

Kajian Kegempaan Lanjutan Wilayah Palu, dan Aplikasinya Pada Perencanaan Infrastruktur Kelautan

Adecar Nugroho¹, Yulisa Sariska², Nurisa³, Titia Yudha Sarah Puspita⁴

Witteveen Bos Indonesia^{1,2,3}, Kementerian Pekerjaan Umum⁴
Adecar.nugroho@witteveenbos.com¹, Yulisa Sariska@witteveenbos.com², Nurisa@witteveenbos.com³,
titiayudha@pu.go.id

Abstrak— Peristiwa seismik pada akhir September 2018 yang memicu tsunami menyebabkan kerusakan besar di tiga pelabuhan di Sulawesi Tengah, dimana pelabuhan pelabuhan tersebut memegang peranan penting bagi aktifitas ekonomi daerah. Saat ini pelabuhan pelabuhan tersebut tetap beroperasi walaupun dengan keadaan yang kurang layak. Adapun setelah kejadian tersebut, Pemerintah mengeluarkan Peta Zona Rawan Bencana yang mengindikasikan bahwa daerah tersebut dikategorikan sebagai Zona terlarang (untuk kegiatan konstruksi). Hal ini tentunya berdampak pada kegiatan perencanaan rehabilitasi dan pengembangan daerah tersebut pada umumnya, dan rehabilitasi dan pengembangan infrastruktur kelautan pada khususnya. Dengan pemahaman kondisi setempat dimana daerah tersebut berada dalam jarak yang sangat dekat dengan sesar aktif, maka tim penulis melakukan study lanjutan untuk dapat memberikan rekomendasi beban gempa dan dampak yang harus di pertimbangkan dalam perencanaan infrastruktur. Dengan studi ini diharapkan dapat memberikan jalan tengah yang menjembatani antara perekonomian daerah, kesejahteraan masyarakat dan keselamatan dengan kaitannya terhadap pemenuhan regulasi atau acuan pemerintah.

Kata kunci—Kegempaan, Tsunami, Pengembangan daerah, Palu, Sulawesi Tengah, Infrastruktur Laut, Gempa Palu

Abstract— The seismic event at the end of September 2018 that triggered the tsunami caused major damage to three ports in Central Sulawesi, where these ports play an important role for regional economic activities. At present the port continues to operate even though it is in an unfavorable condition.

Meanwhile, after the incident, the Government issued a Disaster Prone Zone Map which indicated that the area was categorized as a forbidden zone (for construction activities). This certainly has an impact on planning activities for the rehabilitation and development of the area in general, and the rehabilitation and development of marine infrastructure in particular.

With an understanding of local conditions where the area is very close to an active fault, the team of authors conducted a follow-up study to be able to provide recommendations for earthquake loads and impacts that must be considered in infrastructure planning. With this study, it is hoped that it can provide a middle way that bridges between the regional economy, community welfare and safety in relation to fulfilling regulations or government guidelines.

Key Word —Seismic, Tsunami, Land Development, Palu, Central Sulawesi, Coastal Infrastructure, Palu Earthquake

I. PENDAHULUAN

Gempa bumi dan tsunami Teluk Palu pada akhir September 2018 adalah salah satu peristiwa bencana alam terbesar di tahun 2018 yang mengguncang Indonesia. Peristiwa ini menyebabkan banyak korban jiwa dan kerusakan

pada fasilitas yang penting untuk mendukung kelanjutan perekonomian. Salah satu fasilitas umum yang sangat terdampak oleh bencana ini adalah pelabuhan yang terletak di Teluk Palu, yang memiliki peranan penting dalam menggerakkan perekonomian di Provinsi Sulawesi Tengah.

Pemerintah Indonesia berupaya melakukan pemulihan pasca bencana termasuk pemulihan fasilitas publik di Provinsi Sulawesi Tengah. Dalam rangka mempersiapkan pengembangan pelabuhan yang baik dan memenuhi syarat untuk kelancaran operasional dan keselamatan pelayaran, maka diperlukan penyusunan dokumen desain pelabuhan.

Pada analisa gempa untuk Pelabuhan di Indonesia pada umumnya, parameter kegempaan terkait desain geoteknikal dan interaksi tanah dan struktur menjadi aspek yang sangat penting dalam tahap evaluasi dan desain. Acuan yang digunakan adalah peraturan gempa SNI 1726-2019 “Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-gedung” dan SNI 8460:2017 “Persyaratan Perancangan Geoteknik”.

Evaluasi kegempaan/seismik didefinisikan sebagai metodologi berdasarkan peraturan yang berlaku untuk mengevaluasi kapasitas eksisting dan kinerja suatu struktur bangunan terhadap tingkat “Tujuan Kinerja”/Performance Objective yang ditentukan. Penentuan “Tujuan Kinerja” ini juga dapat digunakan pada desain struktur bangunan baru.

“Tujuan dan Tingkat Kinerja” terkait pada suatu kriteria penerimaan/Acceptance Criteria yang telah didefinisikan pada peraturan yang berlaku. Kriteria penerimaan akan mempengaruhi nilai:

- Defleksi dan deformasi struktur maupun tanah.
- Batas minimum kekuatan struktur yang diperlukan untuk menahan beban luar.
- Perhitungan deformasi inelastik.
- Toe level dan panjang tiang pancang.
- Analisa likuifaksi dan (friction) bearing capacity tiang pancang.
- Kriteria penerimaan untuk batas kerusakan maupun kegagalan struktur dan tanah.
- Biaya dan waktu konstruksi.
- Biaya dan waktu perbaikan dan perawatan struktur.

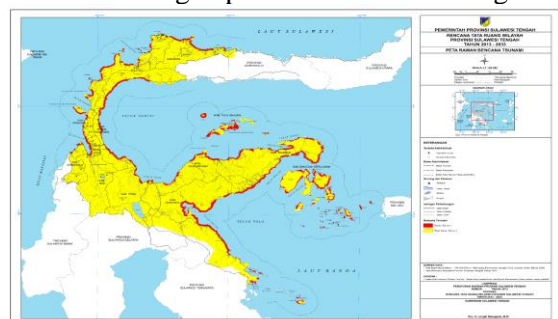
Desain struktur tahan gempa bertujuan terutama untuk mencegah hilangnya nyawa dan keruntuhan global. Pendekatan yang paling umum digunakan adalah desain struktur dengan kapasitas duktilitas yang besar, sehingga mampu menahan deformasi inelastis saat terjadi guncangan tanah yang kuat dengan probabilitas keruntuhan yang kecil. Namun, kerusakan yang diantisipasi terjadi pada komponen struktural dan

non-struktural yang disebabkan oleh deformasi besar dapat berdampak serius pada fungsionalitas pasca gempa dan seringkali memerlukan perbaikan yang mahal dan mengganggu operasional pelabuhan. Di sisi lain, desain struktur yang lebih kaku dan tidak lentur dapat meminimalkan deformasi dan kerusakan. Namun, peningkatan jumlah material, akselerasi struktural, dan kerusakan yang peka terhadap akselerasi gempa akan menimbulkan masalah lainnya. Oleh karena itu, desain struktur yang dapat mengakomodasi deformasi yang cukup kecil dan memiliki kelenturan yang seimbang diperlukan untuk mencapai optimalisasi kekuatan, biaya maupun waktu konstruksi.

II. KEADAAN ALAM

Provinsi Sulawesi Tengah terdiri dari wilayah pegunungan dan perbukitan yang mencakup sebagian besar wilayah provinsi, serta dataran rendah yang umumnya tersebar di sepanjang pantai dan sekitarnya. Dataran wilayah Sulawesi Tengah mempunyai ketinggian berkisar dari 10 – 2.000 meter di atas permukaan laut (mdpl).

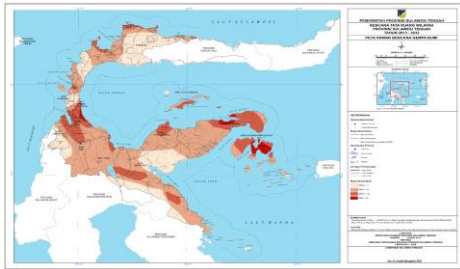
Mengingat Provinsi Sulawesi Tengah merupakan kawasan rawan bencana, maka perlu identifikasi secara spasial untuk mengetahui tingkat kerawanan bencana di lokasi pekerjaan. Identifikasi kebencanaan ini akan dilakukan secara spasial dengan melihat zona dan tipologi bencana melalui peta RTRW Provinsi Sulawesi Tengah, RTRW Kota Palu, dan RTRW Kabupaten Donggala. Dari hasil identifikasi secara spasial untuk rawan bencana terhadap Daerah Teluk Palu diidentifikasi sebagai daerah rawan bencana gempa dan tsunami. Sedangkan



Gambar 1. Peta Kerawanan Bencana Gempa Bumi

Gambar 1 menunjukkan tingkat kerawanan bencana berdasarkan peta RTRW Provinsi Sulawesi Tengah. Dari gambar tersebut terlihat bahwa kawasan Palu masuk dalam kategori kawasan rawan bencana gempa bumi dengan tingkat MMI > VIII. Gambar 2 juga

menunjukkan tingkat kerawanan bencana tsunami untuk kawasan Teluk Palu yang masuk dalam kategori rawan tsunami dan digambarkan melalui warna merah tebal.



Gambar 2. Peta Kerawanan Bencana tsunami

A. Kegempaan

Pulau Sulawesi berdekatan dengan tiga lempeng tektonik sekaligus yaitu :

- a. Lempeng Australia
- b. Lempeng Filipina
- c. Lempeng Pasifik

Persimpangan dari ketiga lempeng ini menimbulkan kerentanan akan aktivitas gempa yang kompleks di Sulawesi, yang terakomodasi oleh sesar geser dan sesar naik. Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia pada tahun 2017 memetakan bahwa terdapat 50 segmen sesar aktif dan megathrust pada pulau Sulawesi.

Besar pergeseran pada sebuah kejadian gempa dapat digunakan untuk menghitung besar magnitudo dan interval waktu antar kejadian gempa. Segmentasi sesar adalah batas sesar yang membagi sesar menjadi beberapa bagian yang merupakan batas retakan permukaan oleh kejadian gempa (Slemmons, 1995). Batas segmentasi adalah batas berakhirnya dan awalan sebuah retakan permukaan sesar yang berkorelasi dengan besar magnitudo gempanya. Segmentasi sesar dikenali berdasarkan batas diskontinyu/ketidakmenerusan struktur sesar. Batas segmen ini dikenali oleh tiga hal, yaitu:

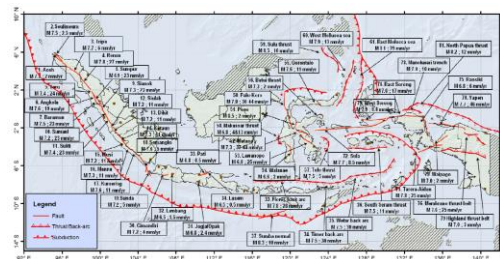
- a. perubahan arah strike
- b. hilang/berhentinya morfologi sesar
- c. berhentinya retakan permukaan dari uji paritan paleoseismologi (Allen, 1968)
- d. hasil analisis deformasi *pre-seismic* dan *post-seismic* oleh citra radar satelit

Segmentasi dapat terjadi akibat perpindahan jalur sesar. Untuk sesar tipe mendatar, umumnya jarak segmentasi seismik terjadi pada sesar yang terpisahkan oleh jarak yang lebih lebar dari 4 km (Wesnousky, 2006). Jika kurang dari 4 km, retakan permukaan dapat bergerak sebagai satu kesatuan retakan permukaan oleh satu kejadian gempa. Pada sesar mendatar, panjang segmen minimum umumnya sekitar 25 km dan panjang

keseluruhannya adalah kelipatan dari 25 km (Klinger, 2010).

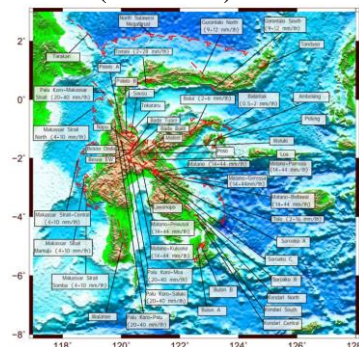
Seksi (*section*) adalah bagian dari segmentasi yang terbagi oleh perubahan arah strike dan/atau perubahan kinematik gerak sesar. Pembagian seksi dicirikan oleh bentuk morfologi sesar. Seksi bukan merupakan batas retakan yang bisa menghasilkan gempa. Terminologi seksi ini dibedakan mengingat dalam istilah geologi gempa, segmentasi merupakan batasan gempa, sedangkan seksi merupakan batasan interpretasi pola morfologi gempa.

Sesar Palu Koro merupakan struktur utama Pulau Sulawesi serta merupakan sesar terpanjang yang ada di Pulau Sulawesi yang memanjang dari Sulawesi bagian tengah hingga Selat Karimata. Sesar ini ditunjukkan. Secara geomorfologi, sesar Palu Koro merupakan sesar geser mengiri (*left lateral slip*). Gempa yang terjadi pada tahun 2018 di Sulawesi diduga diakibatkan oleh aktivitas Sesar Palu Koro.



Gambar 3. Magnitudo maksimum dan slip-rate dari sumber-sumber gempa (2010)

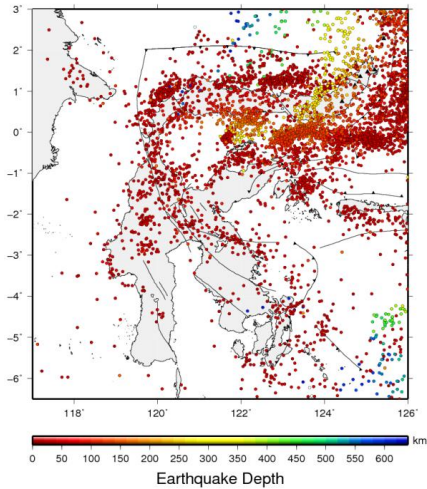
Kejadian seismik di Sulawesi berkaitan dengan subduksi di utara Sulawesi, sesar Palu Koro, sesar Matano, dan subduksi lempeng laut Maluku di timur (Gambar 4).



Gambar 4. Peta sesar aktif di Sulawesi beserta nilai slip rate

Gempa-gempa signifikan di utara Sulawesi berkaitan dengan subduksi di sepanjang palung Sulawesi Utara. Berdasarkan Gambar 5, gempa-gempa dangkal di darat umumnya terjadi di sekitar sesar Palu-Koro dan Matano. Gambar 5

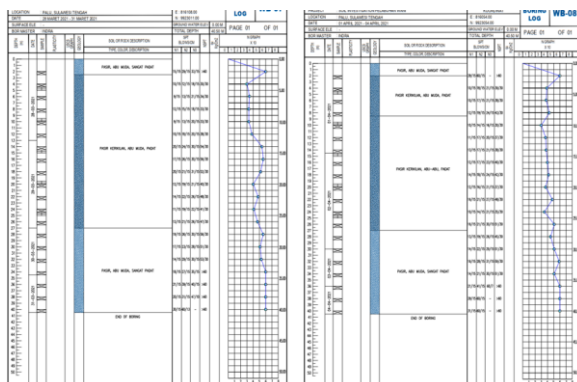
menampilkan aktifitas kegempaan di Sulawesi berkaitan dengan subduksi di utara Sulawesi, sesar Palu Koro, sesar Matano, subduksi lempeng laut Maluku di timur dan gempa-gempa signifikan di utara Sulawesi berkaitan dengan subduksi di sepanjang palung.



Gambar 5. Seismisitas di Sulawesi - gempa dengan magnitudo ≥ 4.5

B. Data Tanah

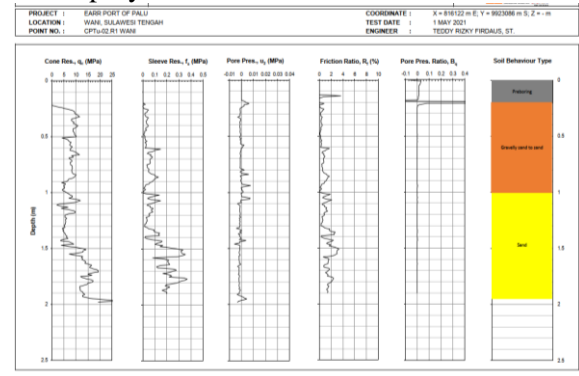
Penyelidikan tanah baru terdiri dari delapan (8) titik bor dalam yaitu WB01 sampai WB08 dan empat (4) titik CPTu yaitu WC1, sampai WC4. Jumlah titik dan lokasi penyelidikan tanah ditentukan sesuai SNI 8460-2017 dan Juknis Dirjen Hubla: Petunjuk Teknis Penyusunan Studi Survei Investigasi Dan Desain (SID) Fasilitas Pelabuhan, 2016.



Gambar 6. Contoh hasil Borelog pada lokasi proyek

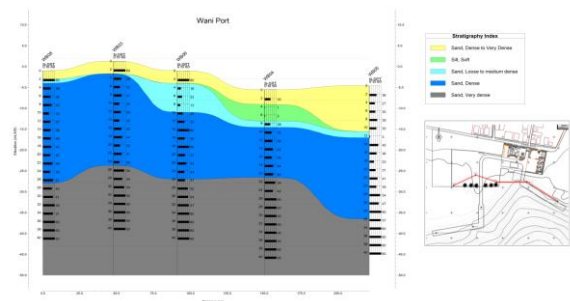
Bor dalam yang digunakan untuk penyelidikan tanah di lapangan ini sesuai dengan ASTM D 1452-80. Hasil dari pengujian bor dalam adalah berupa borlog SPT. Berikut adalah contoh hasil borlog dengan nilai N-SPT untuk penyelidikan tanah di lokasi Pelabuhan. Gambar 7

menunjukkan contoh hasil pengujian CPTu di lokasi proyek.



Gambar 7. Contoh hasil CPTu pada lokasi proyek

Berdasarkan 8 titik bor yang dilakukan pada tahun 2021. Secara umum jenis tanah di lokasi (Pelabuhan Wani) didominasi oleh tanah pasir lanauan dan pasir dengan konsistensi lepas hingga sangat padat. Pada daerah near-shore dan on-shore, ditemukan lapisan pasir berkerikil konsistensi padat hingga sangat padat dengan ketebalan 2 hingga 10 meter dengan nilai N-SPT rata-rata 30 sampai 60. Di bawah lapisan tersebut pada beberapa titik bor dalam, ditemukan pasir lanauan/kerikil lepas hingga sedang dengan ketebalan 2 sampai 6 meter dengan N-SPT 3 hingga 26 serta lensa lanau lempungan setebal 4meter di WB04. Selanjutnya ditemukan pasir lanauan/kerikil padat dengan N-SPT rata-rata 40 dengan variasi ketebalan 8 hingga 28 meter. Dibawahnya ditemukan lapisan pasir/pasir lanauan sangat padat dengan N-SPT > 50 ditemukan hingga kedalaman akhir atau 40 meter dari permukaan tanah.



Gambar 8. Profil lapisan tanah pada lokasi proyek

Secara umum dengan dominasi tanah pasir dan kepadatan sedang, tanah di lokasi ini dikategorikan sebagai tanah dengan daya dukung vertikal cukup baik. Akan tetapi terkait dengan kondisi kegempaan di daerah patahan dengan beban gempa relatif tinggi daerah ini termasuk kedalam daerah dengan resiko longor (karena

beban gempa) dan likuifaksi. Profil lapisan tanah di daerah ini di gambarkan sebagai berikut, dengan warna biru muda di kategorikan sebagai lapisan pasir lepas ke sedang dan hijau sebagai lapisan lunak kohesif (Lanau).

C. Kelas Situs berdasarkan data penyelidikan tanah

Untuk analisis seismik, kelas tapak harus ditentukan menurut SNI 1726-2019. Tanah didominasi oleh tanah granular, oleh karena itu data N-SPT digunakan untuk menentukan kelas tapak untuk lokasi proyek.

Berdasarkan hasil penyelidikan tanah, tanah di Wani sebagian besar diklasifikasikan sebagai SD (Tanah Sedang). Berikut ini adalah penentuan kelas lokasi untuk setiap titik penyelidikan tanah.

III. PEMBAHASAN

Hasil awal DSHA (*Deterministic Seismic Hazard Analysis*), menggunakan Peta Pusgen 2019, dengan Magnitude 7.58, didapatkan nilai Percepatan Tanah di Permukaan (PGA) 0,81g (84th percentile). Berdasarkan grafik hubungan PGA vs Kala Ulang (PSHA) menggunakan Peta Pusgen 2019, ditampilkan pada tabel di bawah ini.

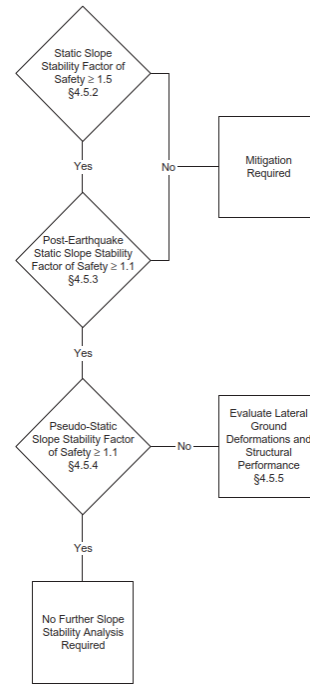
Tabel 1. Nilai PGA dan Kala Ulang

No.	Kala ulang	Peta Pusgen 2019 M=7.58 Jarak 5.61km	Jarak sesar
1	50 tahun	0.32g	
2	72 tahun	0.43g	
3	225 tahun	0.77g	
4	475 tahun	1.01g	
5	1000 tahun	1.25g	
6	2500 tahun	1.55g	

A. Analisis Stabilitas Lereng

Berdasarkan gambar penampang yang mengacu pada data batimetri, denah dermaga multiguna dan keadaan kapal berdiri pada kemiringan 1:3. Selain itu, berdasarkan data historis, terdapat potensi keruntuhan lereng di sekitar kawasan saat terjadi gempa sebelumnya (misalnya Gempa 2018). Penting untuk melakukan analisis stabilitas lereng. Analisis stabilitas lereng dilakukan untuk analisis statik dan analisis seismik menggunakan pendekatan metode pseudostatik pada kondisi gempa seperti yang tertera pada flowchart berikut berdasarkan ASCE 61-14. Di antaranya, analisis stabilitas lereng

statik pascagempa juga harus dilakukan dengan menggunakan parameter residual untuk lapisan yang rentan terhadap likuifaksi.



Gambar 9. Proses evaluasi stabilitas lereng dan deformasi tanah berdasarkan ASCE 61-14

Jika stabilitas menunjukkan nilai keamanan di bawah 1,1 untuk kondisi statik dan statik pasca gempa, maka dilakukan analisis dinamik lebih lanjut menggunakan metode elemen hingga (FEM) dengan software Plaxis 2D untuk mengevaluasi lebih lanjut deformasi tanah lateral dan kinerja struktur yang berinteraksi dengan pemodelan struktural.

PGA yang digunakan untuk stabilitas lereng seismik didasarkan pada kala ulang OLE (72 tahun), CLE (475 tahun) dan DE (2500 tahun) sesuai ASCE 61-14. PGA untuk 72 tahun akan menggunakan 0,43g menurut PSHA dan PGA untuk 475 dan 2500 tahun akan menggunakan 0,81g menurut hasil DSHA (lihat Lampiran 1, Laporan Akhir PSHA Teluk Palu untuk rinciannya).

Berdasarkan rekomendasi Laporan PSHA (Promisco, 2021) dan SNI-1726 Bab 6.10.5.3, bila RP > 225 tahun, nilai PGA Deterministik harus digunakan. Untuk RP 475 dan 1000 tahun karena nilai Probabilistik telah melebihi nilai Deterministik, maka RP harus mengacu pada hasil deterministik (DSHA = 0,81g).

Untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang perilaku kegagalan selama kondisi seismik, selain dari PGA yang Disarankan oleh

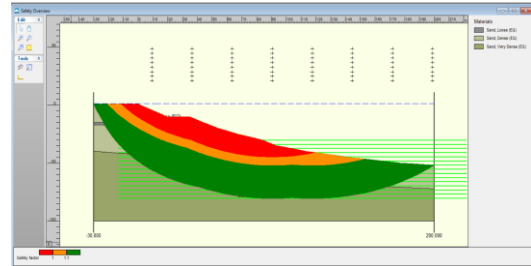
ASCE 61-14, PGA yang lebih rendah juga dipertimbangkan dan mekanisme kegagalan masing-masing dievaluasi. Berdasarkan hal tersebut penelitian ini mengakomodasi perhitungan Pseudostatik untuk beban gempa bervariasi dari 0,1 sampai 0,81 g. Selanjutnya, analisis dinamis dilakukan juga untuk PGA yang berbeda hingga 0,81 g untuk memverifikasi besarnya deformasi dan regangan yang ditunjukkan di lokasi dermaga yang diusulkan. Dengan melakukan urutan analisis ini, mitigasi diusulkan. Dermaga kapal dianalisis untuk kondisi statik dan kondisi seismik dengan variasi PGA 0.1g, 0.2g, 0.3g, dan 0.6g. Hasilnya adalah pada Tabel 2.

Berdasarkan hasil analisis, baik untuk dermaga multipurpose maupun kapal negara, kemiringannya tidak stabil atau berpotensi runtuh ($SF < 1$) untuk gempa dengan PGA lebih besar dari 0,15 g. Untuk PGA yang lebih tinggi, perlu dilakukan langkah-langkah mitigasi. Langkah-langkah mitigasi yang dipilih akan dianalisis lebih lanjut dengan analisis dinamis dan struktural untuk memeriksa deformasi dan kinerja struktural.

Tabel 2. Hasil analisa stabilitas lereng

PGA bedrock (g)	Safety Factor	Catatan
Static	1.51	SF statis untuk lereng > 1.2 (OK)
0.1	1.13	SF pseudostatik untuk lereng >1.1 (OK)
0.2	0.87	SF pseudostatik untuk lereng < 1.1 (not OK)
0.30	0.65	SF pseudostatik untuk lereng < 1.1 (not OK)
0.60	0.44	SF pseudostatik untuk lereng < 1.1 (not OK)

Berdasarkan hasil analisis pseudostatik di dermaga multipurpose untuk batuan dasar PGA 0.2g, terindikasi keruntuhan badan lereng mungkin terjadi hingga area 40 m di belakang dari posisi jetty. Semakin besar nilai PGA maka akan semakin masif dan luas daerah keruntuhannya.

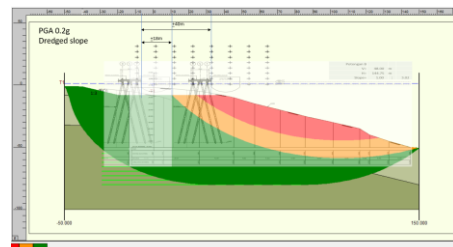


Gambar 10. Hasil Kestabilan lereng untuk PGA 0.2

Mitigasi masih dapat dilakukan untuk mengamankan posisi dan stabilitas jetty pada lereng dengan cara menggeser jetty keluar dari daerah longsor lereng. Namun, pergeseran posisi dermaga ke belakang juga perlu didukung dengan kegiatan pengerukan hingga -8mLWS agar kapal dapat berlayar dengan aman.

Analisis pseudostatik untuk opsi mitigasi dilakukan dengan menggeser mundur dermaga ke sisi darat sejauh 40 meter dari posisi semula. Analisis pseudostatik dilakukan untuk PGA 0.2g, 0.3g, dan 0.43g (periode kembali 72 tahun). Berikut adalah hasil analisis pseudostatik untuk variasi PGA tersebut.

Berdasarkan analisis pseudostatik sebesar 0.2g, posisi jetty berada di area “hijau” yang merupakan area aman dari keruntuhan lereng. Jarak posisi dermaga relatif terhadap daerah potensi keruntuhan adalah 18m. Modus keruntuhan lereng asli tetap sama dengan kondisi semula dengan nilai keamanan lereng $SF = 0,94$. Semakin besar nilai PGA maka akan semakin masif dan luas daerah keruntuhannya. Untuk PGA 0.3g dan 0.43g, lokasi jetty berada pada lokasi keruntuhan lereng juga mengakibatkan SF lebih rendah dari 1.



Gambar 11. Hasil Kestabilan lereng untuk PGA 0.2, dengan mitigasi memundurkan dermaga 40 m kebelakang

Namun demikian, batuan dasar PGA sebesar 0.2g dan 0.3g berhubungan dengan kala ulang kurang dari umur rencana (50 tahun) yang tidak dapat diterima dan tidak dapat memenuhi periode pengembalian minimum berdasarkan ASCE 61-14. Oleh karena itu batuan dasar PGA 0,43g akan dipertimbangkan untuk analisis stabilitas lereng lebih lanjut menggunakan

dinamik plaxis untuk memeriksa efek deformasi lereng terhadap sistem tiang dermaga.

Analisis yang lebih kompleks dan rinci diperlukan untuk memastikan ketahanan struktural dermaga terutama dermaga terhadap mitigasi di atas dengan batuan dasar PGA 0,43g untuk memenuhi periode ulang minimum (72 tahun) berdasarkan ASCE 61-14

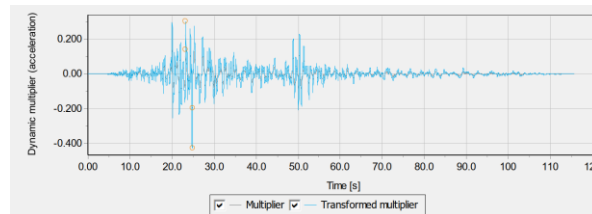
Analisa preliminari di lakukan dengan metode elemen tak hingga menggunakan perangkat lunak Plaxis 2-dimensi. Tujuan utama dari analisa preliminari ini adalah:

Melihat pola deformasi pada lereng original dan lereng yang berinteraksi dengan struktur (lokasi jetty)

Untuk mendapatkan beban tambahan pada fondasi akibat interaksi tanah yang terdeformasi akibat beban gempa. Beban tambahan ini akan di modelkan lebih lanjut pada pemodelan struktur untuk melihat integrasinya dengan struktur atas. Hasil analisa struktur ini dilakukan untuk melihat performa atau ketahan akibat adanya interaksi ini.

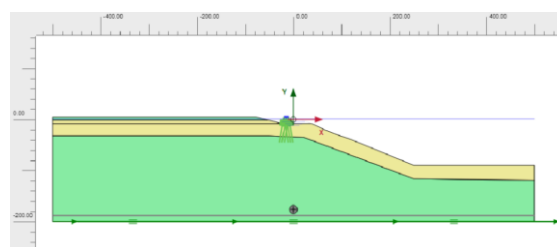
Analisa ini dilakukan dengan batasan batasan berikut:

1. Parameter tanah yang digunakan mengacu kepada Hardening Small Strain model (HSS), mengacu ke kuat geser, berat jenis dan kepadatan berdasarkan data boring dan telah di definisikan pada bab sebelumnya.
2. Parameter tanah di asumsi tidak mengalami likuifaksi. Apabila pada analisa likuifaksi (terpisah/decouple) terindikasi potensi likuifaksi, maka perlu adanya mitigasi, misalkan dengan metode pemadatan atau grouting.
3. Telah di lakukan studi PSHA secara preliminary. Pada analisa ini di pilih secara akselerogram Kocaeli yang mendekati karakteristik gempa dangkal. Pada analisa ini PGA maksimum nya telah di sesuaikan (scalling) sesuai dengan PGA yang digunakan, yaitu 0.43 g. Tentu saja accelerogram terpilih yang akan digunakan diperlukan kajian khusus terkait mekanisme dominan gempa yang diperkirakan akan terjadi.
4. PGA=0.43g dipilih yang dikaitkan dengan periode ulang 72 tahun dan diindikasikan dapat dimitigasi dan kemudian kinerja struktur akan diperiksa.



Gambar 12. Accelerogram yang digunakan

5. Pemodelan di lakukan dengan asumsi bahwa lokasi bedrock berada pada kedalaman cukup dangkal. Ini berdasarkan pengalaman studi yang dilakukan di beberapa lokasi di Makassar dan Jakarta, dimana pemodelan bedrock dangkal dan dalam tidak terlalu berpengaruh terhadap perambatan beban gempa hingga mencapai permukaan. Meskipun asumsi ini perlu konfirmasi dari kajian PSHA.



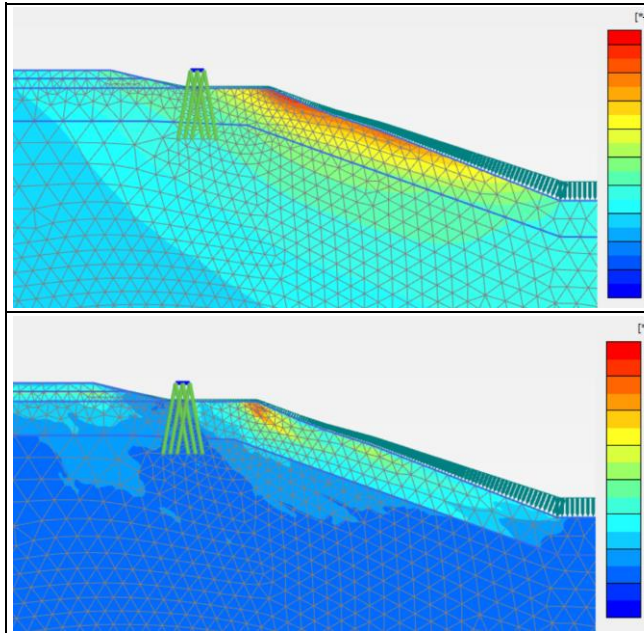
Gambar 13. Profil model dalam Plaxis 2D

6. Geometri dan pemodelan lapisan tanah yang di gunakan mengacu kepada analisa pseudostatik seperti pada bab diatas.
7. Struktur fondasi menggunakan SP812 untuk bagian dermaga. Untuk lantai dari jetty dan trestle menyesuaikan parameter kekakuan pada pemodelan struktur. Koneksi antara pondasi dan lantai dermaga dan trestle diasumsikan tidak terjadi rotasi.
8. Kedalaman fondasi disesuaikan dari analisa kebutuhan kapasitas daya dukung fondasi dengan asumsi PGA 0.43 (disesuaikan dengan ketebalan dan lokasi material tanah yang terindikasi likuifaksi, seperti pada analisa sebelumnya). Gambar berikut menunjukkan perkiraan besarnya deformasi dan yang lebih penting pola keruntuhannya.

Dari hasil analisa di Gambar 14 dapat di bahas sebagai berikut:

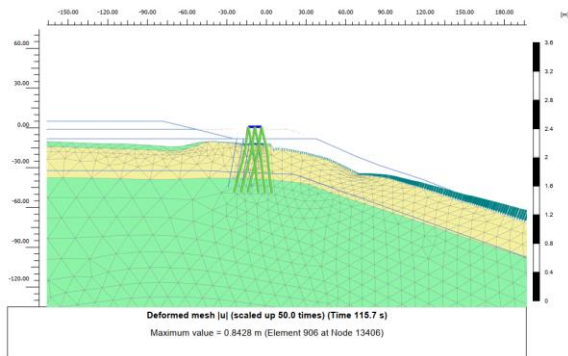
1. Adanya keterkaitan pola deformasi pada analisa dinamis dengan Plaxis dengan pseudostatik, secara kualitatif.
2. Potensi keruntuhan ter indikasi pada lereng original bawah. Dan keruntuhan ini terindikasi lokal, tidak mempengaruhi dimana jetty di tempatkan

Sehingga dapat di indikasikan bahwa, mundurnya lokasi jetty menjauh dari lereng original dan melakukan galian dan pembetulan lereng atas dengan slope yang lebih landai dengan perbandingan 1:4 memberikan dampak yang positif.



Gambar 14. Deformasi (gambar atas), regangan (gambar bawah) pada lereng 'atas' dan 'asli' di bagian bawah

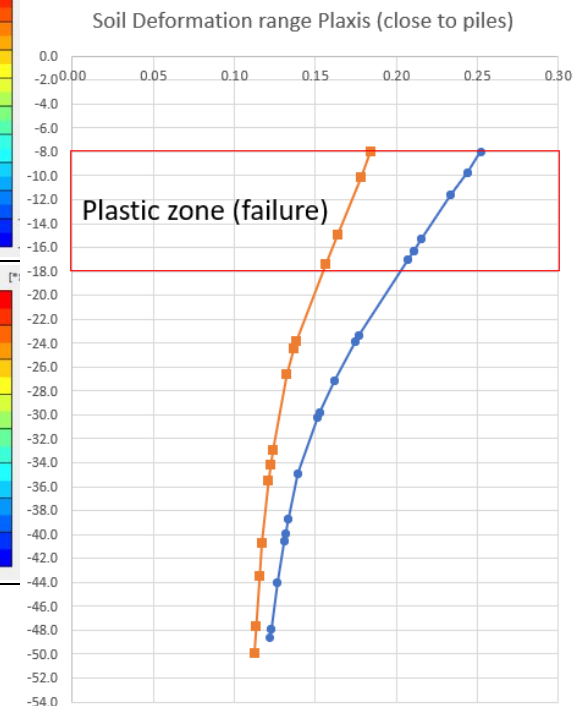
Seperti yang di jelaskan pada hasil analisa stabilitas lereng di atas, terjadi interaksi pada lereng bagian atas dengan struktur jetty. Dari hasil analisa di cek besaran tambahan beban yang terjadi pada masing-masing tiang. Gambar berikut ini adalah salah satu contoh besaran indikasi deformasi pada tiang dan reaksi yang di akibatkan.



Gambar 15. Profil deformasi tanah setelah pembebanan

Deformasi tanah sepanjang kedalaman yang paling dekat dengan tiang disajikan dalam grafik berikut.

Zona plastis ditunjukkan pada elevasi dari elevasi permukaan atas -8 sampai -18 mLWS. Untuk tiang di sepanjang kedalaman ini, kekakuan horizontal (kh) dalam analisis lateral tiang dan gesekan dalam perhitungan daya dukung tiang akan diabaikan untuk mengakomodasi efek deformasi tanah terhadap tiang.



Gambar 16. Deformasi tanah paling dekat dengan tiang

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Kestabilan lereng dapat berpengaruh terhadap tambahan beban horizontal tanah terhadap tiang pancang. Namun, jika nilai keamanan lereng kurang dari persyaratan dan kegagalan global lereng terjadi di bawah dermaga, maka struktur dapat tergeser atau bahkan terguling. Hasil analisa dan perbandingan untuk beberapa nilai PGA ditampilkan pada tabel berikut.

Berdasarkan hasil analisa geoteknikal, beberapa temuan di bawah ini diperoleh:

- a. Dari hasil analisa likuifaksi, terindikasi ketebalan layer terlikuifaksi dipengaruhi besaran variasi PGA. Ketebalan layer terlikuifaksi jika diperhitungkan dalam hitungan daya dukung tiang akan berperan dalam penentuan elevasi ujung tiang. Sangat penting untuk menentukan nilai PGA yang akan dipertimbangkan dalam analisa tersebut.

- b. Dari hasil analisa dengan $PGA=0.2$ dan 0.34 g, terindikasi pola keruntuhan yang cukup masif yang terjadi hingga mencapai area 20-35 m di belakang puncak dari lereng. Besaran PGA ini pun masih jauh lebih kecil dari $PGA 0.6$ g dengan kala ulang 2475 tahun.

Tabel 4. Hasil resume analisa stabilitas lereng

Percepatan puncak di batuan dasar untuk probabilitas terlampaui	PGA batuan dasar	Pengaruh terhadap desain Pelabuhan Wani - Kapal Negara (WB05)
2% dalam 50 years (periode ulang 2,475 tahun)	~0.6	- Faktor Keamanan stabilitas lereng $0.44 < 1.1$ (tidak OK) - Deformasi tanah pada garis pantai adalah $>5m$ - Deformasi tanah di sekitar tiang adalah $>5m$ - Lapisan terlikuifaksi terindikasi sampai kedalaman 26m dari seabed - Elevasi ujung tiang di -37mLWS
10% in 50 years (periode ulang 475 tahun)	~0.34	- Faktor Keamanan stabilitas lereng $0.65 < 1.1$ (tidak OK) - Deformasi tanah pada garis pantai di range 4-5m - Deformasi tanah di sekitar tiang di range 4-5m - Lapisan terlikuifaksi terindikasi sampai kedalaman 22m dari seabed - Elevasi ujung tiang di -35mLWS
korelasi dengan periode ulang tidak diketahui	~0.1	- Faktor Keamanan stabilitas lereng 1.13 (OK) - Deformasi tanah pada garis pantai di range 0.1-0.3m - Deformasi tanah di sekitar tiang di range 0.1-0.3m - Lapisan terlikuifaksi terindikasi sampai kedalaman 13m dari seabed - Elevasi ujung tiang di -27mLWS

- c. Mitigasi dapat dilakukan untuk memperbaiki kondisi stabilitas pada $PGA=0.2$ dan 0.34 g. Namun usaha yang tersedia, secara praktis sulit

diimplementasikan karena besarnya resiko kegagalan performa dari mitigasi yang mungkin, dynamic compaction ataupun grouting.

- d. Mitigasi yang lebih memungkinkan adalah dengan melakukan pelandaian lereng. Di akibatkan beban gempa yang sangat besar, di butuhkan lereng yang sangat landai untuk mencegah keruntuhan sebesar 1:5. Namun ini secara praktis berdampak kepada bergesernya project boundary jauh kebelakang dari puncak lereng eksisting, sekitar 150 m. Lereng yang lebih landai di butuhkan jika $PGA=0.6$ g di perhitungkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Eason, B. Noble, dan I.N. Sneddon, "On certain integrals of Lipschitz-Hankel type involving products of Bessel functions," Phil. Trans. Roy. Soc. London, vol. A247, hal. 529-551, April 1955.
- [2] J. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, hal.68-73.
- [3] I.S. Jacobs dan C.P. Bean, "Fine particles, thin films and exchange anisotropy," in Magnetism, vol. III, G.T. Rado and H. Suhl, Eds. New York: Academic, 1963, hal. 271-350.
- [4] K. Elissa, "Title of paper if known," belum terbit.
- [5] R. Nicole, "Title of paper with only first word capitalized," J. Name Stand. Abbrev., proses cetak.
- [6] Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, dan Y. Tagawa, "Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface," IEEE Transl. J. Magn. Japan, vol. 2, hal. 740-741, Agustus 1987 [Digests 9th Annual Conf. Magnetics Japan, hal. 301, 1982].
- [7] M. Young, The Technical Writer's Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989.