
Review Instrumen Pemantauan Perilaku Geoteknik

Muhammad Toyeb¹, Zainuri², Yogi Yunefri³, Ahmad Zamsuri⁴

¹Program Studi K3 Fakultas Pendidikan dan Vokasi Universitas Lancang Kuning

²Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lancang Kuning

³Program Studi Teknik Informatika Fakultas Ilmu Komputer Universitas Lancang Kuning

^{1,2,3}Jl. Yos Sudarso KM. 8 Rumbai, Pekanbaru, Riau, 28266

e-mail: ¹mtoyeb@unilak.ac.id, ²zainuri@unilak.ac.id, ³yogyunefri@unilak.ac.id,

⁴ahmadzamsuri@unilak.ac.id

Abstrak

Pemantauan perilaku geoteknik memiliki peran penting dalam memastikan keselamatan, keandalan, dan keberlanjutan infrastruktur. Instrumen geoteknik digunakan untuk mendeteksi parameter kritis seperti deformasi, tekanan air pori, penurunan, tegangan tanah, maupun pengaruh faktor lingkungan. Artikel ini menyajikan tinjauan literatur terkini mengenai perkembangan instrumen dan metode monitoring geoteknik, mulai dari perangkat konvensional seperti inclinometer, extensometer, tiltmeter, piezometer, dan earth pressure cell hingga teknologi modern berbasis fiber optic sensing, sensor Internet of Things (IoT), serta sistem digital real-time. Pendekatan terbaru menekankan pada integrasi data multisensor, analitik berbasis big data, serta penerapan digital twin untuk memperkuat kemampuan deteksi dini terhadap potensi kegagalan geoteknik. Perbandingan kelebihan dan keterbatasan masing-masing instrumen menunjukkan bahwa strategi monitoring yang efektif memerlukan kombinasi antara metode konvensional yang teruji dengan teknologi canggih yang adaptif. Dengan demikian, perkembangan sistem pemantauan geoteknik ke depan diarahkan pada efisiensi, akurasi tinggi, dan kemampuan prediktif berbasis kecerdasan buatan guna mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan tepat dalam manajemen risiko geoteknik.

Kata Kunci Instrumen geoteknik, pemantauan geoteknik, deformasi tanah, IoT, serat optik.

Abstract

Geotechnical behavior monitoring plays a crucial role in ensuring the safety, reliability, and sustainability of infrastructure. Geotechnical instruments are employed to detect critical parameters such as deformation, pore water pressure, settlement, soil stress, and environmental influences. This article presents a comprehensive literature review on the recent development of geotechnical instrumentation and monitoring methods, ranging from conventional devices such as inclinometers, extensometers, tiltmeters, piezometers, and earth pressure cells to advanced technologies based on fiber optic sensing, Internet of Things (IoT) sensors, and real-time digital systems. The latest approaches emphasize the integration of multi-sensor data, big data analytics, and digital twin applications to enhance early detection capabilities of potential geotechnical failures. A comparative analysis of advantages and limitations shows that effective monitoring strategies require a combination of proven conventional methods with adaptive advanced technologies. Consequently, the future direction of geotechnical monitoring systems is oriented toward efficiency, high accuracy, and predictive capabilities supported by artificial intelligence, thereby enabling faster and more reliable decision-making in geotechnical risk management.

Keywords: Geotechnical instrumentation, monitoring, soil deformation, IoT, fiber optic sensing.

1. PENDAHULUAN

Pemantauan perilaku geoteknik telah menjadi aspek fundamental dalam konstruksi modern. Pemantauan dengan menggunakan instrumen khusus merupakan sebuah metode untuk pengawasan, kontrol dan evaluasi dari perilaku struktur yang bersumber dari alamiah dan buatan. Kegagalan timbunan jalan, lereng, bendungan, dan galian dalam dapat mengakibatkan kerugian besar baik dari sisi keselamatan maupun ekonomi. Instrumen geoteknik berfungsi untuk mendeteksi deformasi, tekanan air pori, penurunan, serta parameter lainnya. Seiring kemajuan teknologi, instrumen konvensional kini dilengkapi dengan sistem digital, sensor berbasis IoT, *fiber optic*, dan bahkan integrasi ke dalam digital *twin*. Penelitian secara global dari beberapa tahun terakhir menunjukkan peningkatan signifikan pada metode monitoring otomatis dan analitik berbasis kecerdasan buatan (*artificial intelligence*, AI).

Sistem digital untuk geoteknik merupakan penerapan teknologi sensor, data logger, komunikasi nirkabel, dan platform analitik untuk mengotomatisasi pemantauan perilaku tanah dan struktur. Instrumen geoteknik konvensional seperti *inclinometer*, *piezometer*, atau *extensometer* dapat diintegrasikan dengan *Internet of Things* (IoT) sehingga data dikirim secara *real-time* ke pusat pemantauan. Konsep IoT memainkan peran penting dalam implementasi sistem peringatan dini dengan pendekatan waktu nyata, memberikan pedoman awal bagi para pengambil keputusan dan otoritas yang bertanggung jawab atas manajemen darurat kebencanaan [1]. Kemudian sensor berbasis *Internet of Things* (IoT) merupakan instrumen yang dapat diaplikasikan untuk geoteknik yang dilengkapi modul komunikasi nirkabel sehingga mampu mengirimkan data lapangan secara *real-time* ke *server* atau *cloud*. Sensor ini biasanya terhubung melalui jaringan GSM, Wi-Fi, atau satelit, sehingga data dapat dipantau jarak jauh melalui *dashboard* digital. Penggunaan teknologi *Internet of Things* (IoT) menjadi solusi utama dalam analisis keamanan bendungan. Pemantauan sensor secara *real-time* terbukti menjadi kunci untuk mengurangi risiko kegagalan struktur bendungan tanah, yang memiliki tingkat kegagalan dan bahaya yang tinggi [2]. Sensor lainnya menggunakan serat optik untuk mendeteksi perubahan regangan (*strain*), suhu, maupun getaran sepanjang kabel. Sensor digunakan untuk mendeteksi deformasi pada batu atau tanah yang tidak stabil, serta untuk memantau kelembaban atau suhu tanah tersebut [3].

Saat ini perkembangan teknologi pemantauan geoteknik dikenal dengan sebutan digital *twin*. Adapun digital *twin* dapat diartikan suatu istilah dalam hal pengembangan dari sistem pemantauan konvensional yang memberi angka dan grafik, lalu ditransormasikan secara virtual untuk dapat dilihat, dianalisis dan disimulasikan. Tantangan pengembangan digital *twin* dalam bidang geoteknik adalah ketidakseragaman dan perilaku yang kompleks pada tanah sehingga menjadikan pengumpulan, pemasangan dan validasi data menjadi sulit. Namun dengan kemajuan teknologi sensor, komputerisasi, kecerdasan buatan, sistem digital dan adanya standar teknis, tantangan ini dapat diatasi secara bertahap [4]. Tujuan dari *review* ini adalah memberikan pandangan kedepan tentang penggunaan instrumen-instrument pengamatan perilaku struktur geoteknik, sehingga dapat mendorong untuk inovasi pengembangan penelitian bidang geoteknik yang lebih luas.

2. METODE PENELITIAN

Artikel ini menggunakan pendekatan literatur *review* sistematis dengan rentang publikasi beberapa tahun terakhir. Sumber literatur diambil dari jurnal internasional dan nasional, dengan fokus *review* mencakup pada instrumen, metode monitoring, dan aplikasi lapangan.

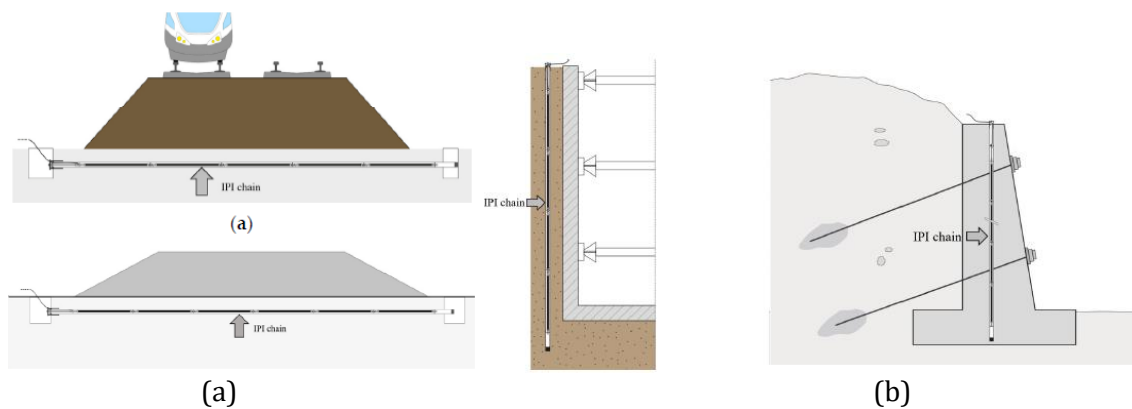
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

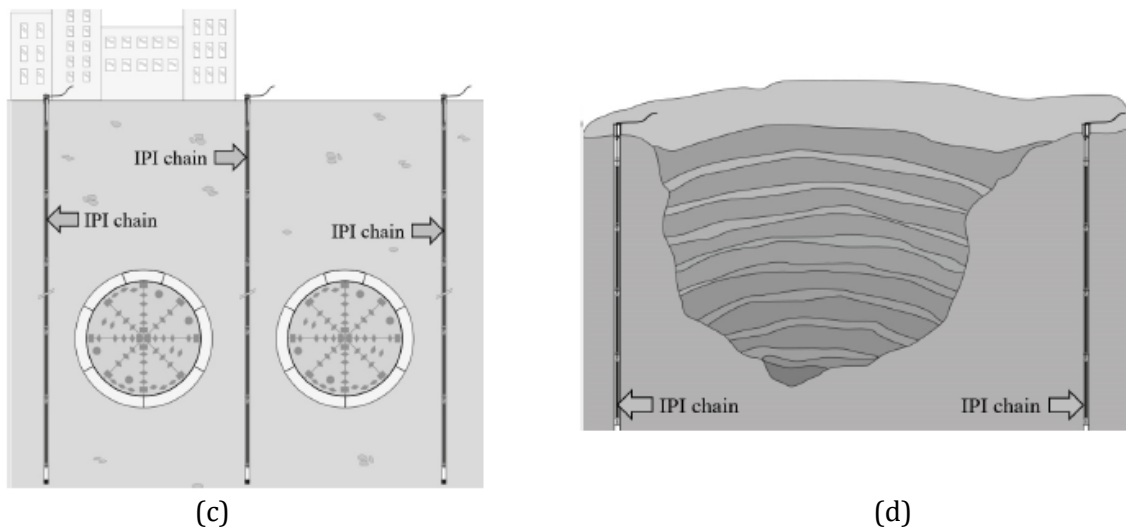
3.1 Klasifikasi Instrumen Geoteknik

Dalam praktik geoteknik, berbagai instrumen digunakan untuk memantau parameter dilapangan yang memengaruhi stabilitas dan kinerja struktur tanah. Instrumen-instrumen tersebut dapat diklasifikasikan berdasarkan fungsi utama yang diukur, mulai dari deformasi tanah, tekanan air pori, hingga kondisi eksternal yang berhubungan dengan faktor lingkungan. Instrumen deformasi, yang berfungsi mendeteksi perubahan perilaku tanah dan struktur, baik secara vertikal maupun lateral. Peralatan yang digunakan berupa *inclinometers*, *extensometers*, *tiltmeters*. Berikutnya adalah instrumen tekanan air pori dan tegangan tanah, yang digunakan untuk memahami interaksi hidro-mekanis dalam massa tanah, terutama pada kondisi jenuh dan semi-jenuh. Peralatan yang digunakan berupa *piezometers* dan *earth pressure cells*.

A. *Inclinometer*

Alat *inclinometer* sesuai untuk aplikasi geoteknik dan struktur di mana alat ini dapat dipasang secara vertikal atau horizontal untuk pemantauan tanggul, longsor, runtuh batu, terowongan, dan galian. Pemantauan menggunakan *inclinometer* sangat efektif dalam memberikan deteksi dini terhadap potensi kegagalan, sehingga memberikan tindakan cepat untuk mengurangi risiko bencana. Pengukuran dengan *inclinometer* dapat memvalidasi model numerik perilaku tanah dan batuan, meningkatkan pemahaman tentang sifat-sifat material tersebut. Prinsip dasar operasinya adalah mengukur perubahan kemiringan sepanjang kedalaman, kemudian diubah menjadi pergeseran lateral tanah atau struktur yang terdeformasi [5]. Pemasangan *inclinometer* dapat mendukung pengembangan sistem peringatan dini pada manajemen risiko infrastruktur [6].

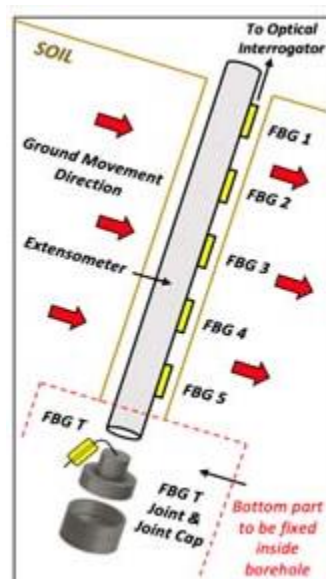


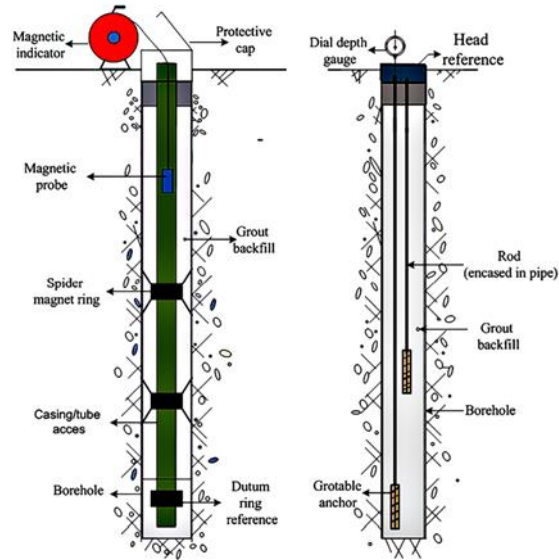


Gambar 1. Aplikasi *Inclinometer* vertikal dan horisontal (a) timbunan (b) turap (c) terowongan (c) pertambangan [7]

B. *Extensometer*

Adalah instrumen yang digunakan untuk mengukur perubahan panjang atau deformasi pada suatu medium berupa tanah, batuan, maupun struktur rekayasa sipil lainnya. Prinsip kerjanya didasarkan pada konsep bahwa regangan (*strain*) adalah hasil perubahan panjang relatif terhadap panjang awal. *Extensometer* banyak diaplikasikan sebagai monitoring settlement pada konstruksi timbunan jalan, tanggul, dan bendungan urugan. Juga digunakan sebagai pemantauan deformasi vertikal pada tanah lunak akibat beban konstruksi. Kemudian untuk analisis perilaku batuan di terowongan, tambang bawah tanah, dan lereng batuan serta validasi model numerik melalui data lapangan berupa deformasi aktual. Penggunaan *extensometer* sering dikombinasikan dengan peralatan pendukung lainnya. Dalam pengembangan *extensometer*, kombinasi dengan sensor regangan *Fiber Bragg Grating* (FBG) dipasang diujung batang sebagai elemen sensor utama sistem *extensometer*, memanfaatkan fleksibilitas dan sensitivitas yang tinggi terhadap variasi regangan lokal [8]. Kemudian *extensometer* tipe batang dan magnet, bisa dipasang untuk pengukuran deformasi dibawah permukaan tanah [9]. Pemantauan penurunan timbunan menggunakan *extensometer* magnet berguna untuk prediksi secara cepat [10].





(a)

(b)

(c)

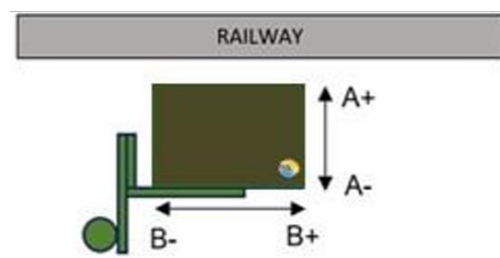
Gambar 2. Aplikasi Extensometer: (a) FBG-extensometer [8]
(b) Extensometer Magnet [9] (c) Batang-Extensometer Batang [9]

C. Tiltmeter

Tiltmeter digunakan untuk mengukur perubahan sudut kemiringan (*tilt/rotation*) pada struktur atau permukaan tanah. Prinsip kerja didasarkan pada sensor elektronik yang mendeteksi perubahan kecil orientasi relatif terhadap gravitasi. Instrumen ini banyak diaplikasikan untuk memantau kestabilan dinding penahan tanah, bangunan sekitar galian dalam, bendungan, maupun lereng, karena mampu memberikan data deformasi dalam skala derajat hingga menit busur secara *real-time*. *Tiltmeter* juga digunakan sebagai instrument monitor pada lereng yang dihubungkan dengan satelit komunikasi untuk pengaruh dari rel kereta api [11] Juga dapat digunakan untuk deteksi dini kelongsoran oleh perubahan stabilitas lereng karena pasang surut muka air [12]. Pengamatan perilaku georeknik akibat pengaruh pasang surut air laut [13] [14].



(a)



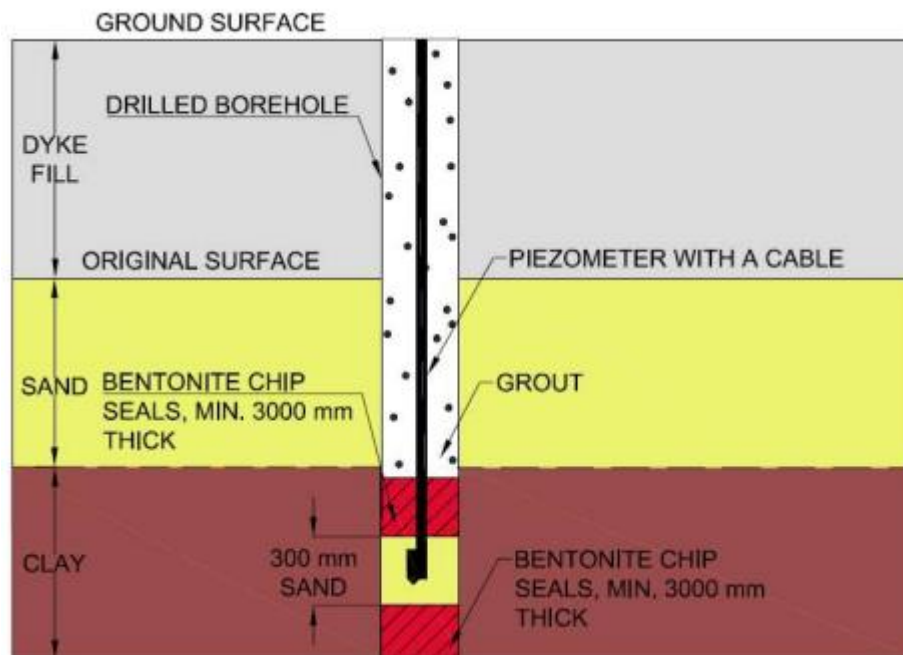
(b)

Gambar 3. (a) Alat *Tiltmeter* (b) *Tiltmeter* terpasang didekat rel [11]

D. Piezometer

Merupakan instrumen geoteknik yang digunakan untuk mengukur tekanan air pori (*pore water pressure*) di dalam tanah. Menguji berbagai jenis tanah dan batuan dilapangan dalam mengukur tegangan, kekakuan, kekuatan dan permeabilitas [15]. Data ini sangat penting karena tekanan air pori mempengaruhi kekuatan geser tanah

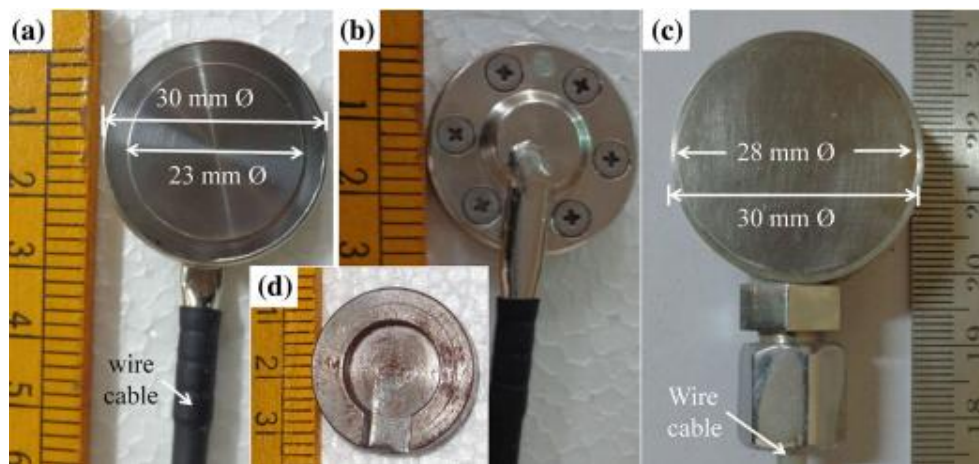
dan kestabilan lereng maupun pondasi. *Piezometer* tersedia dalam berbagai tipe, seperti *standpipe piezometer*, *piezometer pneumatik*, dan *vibrating wire piezometer*, yang masing-masing memiliki keunggulan sesuai kebutuhan monitoring. Instrumen ini umum dipasang pada proyek bendungan, timbunan di atas tanah lunak, dan lereng untuk memantau kondisi hidraulik serta mendukung analisis stabilitas. Piezometer dapat dipasang pada tanah lunak dengan metode pengisian *grouting* secara penuh [16].



Gambar 4. Ilustrasi aplikasi Piezometer [17]

E. Earth pressure cell (EPC)

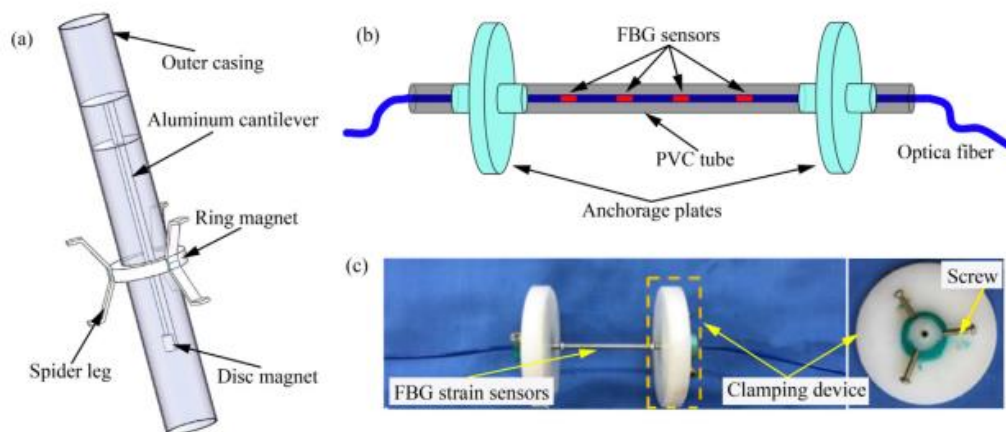
EPC adalah instrumen geoteknik yang digunakan untuk mengukur tekanan tanah yang bekerja pada struktur maupun tanah [18]. Instrumen ini berupa sensor tipe *vibrating wire* atau *hydraulic cell* yang dipasang di dalam timbunan, di belakang dinding penahan, atau di bawah fondasi. Data dari EPC membantu untuk mengamati distribusi tegangan tanah aktual di lapangan, sehingga dapat dibandingkan dengan asumsi teoritis atau hasil analisis numerik. Pengukuran tekanan tanah menggunakan EPC dapat direkomendasikan karena sudah divalidasi dengan perkiraan teoritis yang terbukti akurat [19]. Instrumen ini sangat penting dalam proyek bendungan, terowongan, dinding penahan tanah, serta tanggul untuk memastikan kestabilan struktur dan keamanan konstruksi.



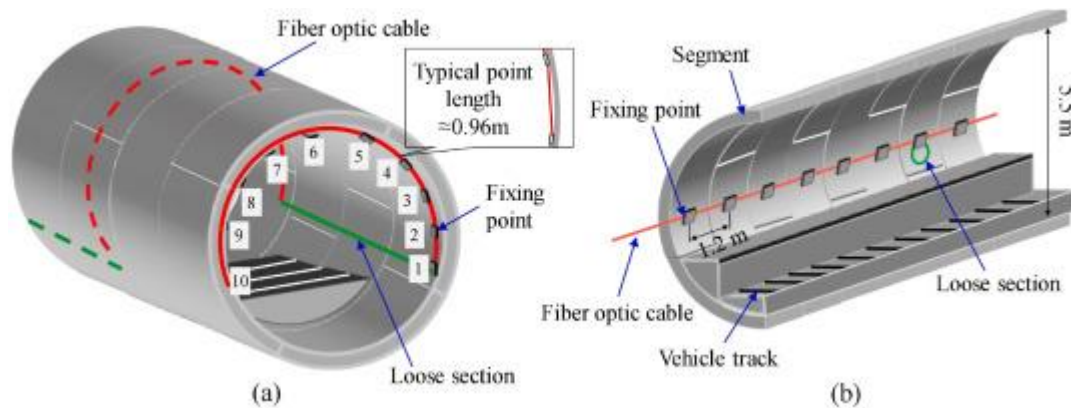
Gambar 5. Ilustrasi *Earth Pressure Cell* [18]

F. *Fiber Optic Sensor*

Fiber optic sensor adalah instrumen modern yang memanfaatkan serat optik untuk mendeteksi perubahan fisik seperti regangan (*strain*), suhu, atau pergeseran di dalam tanah maupun struktur [20]. Prinsip kerjanya didasarkan pada perubahan karakteristik cahaya pada intensitas, fase, atau panjang gelombang yang merambat di sepanjang serat optik akibat adanya deformasi atau perubahan lingkungan. Instrumen ini handal karena mampu melakukan pemantauan terdistribusi (*distributed sensing*) dalam panjang bentang yang luas dengan resolusi tinggi. Dalam geoteknik, *fiber optic sensor* banyak digunakan pada bendungan, terowongan, lereng, dan fondasi untuk mendapatkan data *real-time* mengenai perilaku tanah dan struktur secara berkelanjutan. Teknologi *fiber optic sensor* berhasil diterapkan dalam pemantauan geoteknik karena keunggulan seperti ketahanan terhadap gangguan elektromagnetik, transmisi sinyal stabil jarak jauh, ketahanan tinggi, sensitivitas tinggi, dan bobot ringan, yang dapat dipertimbangkan sebagai pengganti untuk sensor konvensional [21].



Gambar 6. Ilustrasi aplikasi *Fiber Optic Sensor* [20]

Gambar 7. Aplikasi *Fiber Optic Sensor* di Terowongan [22]**Tabel 1.** Perbandingan instrumen geoteknik

Instrumen	Parameter	Metode	Aplikasi	Kelebihan	Keterbatasan
<i>Inklinometer</i>	Pergerakan lateral	Manual/digital probe	Lereng, dinding penahan	Akurasi tinggi	Perlu borehole
<i>Extensometer</i>	Deformasi vertikal	Magnetik/optik	Timbunan	Mudah dipasang	Terbatas pada titik
<i>Tiltmeter</i>	Kemiringan	Sensor digital	Bangunan/fondasi	<i>Real-time</i>	Sensitif getaran
<i>Piezometer</i>	Tekanan air pori	<i>Standpipe/vibrating wire</i>	Bendungan, lereng	Data langsung	Instalasi permanen
<i>Earth Pressure Cells</i>	Tekanan tanah/struktur	<i>Hydraulic type/vibrating wire</i>	Turap, pondasi	Data langsung	Relatif mahal
<i>Fiber optic sensor</i>	regangan/suhu	Distribusi regangan/temperatur	Terowonga, bendungan	Resolusi tinggi	Biaya mahal

3.2 Tren Teknologi dan Arah Pengembangan

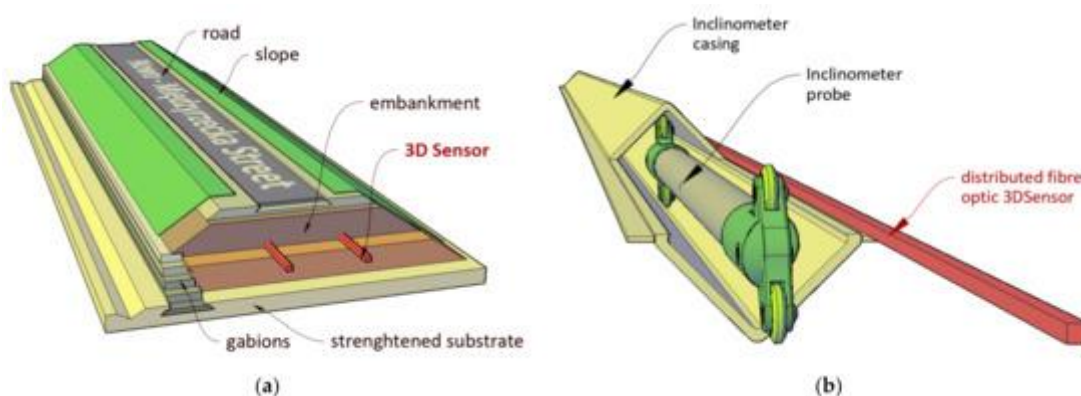
Tren utama meliputi digital *twins*, IoT, AI, dan *fiber optic sensing*. Tantangan yang dihadapi adalah interoperabilitas data, biaya implementasi, serta ketahanan instrumen di lapangan. Penelitian masa depan diarahkan pada integrasi sistem pemantauan multisensor dengan analisis berbasis *machine learning* untuk prediksi keamanan dan kegagalan geoteknik.

Konsep digital *twin* sejalan dengan kebutuhan informatisasi geoteknik, sehingga penerapan teknologi digital twin membantu mempercepat proses pengembangan informatisasi dan digitalisasi geoteknik tersebut [23]. Penelitian tentang digital *twin* dalam geoteknik masih terbatas yang sebagian besar studi berfokus pada terowongan dan lereng. Integrasi digital *twin* dengan *machine learning* telah meningkatkan kemampuan prediktif [24], namun tantangan seperti interoperabilitas, *platform* yang skalabel, dan pengumpulan data *real-time* dapat menghambat penerapan digital *twin* secara luas [25]. Pendekatan digital *twin* telah diakui sebagai solusi yang menjanjikan untuk mengatasi tantangan yang dihadapi oleh industri arsitektur, keteknikan, konstruksi, operasi, dan manajemen [26].

IoT dalam geoteknik adalah penerapan jaringan sensor yang saling terhubung melalui internet untuk memantau perilaku tanah dan struktur secara *real-time*. Seperti klasifikasi

tanah dari pengenalan warna tanah melalui pendekatan kecerdasan buatan sangat penting untuk analisis tanah yang efisien dan cepat dalam bidang teknik geoteknik [27]. Hal ini memungkinkan untuk memperoleh karakterisasi lokasi yang lebih baik dan mendukung pengambilan keputusan yang terinformasi dalam proyek-proyek teknik. Integrasi data warna tanah dengan informasi geospasial lainnya meningkatkan kemampuan pemetaan dan pemodelan geologi. Konsep IoT mampu melakukan pengumpulan dan pemrosesan data uji geoteknik secara otomatis, mengurangi beban kerja penguji, dan meminimalkan pengaruh faktor manusia terhadap hasil uji [28]. Dalam pembangunan infrastruktur yang terus berkembang, integrasi teknologi canggih seperti kecerdasan buatan (AI) dan *Internet of Things* (IoT) telah muncul sebagai strategi transformatif untuk meningkatkan ketepatan dan efisiensi proses karakterisasi bidang geoteknik. Penerapan sistem ini sangat penting untuk mengatasi tantangan pengembangan infrastruktur modern dan keberlanjutan [29] [30]. Salah satu fitur utama IoT adalah kemampuan alat otomatis untuk mengumpulkan dan mengolah data secara mandiri, yang telah mendorong pengembangan perangkat lunak khusus dan platform visualisasi berbasis web untuk pengelolaan data yang lebih cepat, efisien, dan mudah diakses [31].

Fiber optic sensing sangat bermanfaat karena mampu memberikan data terdistribusi sepanjang kabel dengan resolusi tinggi. Teknologi ini telah digunakan untuk memantau pergeseran lereng dan potensi longsor, mendeteksi kebocoran dan rembesan pada bendungan, mengukur penurunan dan deformasi timbunan serta pemantauan integritas terowongan dan dinding penahan. Keunggulannya adalah akurasi tinggi, cakupan area luas, serta kemampuan integrasi dengan sistem digital berbasis IoT dan digital *twin*. Suatu eksperimen menunjukkan kemampuan sensor untuk mendeteksi peningkatan tegangan tanah sebelum terjadi longsor, serta memantau retakan pada batuan [32]. Pemantauan pergeseran tanah akibat beban struktur, bendungan dan longsoran dengan menggunakan *fiber optic sensing* memberikan pemantauan menerus sepanjang bidang, berbeda dari instrument tradisional seperti *extensometer* yang hanya sekitar titik pemasangan [33]. *Fiber optic* dapat dipasang dalam parit dangkal atau dipasang dalam lubang bor untuk mendeteksi tanda-tanda awal kegagalan sebelum terjadi longsor. Dengan mengukur cahaya yang dikirim dan dipantulkan kembali, sistem *fiber optic* mendeteksi pergerakan massa melalui perubahan pada kabel, sehingga pengukuran peringatan dini dapat dilakukan [34].



Gambar 8. Ilustrasi Lokasi Pemasangan *Fiber Optic Sensor* di Timbunan Jalan [35]

4. KESIMPULAN

Pemantauan perilaku geoteknik merupakan aspek penting dalam memastikan keamanan dan keberlanjutan infrastruktur. Instrumen konvensional seperti *inclinometer*, *extensometer*, *tiltmeter*, *piezometer* dan *earth pressure cell* tetap menjadi alat utama dalam mendeteksi deformasi, tekanan air pori, maupun distribusi tegangan. Namun, perkembangan teknologi terbaru seperti *fiber optic sensing*, sensor berbasis IoT, dan sistem digital *real-time* telah memperluas kemampuan monitoring, memungkinkan integrasi multi-sensor, analisis data secara cepat, serta mendukung sistem peringatan dini (*early warning system*). Dengan demikian, strategi monitoring geoteknik masa depan perlu menekankan pada kombinasi instrumen tradisional yang teruji dengan teknologi digital yang adaptif, agar dapat memberikan informasi yang lebih komprehensif, mendukung pengambilan keputusan cepat, dan meningkatkan ketahanan infrastruktur di berbagai kondisi geoteknik.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam diskusi, sehingga artikel ini dapat diselesaikan tepat waktu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Carri, A. Valletta, E. Cavalca, R. Savi, and A. Segalini, "Advantages of iot-based geotechnical monitoring systems integrating automatic procedures for data acquisition and elaboration," *Sensors*, vol. 21, no. 6, Mar. 2021, doi: 10.3390/s21062249.
- [2] C. Nasika, P. Diez, P. Gerard, T. J. Massart, and S. Zlotnik, "Towards real time assessment of earthfill dams via Model Order Reduction," *Finite elements in analysis and design*, vol. 199, p. 103666, 2022.
- [3] M. Le Breton, F. Liébault, L. Baillet, A. Charléty, É. Larose, and S. Tedjini, "Dense and long-term monitoring of earth surface processes with passive RFID—a review," *Earth Sci Rev*, vol. 234, p. 104225, 2022.
- [4] W. Tan, S. Wu, Y. Li, and Q. Guo, "Digital Twins' Application for Geotechnical Engineering: A Review of Current Status and Future Directions in China," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 15, p. 8229, Jul. 2025, doi: 10.3390/app15158229.
- [5] T. F. de Souza Junior, J. L. S. Borges, C. F. Silva, and K. S. Heineck, "Design, construction, and validation of an experimental inclinometer probe," *Soils and Rocks*, vol. 47, no. 4, Oct. 2024, doi: 10.28927/SR.2024.000623.
- [6] H. Mohamad, A. A. A. M. Beddelee, M. F. Ghazali, H. E. Lee, K. Chaiyasarn, and M. Y. M. Nasir, "Distributed fibre optic inclinometer with cloud-based monitoring system," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 41, p. 101406, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101406>.
- [7] F. Freddi, L. Mingazzi, E. Pozzi, and N. Aresi, "Laboratory Assessment of an In-Place Inclinometer Chain for Structural and Geotechnical Monitoring," *Sensors (Basel)*, vol. 23, no. 20, Oct. 2023, doi: 10.3390/s23208379.
- [8] M. A. Alias *et al.*, "A High-Precision Extensometer System for Ground Displacement Measurement Using Fiber Bragg Grating," *IEEE Sens J*, vol. 22, no. 9, pp. 8509–8521, May 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3159850.
- [9] A. Gholinia, M. Nikkhah, and R. Naderi, "Validation of borehole extensometers results in geotechnical monitoring," *Environ Earth Sci*, vol. 81, no. 11, p. 312, 2022, doi: 10.1007/s12665-022-10422-9.

-
- [10] S. Faisal, S. Paul, and M. Gary, "Data-Based Modeling Approaches for Short-Term Prediction of Embankment Settlement Using Magnetic Extensometer Time-Series Data," *International Journal of Geomechanics*, vol. 22, no. 2, p. 04021269, Feb. 2022, doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002253.
 - [11] H. A. Penido, G. B. Vasconcellos, A. A. Gontijo, G. P. Ribas, and L. R. Fonseca, "Slope Monitoring along the Vitória-Minas Railway using Tiltmeters with Satellite Communication," *SLOPE Stability 2024*, 2024.
 - [12] Gy. Mentés, "Observing slope stability changes on the basis of tilt and hydrologic measurements," *Journal of Applied Geodesy*, vol. 11, no. 2, pp. 115–121, 2017, doi: 10.1515/jag-2016-0020.
 - [13] A. Ashida; K. Tsusaka; S. Mochiji; G. Coelho; M. Himeno; A. Iino, "Feasibility Assessment of Tiltmeter Monitoring for an Offshore Monoclinal Dipping Saline Aquifer CCS Site: Insights from Coupled Geomechanical Modeling," in *APOGCE 2024*, Oct. 2024.
 - [14] X. Zhu *et al.*, "Determination of borehole tiltmeter orientation using earth tides," *J Geod*, vol. 98, no. 8, p. 72, 2024, doi: 10.1007/s00190-024-01878-7.
 - [15] B. G. Clarke, *Pressuremeters in Geotechnical Design*, 2nd Edition. London: CRC Press, 2022. Accessed: Sep. 22, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1201/9781003028925>
 - [16] V. Marefat, F. Duhaime, R. P. Chapuis, and V. Le Borgne, "Performance of Fully Grouted Piezometers under Transient Flow Conditions: Field Study and Numerical Results," *Geotechnical Testing Journal*, vol. 42, no. 2, pp. 433–456, Mar. 2019, doi: 10.1520/GTJ20170290.
 - [17] S. Martens, S. Li, R. Hoda, P. Oblozinsky, and S. Iqbal, "Applicability of the fully grouted piezometer installation method for transient seepage conditions," *Proceedings of GeoVirtual*, pp. 14–16, 2020.
 - [18] V. K. Gade and S. M. Dasaka, "Influence of Contacting Material on Calibration Response of Diaphragm Earth Pressure Cells," *Indian Geotechnical Journal*, vol. 50, no. 1, pp. 133–141, 2020, doi: 10.1007/s40098-019-00363-9.
 - [19] C. P. G. Jayalath and K. D. Wimalasena, "Laboratory calibration of earth pressure cells," *International Journal of GEOMATE*, vol. 20, no. 82, pp. 61–67, Jun. 2021, doi: 10.21660/2021.82.Gx362.
 - [20] Y. Zheng, Z.-W. Zhu, W. Xiao, and Q.-X. Deng, "Review of fiber optic sensors in geotechnical health monitoring," *Optical Fiber Technology*, vol. 54, p. 102127, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2019.102127>.
 - [21] J. Ma, H. Pei, H. Zhu, B. Shi, and J. Yin, "A review of previous studies on the applications of fiber optic sensing technologies in geotechnical monitoring," *Rock Mechanics Bulletin*, vol. 2, no. 1, p. 100021, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2022.100021>.
 - [22] H.-H. Zhu, D.-Y. Wang, B. Shi, X. Wang, and G.-Q. Wei, "Performance monitoring of a curved shield tunnel during adjacent excavations using a fiber optic nervous sensing system," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 124, p. 104483, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104483>.
 - [23] J. Wu, L. Dai, G. Xue, and J. Chen, "Theory and Technology of Digital Twin Model for Geotechnical Engineering," in *Proceedings of the 8th International Conference on Civil Engineering*, G. Feng, Ed., Singapore: Springer Singapore, 2022, pp. 403–411.
 - [24] A. Khan, Y. Li, M. Shoaib, U. Sajjad, and F. Rui, "Utilizing Machine Learning and Digital Twin Technology for Rock Parameter Estimation from Drilling Data," *Journal of Intelligent Construction*, vol. 3, no. 2, pp. 1–23, 2025, doi: 10.26599/Jic.2025.9180088.

- [25] Y. Wang, A. Rezaei, and S. Hicks, "Digital twin applications in geotechnical engineering: a systematic review," *Machine Learning and Data Science in Geotechnics*, vol. 1, no. 1, pp. 77–91, Aug. 2025, doi: 10.1108/MLAG-02-2025-0005.
- [26] D. Cotoarbă, D. Straub, and I. F. C. Smith, "Probabilistic digital twins for geotechnical design and construction," *Data-Centric Engineering*, vol. 6, p. e30, 2025, doi: DOI: 10.1017/dce.2025.10008.
- [27] E. E.-D. Hemdan and M. E. Al-Atroush, "An efficient IoT-based soil image recognition system using hybrid deep learning for smart geotechnical and geological engineering applications," *Multimed Tools Appl*, vol. 83, no. 25, pp. 66591–66612, 2024, doi: 10.1007/s11042-024-18230-y.
- [28] Y. Ma and G. Guo, "Intelligent algorithm of geotechnical test data based on Internet of Things," *Comput Commun*, vol. 158, pp. 32–38, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.04.028>.
- [29] N. Rane, S. Choudhary, and J. Rane, "Leading-edge Artificial Intelligence (AI) and Internet of Things (IoT) technologies for enhanced geotechnical site characterization," *SSRN Electronic Journal*, 2023, doi: 10.2139/ssrn.4640926.
- [30] A. A. Firoozi and A. A. Firoozi, "Smart Geotechnics: Enhancing Infrastructure Resilience with IoT and AI," *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, vol. 14, no. 1, pp. 89–101, Jun. 2024, doi: 10.54203/jceu.2024.7.
- [31] A. Carri, A. Valletta, E. Cavalca, R. Savi, and A. Segalini, "Advantages of iot-based geotechnical monitoring systems integrating automatic procedures for data acquisition and elaboration," *Sensors*, vol. 21, no. 6, Mar. 2021, doi: 10.3390/s21062249.
- [32] A. Minardo *et al.*, "Distributed optical fiber sensor applications in geotechnical monitoring," *Sensors*, vol. 21, no. 22, Nov. 2021, doi: 10.3390/s21227514.
- [33] A. M. Puzrin, M. Iten, and F. Fischli, "Monitoring of ground displacements using borehole-embedded distributed fibre optic sensors," *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 53, no. 1, pp. 31–38, Feb. 2020, doi: 10.1144/qjgegh2018-166.
- [34] A. Acharya and T. Kogure, "Application of novel distributed fibre-optic sensing for slope deformation monitoring: a comprehensive review," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 20, no. 7, pp. 8217–8240, 2023, doi: 10.1007/s13762-022-04697-5.
- [35] Ł. Bednarski, R. Sieńko, M. Grygierek, and T. Howiacki, "New distributed fibre optic 3dsensor with thermal self-compensation system: Design, research and field proof application inside geotechnical structure," *Sensors*, vol. 21, no. 15, Aug. 2021, doi: 10.3390/s21155089.



Prosiding- SEMASTER: Seminar Nasional Teknologi Informasi & Ilmu Komputer is licensed under a [Creative Commons Attribution International \(CC BY-SA 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)