

ZONASI KERENTANANAN LIKUEFAKSI DI WILAYAH SELATAN PULAU TERNATE MENGGUNAKAN METODE *ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS* (AHP)

Rizqy Tasnima Fadhilah

Universitas Airlangga, Surabaya

email: rizqy.tasnima.fadhilah-2023@pasca.unair.ac.id

Abstract: *This study focuses on liquefaction vulnerability mapping in the southern part of Ternate Island, specifically in Kayu Merah, Kalumata, and Fitu villages. Using the Analytical Hierarchy Process (AHP), field data, and laboratory tests, the research identifies Kalumata as the area with the highest liquefaction potential due to its shallow groundwater table, high water content, and sandy soil composition. Previous liquefaction analyses primarily relied on empirical and probabilistic methods with significant limitations, including difficulties integrating complex factors and dependence on limited historical data. Conventional methods often fail to comprehensively capture the spatial and temporal variability of geotechnical factors. AHP was selected for its ability to overcome these limitations, enabling more flexible and systematic multi-criteria weighting compared to traditional approaches. The zoning map produced through GIS provides critical insights for disaster risk mitigation and urban planning. The research hypothesis posits that the AHP method will provide a more accurate and detailed liquefaction vulnerability assessment compared to conventional approaches. Recommendations include soil improvement techniques, liquefaction-resistant foundation designs, and long-term monitoring to enhance resilience against seismic hazards. This study serves as a foundation for future research and policy-making in geohazard-prone regions.*

Keywords: *Liquefaction vulnerability, Analytical Hierarchy Process (AHP), Disaster mitigation, Geotechnical engineering, Urban planning in seismic zones*

Abstrak: Studi ini fokus pada pemetaan kerentananan likuefaksi di bagian selatan Pulau Ternate, khususnya di desa Kayu Merah, Kalumata, dan Fitu. Dengan menggunakan Proses Hierarki Analitik (AHP), data lapangan, dan uji laboratorium, penelitian ini mengidentifikasi Kalumata sebagai wilayah dengan potensi likuefaksi tertinggi karena kedalaman muka air tanah yang dangkal, kandungan air yang tinggi, dan komposisi tanah berpasir. Penelitian sebelumnya dalam analisis likuefaksi umumnya menggunakan metode empiris dan probabilistik yang memiliki keterbatasan signifikan, seperti kesulitan mengintegrasikan faktor kompleks dan ketergantungan pada data historis yang terbatas. Metode konvensional sering kali tidak mampu menangkap variabilitas spasial dan temporal faktor geoteknik secara komprehensif. AHP dipilih karena kemampuannya dalam mengatasi kelemahan tersebut, memungkinkan pembobotan multikriteria yang lebih fleksibel dan sistematis dibandingkan metode tradisional. Peta zona yang dihasilkan melalui GIS memberikan wawasan penting untuk mitigasi risiko bencana dan perencanaan kota. Hipotesis penelitian menyatakan bahwa metode AHP akan memberikan penilaian kerentanan likuefaksi yang lebih akurat dan terperinci dibandingkan pendekatan konvensional. Rekomendasi yang diajukan meliputi teknik perbaikan tanah, desain fondasi tahan likuefaksi, dan pemantauan jangka panjang untuk meningkatkan ketahanan terhadap bahaya seismik. Studi ini menjadi dasar untuk penelitian dan pembuatan kebijakan di wilayah yang rawan geohazard di masa depan.

Kata kunci: Kerentananan likuefaksi, Proses Hierarki Analitik (AHP), Mitigasi bencana,

PENDAHULUAN

Indonesia berada pada zona seismik aktif global dengan potensi tinggi terhadap gempa dan likuefaksi karena pengaruh interaksi kompleks lempeng tektonik (Amarda & Syafriani, 2021; Qodri et al., 2024). Penelitian terdahulu belum mengembangkan metode analisis kerentanan likuefaksi berbasis Analytical Hierarchy Process (AHP) secara komprehensif di wilayah kepulauan seperti Ternate. Pemanfaatan data pra-2017 dan absennya pemetaan terbaru memperlihatkan ketimpangan antara kebutuhan aktual mitigasi dan informasi risiko terkini. Situasi ini memperkuat urgensi penelitian yang meninjau pendekatan penilaian risiko berbasis AHP guna mendukung kesiapsiagaan wilayah rentan bencana. Penggunaan AHP memungkinkan integrasi parameter geoteknik dan seismik secara sistematis untuk memetakan risiko secara presisi. Penelitian ini memberi kontribusi teoritis dalam bentuk model integratif penilaian kerentanan likuefaksi berbasis AHP yang belum banyak diterapkan pada konteks kepulauan aktif secara geologis. Secara praktis, hasilnya dapat mendukung pemerintah daerah Ternate dalam penyusunan regulasi teknis pembangunan infrastruktur tahan bencana. Rumusan masalah penelitian ini adalah bagaimana efektivitas metode AHP dalam memetakan zonasi kerentanan likuefaksi di wilayah selatan Pulau Ternate. Tujuan penelitian adalah mengembangkan model pemetaan risiko likuefaksi berbasis AHP yang komprehensif dan kontekstual. Manfaat teoritis dari penelitian ini adalah perluasan penerapan metode AHP dalam studi geoteknik kebencanaan di wilayah kepulauan. Manfaat praktisnya terletak pada penyediaan peta risiko aktual untuk mendukung pengambilan keputusan dalam mitigasi bencana dan perencanaan tata ruang.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) untuk menganalisis kerentanan likuefaksi di wilayah selatan Pulau Ternate, khususnya di Kelurahan Kayu Merah, Kalumata, dan Fitu. AHP, dikembangkan oleh Saaty (1980), memungkinkan pengambilan keputusan multi-kriteria berbasis hierarki dan bobot prioritas melalui matriks perbandingan berpasangan (Khazaii, 2016). Studi ini bersifat eksperimental dan bertujuan memetakan zonasi kerentanan likuefaksi dengan pendekatan ilmiah yang dapat direplikasi. Data primer dikumpulkan melalui pengambilan sampel tanah dengan metode bor tangan di tiga lokasi, dilanjutkan dengan pengujian laboratorium untuk mengukur parameter fisik dan mekanik tanah sesuai standar ASTM, termasuk uji geser langsung (D3080), distribusi ukuran butir (D422), kadar air, berat jenis, berat volume, porositas, dan angka pori.

Kriteria utama dalam analisis AHP mencakup muka air tanah, kadar air, litologi, kohesi, dan porositas. Masing-masing kriteria dikaitkan langsung dengan kerentanan likuefaksi berdasarkan prinsip geoteknik: misalnya, muka air tanah dangkal meningkatkan tekanan air pori dan menurunkan tegangan efektif selama gempa, sedangkan litologi berbutir halus seperti pasir dan lanau lebih rentan terhadap likuefaksi dibanding lempung. Matriks perbandingan berpasangan disusun berdasarkan skala 1–9, dan bobot kriteria dihitung melalui *eigenvector*. Konsistensi analisis dinilai menggunakan *Consistency Ratio* (CR), yang dianggap valid jika $CR < 0,1$. Hasil integrasi analisis AHP dengan data spasial menggunakan GIS menghasilkan peta zonasi kerentanan likuefaksi yang mengidentifikasi wilayah berisiko tinggi, sedang, dan rendah, serta memberikan dasar ilmiah untuk mitigasi bencana dan perencanaan tata ruang yang berbasis data.

HASIL DAN PEMBAHASAN**Pemetaan Muka Air Tanah**

Pada studi kasus pemetaan daerah rawan potensi likuefaksi, dilakukan pemetaan muka air tanah pada lokasi penelitian sebanyak 45 titik. Pengukuran

ini bertujuan memperoleh data representatif terkait kondisi hidrogeologi untuk analisis risiko geoteknik. Tabel berikut menunjukkan hasil pengukuran tinggi muka air tanah pada tiap titik.

Tabel 1 Pola pembebanan pada link dan portal EBF

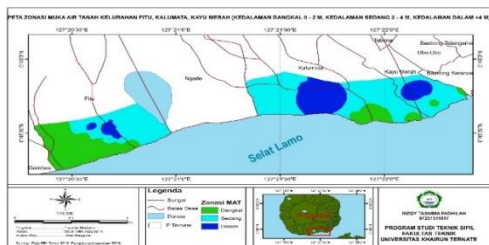
No	Segments	Length (km)	Tinggi Muka Air Tanah
Kayu Merah	127.3731	0.7634	1.20
Kayu Merah	127.3713	0.7629	2.65
Kayu Merah	127.3700	0.7632	5.30
Kayu Merah	127.3711	0.7624	2.30
Kayu Merah	127.3706	0.7618	1.25
Kayu Merah	127.3702	0.7628	4.20
Kayu Merah	127.3690	0.7626	5.85
Kayu Merah	127.3692	0.7613	2.75
Kalumata	127.3690	0.7603	1.45
Kalumata	127.3519	0.7602	1.40
Kalumata	127.3510	0.7610	2.70
Kalumata	127.3512	0.7598	1.30
Kalumata	127.3508	0.7607	2.00
Kalumata	127.3661	0.7604	1.55
Kalumata	127.3654	0.7609	1.40
Kalumata	127.3651	0.7597	0.57
Kalumata	127.3647	0.7599	2.00
Kalumata	127.3640	0.7613	2.90
Kalumata	127.3643	0.7604	1.70
Kalumata	127.3628	0.7618	6.30
Kalumata	127.3621	0.7618	6.10
Fitu	127.3463	0.7571	1.00
Fitu	127.3455	0.7568	0.75
Fitu	127.3458	0.7583	2.20
Fitu	127.3455	0.7573	2.45
Fitu	127.3453	0.7580	8.70
Fitu	127.3451	0.7575	2.60
Fitu	127.3452	0.7572	1.10
Fitu	127.3447	0.7577	1.83
Fitu	127.3445	0.7584	6.25
Fitu	127.3442	0.7577	1.96
Fitu	127.3443	0.7567	0.50
Fitu	127.3438	0.7574	1.47
Fitu	127.3434	0.7573	1.60
Fitu	127.3434	0.7580	2.25
Fitu	127.3433	0.7586	2.70
Fitu	127.3426	0.7589	3.65
Fitu	127.3432	0.7589	6.31
Fitu	127.3420	0.7586	2.15
Fitu	127.3409	0.7582	0.30
Fitu	127.3403	0.7585	0.90

Fitu	127.3402	0.7579	0.20
Fitu	127.3427	0.7580	0.22
Fitu	127.3394	0.7578	1.18
Fitu	127.3395	0.7572	0.40



Gambar 1 Peta Lokasi Pengukuran Muka Air Tanah Pengambilan Sampel

Peta lokasi pengukuran (Gambar 1) memvisualisasikan distribusi titik pengambilan data yang dikembangkan berbasis GIS. Peta ini tak sekadar bersifat ilustratif, tetapi menjadi landasan analitis untuk mengevaluasi potensi likuefaksi yang dipengaruhi oleh kedalaman air tanah, litologi, dan topografi lokal. Integrasi skala spasial, orientasi geografi, dan data hidrogeologi meningkatkan ketepatan informasi yang mendasari kebijakan mitigasi risiko.



Gambar 2 Peta zonasi muka air tanah daerah penelitian

Selanjutnya, peta zonasi muka air tanah (Gambar 2) membagi wilayah menjadi tiga kategori: dangkal (0–2 m), sedang (2–4 m), dan dalam (>4 m). Wilayah dengan muka air dangkal

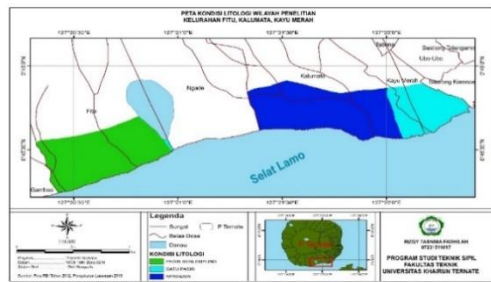
memiliki potensi likuefaksi tinggi karena kejenuhan tanah yang besar saat terjadi guncangan seismik. Sebaliknya, muka air dalam memberikan kestabilan lebih terhadap tekanan siklik dan hidrostatik. Pemahaman hubungan antara kondisi tanah dan air tanah menjadi krusial dalam perencanaan infrastruktur tahan gempa serta pengelolaan air tanah berkelanjutan (Hossain et al., 2021; Idriss & Boulanger, 2008). Kajian ini mendukung pendekatan akademis dan kebijakan berbasis data dalam menghadapi risiko geohazard secara ilmiah dan faktual.

Pengambilan Sampel dan Uji Mekanika Tanah

merupakan parameter kunci dalam menilai potensi likuefaksi di wilayah rawan gempa karena keduanya memengaruhi kestabilan tanah terhadap gaya eksternal, terutama tekanan air pori yang meningkat selama gempa, sebagaimana ditunjukkan oleh hasil uji geser langsung pada sampel tanah dari Kayu Merah, Kalumata, dan Fitu yang menunjukkan nilai kohesi tergolong rendah (0,112–0,179 kg/cm²) dan sudut geser dalam sempit (23°–28°), sehingga wilayah ini tergolong rentan terhadap penurunan daya dukung tanah saat terjadi gempa (Hidajat et al., n.d.). Berdasarkan Tabel 2, Kalumata memiliki sudut geser terbesar tetapi kohesi terendah, menunjukkan kekuatan geser dominan dari gesekan partikel bukan ikatan antarpartikel.

Tabel 2 Hasil Uji Direct Shear

No	Sampel	Kohesi(C) (kg/cm ²)	Sudut Geser (φ)
1	Kayu Merah	0.179	24
2	Kalumata	0.119	28
3	Fitu	0.112	23



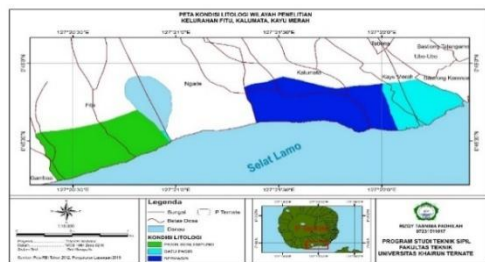
Gambar 3 Peta zonasi nilai kohesi kelurahan kayu merah, kalumata, fitu

Gambar 3 menunjukkan distribusi nilai kohesi yang rendah di seluruh lokasi penelitian, menandakan kekuatan ikatan antarpartikel tanah yang lemah dan mendukung risiko likuefaksi tinggi.

Berdasarkan Tabel 3, Kalumata merupakan wilayah dengan kandungan pasir dominan dan kadar lanau paling rendah, mempertegas kerentanannya terhadap likuefaksi.

Tabel 3 Hasil uji analisa saringan

No	Sampel	Kerikil	Pasir	Lempung/Lanau
1	Kayu Merah	16.23	73.57	10.20
2	Kalumata	2.00	77.74	20.26
3	Fitu	4.32	58.96	36.72



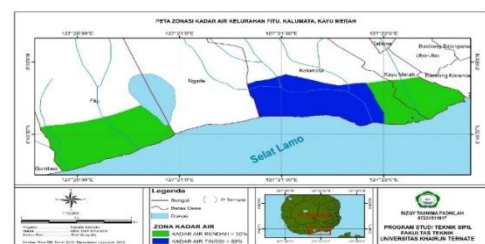
Gambar 4 Peta kondisi litologi daerah penelitian

Gambar 4 memperlihatkan kondisi litologi yang didominasi oleh pasir dan lanau, mempertegas kemungkinan terjadinya likuefaksi pada lapisan tanah permukaan di area penelitian.

Berdasarkan Tabel 4, Kalumata memiliki nilai-nilai fisik tertinggi yang mendukung hipotesis bahwa wilayah ini paling rentan terhadap likuefaksi.

Tabel 4 Data uji tanah

No	Sampel	Kadar Air (w) (%)	Berat Jenis (Gs)	Berat Volume Tanah (Y) (gr/cm ³)	Berat Volume Kering (Yd) (gr/cm ³)	Porositas (n) (%)	Angka Pori (e)
1	Kayu Merah	29.44	2.38	1.80	1.39	41.57	0.71
2	Kalumata	61.83	2.48	1.27	0.79	68.33	2.16
3	Fitu	31.64	2.46	1.50	1.14	53.60	1.16



Gambar 5 Peta zonasi kadar air daerah penelitian

Gambar 5 menggambarkan distribusi kadar air yang tertinggi berada di Kalumata, sehingga daerah ini menjadi fokus utama dalam kajian risiko likuefaksi.



Gambar 6 Peta zonasi porositas daerah penelitian

Gambar 6 menunjukkan zona Kalumata sebagai daerah dengan porositas tertinggi, yang memungkinkan peningkatan tekanan air pori yang signifikan selama peristiwa gempa bumi dan memperbesar potensi likuefaksi.

Penentuan Zonasi Potensi Likuefaksi Menggunakan Metode Statistika *Analytic Hierarchy Process*



Gambar 7 Flow chart *Analytical Hierarchy Process*

Mendefinisikan Masalah

Mendefinisikan masalah dan menentukan solusi yang diinginkan. Menentukan tujuan, kriteria, dan alternative.

Tujuan : Menzonasi Potensi Rawan Likuefaksi di wilayah penelitian

Kriteria: Muka Air Tanah, Kadar Air, Litologi, Kohesi, Porositas

Alternative: Kayu Merah, Kalumata, Fitu

Membuat matriks berpasangan

Langkah berikutnya dalam AHP adalah dilakukan melalui penyusunan matriks perbandingan berpasangan antar kriteria, yang mencerminkan hubungan tingkat pengaruh relatif masing-masing faktor terhadap potensi likuefaksi. Berdasarkan analisis, muka air tanah dan kadar air dianggap memiliki pengaruh

yang setara dan lebih besar dibandingkan litologi, kohesi, dan porositas, yang memiliki pengaruh relatif setara satu sama lain. Skala penilaian ini menghasilkan matriks evaluasi yang digunakan untuk menentukan bobot relatif kriteria.

Tabel 5 Matriks perbandingan berpasangan antar kriteria

Kriteria	Muka Air Tanah (MAT)	Kadar Air (W)	Litologi (L)	Kohesi (C)	Porositas (P)
MA	1	1	3	3	3
W	1	1	3	3	3
L	1/3	1/3	1	1	1
C	1/3	1/3	1	1	1
P	1/3	1/3	1	1	1
Ju	3	3	9	9	9

Analisis lokasi menunjukkan bahwa Kalumata memiliki muka air tanah paling dangkal dibandingkan Kayu Merah dan Fitu, dengan skala perbandingan masing-masing 7 dan 5, serta Fitu sedikit lebih dangkal dari Kayu Merah (skala 3). Penilaian ini dikonversikan dalam matriks evaluasi untuk kriteria muka air tanah.

Tabel 6 Matriks perbandingan berpasangan Alternative terhadap kriteria MAT

Alternatif	Kayu Merah	Kalumata	Fitu
Kayu Merah	1	1/7	1/3
Kalumata	7	1	5
Fitu	3	1/5	1
Jumlah	11	1.343	6.33

Hasil laboratorium mengungkapkan kadar air tertinggi terdapat di Kalumata (61,83%), diikuti Fitu (31,64%) dan Kayu Merah (29,44%), yang berdampak pada kerentanan likuefaksi. Skala perbandingan 7 untuk Kalumata terhadap Kayu Merah dan 5 terhadap Fitu menunjukkan dominasi kejenuhan. Fitu dibanding Kayu

Merah memiliki skala 3. Matriks perbandingan berpasangan alternatif terhadap kriteria kadar air disajikan dalam Tabel 7 berikut.

Tabel 7 Matriks perbandingan berpasangan alternative terhadap kriteria kadar air

Alternative	Kayu Merah	Kalumata	Fitu
Kayu Merah	1	1/7	1/3
Kalumata	7	1	5
Fitu	3	1/5	1
Jumlah	11	1.343	6.33

Komposisi litologi menunjukkan Kalumata memiliki dominasi pasir tertinggi (77,74%), disusul Kayu Merah (73,57%) dan Fitu (58,96%), yang berdampak pada kehilangan kekuatan geser tanah saat gempa. Perbandingan litologi antar lokasi dilakukan berdasarkan proporsi pasir. Perhitungan ini menghasilkan matriks perbandingan berpasangan yang menjadi dasar dalam menentukan bobot prioritas masing-masing alternatif terhadap kriteria litologi, sebagaimana disajikan dalam Tabel 8.

Tabel 8 Matriks perbandingan berpasangan alternative terhadap kriteria litologi

Alternative	Kayu Merah	Kalumata	Fitu
Kayu Merah	1	1/3	5
Kalumata	3	1	7
Fitu	1/2	1/7	1
Jumlah	4.2	1.476	13

Nilai kohesi tertinggi ditemukan di Kayu Merah (0,179 kg/cm²), lalu Kalumata (0,119 kg/cm²), dan Fitu (0,112 kg/cm²). Nilai ini menunjukkan variasi daya dukung terhadap beban siklik, di mana Kayu Merah paling stabil, sedangkan Fitu paling rentan terhadap likuefaksi. Skala perbandingan disusun sesuai perbedaan nilai kohesi tersebut.

Matriks perbandingan berpasangan berikut menggambarkan hubungan relatif antar alternatif berdasarkan kriteria kohesi, dengan bobot yang mencerminkan tingkat perbedaan daya tahan tanah terhadap likuefaksi.

Tabel 9 Matriks Perbandingan Berpasangan Alternative Terhadap Kriteria Kohesi

Alternative	Kayu Merah	Kalumata	Fitu
Kayu Merah	1	1/5	1/7
Kalumata	5	1	1/3
Fitu	7	3	1
Jumlah	13	4.2	1.476

Porositas tertinggi terdapat di Kalumata (68,33%), diikuti Fitu (53,60%) dan Kayu Merah (41,57%). Tingginya porositas meningkatkan kerentanan terhadap likuefaksi karena lemahnya tahanan terhadap tekanan air pori. Kalumata memiliki skala perbandingan 7 terhadap Kayu Merah dan 5 terhadap Fitu, sedangkan Fitu terhadap Kayu Merah adalah 3. Perbandingan ini kemudian dikonversi ke dalam bentuk matriks perbandingan berpasangan yang akan digunakan dalam analisis AHP untuk menentukan bobot prioritas masing-masing alternatif dalam menentukan tingkat kerentanan likuefaksi berdasarkan faktor porositas.

Tabel 10 Matriks Perbandingan Berpasangan Alternative Terhadap Kriteria Porositas

Alternative	Kayu Merah	Kalumata	Fitu
Kayu Merah	1	1/7	1/3
Kalumata	7	1	5
Fitu	3	1/2	1
Jumlah	11	1.343	6.33

Menghitung Vektor Eigen Normalisasi (EVN)

Proses penentuan bobot relatif dalam analisis hierarki dilakukan melalui

perhitungan eigen vector normalisasi dari matriks perbandingan berpasangan. Setelah nilai pada tiap sel dibagi dengan total kolom untuk memperoleh normalisasi matriks, dilakukan penjumlahan nilai tiap baris dan pembagian dengan jumlah kriteria guna menghasilkan eigen vector normalisasi

(EVN).

Tabel 11 menunjukkan hasil EVN antar kriteria, dengan kriteria MAT dan W memiliki bobot tertinggi (EVN = 0.333), menandakan tingkat kepentingan yang seimbang terhadap potensi likuefaksi, sementara kriteria L, C, dan P masing-masing memiliki EVN sebesar 0.111.

Tabel 11 Eigen Vector Normalisasi Antar Kriteria

Kriteria	MAT	W	L	C	P	TOTAL	EVN
MAT	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	1.667	0.333
W	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	1.667	0.333
L	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.556	0.111
C	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.556	0.111
P	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.556	0.111
JUMLAH	1	1	1	1	1		

Kriteria muka air tanah diolah untuk menilai pengaruh kedalamannya terhadap kerentanan likuefaksi. Kalumata memiliki EVN tertinggi (0.724), menunjukkan muka air tanah paling dangkal dan potensi likuefaksi tertinggi, sedangkan Kayu Merah memiliki EVN terendah (0.083), mencerminkan kerentanan lebih rendah.

Tabel 12 Eigen Vector Normalisasi Alternative Terhadap Kriteria Muka Air Tanah

Alternatif	Kayu Merah	Kalumata	Fitu	EVN
Kayu Merah	0.091	0.106	0.0	0.0
Kalumata	0.636	0.745	0.7	0.7
Fitu	0.273	0.149	0.1	0.1
	1	1	1	

Kriteria kadar air dianalisis untuk mengetahui tingkat kejenuhan tanah. Kalumata kembali menempati peringkat pertama (EVN = 0.724), menunjukkan kejenuhan tinggi dan tekanan air pori besar saat gempa. Kayu Merah (EVN =

0.083) menunjukkan tanah yang lebih stabil secara seismik.

Tabel 13 Eigen Vector Normalisasi Alternative Terhadap Kriteria Kadar Air

Alternatif	Kayu Merah	Kalumata	Fitu	EVN
Kayu Merah	0.091	0.106	0.05	0.08
Kalumata	0.636	0.745	0.78	0.72
Fitu	0.273	0.149	0.15	0.19
	1	1	1	

Penilaian litologi mengungkapkan Kalumata sebagai lokasi dengan fraksi pasir tinggi (EVN = 0.643), meningkatkan kerentanan likuefaksi. Fitu memiliki EVN terendah (0.074), menandakan material lebih kohesif dan lebih stabil terhadap gempa.

Tabel 14 Eigen Vector Normalisasi Alternative Terhadap Kriteria Litologi

Alternatif	Kayu Merah	Kalumata	Fitu	EVN
Kayu Merah	0.238	0.22	0.38	0.28
Kalumata	0.714	0.67	0.53	0.64

Fitu	0.048	0.09	0.07	0.07
	1	1	1	

Analisis terhadap kohesi tanah menunjukkan Fitu memiliki kohesi tertinggi (EVN = 0.643), menandakan kekuatan internal tanah lebih tinggi terhadap pergeseran. Sebaliknya, Kayu Merah memiliki kohesi terendah (EVN = 0.074), berisiko lebih tinggi terhadap kegagalan struktur tanah saat gempa.

Tabel 15 Eigen Vector Normalisasi Alternative Terhadap Kriteria Kohesi

Alternati ve	Kayu Mera h	Kalu - mata	Fitu	EV N
Kayu Merah	0.077	0.04	0.09	0.07
Kalumata	0.385	0.23	0.22	0.28
Fitu	0.538	0.71	0.67	0.64
	1	1	1	

Evaluasi porositas menunjukkan Kalumata kembali unggul (EVN = 0.724), mencerminkan kemampuan tanah menyimpan air lebih tinggi, sehingga potensi peningkatan tekanan air pori selama gempa lebih besar. Kayu Merah memiliki porositas rendah (EVN = 0.083), dengan risiko likuefaksi lebih kecil.

Tabel 16 Eigen Vector Normalisasi Alternative Terhadap Kriteria Porositas

Alternati ve	Kayu Mera h	Kalu - mata	Fitu	EV N
Kayu Merah	0.091	0.10	0.05	0.08
Kalumata	0.636	0.74	0.78	0.72
Fitu	0.273	0.14	0.15	0.19
	1	1	1	

Menghitung Rasio Konsistensi

Rasio konsistensi merupakan indikator utama untuk mengevaluasi keandalan matriks perbandingan berpasangan dalam metode Analytical Hierarchy Process (AHP), khususnya dalam konteks analisis kerentanan likuefaksi. Konsistensi ini sangat penting karena ketidakkonsistenan dapat menyebabkan bias dalam pembobotan kriteria yang selanjutnya mengarah pada keputusan pemetaan zonasi risiko yang tidak akurat. Nilai eigen maksimum (λ_{maks}) menjadi dasar perhitungan, yang mencerminkan dominasi relatif antar kriteria dan diuji terhadap jumlah total parameter agar diketahui tingkat konsistensinya. Semakin mendekati jumlah kriteria, semakin tinggi konsistensinya. Dalam penelitian ini, nilai λ_{maks} disajikan pada Tabel 17 berikut:

Tabel 17 Nilai Eigen Maksimal

Parameter	Result
Muka Air Tanah (MAT)	5
Kadar Air (W)	5
Litologi (L)	5
Kohesi (C)	5
Porositas (P)	5
Total	25
λ	5

Menghitung Indeks Konsistensi (CI)

$$CI = (\lambda - n) / (n - 1) \quad (1)$$

$$= (5 - 5) / (5 - 1) = 0$$

Nilai CI sebesar 0 menunjukkan konsistensi sempurna antar kriteria. Selanjutnya, rasio konsistensi (CR) dihitung menggunakan nilai Random Index (RI) sesuai jumlah parameter yang dibandingkan. Berdasarkan Tabel 18, RI untuk $n = 5$ adalah 1,12. Nilai CR yang lebih kecil dari 0,1 membuktikan bahwa struktur perbandingan kriteria dalam AHP ini sangat konsisten, sehingga hasil pembobotan valid untuk digunakan dalam pemetaan zonasi kerentanan likuefaksi secara ilmiah dan dapat dipertanggungjawabkan (Saaty, 1980).

$$CR = CI / RI \quad (2)$$

$$= 0 / 1,12 = 0$$

Tabel 18 Nilai Eigen Maksimal

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R	0	0	0.5	0.9	1.1	1.2	1.3	1.4	1.4	1.4	1.5	1.4	1.5	1.5	1.5

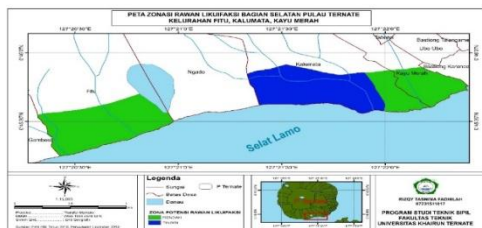
Penentuan Kela Kerentanan Likefaksi

Penentuan tingkat kerentanan likuefaksi dilakukan dengan pendekatan analitis berbasis perhitungan vektor eigen yang telah dinormalisasi, mengacu pada lima parameter geoteknik utama: muka air tanah (MAT), kadar air (W), litologi (L), kohesi (C), dan porositas (P). Nilai maksimum dan minimum tiap kriteria dihitung untuk memperoleh rentang nilai, yang selanjutnya digunakan dalam klasifikasi dua tingkat kerentanan: tinggi dan rendah. Zonasi ini ditetapkan berdasarkan rentang klasifikasi yang diturunkan dari data numerik masing-masing parameter.

Hasil perhitungan yang dirangkum dalam Tabel 19 memperlihatkan bahwa Kelurahan Kalumata memiliki nilai dominan tinggi pada empat dari lima kriteria (MAT, W, L, dan P), sehingga dikategorikan sebagai wilayah dengan kerentanan tinggi terhadap likuefaksi. Sebaliknya, Kayu Merah dan Fitu termasuk dalam klasifikasi kerentanan rendah pada sebagian besar parameter, meskipun Fitu menunjukkan nilai kohesi tinggi yang mengindikasikan potensi kerentanan lokal terhadap likuefaksi di aspek tersebut. Temuan ini mendukung pembuatan peta zonasi risiko likuefaksi sebagai dasar mitigasi bencana dan perencanaan tata ruang berbasis risiko

Tabel 19 Penentuan Kelas Kerentanan Likuefaksi

	MAT	W	L	C	P
Kayu Merah	0.083	0.083	0.283	0.074	0.083
Kalumata	0.724	0.724	0.643	0.283	0.724
Fitu	0.193	0.193	0.074	0.643	0.193
MAX	0.724	0.724	0.643	0.643	0.724
MIN	0.083	0.083	0.074	0.074	0.083
Nilai Kisaran	0.320	0.320	0.285	0.285	0.320
Klasifikasi Kerentanan Tinggi	0,404 - 0,724	0,404 - 0,724	0,359 - 0,644	0,359 - 0,644	0,404 - 0,724
Klasifikasi Kerentanan Rendah	0,083 - 0,403	0,083 - 0,403	0,074 - 0,359	0,074 - 0,359	0,083 - 0,403
Kerentanan Tinggi	Kalumata	Kalumata	Kalumata	Fitu	Kalumata
Kerentanan Rendah	Kayu Merah, Fitu	Kayu Merah, Fitu	Kayu Merah, Fitu	Kayu Merah, Kalumata	Kayu Merah, Fitu

**gambar 8 Peta zonasi likuefaksi bagian selatan pulau ternate**

Peta zonasi pada Gambar 8 mengilustrasikan distribusi spasial kerentanan di bagian selatan Pulau Ternate. Meski hasil awal memberikan gambaran bermanfaat, keterbatasan utama penelitian ini terletak pada jumlah sampel tanah yang terbatas, yakni satu per kelurahan, yang berisiko mengurangi representativitas kondisi geoteknik secara

menyeluruh. Untuk meningkatkan akurasi dan cakupan spasial, disarankan bahwa studi lanjutan menggunakan lebih banyak titik sampel serta menerapkan metode interpolasi spasial dan geostatistik (McBratney et al., 2003). Validasi tambahan ini penting untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam mitigasi risiko geologi secara komprehensif dan berbasis bukti.

SIMPULAN

Penilaian risiko pulau Ternate untuk peristiwa likuefaksi menunjukkan bahwa Kalumata memiliki risiko tertinggi di antara tiga wilayah yang dinilai dan ini disebabkan oleh permukaan air tanah yang dangkal, kandungan air tanah yang tinggi, dan litologi berpasir. Berkaitan dengan zona risiko yang relatif lebih rendah, Kayu Merah dan Fitu dikategorikan dalam kumpulan yang sama. Penilaian menunjukkan bahwa sebagian besar zona rentan likuefaksi sebelumnya kini juga merupakan bagian dari Ternate dan sangat cocok untuk digunakan dalam perencanaan dan pengelolaan pekerjaan mitigasi risiko. Perencanaan untuk konstruksi kurang komprehensif karena lokasi-lokasi ini masih sangat kurang berkembang. Area yang lebih besar dari zona rentan likuefaksi menunjukkan bahwa struktur yang dibangun di area ini telah direncanakan atau dikembangkan tanpa penilaian risiko yang komprehensif terkait dengan penggalian terowongan, penyelaman caisson, atau penggalian dalam. Secara keseluruhan, perencanaan struktural kurang memadai sehingga lebih banyak pekerjaan harus diarahkan ke zona-zona ini.

DAFTAR PUSTAKA

Adii, J., Kusumawati, D., Falevi, C., & Sahara, D. (2021). Maluku Sea Plate Faulting Regime Analysis: A Preliminary Study. *IOP Conference*

Series: Earth and Environmental Science, 873. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/873/1/012100>

Amarda, M. P., & Syafriani, -. (2021). Analysis of Seismic Hazards and Vulnerability throughout Indonesia Based on 1999-2003 Earthquake Data Using the Microseismic Method. *PILLAR OF PHYSICS*. <https://doi.org/10.24036/11929171074>

Anggara, V., Fatnanta, F., & Yusa, M. (2020). *Analisis Likuefaksi Berdasarkan Data CPT Untuk Perancangan Pondasi Di Pesisir Pantai Kabupaten Kulon Progo DIY*. 16, 77–90. <https://doi.org/10.25077/jrs.16.2.77-90.2020>

Azizah, H., Fatnanta, F., & Yusa, M. (2022). Analisis Potensi Likuefaksi Menggunakan Data CPT (Cone Penetration Test) di Teluk Bintuni Papua Barat. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sipil*. <https://doi.org/10.56208/jtrs.v1.i2-hal44-53>

Bahi, F., Bensaibi, M., & Draidi, B. M. (2024). Estimation of the liquefaction potential index using analytical hierarchy process (AHP) method. *STUDIES IN ENGINEERING AND EXACT SCIENCES*. <https://doi.org/10.54021/seesv5n2-037>

Bozzoni, F., Boni, R., Conca, D., Meisina, C., Lai, C., & Zuccolo, E. (2021). *A Geospatial Approach for Mapping the Earthquake-Induced Liquefaction Risk at the European Scale*. 11, 32. <https://doi.org/10.3390/GEOSCIENCES11010032>

Chang, W.-J., Ni, S., Huang, A., Huang, Y., & Yang, Y. Z. (2011). Geotechnical reconnaissance and liquefaction analyses of a liquefaction site with silty fine sand in Southern Taiwan. *Engineering Geology*, 123, 235–245. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2011.09.003>

- Dung, N. B., Long, N. Q., Goyal, R., An, D. T., & Minh, D. T. (2021). The Role of Factors Affecting Flood Hazard Zoning Using Analytical Hierarchy Process: A Review. *Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00235-4>
- Ervita, K., Marfai, M., Khakhim, N., & Mei, E. (2019). *Tsunami susceptibility mapping in the coastal area of Ternate Island*. 11372, 113721. <https://doi.org/10.1117/12.2541843>
- Hall, R. (1987). Plate boundary evolution in the Halmahera region, Indonesia. *Tectonophysics*, 144, 337–352. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(87\)90301-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(87)90301-5)
- Hanindya, K., Makrup, L., Widodo, .., & Paulus, R. (2023). Deterministic Seismic Hazard Analysis to Determine Liquefaction Potential Due to Earthquake. *Civil Engineering Journal*. <https://doi.org/10.28991/cej-2023-09-05-012>
- Hidajat, W. K., Fahrudin, & Mardhiko, A. S. (n.d.). *PEMETAAN ZONA KERENTANAN DAERAH POTENSI LIKUIFAKSI AKIBAT GEMPABUMI TEKTONIK DAERAH PLERET DAN SEKITARNYA, KABUPATEN BANTUL, PROPINSI DAERAH ISTIMEWA YOGYAKARTA*.
- Hu, J., Tan, Y., & Zou, W. (2021). Key factors influencing earthquake-induced liquefaction and their direct and mediation effects. *PLoS ONE*, 16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246387>
- Ilham, M., & Putra, D. (2024). Integration of Fuzzy Sets, AHP, and TOPSIS Methods for Estimation of Liquefaction Potential Zones in Wates Groundwater Basin, Kulon Progo, Special Region of Yogyakarta. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1378/1/012006>
- Khazaii, J. (2016). *Analytical Hierarchy Process (AHP)*. 73–85. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33328-1_9
- Lessy, M., Lassa, J., & Zander, K. (2024). Understanding Multi-Hazard Interactions and Impacts on Small-Island Communities: Insights from the Active Volcano Island of Ternate, Indonesia. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su16166894>
- Lessy, M., Nagu, N., & Hadi, F. N. (2024). Toward Resilience City: Potential Hazards and Scenario for Ternate Island, North Maluku. *Techno: Jurnal Penelitian*. <https://doi.org/10.33387/tjp.v13i1.7329>
- Nakao, K., Inazumi, S., Takahashi, T., & Nontananandh, S. (2022). Numerical Simulation of the Liquefaction Phenomenon by MPSM-DEM Coupled CAES. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14127517>
- Natawidjaja, D., Daryono, M., Prasetya, G., Udrek, Liu, P., Hananto, N., Kongko, W., Triyoso, W., Puji, A., Meilano, I., Gunawan, E., Supendi, P., Pamumpuni, A., Irsyam, M., Faizal, L., Hidayati, S., Sapiie, B., Kusuma, M., & Tawil, S. (2020). The 2018 Mw7.5 Palu ‘supershear’ earthquake ruptures geological fault’s multi-segment separated by large bends: Results from integrating field measurements, LiDAR, swath bathymetry, and seismic-reflection data. *Geophysical Journal International*, 224, 985–1002. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa498>
- Nengah, I., & Basoka, A. W. (2019). The potential of liquefaction disasters based on the geological, CPT, and borehole data at Southern Bali Island. *Journal of Applied Engineering Science*. <https://doi.org/10.5937/jaes17-20794>
- Nourzadeh, D., Mortazavi, P., Ghalandarzadeh, A., Takada, S., & Ahmadi, M. (2019). Performance assessment of the Greater Tehran Area buried gas distribution pipeline

-
- network under liquefaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.
<https://doi.org/10.1016/J.SOILDYN.2019.05.033>
- Pajrin, U., Mubarak, A., Basuki, J., Zakaria, Z., Sophian, R., & Khoirullah, N. (2019). Liquefaction Potential Based on Geology and Geotechnical Data on Sanana Region, Sula Island Regency, North Maluku, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 396.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/396/1/012038>
- Qodri, M., Anggorowati, V., & Mase, L. (2024). Cone Penetration Test-based Analysis for Shallow Liquefaction Potential Evaluation Due to Maximum Credible Earthquakes of Cimandiri Fault in Sukabumi, West Java, Indonesia. *Iraqi Geological Journal*.
<https://doi.org/10.46717/igj.57.1f.1ms-2024-6-10>
- Rakhman, H. K., Ismanti, S., & Aditya, T. (2024). Liquefaction potential analysis based on standard penetration test in coastal area (Case study: Loh Buaya, Rinca Island, Indonesia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1314. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1314/1/0121>

