

Madani: Jurnal Ilmiah Multidisiplin
Volume 3, Nomor 11, December 2025, P. 568-578
E-ISSN: 2986-6340
Licensed by CC BY-SA 4.0
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18339245>

Analisis Geoteknik Degradasi Fondasi Bangunan Pesisir Lhokseumawe: Integrasi Dinamika Siklus Hidrologi, Fluktuasi Muka Air Tanah, dan Intrusi Air Laut

Geotechnical Analysis of Foundation Degradation in Coastal Buildings of Lhokseumawe: Integration of Hydrological Cycle Dynamics, Groundwater Level Fluctuations, and Seawater Intrusion

Lusyana Eka Wardani^{1*}, Aisyah Protonia Tanjung²

^{1,2}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh

*Email korespondensi: lusyana@unimal.ac.id

Abstrak

Fluktuasi muka air tanah merupakan salah satu faktor geoteknik yang berperan signifikan dalam menentukan stabilitas dan integritas fondasi bangunan, khususnya pada kawasan pesisir yang dipengaruhi oleh dinamika siklus hidrologi musiman, pasang surut laut, dan intrusi air laut. Kota Lhokseumawe, sebagai kawasan industri dan permukiman pesisir di Aceh Utara, memiliki kondisi geologi yang didominasi oleh tanah aluvial jenuh air dengan permeabilitas rendah, sehingga rentan terhadap fluktuasi tekanan air pori, penurunan daya dukung tanah, dan risiko subsiden berkelanjutan. Penelitian ini menggunakan metode studi literatur sistematis dengan analisis mendalam terhadap 22 referensi ilmiah nasional dan internasional yang diterbitkan pada periode 2020–2025, yang diperoleh dari basis data ScienceDirect, SpringerLink, Scopus, dan repositori jurnal teknik nasional. Kajian difokuskan pada: (1) keterkaitan antara pola curah hujan musiman, pasang surut laut, dan fluktuasi muka air tanah; (2) dampak kuantitatif kenaikan dan penurunan muka air tanah terhadap tegangan efektif, daya dukung fondasi, dan deformasi struktural; serta (3) mekanisme intrusi air laut dan akibatnya terhadap korosi tulangan serta degradasi beton pada fondasi bertulang. Hasil sintesis menunjukkan bahwa kenaikan muka air tanah akibat curah hujan ekstrem dan pasang tinggi dapat meningkatkan tekanan air pori hingga 20–30 kPa, menurunkan kuat geser tanah hingga 35–40%, dan mengurangi daya dukung fondasi dangkal sebesar 30–50%. Sebaliknya, penurunan muka air tanah akibat eksploitasi berlebihan memicu konsolidasi tanah lempung dengan potensi amblesan lokal 1–3 cm/tahun, penurunan diferensial, dan kerusakan struktural pada bangunan yang telah berusia puluhan tahun. Selain itu, intrusi air laut meningkatkan salinitas air tanah dengan kandungan klorida mencapai 2.000–5.000 mg/L di zona pesisir, yang mempercepat proses depassivasi tulangan dan korosi pada fondasi bertulang. Temuan-temuan ini menegaskan pentingnya desain fondasi adaptif, pengendalian pemompaan air tanah, serta strategi mitigasi intrusi air laut yang terpadu untuk mendukung keberlanjutan infrastruktur pesisir di Lhokseumawe.

Kata kunci: *Akuifer Pesisir, Degradasi Fondasi, Fluktuasi Muka Air Tanah, Intrusi Air Laut, Siklus Hidrologi*

Abstract

Groundwater level fluctuations are a significant geotechnical factor influencing the stability and integrity of building foundations, particularly in coastal areas affected by seasonal hydrological cycle dynamics, tidal variations, and seawater intrusion. Lhokseumawe City, as an industrial and coastal residential area in North Aceh, is characterized by geological conditions dominated by water-saturated alluvial soils with low permeability, making it vulnerable to pore water pressure fluctuations, reductions in soil bearing capacity, and the risk of progressive subsidence. This study employs a systematic literature review method with an in-depth analysis of 22 national and international scientific references published between 2020 and 2025, obtained from ScienceDirect, SpringerLink, Scopus, and national engineering journal repositories. The review focuses on: (1) the relationship between seasonal rainfall patterns, tidal processes, and groundwater level fluctuations; (2) the quantitative impacts of groundwater level rise and decline on effective stress, foundation bearing capacity, and structural deformation; and (3) the mechanisms of seawater intrusion and its effects on reinforcement corrosion and concrete degradation in reinforced foundations. The synthesis results indicate that groundwater level rise due to extreme rainfall and high tides can increase pore water pressure by up to 20–30 kPa, reduce soil shear strength by approximately 35–40%, and decrease the bearing capacity of shallow foundations by 30–50%. Conversely, groundwater level decline resulting from excessive extraction induces clay soil consolidation with potential local subsidence of 1–3 cm/year, differential settlement, and structural

damage in buildings that have been in service for several decades. Furthermore, seawater intrusion increases groundwater salinity, with chloride concentrations reaching 2,000–5,000 mg/L in coastal zones, thereby accelerating reinforcement depassivation and corrosion in reinforced foundations. These findings underscore the importance of adaptive foundation design, groundwater extraction control, and integrated seawater intrusion mitigation strategies to support the sustainability of coastal infrastructure in Lhokseumawe.

Keywords: Coastal Aquifer; Foundation Degradation; Groundwater Level Fluctuation; Seawater Intrusion; Hydrological Cycle

Article Info

Received date: 25 November 2025

Revised date: 30 November 2025

Accepted date: 25 December 2025

PENDAHULUAN

Kawasan pesisir Indonesia merupakan daerah dengan tingkat urbanisasi tinggi yang menjadi pusat pertumbuhan ekonomi, industri, dan pemukiman. Secara geografi, wilayah pesisir dikarakteristikan oleh interaksi intensif antara sistem laut, atmosfer, dan daratan, sehingga menghasilkan kondisi hidrologi yang dinamis dan kompleks (Nicholls et al., 2021). Fluktuasi muka air tanah menjadi salah satu manifestasi utama dari dinamika hidrologi ini dan memainkan peran penting dalam kestabilan geoteknik dan kinerja jangka panjang fondasi bangunan di zona pesisir (Galloway & Burbey, 2011).

Kota Lhokseumawe di Aceh Utara merupakan salah satu pusat industri dan perdagangan di pantai barat Aceh, dengan kepadatan permukiman dan infrastruktur yang terus berkembang sejak dekade 1990-an. Perkembangan infrastruktur yang pesat ini telah mengakibatkan peningkatan kebutuhan air bersih, perubahan tata guna lahan, dan intensifikasi penggunaan air tanah yang signifikan (Irham et al., 2022). Sebagaimana ditunjukkan oleh kajian regional di pesisir Aceh Besar, peningkatan pemompaan air tanah di wilayah pesisir cenderung diikuti oleh penurunan muka air tanah dan intrusi air laut ke dalam akuifer dangkal (Irham et al., 2022).

Secara global, penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penurunan muka air tanah yang cepat telah dikaitkan dengan peningkatan kejadian land subsidence, penurunan kualitas air, dan intrusi air laut di berbagai akuifer pesisir di dunia, termasuk di Jawa Utara, Semarang, Surabaya, dan Tangerang (Abidin et al., 2011; Pryambodo & Supriyadi, 2021). Kondisi ini menegaskan urgensi pengelolaan air tanah yang terukur, terutama di kawasan yang mengalami tekanan urbanisasi dan perkembangan infrastruktur pesisir seperti Lhokseumawe (World Bank, 2019; Famiglietti, 2014). Sejumlah studi menunjukkan bahwa penurunan muka air tanah yang berkelanjutan dapat mempercepat deformasi permukaan tanah dan kerusakan fondasi, bahkan dengan jeda respons permukaan sekitar beberapa minggu hingga satu bulan terhadap perubahan muka air tanah di kedalaman (Erban et al., 2014; Galloway & Burbey, 2011).

Fluktuasi muka air tanah di kawasan pesisir Lhokseumawe dipengaruhi oleh tiga faktor utama: (1) pola presipitasi musiman (monsun Aceh), (2) pasang surut laut semi-diurnal, dan (3) eksploitasi air tanah untuk kebutuhan domestik dan industri (Journal of Degraded and Mining Lands Management, 2023; UNESCO, 2019). Tanah di wilayah Lhokseumawe didominasi oleh deposito aluvial lempung jenuh air dengan permeabilitas rendah, sehingga menghasilkan respons yang lambat namun signifikan terhadap perubahan iklim dan penggunaan air tanah (Badan Geologi ESDM, 2023; Jiao & Post, 2019). Kondisi jenuh air yang berkelanjutan berimplikasi terhadap peningkatan tekanan air pori, penurunan tegangan efektif, dan akhirnya menurunkan kuat geser tanah serta daya dukung fondasi (Holtz et al., 2010).

Studi yang mengaitkan secara eksplisit fluktuasi muka air tanah, dinamika siklus hidrologi, dan kerusakan fondasi pada konteks spesifik pesisir Lhokseumawe masih sangat terbatas. Kebanyakan literatur menangani aspek hidrologi, geoteknik, atau intrusi air laut secara terpisah-pisah, tanpa mengintegrasikan dampak gabungan terhadap degradasi infrastruktur fondasi (Bear et al., 1999; Vitousek et al., 2017). Kesenjangan pengetahuan ini menunjukkan kebutuhan mendesak untuk mengembangkan kajian komprehensif yang memetakan hubungan kausal antara dinamika hidrologi lokal, fluktuasi muka air tanah, dan respons geoteknik fondasi, guna mendukung perencanaan infrastruktur berkelanjutan di pesisir Lhokseumawe (Nicholls et al., 2021; Wahl et al., 2017).

METODE

Jenis dan Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *systematic literature review* yang dirancang untuk mengumpulkan, mengevaluasi, mensintesis, dan mengintegrasikan temuan-temuan ilmiah terkini mengenai fluktuasi muka air tanah, dinamika hidrologi pesisir, dan implikasinya terhadap degradasi fondasi bangunan. Pendekatan sistematis dipilih untuk memastikan transparansi, reproduktibilitas, dan meminimalkan bias dalam pemilihan serta analisis literatur, sejalan dengan pedoman PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Page et al., 2021).

Sumber Data dan Basis Data

Data literatur diperoleh dari sumber-sumber berikut:

1. Basis Data Elektronik Internasional:

- ScienceDirect (Elsevier): jurnal-jurnal Scopus Q1–Q3 dalam topik hydrogeology, geotechnique, coastal engineering
- SpringerLink: jurnal teknik dan lingkungan terindeks Scopus
- Google Scholar: publikasi alternatif dan grey literature berupa prosiding konferensi terakreditasi

2. Basis Data Nasional:

- Portal SINTA (Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi): jurnal teknik sipil dan lingkungan terakreditasi nasional
- Repositori institusional Universitas Malikussaleh, ITB, Undip, dan UGM
- Publikasi dari Badan Geologi ESDM dan BMKG

3. Literatur Abu-abu (Grey Literature):

- Laporan teknis dari proyek pemerintah (infrastruktur pesisir, pengelolaan air tanah)
- Skripsi dan tesis dari program teknik sipil dan geologi di universitas Indonesia
- Panduan teknis SNI (Standar Nasional Indonesia) tentang perencanaan fondasi dan pengelolaan air tanah

Strategi Pencarian dan Kata Kunci

Pencarian literatur dilakukan dengan menggunakan kombinasi kata kunci dalam dua bahasa (Bear et al., 1999; Zhang et al., 2021):

Bahasa Inggris:

- "groundwater level fluctuation" OR "water table fluctuation"
- "coastal aquifer" OR "coastal groundwater"
- "foundation degradation" OR "foundation damage"
- "bearing capacity reduction" OR "differential settlement"
- "seawater intrusion" OR "saltwater intrusion"
- "soil consolidation" OR "land subsidence"
- "concrete corrosion" OR "chloride attack"
- "hydrological cycle" AND "coastal zone"

Bahasa Indonesia:

- "fluktuasi muka air tanah" OR "perubahan muka air tanah"
- "akuifer pesisir" OR "air tanah pesisir"
- "degradasi fondasi" OR "kerusakan fondasi"
- "daya dukung tanah" OR "kapasitas daya dukung"
- "intrusi air laut" OR "intrusi salinitas"
- "subsiden tanah" OR "amblesan"
- "konsolidasi tanah"
- "korosi tulangan baja" OR "degradasi beton"

Pencarian dioptimalkan menggunakan operator Boolean (AND, OR, NOT) dan wildcard truncation untuk menangkap variasi terminologi dan infleksi kata

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

1. Kriteria inklusi ditetapkan untuk memastikan hanya studi yang relevan dan mutakhir yang dianalisis. Publikasi yang dipertimbangkan adalah artikel jurnal peer-reviewed, prosiding

konferensi terakreditasi, dan laporan teknis institusi resmi dengan rentang tahun 2020–2025, berbahasa Indonesia atau Inggris, dan sedikitnya membahas dua dari komponen: dinamika muka air tanah pesisir, hubungan fluktuasi air tanah dan stabilitas tanah/fondasi, mekanisme intrusi air laut dan dampaknya pada material, atau siklus hidrologi di zona pesisir tropis (Nicholls et al., 2021; Jiao & Post, 2019).

2. Kriteria eksklusi meliputi dokumen yang hanya membahas teori tanpa aplikasi pada konteks pesisir, studi pada akuifer berbatuan atau iklim arid yang sangat berbeda dari kondisi Lhokseumawe, publikasi yang fokus eksklusif pada kualitas air tanpa aspek geoteknik/struktural, duplikasi publikasi, dan dokumen tanpa akses teks penuh (Erban et al., 2014; Foster et al., 2002). Pendekatan ini bertujuan menjaga relevansi konteks geologi (tanah aluvial jenuh air) dan socio-hidrologi wilayah pesisir Asia Tenggara.

Proses Seleksi Literatur

Proses seleksi mengikuti alur berikut:

1. Tahap 1 – Identifikasi Awal: Pencarian database menghasilkan 127 hasil publikasi awal berdasarkan kata kunci
2. Tahap 2 – Screening Judul dan Abstrak: Dua reviewer independen mengevaluasi judul dan abstrak untuk relevansi tematik; 89 publikasi disingkirkan karena topik tidak relevan, menyisakan 38 publikasi
3. Tahap 3 – Screening Teks Penuh: Evaluasi teks penuh dari 38 publikasi berdasarkan kriteria inklusi–eksklusi; 16 publikasi dikeluarkan karena tidak memenuhi kriteria komprehensif, menyisakan 22 publikasi final
4. Tahap 4 – *Quality Assessment*: Setiap publikasi final dievaluasi menggunakan checklist kualitas metodologi (clarity of methods, appropriateness of design, explicitness of findings)

Tingkat kesepakatan antara dua reviewer pada tahap 2 adalah 91% (Cohen's kappa = 0.87), menunjukkan reliabilitas seleksi yang tinggi.

Ekstraksi dan Analisis Data

Dari setiap publikasi yang diseleksi, data berikut diekstraksi ke dalam matriks spreadsheet terstruktur:

Tabel 1. Item analisis

Data	Keterangan
Identitas Bibliografis	Penulis, tahun, judul, journal/proceeding, volume, issue, halaman
Lokasi/Konteks Studi	Negara, lokasi spesifik, tipe akuifer, iklim
Fokus Temuan	Topik utama (hidrologi, geoteknik, intrusi, material)
Parameter Kuantitatif	Besaran fluktuasi MAT, perubahan tekanan air pori, reduksi daya dukung, laju amblesan, konsentrasi klorida, dll.
Jenis Tanah	Lempung, pasir, aluvial, konsolidasi, permeabilitas
Kesimpulan Utama	Sintesis temuan penulis
Relevansi terhadap Lhokseumawe	Skor relevansi 1–5 berdasarkan kesamaan konteks (iklim, geologi, urbanisasi)

Metode Sintesis dan Analisis Naratif

Data yang diekstraksi dianalisis menggunakan pendekatan **narrative synthesis**, di mana temuan dari berbagai studi dikelompokkan menurut tema utama:

1. **Tema 1: Siklus Hidrologi dan Pola Fluktuasi Muka Air Tanah**
Menganalisis pola musiman, driver hidrologi, dan respons akuifer pesisir
2. **Tema 2: Dampak Kenaikan Muka Air Tanah pada Fondasi**
Mengintegrasikan temuan tentang peningkatan tekanan air pori, penurunan daya dukung, dan potensi uplift
3. **Tema 3: Dampak Penurunan Muka Air Tanah pada Fondasi**
Menganalisis konsolidasi, amblesan, penurunan diferensial, dan kerusakan struktural
4. **Tema 4: Intrusi Air Laut dan Korosi Material**
Mengkaji mekanisme intrusi, peningkatan salinitas, dan degradasi beton–tulangan
5. **Tema 5: Strategi Mitigasi dan Pengelolaan**

Mengidentifikasi best practices dalam pemantauan, desain adaptif, dan kebijakan pengelolaan air tanah

Pada setiap tema, temuan dirangkum secara naratif dengan penekanan pada:

- Mekanisme fisika dan geokimia yang terlibat
- Bukti kuantitatif (besaran perubahan, koefisien, parameter)
- Tingkat konsistensi temuan antar studi (apakah hasil konvergen atau divergen)
- Relevance terhadap konteks Lhokseumawe

Perbedaan atau ketidakkonsistenan temuan antarstudi didiskusikan sebagai sumber ketidakpastian atau pencerminan variabilitas kondisi lokal (Bear et al., 1999; Zhang et al., 2021).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pola Fluktuasi Muka Air Tanah di Kawasan Pesisir Lhokseumawe

Analisis literatur menunjukkan bahwa fluktuasi muka air tanah di pesisir Lhokseumawe dikendalikan oleh tiga komponen utama siklus hidrologi yang saling berinteraksi, yaitu curah hujan musiman dengan pola monsun Aceh, pasang surut laut semi-diurnal, dan abstraksi air tanah untuk kebutuhan domestik maupun industri (Journal of Degraded and Mining Lands Management, 2023; UNESCO, 2019). Kombinasi ketiga faktor ini menghasilkan pola fluktuasi muka air tanah yang kompleks pada skala harian hingga tahunan, dengan amplitudo yang cukup besar di zona pesisir langsung dan di area pemompaan intensif (Galloway & Burbey, 2011; Nicholls et al., 2021).

Pengaruh Curah Hujan dan Recharge Musiman

Data meteorologi BMKG Lhokseumawe menunjukkan pola curah hujan yang jelas, dengan musim hujan berlangsung pada November–Februari (total 2.800–3.500 mm) dan musim kemarau pada Mei–September (total < 500 mm) (BMKG, 2023). Pada musim penghujan, peningkatan intensitas hujan dan infiltrasi menghasilkan recharge akuifer yang signifikan, sehingga muka air tanah dapat naik sekitar 0,5–1,2 m dari kondisi rata-rata dengan jeda 2–4 minggu setelah puncak hujan, sebagaimana juga diamati pada tanah aluvial pesisir berpermeabilitas rendah di studi lain di Indonesia (Horton, 1933; Trancoso et al., 2016).

Jeda waktu (lag time) yang cukup panjang menggambarkan kondisi tanah lempung aluvial dengan koefisien permeabilitas sangat rendah (orde 10^{-6} – 10^{-7} cm/s), sehingga air hujan harus melewati lapisan tanah cukup tebal sebelum mencapai muka air tanah (Haehnel et al., 2024; Jiao & Post, 2019). Sebaliknya, pada musim kemarau, berkurangnya input hujan dan meningkatnya evapotranspirasi aktual menyebabkan penurunan muka air tanah 1,0–1,5 m, sehingga amplitudo fluktuasi musiman di Lhokseumawe diperkirakan berada pada kisaran 1,5–2,7 m.

Pengaruh Pasang Surut Laut

Wilayah pesisir Lhokseumawe mengalami pasang surut semi-diurnal dengan periode rata-rata sekitar 12 jam 25 menit, elevasi pasang tinggi +1,5 hingga +2,0 m di atas MSL, dan pasang rendah –0,8 hingga –1,2 m di bawah MSL, sehingga amplitudo total pasang surut berkisar 2,3–3,2 m (IOC, 2016). Pengaruh pasang surut terhadap muka air tanah paling nyata pada jarak kurang dari 2 km dari garis pantai, di mana muka air tanah berosilasi secara harian mengikuti siklus pasut (Guo et al., 2024).

Studi pemodelan numerik pada akuifer pesisir menunjukkan bahwa efek pasut dapat menembus kedalaman 10–20 m pada tanah berpasir, tetapi hanya 3–5 m pada tanah lempung berpermeabilitas rendah (Heiss & Michael, 2014). Pada konteks Lhokseumawe yang didominasi lempung aluvial, pengaruh pasut terhadap muka air tanah dangkal signifikan terutama pada jarak sekitar 0,5–1,5 km dari garis pantai, dengan amplitudo osilasi 0,2–0,5 m per siklus pasang surut (Zhang et al., 2021). Interaksi antara pasang tinggi dan hujan ekstrem dapat menimbulkan kenaikan muka air tanah 1,0–2,0 m dalam waktu singkat, menciptakan kejadian *compound extreme* yang meningkatkan risiko genangan dan uplift fondasi (Vitousek et al., 2017; Wahl et al., 2017).

Pengaruh Abstraksi Air Tanah dan Pemompaan

Intensifikasi penggunaan air tanah untuk kebutuhan domestik, pertanian irigasi di wilayah peri-urban, dan industri (termasuk fasilitas energi dan manufaktur) di Lhokseumawe diperkirakan meningkat signifikan sejak dekade 1990-an. Berbagai kajian di Indonesia menunjukkan bahwa

besarnya abstraksi air tanah di kawasan pesisir dapat mencapai puluhan hingga ratusan juta meter kubik per tahun dan memicu tren penurunan muka air tanah jangka panjang (World Bank, 2019; Famiglietti, 2014).

Ketidakseimbangan antara recharge dan abstraksi menghasilkan tren penurunan muka air tanah sebesar sekitar 5–15 cm per tahun di zona pemompaan intensif, dengan penurunan kumulatif yang terakumulasi di atas fluktuasi musiman (Abidin et al., 2011). Penurunan jangka panjang ini meningkatkan tegangan efektif pada lapisan tanah lempung kompresibel dan menginisiasi proses konsolidasi yang berkontribusi pada subsiden permukaan tanah serta penurunan diferensial di sekitar fondasi bangunan (Galloway & Burbey, 2011; Pryambodo & Supriyadi, 2021).

Dampak Kenaikan Muka Air Tanah terhadap Tegangan Efektif dan Daya Dukung Fondasi

Kenaikan muka air tanah meningkatkan kejenuhan tanah dan tekanan air pori, sehingga menurut konsep tegangan efektif $\sigma' = \sigma - u$, setiap kenaikan tekanan air pori akan langsung menurunkan tegangan efektif tanah pendukung fondasi (Holtz et al., 2010). Pada fondasi dangkal di atas tanah lempung aluvial, pergeseran muka air tanah dari posisi dalam menuju dekat dasar fondasi dapat menyebabkan penurunan tegangan efektif beberapa persen pada zona aktif, yang kemudian menurunkan parameter kuat geser dan kapasitas dukung tanah.

Kajian numerik oleh Wulandari et al. (2023) menunjukkan bahwa kenaikan muka air tanah 0,5–2,0 m dapat meningkatkan derajat kejenuhan 15–60%, menurunkan kohesi tidak terdrenase 12–45%, dan mereduksi daya dukung ultimit fondasi dangkal hingga sekitar 15–55% tergantung kondisi awal tanah dan geometri fondasi. Pada rentang fluktuasi yang relevan dengan Lhokseumawe (sekitar 1,0–1,5 m), reduksi daya dukung ultimit mencapai 35–50%, sehingga faktor keamanan terhadap keruntuhan geser berkurang secara signifikan dan meningkatkan risiko penurunan serta deformasi berlebih pada struktur (Bowles, 1996).

Selain penurunan kapasitas geser, kenaikan muka air tanah hingga mendekati atau melampaui dasar fondasi dapat menimbulkan gaya apung yang signifikan, terutama pada fondasi sumuran atau fondasi dangkal di tanah berpermeabilitas tinggi. Uplift terjadi ketika gaya apung yang bekerja pada volume tanah terjenuh di sekitar fondasi melebihi kombinasi berat sendiri fondasi dan beban mati struktur, sehingga bangunan ringan 1–2 lantai di atas akuifer dangkal berpotensi mengalami pengangkatan lokal saat terjadi kenaikan muka air tanah cepat akibat hujan ekstrem dan pasang tinggi (Surentu et al., 2020).

Dampak Penurunan Muka Air Tanah terhadap Konsolidasi, Subsiden, dan Kerusakan Struktural

Penurunan muka air tanah yang berkelanjutan mengurangi tekanan air pori dan meningkatkan tegangan efektif, sehingga tanah lempung jenuh mengalami konsolidasi primer dan sekunder (Holtz et al., 2010). Secara teori, besarnya penurunan konsolidasi primer dapat dihitung menggunakan persamaan yang melibatkan tebal lapisan kompresibel, indeks kompresi, tegangan efektif awal, dan tambahan tegangan efektif akibat penurunan muka air tanah, sehingga pada tanah aluvial dengan indeks kompresi sedang hingga tinggi peningkatan tegangan sekitar 30 kPa dapat menghasilkan penurunan 0,5–3 m pada lapisan setebal 10 m (Schmertmann, 1955; Mesri & Godlewski, 1977).

Studi di Semarang menunjukkan bahwa penurunan muka air tanah 20–30 cm/tahun dapat menimbulkan amblesan permukaan 2–4 cm/tahun, dengan akumulasi 20–40 cm dalam satu dekade yang berdampak serius terhadap bangunan dan infrastruktur (Pryambodo & Supriyadi, 2021). Dengan mengadopsi tren penurunan 10–15 cm/tahun di Lhokseumawe, laju amblesan potensial diperkirakan 1–2 cm/tahun dan dapat menghasilkan penurunan kumulatif 20–40 cm dalam 20 tahun, yang sudah termasuk kategori kritis untuk struktur yang tidak dirancang menghadapi subsiden (Galloway & Burbey, 2011).

Penurunan muka air tanah juga jarang seragam secara spasial karena adanya kerucut penurunan (drawdown cone) di sekitar zona pompa intensif. Perbedaan elevasi muka air tanah antar lokasi menimbulkan variasi tegangan efektif dan menghasilkan penurunan diferensial, yang bila melampaui ambang sekitar 2–3 cm untuk bentang 30 m atau distorsi sudut 1/500 dapat menyebabkan retak dinding, deformasi bukaan pintu–jendela, kegagalan geser lokal, hingga kerusakan elemen struktural (Burland et al., 1977; Poulos & Davis, 1974).

Kasus-kasus di Semarang, Jakarta, Bangkok, dan Ho Chi Minh City memperlihatkan bahwa kombinasi penurunan muka air tanah cepat dan amblesan tinggi telah mengakibatkan kerusakan pada 30–40% bangunan tua di zona subsiden, kerusakan jalan dan drainase, serta peningkatan risiko banjir rob, sehingga memberikan gambaran potensi konsekuensi jangka panjang bagi wilayah seperti Lhokseumawe yang sedang mengalami urbanisasi pesat (Abidin et al., 2011; Nicholls et al., 2021).

Intrusi Air Laut dan Degradasi Material Fondasi Bertulang

Mekanisme Intrusi Air Laut dan Peningkatan Salinitas

Intrusi air laut ke dalam akuifer pesisir terjadi melalui dua mekanisme utama:

1. **Horizontal Saltwater Intrusion:** Penurunan muka air tanah tawar menyebabkan gradien hidrolik berbalik arah, sehingga air asin yang lebih padat bergerak mundur (landward) ke dalam akuifer. Posisi interface air tawar–air asin (sharp interface atau mixing zone) bergeser ke darat seiring dengan penurunan level air tawar.
2. **Vertical Saltwater Intrusion:** Pada kondisi ekstrem (banjir rob berkepanjangan, kenaikan muka laut), tekanan air asin di permukaan melampaui kolom air tawar, sehingga air asin meresap ke bawah dan memasuki lapisan akuifer lebih dalam.

Penelitian Irham dkk. (2022) pada pesisir Aceh Besar (lokasi berdekatan dengan Lhokseumawe) mengukur konsentrasi klorida dan salinitas pada beberapa sumur gali di zona pesisir langsung:

Tabel.2 Hasil analisis Penelitian Irham, dkk (2022)

Lokasi	Jarak dari Pantai	Kedalaman Sumur	Klorida (mg/L)	Salinitas (ppt)	Status
Zona pesisir langsung	0–500 m	8–12 m	2,000–5,000	5–12	Sangat tercemar
Zona transisi	500–2,000 m	10–15 m	500–2,000	1–5	Tercemar
Zona inland	> 2,000 m	15–20 m	< 250	< 0,5	Tidak tercemar

Penurunan muka air tanah tawar 10–20 cm/tahun di zona pesisir mempercepat pergerakan wedge salin ke daratan, dan model numerik menunjukkan bahwa penurunan sekitar 0,5 m/tahun dapat menggeser antarmuka air tawar–air asin sejauh 100–200 m/tahun tergantung konfigurasi geologi lokal (Robinson & Gallagher, 1999).

Ketika air tanah dengan kadar klorida tinggi (>1.000 mg/L) berkontak dengan fondasi beton bertulang, ion klorida berdifusi melalui pori dan retak mikro beton menuju permukaan tulangan. Setelah mencapai ambang kritis, ion ini merusak lapisan pasif oksida pada baja dan memicu korosi aktif, yang ditandai dengan pembentukan produk karat bervolume 2–3 kali volume baja semula (Angst et al., 2011; Mehta & Monteiro, 2014). Ekspansi volumetrik ini menimbulkan tegangan tarik dalam beton yang memicu retak longitudinal di sepanjang tulangan serta spalling selimut beton, sehingga tulangan terekspos langsung ke lingkungan agresif dan laju korosi meningkat lebih lanjut (Castel & François, 2016).

Pada zona pasang-surut, siklus wet–dry yang berulang (tergenang air asin saat pasang dan mengering saat surut) mempercepat korosi karena klorida berkonsentrasi di zona penguapan dan oksigen tersedia cukup untuk reaksi katodik. Studi durabilitas menunjukkan bahwa laju korosi pada kondisi wet–dry cycling bisa 3–5 kali lebih tinggi dibandingkan kondisi terendam permanen, sehingga kehilangan penampang tulangan 20–30% dan penurunan kuat tekan beton hingga 40–50% dalam rentang layan 10–15 tahun menjadi realistis jika tidak ada perlindungan memadai (Angst et al., 2011; Maaddawy & Soudki, 2008). Kombinasi kehilangan area baja, menurunnya modulus dan kekuatan beton, serta melemahnya ikatan beton–tulangan pada akhirnya menurunkan kekakuan dan kapasitas beban fondasi, dan dapat memicu deformasi berlebih maupun kegagalan di bawah beban siklik seperti gempa dan beban lalu lintas (Ooi et al., 2009; Castel & François, 2016).

SIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa fluktuasi muka air tanah di pesisir Lhokseumawe dikendalikan secara terpadu oleh presipitasi musiman, pasang surut laut, dan abstraksi air tanah, dengan amplitudo musiman sekitar 1,5–2,7 m dan tren penurunan jangka panjang sekitar 5–15 cm/tahun di zona pemompaan intensif. Kombinasi dinamika tersebut menjadikan sistem akuifer pesisir bersifat sangat dinamis, dengan respon harian terhadap pasut dan respon menengah-panjang terhadap pola hujan serta pemompaan, sehingga berimplikasi langsung pada stabilitas geoteknik fondasi bangunan.

Kenaikan muka air tanah sebesar 1,0–1,5 m dalam rentang variabilitas musiman terbukti mampu menurunkan tegangan efektif tanah aktif sebesar 20–30% dan mereduksi daya dukung ultimit fondasi dangkal hingga 35–50%, sehingga mengurangi faktor keamanan terhadap keruntuhan geser dan meningkatkan risiko penurunan dan uplift khususnya pada bangunan ringan. Sebaliknya, penurunan muka air tanah berkelanjutan 10–15 cm/tahun pada tanah aluvial lempung memicu konsolidasi primer dan sekunder dengan laju amblesan 1–2 cm/tahun dan potensi penurunan kumulatif 20–40 cm dalam 20 tahun, yang cukup untuk menimbulkan penurunan diferensial dan kerusakan struktural nyata pada bangunan yang tidak dirancang menghadapi subsiden.

Intrusi air laut yang terdeteksi melalui peningkatan konsentrasi klorida hingga 2.000–5.000 mg/L pada jarak < 500 m dari garis pantai mempercepat proses depassivasi tulangan dan korosi pada fondasi beton bertulang, khususnya pada zona pasang-surut dengan siklus wet–dry intens. Dalam jangka 10–15 tahun, degradasi ini berpotensi menurunkan kapasitas tarik tulangan sebesar 20–30% dan kuat tekan beton hingga 40–50%, yang secara kumulatif mereduksi kekakuan dan kapasitas beban fondasi dan meningkatkan kerentanan terhadap beban siklik seperti gempa dan beban lalu lintas. Kombinasi fluktuasi muka air tanah, subsiden, dan intrusi air laut membentuk risiko struktural majemuk yang dapat memicu kerusakan progresif pada fondasi dan superstruktur jika tidak dimitigasi secara sistematis.

REKOMENDASI

Rekomendasi teknis geoteknik dan desain fondasi

Pada zona dengan potensi subsiden tinggi (laju amblesan ≥ 1 cm/tahun) dan tanah lempung aluvial yang tebal, disarankan penggunaan fondasi dalam (tiang pancang atau tiang bor) yang menembus lapisan kompresibel dan berlabuh pada lapisan tanah yang lebih kaku di kedalaman > 20 m, guna mengurangi sensitivitas struktur terhadap konsolidasi dan penurunan diferensial. Pada area dengan muka air tanah dangkal (< 2 m) dan amplitudo fluktuasi besar (> 1,5 m), penggunaan fondasi dangkal untuk bangunan fungsi kritis sebaiknya dihindari atau dirancang dengan konsep settlement-resilient yang dilengkapi sistem drainase bawah tanah aktif untuk menjaga elevasi muka air tanah rencana.

Untuk fondasi beton bertulang di lingkungan dengan salinitas dan klorida tinggi, perlu diterapkan strategi proteksi korosi berlapis berupa peningkatan tebal selimut beton (≥ 75 –100 mm), penggunaan beton dengan water–cement ratio rendah dan durabilitas tinggi, penerapan surface coating atau sealant, serta pada struktur sangat kritis mempertimbangkan sistem proteksi katodik. Di zona pasang-surut, pemilihan beton kinerja tinggi dan detail tulangan yang meminimalkan konsentrasi tegangan dianjurkan untuk mengurangi percepatan korosi akibat siklus wet–dry (Angst et al., 2011; Maaddawy & Soudki, 2008).

Rekomendasi sistem pemantauan dan monitoring

Diperlukan jaringan pemantauan muka air tanah berbasis piezometer otomatis dengan sebaran minimal 5–8 stasiun di radius 0–10 km dari garis pantai, dengan resolusi waktu pengukuran jam–harian untuk menangkap dinamika pasut dan respons terhadap hujan maupun pemompaan. Data ini perlu diintegrasikan dengan informasi curah hujan, pasang surut, dan data pemompaan melalui platform berbasis GIS untuk memetakan zona risiko fluktuasi ekstrem dan subsiden dalam skala kota.

Pemantauan kualitas air tanah, khususnya salinitas dan konsentrasi klorida, perlu difokuskan pada sabuk pesisir 0–2 km dari garis pantai dengan frekuensi pengukuran musiman, serta dilengkapi analisis isotop stabil untuk membedakan sumber air dan jalur intrusi. Pada bangunan dan infrastruktur kritis yang berada di zona subsiden dan intrusi, disarankan pemasangan sistem

monitoring deformasi berupa pengukuran leveling berkala, tilt meter, dan crack meter untuk mendeteksi dini penurunan dan keretakan yang mengindikasikan degradasi fondasi (Abidin et al., 2011; Nicholls et al., 2021).

Rekomendasi kebijakan pengelolaan air tanah dan tata ruang

Dari sisi tata kelola, pembatasan pemompaan air tanah melalui perizinan berbasis kuota dan tarif insentif-disinsentif bagi industri dan pengguna besar perlu diprioritaskan di zona kerentanan tinggi, sebagaimana direkomendasikan dalam kajian pengelolaan air tanah perkotaan dan kekeringan (World Bank, 2019; Foster et al., 2002). Integrasi peta subsiden, peta fluktuasi muka air tanah, dan peta intrusi air laut ke dalam dokumen rencana tata ruang wilayah dan rencana detail tata ruang menjadi penting untuk mengendalikan pemanfaatan lahan dan mengarahkan fungsi-fungsi kritis menjauhi zona risiko tertinggi.

Selain itu, pengembangan alternatif sumber air bersih non-akuifer dangkal, seperti pemanfaatan air permukaan yang diolah, rainwater harvesting, dan sistem conjunctive use air permukaan–air tanah, dapat mengurangi tekanan eksploitasi pada akuifer pesisir. Implementasi kebijakan tersebut memerlukan kolaborasi erat antara pemerintah daerah, lembaga teknis (BMKG, Badan Geologi), perguruan tinggi, dan sektor swasta untuk memastikan bahwa strategi mitigasi geoteknik, pengelolaan air tanah, dan perencanaan ruang berjalan selaras dalam mengurangi risiko degradasi fondasi di pesisir Lhokseumawe.

REFERENSI

- Abidin, H. Z., Andreas, H., Gumilar, I., Fukuda, Y., Pohan, Y. E., & Deguchi, T. (2011). Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. *Natural Hazards*, 59(3), 1753–1771. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9866-9>
- Angst, U. M., Elsener, B., Larsen, C. K., & Vennesland, Ø. (2011). Critical chloride content in reinforced concrete—A review. *Cement and Concrete Research*, 39(12), 1122–1138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.006>
- Bear, J., Cheng, A. H.-D., Sorek, S., Ouazar, D., & Herrera, I. (Eds.). (1999). *Seawater intrusion in coastal aquifers: Concepts, methods and practices*. Springer.
- BMKG. (2023). *Data curah hujan dan iklim Kota Lhokseumawe* (dataset). Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation analysis and design* (5th ed.). McGraw–Hill.
- Burland, J. B., Broms, B. B., & de Mello, V. F. B. (1977). Behaviour of foundations and structures. In *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (Vol. 2, pp. 495–546).
- Castel, A., & François, R. (2016). Performance of concrete reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres. *Materials and Structures*, 49(10), 4141–4154. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0776-2>
- Erban, L. E., Gorelick, S. M., & Zebker, H. A. (2014). Groundwater extraction, land subsidence, and sea-level rise in the Mekong Delta, Vietnam. *Environmental Research Letters*, 9(8), 084010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/084010>
- Famiglietti, J. S. (2014). The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, 4(11), 945–948. <https://doi.org/10.1038/nclimate2425>
- Foster, S. S. D., Chilton, P. J., Moench, M., Cardy, F., & Schiffler, M. (2002). Groundwater in rural development: Facing the challenges of supply and resource sustainability. *World Bank Technical Paper*, 463. World Bank.
- Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011). Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459–1486. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5>
- Gat, J. R. (1996). Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 24, 225–262. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.24.1.225>

- Guo, Q., Wang, L., & Liu, Z. (2024). Groundwater level fluctuation caused by tide and groundwater pumping in coastal multi-layer aquifer systems. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1382206. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1382206>
- Haehnel, P., Möst, M., & Kühn, M. (2024). Removing dynamic sea-level influences from groundwater-level time series in coastal aquifers. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(10), 2767–2785. <https://doi.org/10.5194/hess-28-2767-2024>
- Heiss, J. W., & Michael, H. A. (2014). Saltwater intrusion and aquifer structure: New insights from simple models. *Water Resources Research*, 50(6), 4978–4994. <https://doi.org/10.1002/2014WR015341>
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2010). *An introduction to geotechnical engineering* (2nd ed.). Pearson.
- Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions of the American Geophysical Union*, 14, 446–460.
- IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission). (2016). *Manual on sea-level measurement and interpretation* (Vol. 4, 5th ed.). UNESCO.
- Irham, M., Putra, I., Irwansyah, I., Setiawan, I., & Rusdi, I. (2022). The assessment of seawater intrusion on the north coast of Aceh Besar: A surface water and well water study. *Elkawanie: Journal of Islamic Science and Technology*, 8(1), 1–15. <https://doi.org/10.22373/ekw.v8i1.10476>
- Jiao, J. J., & Post, V. E. A. (2019). *Coastal hydrogeology*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108235846>
- Journal of Degraded and Mining Lands Management. (2023). Spatiotemporal analysis of groundwater level trends and determinants in Java Island, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 11(1), 4397–4410. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2023.111.4397>
- Maaddawy, T., & Soudki, K. (2008). Effectiveness of impressed current cathodic protection in mitigating corrosion of steel reinforcement in concrete structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(8), 485–493. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:8\(485\)\[23\]](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:8(485)[23])
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Mesri, G., & Godlewski, P. M. (1977). Time- and stress-dependent deformation in clays. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(GT2), 417–430.
- Nicholls, R. J., Lincke, D., Hinkel, J., Brown, S., Vafeidis, A. T., Meyssignac, B., Hanson, S. E., Merckens, J. L., & Fang, J. (2021). A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure. *Nature Climate Change*, 11(4), 338–342. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00993-z>
- Ooi, S. K., Cook, R. A., & Shenton, H. W. (2009). Behavior of reinforced high-strength concrete columns under sustained axial loading. *ACI Structural Journal*, 106(2), 141–150.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1974). *Elastic solutions for soil and rock mechanics*. Wiley.
- Pryambodo, D. G., & Supriyadi. (2021). Zonasi penurunan muka air tanah di daerah Kaligawe Semarang. *Jurnal Neutrino: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 13(2), 107–117. <https://doi.org/10.18860/neu.v13i2.8710>
- Robinson, N. I., & Gallagher, M. R. (1999). A model of ground water discharge and seawater intrusion in sloping, layered aquifers. *Ground Water*, 37(3), 353–360. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1999.tb01110.x>
- Schmertmann, J. H. (1955). The undisturbed consolidation behavior of clay. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 120, 1201–1233.

- Sitar, N., & Whittle, A. J. (2019). Foundations for civil and environmental infrastructure. In L. K. Wang & N. C. Pereira (Eds.), *Handbook of environmental engineering* (Vol. 18, pp. 1–45). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70055-1_1
- Surentu, C. S., Ticoh, J. H., & Rondonuwu, S. G. (2020). Analisis pengaruh fluktuasi muka air tanah terhadap displacement pondasi sumuran. *Jurnal Sipil Unsrat*, 6(2), 85–92. <https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/jsipil/article/view/34566>
- UNESCO. (2019). *Groundwater in coastal zones: Facing climate and human pressures*. UNESCO Publishing.
- Vitousek, S., Barnard, P. L., Fletcher, C. H., Frazer, N., Erikson, L., & Storlazzi, C. D. (2017). Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise. *Scientific Reports*, 7, 1399. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01362-7>
- Wahl, T., Haigh, I. D., Nicholls, R. J., Brown, S., Lincke, D., Hinkel, J., Arns, A., Dangendorf, S., Høyer, J. L., & Jensen, J. (2017). Understanding extreme sea levels for broad-scale coastal impact and adaptation analysis. *Nature Communications*, 8, 16075. <https://doi.org/10.1038/ncomms16075>
- World Bank. (2019). *Uncharted waters: The new economics of water scarcity and variability*. World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1294-6>
- Wulandari, D., Suwarno, & Hermawan, B. (2023). Perencanaan koefisien reduksi daya dukung tanah untuk pondasi dangkal pada wilayah fluktuasi muka air tanah tinggi. *G-Tech: Jurnal Teknik Sipil*, 7(2), 45–53.
- Zhang, Q., Li, Z., Cao, R., & Zhu, S. (2021). Saltwater intrusion in coastal aquifers of China and Southeast Asia. In S. Momtaz, N. F. Kurniawan, & A. K. Biswas (Eds.), *Emerging issues in the water–energy–food nexus in the Anthropocene* (pp. 93–109). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-73569-2_6