

STUDI EKSPERIMENTAL DARI PERMEABILITAS DAN STRUKTUR MIKRO PADA TANAH DI TPA BAKUNG

Oleh

Rizka¹, Irwan Iskandar², M Bisri Mustofa³

¹Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sumatera, Lampung, Indonesia

²Teknik Pertambangan, Institut Teknologi Bandung, Jawa Barat, Indonesia

³Geofisika, Universitas Indonesia, Indonesia

E-mail: ¹rizka@tg.itera.ac.id

Article History:

Received: 19-11-2025

Revised: 15-12-2025

Accepted: 22-12-2025

Keywords:

Falling Head Test,
Permeabilitas,
Struktur Mikro

Abstract: Penelitian ini mengamati karakteristik permeabilitas makroskopis, komposisi mineral, dan perubahan mikrostruktur pada lempung di TPA Bakung menggunakan uji permeabilitas falling head test, X-ray diffraction (XRD), and Scanning Electron Microscope (SEM). Hasil uji permeabilitas falling head test menunjukkan bahwa nilai permeabilitas diantara 0.000004 cm/det sampai 0.000042 cm/det yang merupakan tanah lempung. Uji XRD dan SEM menunjukkan bahwa mineral pada TPA Bakung mayoritas termasuk mineral lempung yang terdiri dari kaolinit, kristobalit, muskovit, dan quartz. Berdasarkan nilai permeabilitas dapat disimpulkan tidak semua tanah di TPA Bakung memiliki permeabilitas yang sesuai dengan persyaratan peraturan kementerian lingkungan hidup.

PENDAHULUAN

Saat ini, lempung banyak digunakan sebagai material kedap air pada tempat pembuangan sampah di TPA. Material kedap air dapat diamati dari nilai permeabilitasnya. Permeabilitas TPA harus mematuhi persyaratan Standar Nasional Indonesia (SNI) TPA (SNI 03-3214-1) dan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (PermenLHK) mengatur baku mutu lindi (*leachate*) dan standar pengelolaan TPA secara umum, yang mewajibkan sistem lapisan kedap air kurang dari 10^{-6} cm/det. Lindi yang dihasilkan pada lokasi TPA memiliki komponen yang kompleks, konsentrasi terlarut yang tinggi dari ion logam berat dan berbagai ion lainnya, serta mengandung hidrokarbon aromatik dan senyawa organik industri lainnya (Kjeldsen et al., 2002). Apabila terjadi kebocoran, air lindi akan merusak lapisan kedap air di dasar lokasi TPA, mengubah mikrostruktur lapisan lempung di dasar, merusak stabilitas lapisan kedap air, dan dapat menyebabkan pencemaran pada air permukaan dan air tanah.

Pada beberapa tahun terakhir, telah banyak dilakukan studi eksperimental dan hasil teoritis mengenai permeabilitas seperti menganalisis hubungan penyebaran lindi TPA Sumurbatu terhadap kualitas air tanah di Kelurahan Sumurbatu Kecamatan Bantar Gebang Bekasi Tahun 2017 (Arum, Rahardjo, & Yunita, 2017), menganalisis karakteristik permeabilitas makroskopis, distribusi pori, komposisi mineral, dan perubahan struktur mikro pada lempung berlanau yang dibentuk ulang pada konsentrasi berbeda dan tekanan balik berbeda melalui uji permeabilitas triaksial dinding fleksibel, uji resonansi magnetik, uji uji X-Ray diffraction (XRD), dan Scan Electron Microscope (SEM) tes mikroskop (Wang, Lu, Li,

& Li, 2020). Selain itu terdapat juga studi mengamati perubahan parameter konvensional polutan dan hubungan antara sifat mekanik dan sifat-sifat mikrostruktur lempung yang dipadatkan setelah lindi TPA terkikis untuk mengevaluasi lempung (Safari & Valizadeh, 2018).

Meskipun sudah banyak penelitian mengenai erosi lempung yang dipadatkan dengan menggunakan lindi TPA, hanya sedikit penelitian yang meneliti hubungan antara komposisi mineral, distribusi pori, dan perubahan mikro struktur dan karakteristik permeabilitas makroskopis dari lempung yang dibentuk kembali oleh korosi lindi TPA terutama di TPA Bakung. Oleh karena itu, perlu dilakukannya penelitian terkait permeabilitas dan struktur mikro pada sampel tanah di TPA Bakung, Lampung. Penelitian ini menganalisis nilai permeabilitas makro menggunakan metode falling head test, uji *X-Ray diffraction* (XRD), dan uji *Scan Electron Microscope* (SEM). Tujuannya untuk melihat distribusi pori, komposisi mineral, dan perubahan struktur mikro pada lempung di TPA Bakung.

LANDASAN TEORI

Permeabilitas Tanah

Permeabilitas merupakan kemampuan air mengalir pada pori-pori tanah; semakin kecil porinya, semakin kecil koefisien permeabilitasnya. Sedangkan menurut (Brady, Retzer, Lyon, & Buckman, 1952) permeabilitas dengan tekstur tanah, di mana tanah berpasir (pori besar) memiliki permeabilitas tinggi, sedangkan tanah lempung (pori kecil) memiliki permeabilitas rendah. Struktur dan tekstur serta unsur organik dapat menaikkan laju permeabilitas tanah. Tanah dengan permeabilitas tinggi menaikkan laju infiltrasi dan menurunkan laju limpasan air permukaan (*run off*). Tekstur tanah merupakan salah satu sifat fisik tanah, begitu pula permeabilitas. Koefisien permeabilitas bergantung pada ukuran rata-rata pori dipengaruhi oleh distribusi ukuran partikel, bentuk partikel dan struktur tanah. Secara garis besar semakin kecil ukuran partikel, semakin kecil pula ukuran pori dan semakin rendah koefisien permeabilitasnya. Artinya suatu lapisan tanah berbutir kasar mengandung butiran-butiran halus memiliki nilai koefisien permeabilitas yang lebih rendah dan pada tanah ini koefisien permeabilitas merupakan fungsi angka pori. Tinggi rendahnya permeabilitas ditentukan oleh ukuran pori.

Pengukuran permeabilitas pada penelitian ini menggunakan metode *falling head test* (FHT). Metode falling head test adalah metode laboratorium untuk menentukan koefisien permeabilitas (k) tanah berbutir halus (lempung, lanau) dengan mengamati penurunan ketinggian air secara bertahap dalam pipa vertikal. Pada *falling head test*, air di dalam pipa yang dipasang di atas sampel tanah dibiarkan turun. Volume air yang melewati sampel tanah sama dengan volume air yang hilang di dalam pipa. Berdasarkan rumus Darcy dapat ditulis persamaan berikut:

$$q = k \frac{h}{L} A \quad (1)$$

q : debit (m^3/s)

k : Koefisien permeabilitas (Darcy)

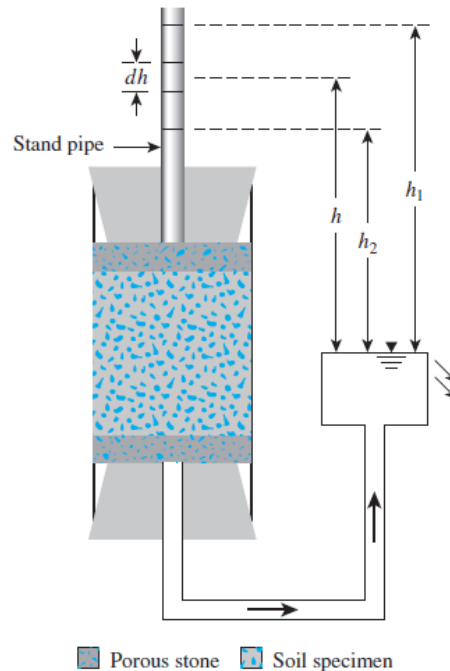
A : Luas penampang (m^2)

i : koefisien hidrolik = $\Delta h/L$

Sedangkan untuk pengujian pada tanah granular menggunakan falling head test dapat

dirumuskan sebagai berikut:

$$k = 2.303 \frac{aL}{At} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \quad (2)$$



Gambar 1. Falling head test (Das & Sobhan, 2014)

X-RAY DIFFRACTION (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) adalah metode analisis yang menarik untuk diterapkan pada studi terhadap material kristal yang menghasilkan difraksi. XRD merupakan bentuk metode yang menggunakan radiasi elektromagnetik dengan panjang gelombang pendek yang sesuai dengan jarak antar atom atau bidang kristal. XRD adalah salah satu alat karakteristik yang digunakan dalam kimia keadaan padat dan ilmu material. Pada penelitian ini, XRD digunakan untuk menentukan mineralogi tanah.

Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) adalah jenis mikroskop elektron yang menghasilkan gambar sampel dengan memindainya dengan berkas elektron terfokus. Elektron berinteraksi dengan atom dalam sampel, menghasilkan berbagai sinyal yang dapat dideteksi dan mengandung informasi tentang topografi dan komposisi permukaan sampel. Pada penelitian ini, SEM digunakan untuk mengetahui struktur mikro dari tanah.

METODE PENELITIAN

Data

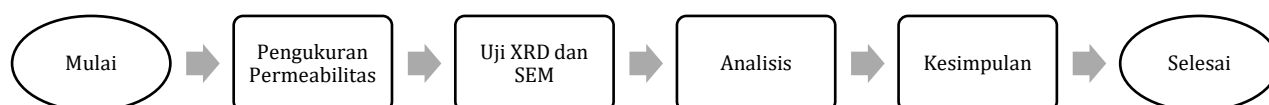
Sampel diambil dari tanah yang terdapat di sekitar TPA Bakung dengan cara mengebor dengan kedalaman 1 meter. Terdapat tujuh sampel tanah yang kemudian diuji nilai permeabilitas tanah, uji XRD dan SEM. Sebelumnya tanah diukur parameter fisika dan kimianya saat di lapangan. Adapun parameter fisika dan kimia dari sampel tanah di lapangan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter fisika kimia sampel tanah

Sampel	Kadar air	pH	Humidity (%)	Temperatur (°C)	Moisture
L2A	14.90	5.50	63.00	33.00	Basah
L2B	25.92	5.00	71.00	36.00	Basah
L1B	18.22	6.00	68.00	32.00	Kering
L3A	17.05	5.50	78.00	27.00	Normal
L4A	16.99	7.00	79.00	30.00	Kering
L4B	25.90	7.00	77.00	28.00	Kering
L5A	27.43	7.00	67.00	29.00	Basah

Metode

Pada penelitian ini dilakukan pengukuran eksperimental laboratorium untuk mengukur permeabilitas dan menganalisis mineralogi menggunakan uji *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Kemudian dilakukan analisis kualitatif dari hasil eksperimen. Adapun alur penelitian dapat dilihat pada diagram Gambar 2.

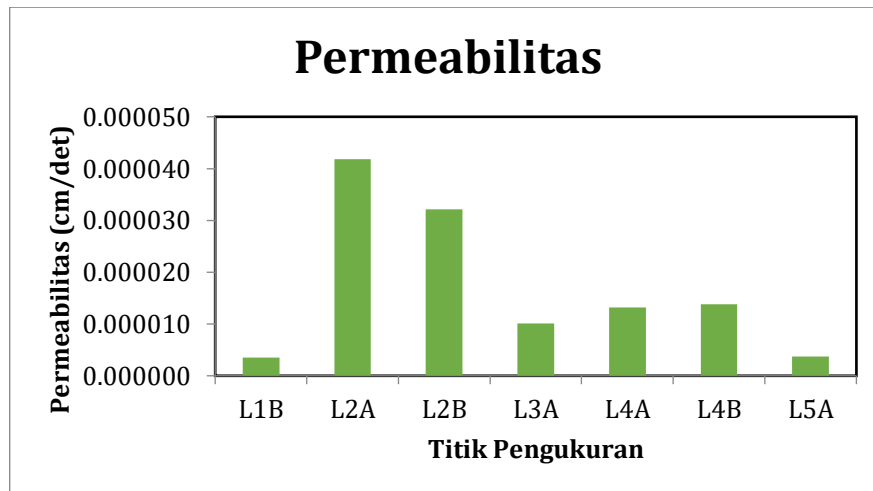


Gambar 2. Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Permeabilitas

Permeabilitas tanah tergantung pada bentuk dan ukuran partikel, susunan pori-pori dan partikel tanah, rasio rongga, dan sifat cairan pori. Bentuk partikel menentukan geometri dan ukuran ruang pori yang melihat porositas efektif sebagai faktor penentu permeabilitas tanah. Permeabilitas tanah di TPA Bakung memiliki nilai permeabilitas pada L1B dengan 0.000004 cm/det, L2A dengan 0.000042 cm/det, L2B dengan 0.000032 cm/det, L3A dengan 0.000010 cm/det, L4A dengan 0.000013 cm/det, L4B dengan 0.000014 cm/det, dan L5A dengan 0.000004 cm/det. Berdasarkan nilai permeabilitas tersebut dapat disimpulkan tipe tanahnya adalah lempung. Lempung pada TPA akan terinfiltrasi ke dalam tanah sehingga tidak menjadi *run off* yang merusak permukaan tanah. Adapun histogram nilai permeabilitas setiap sampel dapat dilihat pada Gambar 3.



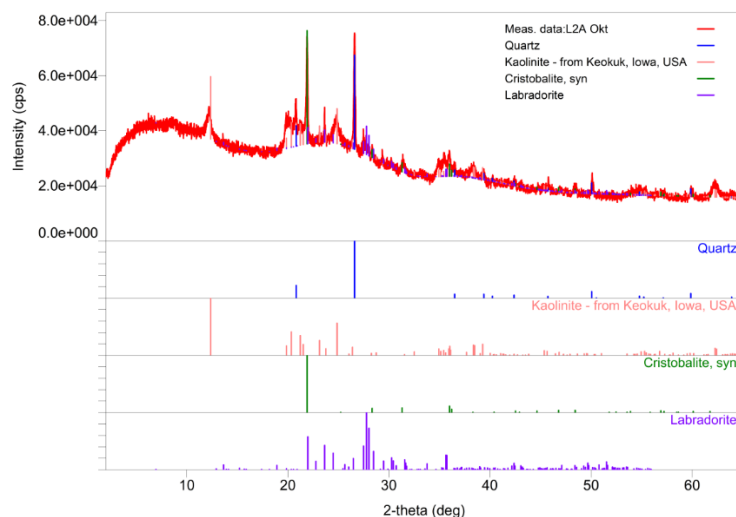
Gambar 3. Grafik nilai permeabilitas pada titik pengukuran

Komposisi Mineral Dan Struktur Mikro

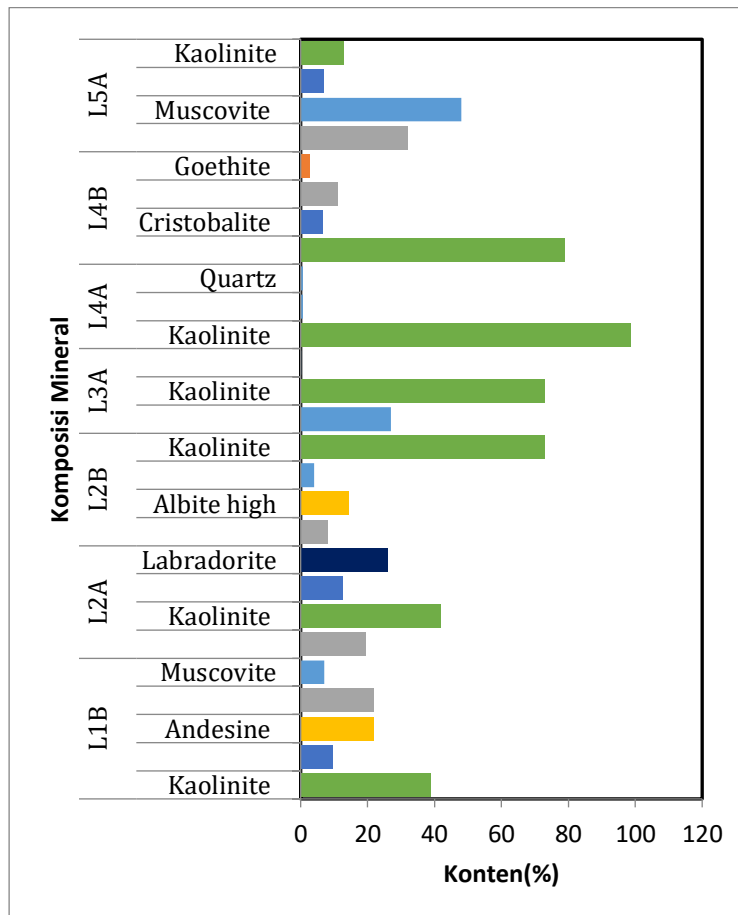
Untuk mengetahui perbedaan komposisi mineral dan struktur mikro lempung dilakukan uji XRD dan SEM. Kurva XRD yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 4; komposisi mineral diilustrasikan pada Gambar 5; dan SEM dengan skala perbesaran 2.000 kali ditampilkan pada Gambar 6.

Berdasarkan analisis XRD (Gambar 4) ditemukan mineral lempung (clay) yang terdiri dari kaolinit ($(\text{Al}_2 (\text{Si}_2\text{O}_5) (\text{OH})_4)$), kristobalit (SiO_2), quartz (SiO_2), muscovite ($\text{K Al}_3 \text{Si}_3 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$), andesine ($\text{Na}_{0.499} \text{Ca}_{0.491} (\text{Al}_{1.488} \text{Si}_{2.506} \text{O}_8)$), labradorite ($\text{Ca}_{0.64} \text{Na}_{0.31} (\text{Al}_{1.775} \text{Si}_{2.275} \text{O}_8)$). Hasil XRD juga terkonfirmasi dengan analisis SEM.

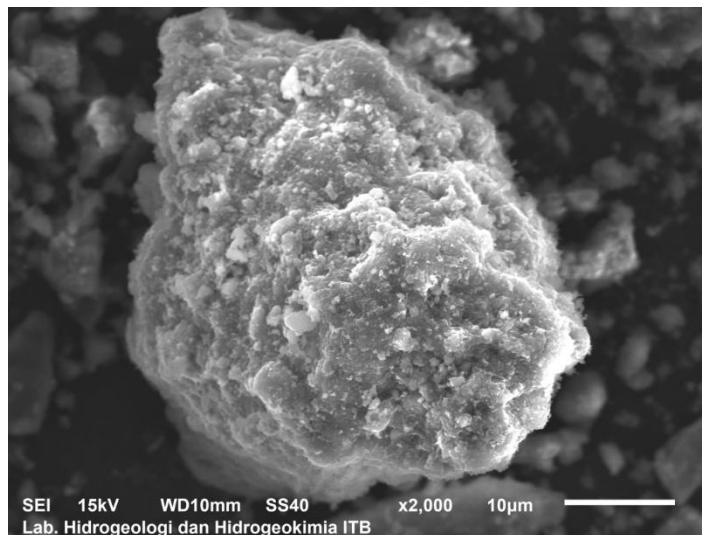
Gambar 5 menunjukkan foto yang diambil dari SEM. Hasil SEM menunjukkan bahwa mereka terutama terdiri dari quartz dan banyak paduan berdasarkan Si, O, Al, Ca, Fe, P, K, Mg, S, Na, K, Ti, Mn. Hasil SEM menunjukkan adanya porositas intra-granular (permukaan kasar dan retakan) yang semuanya merupakan faktor yang menyebabkan perkiraan yang terlalu tinggi dari luas permukaan TPA yang sebenarnya.



Gambar 4. Hasil XRD pada sampel tanah L2A



Gambar 5. Komposisi mineralogi dari hasil XRD



Gambar 6. Analisis SEM

Berdasarkan analisis XRD dan SEM ditemukan mineral-mineral yang memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat adsorpsi (*clay*); kemungkinan besar struktur sampel dan karakteristik komposisi kimia berasal dari unsur Si, Al, K (Dimitrova et al., 2012).

Pengamatan lapangan menunjukkan asal sekunder kristobalit: (1) tanah yang berlempung di bagian hulu menjadi lebih berpasir dan diperkaya dengan silika di bagian hilir; (2) kimia air menunjukkan *leaching* Al yang tinggi selama musim hujan yang menyiratkan tanah liat proses *dissolution*; dan (3) 'Kristalinitas' yang relatif tinggi dari cristobalite menunjukkan bahwa mineral ini diwariskan dari vulkanisme dan dapat berubah menjadi muscovit sedangkan *quartz* sebagian besar atau seluruhnya larut (Elsass, Dubroeuq, & Thiry, 2000). Limbah padat telah mengalami sistem pemurnian pasir silika dan proses pemekatan dalam sistem dispersi air, sehingga terjadi peningkatan kandungan silika dalam satuan persentase berat sampel.

Berdasarkan analisis XRD dan SEM dapat disimpulkan bahwa sampel tanah memiliki mineral lempung (*clay*). Mineral lempung terbentuk dari hasil reaksi mineral silikat dengan asam karbonat yang kemudian terjadi hidrasi silikat. Keberadaan mineral silikat mengakibatkan adanya pelemahan (retardasi). Mineral lempung berfungsi sebagai peredam. Peredaman ini terjadi akibat adanya lindi. Mineral lempung ini terbentuk oleh proses alami dari air hujan dan mineral silika.

Mineral lempung memiliki struktur lamelar tidak teratur setelah terkorosi oleh lindi TPA dengan konsentrasi yang berbeda. Ini menunjukkan agregat struktural. Menurut hasil uji XRD dan SEM, pembentukan agregat dalam SEM adalah produk dari sementasi polutan organik pada lindi TPA dan partikel tanah. Dengan peningkatan waktu infiltrasi, pori-pori makro pada lempung hasil secara bertahap berubah menjadi pori-pori mikro bertahap menurun, yang dapat menjelaskan fenomena bahwa permeabilitas menunjukkan tren penurunan bertahap. Semakin tinggi konsentrasi lindi TPA, semakin intens korosi lempung. Fenomena sementasi dan aglomerasi terlihat jelas. Partikel-partikel tanah teragregasi dengan rapat, dan jumlah partikel mikro yang lepas berkurang.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian dapat disimpulkan bahwa nilai permeabilitas diantara 0.000004 cm/det sampai 0.000042 cm/det yang merupakan tanah lempung. Dapat disimpulkan tidak semua tanah di TPA Bakung memiliki permeabilitas sesuai dengan persyaratan peraturan kementerian lingkungan hidup. Komposisi mineral dan struktur mikro dari hasil XRD dan SEM dapat disimpulkan bahwa TPA Bakung memiliki mineral lempung (*clay*) yang terdiri dari kaolinit ($(\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4)$), kristobalit (SiO_2), quartz (SiO_2), muscovite ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), andesine ($\text{Na}_{0.499}\text{Ca}_{0.491}(\text{Al}_{1.488}\text{Si}_{2.506}\text{O}_8)$), labradorite ($\text{Ca}_{0.64}\text{Na}_{0.31}(\text{Al}_{1.775}\text{Si}_{2.275}\text{O}_8)$). Mineral lempung terbentuk dari hasil reaksi mineral silikat dengan asam karbonat yang kemudian terjadi hidrasi silikat. Keberadaan mineral silikat mengakibatkan adanya pelemahan (retardasi).

PENGAKUAN/ACKNOWLEDGEMENTS

Penulis mengucapkan terimakasih kepada laboran Laboratorium Hidrogeologi dan Hidrogeokimia ITB dan Laboratorium Sedimen UI yang membantu penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arum, A. R., Rahardjo, M., & Yunita, N. A. (2017). Analisis Hubungan Penyebaran Lindi TPA Sumurbatu terhadap Kualitas Air Tanah di Kelurahan Sumurbatu Kecamatan

- Bantar Gebang Bekasi Tahun 2017. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 5(5), 461–469.
- [2] Brady, N. C., Retzer, J. L., Lyon, T. L., & Buckman, H. O. (1952). The Nature and Properties of Soils. *Journal of Range Management*, 5(6), 420. <https://doi.org/10.2307/3894608>
- [3] Das, B. M., & Sobhan, K. (2014). *Principles of Geotechnical Engineering* (8th ed.). Australia: Cengage Learning.
- [4] Dimitrova, R., Lurponglukana, N., Fernando, H. J. S., Runger, G. C., Hyde, P., Hedquist, B. C., ... Johnson, W. (2012). Relationship between particulate matter and childhood asthma-basis of a future warning system for central Phoenix. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(5), 2479–2490. <https://doi.org/10.5194/acp-12-2479-2012>
- [5] Elsass, F. ., Dubroeuq, D., & Thiry, M. (2000). Diagenesis of silica minerals from clay minerals in volcanic soils of Mexico. *Clay Minerals*, 35(3), 477–489. <https://doi.org/10.1180/000985500546954>
- [6] Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., & Christensen, T. H. (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(4), 297–336. <https://doi.org/10.1080/10643380290813462>
- [7] Safari, E., & Valizadeh, R. (2018). Analysis of biological clogging potential in a simulated compacted clay liner subjected to high-strength leachate infiltration. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(5), 1029–1038. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1445-5>
- [8] Wang, C., Lu, H., Li, D., & Li, J. (2020). Experimental study on the permeability and microstructure of remoulded silty clay corroded by landfill leachate. *Nature Environment and Pollution Technology*, 19(3), 1241–1248. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2020.v19i03.039>