

Pentingnya Pelaksanaan Penyelidikan Tanah yang Tepat untuk Proyek Geoteknik di Kawasan *Waterfront Area*, Studi Kasus Jetty Dumai, Sumatera, Indonesia

Adecar Nugroho¹, Merdeka Sandi Tazakka², Budiwan Adi Tirta³,

PT. Witteveen Bos Indonesia^{1,2,3},
adecar.nugroho@witteveenbos.com¹, sanditazakka@hotmail.com², budiwan.tirta@witteveenbos.com³,

Abstract—Kondisi stratigrafi yang unik di kawasan *waterfront area* sangat dipengaruhi oleh pergerakan lempeng tektonik di daerah sekitarnya, selain itu proses erosi-sedimentasi juga mempengaruhi keberadaan endapan lunak di daerah tersebut. Situasi unik ini meningkatkan variasi stratigrafi dalam ruang lingkup kondisi lokal/setempat. Kasus jetty Dumai merupakan salah satu kasus dimana kesalahan dalam interpretasi tanah pada fase perencanaan berujung pada timbulnya masalah yang terjadi setelah konstruksi berakhir. Setelah proses konstruksi, jetty ditemukan bergoyang sebelum beroperasi. Setelah dilakukan investigasi, ditemukan bahwa jetty dibangun diatas kondisi tanah yang lebih buruk dari yang telah direncanakan pada fase desain. Oleh karena itu penyelidikan tanah yang tepat harus dilakukan untuk meminimalkan risiko kesalahan pada fase perencanaan dalam menginterpretasi profil tanah di kawasan *water front area*.

Index Terms—penyelidikan tanah, water front area, jetty desain, profil tanah, stratigrafi

I. PENDAHULUAN

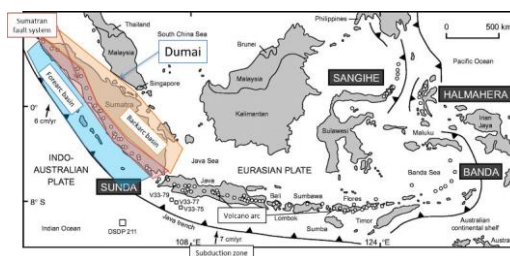
Penyelidikan tanah seringkali dianggap kurang penting pada tahap awal proyek, karena seringkali pelaksanaan penyelidikan tanah ini dirasa kurang memiliki nilai tambah untuk proyek dalam jangka waktu pendek. Untuk itu, fase ini akan ditekan seminimal mungkin untuk mengurangi biaya dan waktu pada fase awal. Kondisi dan gambaran umum lokasi proyek, pertama - tama ditentukan berdasarkan pengalaman dan juga *expert judgment* yang dilakukan untuk menentukan asumsi - asumsi pada tahap desain.

Kerap kali pada proyek - proyek di kawasan *waterfront area* ditemukan bahwa asumsi desain yang telah ditentukan kurang tepat sehingga bisa menyebabkan masalah di kemudian hari (misalkan pada tahap saat/setelah konstruksi). Hal itu menyebabkan diadakannya penyelidikan lokasi tambahan, desain ulang dan perbaikan pekerjaan konstruksi yang memiliki dampak signifikan pada waktu dan biaya proyek.

II. KONDISI GEOLOGI DUMAI, INDONESIA

Dumai adalah kota pelabuhan industri yang berlokasi di provinsi Riau, Sumatera. Sektor industri di Dumai termasuk dalam kategori sedang berkembang pada saat ini, seiring juga dengan kebutuhan jetty untuk perusahaan baru maupun lama pada Kawasan tersebut.

Sumatera secara umum dipengaruhi oleh tiga wilayah tektonik antara lain cekungan busur muka, cekungan busur belakang dan patahan Sumateran (lihat gambar 1), sedangkan Dumai terletak di cekungan busur belakang pada cekungan *central* Sumatera. Sehingga sebagian besar wilayah di Sumatera telah mengalami beberapa deformasi struktural karena gaya eksternal, seperti kompresi dan ekstensi, di mana sebagian cekungan telah bergerak ke atas dan cekungan yang lain bergerak ke bawah sepanjang patahan (*brittle failure* skala besar pada kerak bumi).



Gambar 1. Peta geologi Indonesia, yang difokuskan di Sumatera - Dumai area

Peta geologi daerah tersebut mengindikasikan bahwa selat Dumai dibatasi oleh patahan tektonik (gambar 1, Cameron et al, 1982). Diperkirakan bahwa sesar-sesar ini telah

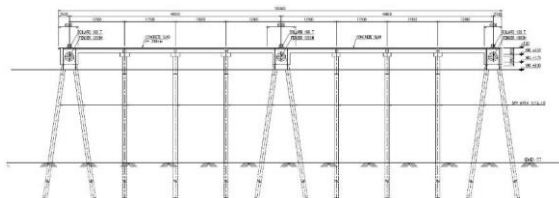
membentuk selat Dumai dengan kombinasi erosi selama periode permukaan laut rendah. Pada fase kenaikan permukaan laut, palung ini telah diisi dengan lapisan sedimen yang tebal (de Vries, 2017). Menurut penelitian oleh Rifardi (2001), Dumai *strait* telah menjadi daerah endapan sedimen yang diangkut dari Samudra Hindia dan Laut Cina Selatan, menyebabkan beberapa lapisan endapan lunak mendominasi lapisan atas dasar laut di daerah tersebut.

III. OVERVIEW DESAIN JETTY

Sebuah jetty baru telah dibangun untuk fasilitas pabrik petrokimia di Dumai. Konfigurasi jetty tersebut terdiri dari struktur jetty utama untuk kapal tanker 50.000 DWT dan struktur *berthing* untuk *barge* 5.000 DWT dan 10.000 DWT. Secara keseluruhan konfigurasi jetty tersebut memiliki dimensi panjang 262,5 m dan

panjang 17 m. Struktur Jetty utama memiliki *berthing* elemen yang didukung dengan kelompok tiang yang terdiri dari 8 tiang pancang. Material pancang yang digunakan adalah *spiral*

welded steel pipe dengan diameter 914 mm. Kedalaman tanam tiang pancang berkisar antara 32 hingga 33 m dengan total panjang masing-masing pancang saat instalasi adalah 62 m. Dengan elevasi *deck* rencana adalah +5 LWS dan *top pile* level +3 LWS dan kedalaman air sekitar 26 - 27 m (dari LWS) pada area jetty.



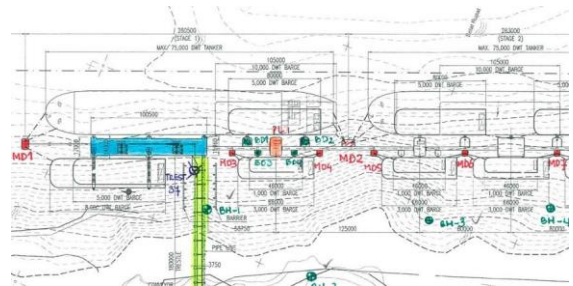
Gambar 2. Tampak depan Jetty utama (Engineering sketch)

IV. EVALUASI DATA TANAH YANG TERSEDIA

Lima *borehole* awal (BH01 - BH05) tersedia

pada tahap desain jetty. Namun demikian, lokasi *borehole* tersebut tidak berada dalam posisi sejajar dengan jetty dan tidak berada di elevasi *seabed* yang representatif. Level *seabed* pada lubang bor yang dieksekusi berada di kisaran +3 m hingga -10 m LWS, sedangkan lokasi jetty utama berada pada level -26 m hingga -27 m LWS. Lokasi *borehole* tersebut pada area konstruksi jetty ditunjukkan pada gambar di bawah ini. Berdasarkan pada posisi *borehole* dan skenario terburuk dari data *borehole* tersebut, diasumsikan bahwa BH01 adalah titik paling representatif untuk men-desain jetty utama (*main*

jetty). Resume dari desain tiang pancang dapat dilihat pada tabel 1.



Gambar 3. Titik penyelidikan tanah pada area konstruksi jetty

Table 1. Resume data desain tiang pancang dan jaraknya dengan BH-01, dengan diameter 800-900mm

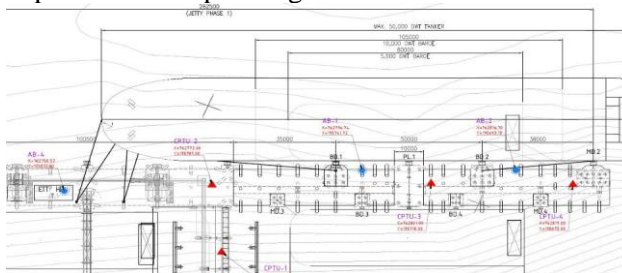
Struktur	Tipe pancang	Pile length [m]	Jarak dengan BH-1 [m]
Main Jetty	Steel pipe pile	62	90
Berthing Dolphin 1	Steel pipe pile	62	87
Berthing Dolphin 2	Steel pipe pile	62	117
Berthing Dolphin 3	Steel pipe pile	62	84
Berthing Dolphin 4	Steel pipe pile	62	105
Mooring Dolphin 1	Steel pipe pile	62	163
Mooring Dolphin 2	Steel pipe pile	62	148
Mooring Dolphin 3	Steel pipe pile	62	73
Mooring Dolphin 4	Steel pipe pile	62	127
Platform 1	Steel pipe pile	62	101

Borelog dari BH-1 menunjukkan bahwa lapisan pasir keras ditemukan pada kedalaman 21 m di bawah permukaan dasar laut. Setiap tiang pancang di jetty utama memiliki panjang 62 m dan *top pile* elevasi pada +3 m LWS. Lokasi di mana tiang dipasang di elevasi dasar laut -27m LWS, maka tiang pancang akan memiliki panjang bebas 30 m dengan penetrasi tanam 32 m masuk ke dalam tanah. Jika mengacu pada BH-1, seharusnya pancang akan terpasang pada lapisan tanah kaku berbutir halus (*stiff finegrained soil*) sedalam 21 m pertama yang kemudian sisanya masuk sedalam 11 m ke

lapisan tanah keras pasir-lanau kasar (*coarse silt-sand mixture*) dengan nilai SPT lebih tinggi dari 40 N. Tiang pancang didesain sebagai pancang *end-bearing* dan sangat bergantung pada lapisan keras 11 m sebagai kontribusi daya dukung *lateral* dan vertikal struktur. Setelah konstruksi, ditemukan bahwa jetty bergoyang dengan deformasi yang jauh melebihi kriteria design sebelum beroperasi (hanya terkena arus/gelombang). Pada tahun 2016, pemilik jetty meminta beberapa pihak untuk mereview desain daripada jetty tersebut.

V. PENYELIDIKAN TANAH TAMBAHAN

Review desain dimulai dengan melakukan penyelidikan tanah baru yang terdiri dari 6 borehole tambahan (AB1 - AB6) dengan kedalaman yang bervariasi. Layout borehole dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



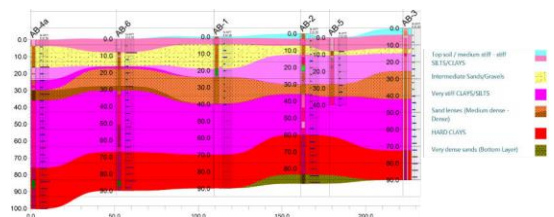
Gambar 4. Penyelidikan tanah tambahan pada area jetty

Karena beberapa kendala pada *site*, tidak semua titik penyelidikan baru yang direncanakan dapat dieksekusi. Namun demikian, dari penyelidikan tambahan yang tereksekusi didapati informasi yang sangat berbeda terutama pada kondisi tanah dasarnya. Lapisan pasir yang ditemukan di BH-1 pada kedalaman setelah 21 m (penyelidikan awal) merupakan lensa lokal, yang di bawahnya masih terdapat lapisan tanah lempung dengan *consistency* sedang (*medium stiff clay*) sampai kedalaman 80 m, lalu setelah itu dijumpai tanah lempung keras (*hard clay*) yang ditemukan pada kedalaman 80-100 m di bawah permukaan dasar laut. Berdasarkan temuan baru ini, kondisi aktual tanah secara umum dapat digambarkan sebagai berikut:

investigasi baru menunjukkan bahwa 1 - 2 m teratas didominasi oleh endapan tanah lunak dengan campuran kerikil dan pasir di daerah tertentu. Kemudian 5 hingga 7 m berikutnya terdiri dari lapisan tanah lempung lunak hingga

sedang. Dilanjutkan dengan lapisan tanah granular berkerikil atau berpasir dengan ketebalan sekitar 5 m. Di bawah lapisan tanah kerikil / pasir, terdapat tanah lempung dengan *consistency medium* sampai ke tanah lempung keras pada lokasi sangat dalam. Berdasarkan *borehole* AB2 diketahui bahwa lapisan pasir sangat padat baru ditemukan pada kedalaman 100 m di bawah LWS. Ini menunjukkan perbedaan yang signifikan dari investigasi sebelumnya.

Berdasarkan informasi baru ini, telah dikonfirmasi bahwa asumsi desain pancang sebagai *end bearing pile* adalah tidak relevan pada kondisi aktual. Kondisi pancang aktual dipasang pada lapisan tanah lempung lunak-sedang (N-SPT 2 - 8) dan pasir dengan kepadatan sedang (N-SPT 15 - 30) dengan lensa kerikil-pasir yang terletak di antaranya. Pada kasus dan kondisi ini, jika tiang pancang harus didesain sebagai *end bearing pile*, maka ujung tiang harus masuk hingga setidaknya 80 m di bawah permukaan dasar laut. Namun, solusi tersebut tidak tepat dan tidak efektif, terlebih lagi kedalaman air di lokasi jetty dapat mencapai hingga 27 m dari LWS. Berdasarkan hasil penyelidikan tanah tambahan, tiang pancang seharusnya dirancang sebagai *friction pile* yang juga mempertimbangkan aspek rekayasa struktural guna mencapai stabilitas dan mencegah goyangan.



Gambar 5. Profile tanah pada alinemen jetty setelah investigasi tambahan 2016

VI. PENYELIDIKAN TANAH BERDASARKAN STANDAR NASIONAL INDONESIA

Standar Nasional Indonesia 8640: 2017 tentang persyaratan untuk desain geoteknik menyarankan agar penyelidikan lokasi harus dilakukan untuk mendapatkan data input yang tepat untuk desain. Untuk desain jetty dijelaskan dalam kode bahwa sekurang-kurangnya harus dilakukan 1 titik penyelidikan tanah tiap 50 m jarak. Jika terdapat indikasi anomali, maka dapat dilakukan titik uji tambahan. Selain itu, SNI juga memberikan syarat minimal bahwa minimal

sample tanah sejumlah 3 hingga 5 sampel harus diambil di setiap lapisan tanah untuk uji indeks propertis tanah, sifat mekanik dan sifat hidrolis tanah.

VII. DISKUSI TENTANG PENYELIDIKAN LOKASI UNTUK ASESMEN JETTY DUMAI

Seperti dikutip dari Poulos (2017), estimasi biaya penyelidikan lokasi yang optimal dapat diestimasi dengan angka yang sudah mempertimbangkan hal - hal seperti dampak finansial karena kejadian yang tidak terduga dan juga sensitivitas konstruksi terhadap kondisi tanah. Pendekatan kuantitatif untuk bangunan tinggi menurut Goldsworthy (2006), disarankan bahwa biaya optimal untuk kampanye penyelidikan lokasi untuk proyek dengan sensitivitas rendah adalah pada kisaran 1% dari total biaya proyek dan untuk proyek dengan sensitivitas tinggi berkisar antara 6 - 8% dari total biaya proyek.

Dalam proyek ini, investigasi awal di lokasi terdiri dari penyelidikan tanah berjumlah 5 borehole termasuk uji laboratorium dengan survei batimetri dan topografi, dengan total biaya sebesar 364,4 juta Rupiah. Dengan membandingkan investigasi awal lokasi dengan total biaya proyek sebesar 62,5 miliar Rupiah, rasionya adalah berkisar 0,6% yaitu nilai yang kurang dari 1% dari total nilai proyek. Meskipun dari perspektif biaya angka tersebut tergolong wajar dengan memiliki rasio yang kurang dari 1% sebagaimana seperti didapati pada berbagai kasus proyek (Peacock dan Whyte, 1988), diketahui bahwa lokasi borehole dari investigasi awal tidak dilakukan pada lokasi yang tepat dan mestinya diposisikan ke lokasi yang lebih dalam di -26 hingga -27 LWS dan oleh karena itu penyelidikan lokasi tersebut dianggap tidak memadai dalam hal kualitas dan kuantitas.

Biaya yang dikeluarkan dari kejadian yang tidak terduga karena penyelidikan lokasi yang tidak memadai dapat menyebabkan pembengkakan biaya yang sangat tinggi pada proyek. Terindikasi bahwa rasio 1% atau lebih rendah dapat memberikan biaya tambahan setinggi 80 hingga 100% dari biaya awal pada proyek - proyek jalan raya (Mott Macdonald dan Soil Mechanics, 1994). Dengan kata lain total biaya proyek yang harus di keluarkan menjadi dua kali lipat. Semakin besar kuantitas dan tinggi kualitas yang dilakukan dalam penyelidikan lokasi berimbas pada meningkatnya awareness

terutama selama proses desain sehingga risiko dan hazard geoteknik dapat dideteksi dan diatasi.

Dalam kasus proyek ini, struktur jetty yang dibangun dengan desain yang tidak valid meningkatkan total biaya proyek karena masalah goyangan jetty. Memperkuat jetty utama mungkin menjadi salah satu solusi guna mengatasi masalah ini atau bahkan skenario lain yang mungkin lebih murah seperti membangun jetty baru di daerah yang lebih dangkal. Biaya yang harus dikeluarkan dari masing-masing solusi tersebut mendekati biaya proyek awal sebagai biaya tambahan proyek, dan ini selaras dengan Mott Macdonald (1994) tentang hubungan rasio penyelidikan lokasi dengan total biaya proyek terhadap pembengkakan biaya yang bakal terjadi.

Penyelidikan lokasi baru menelan biaya sekitar 1,27 miliar Rupiah dan terdiri dari 6 borehole disertai dengan 4 CPTu dan beberapa uji laboratorium. Investigasi kedua melengkapi puzzle yang hilang pada jetty utama karena informasi penting tentang stratigrafi dan jenis tanah yang tidak diketahui sebelumnya pada area ini telah terungkap. Dari investigasi pertama dan kedua, pemilik proyek menghabiskan total dana sebesar 1,63 miliar Rupiah.

Item-item yang ditentukan untuk penyelidikan lokasi kedua mencakup aspek - aspek teknis berdasarkan expert judgment dimana item tersebut sudah memadai untuk mengevaluasi kondisi eksisting jetty, dan yang paling penting item yang ditentukan sudah disesuaikan dengan anggaran pemilik proyek . Uji geoteknik yang digunakan untuk asesmen struktur jetty eksisting dirangkum pada tabel 2. Jenis pengujian yang berbeda mungkin saja diperlukan pada proyek-proyek lain, dan karenanya uji yang dilakukan pada proyek ini tidak mengikat untuk digunakan sebagai pedoman pada proyek lain. Selain penyelidikan tanah, asesmen struktural jetty juga dilakukan seperti structure non-destructive dan destructive test untuk memverifikasi integritas struktur jetty seperti natural vibration test dan coring beton. Setelah data baru tersebut diperoleh dari investigasi kedua, data - data tersebut dapat digunakan bersama dengan data observasi (seperti dimensi aktual komponen jetty, kemiringan tiang pancang aktual, dll.) untuk dilakukan back analisis dengan memodelkan sistem kekakuan aktual dari struktur eksisting. Dari asesmen yang dilakukan Witteveen+Bos tersebut, dapat ditarik kesimpulan apakah jetty bisa beroperasi atau

tidak, sehingga langkah-langkah mitigasi terbaik dapat disarankan kepada pemilik proyek.

Table 2. Penyelidikan tanah untuk asesmen Jetty Dumai

Test	Type	Keterangan
Borehole dengan SPT	Lapangan	Uji Borehole dilakukan di lokasi yang penting. Borehole digunakan untuk memberikan informasi penting tentang kondisi subsurface serta untuk mengambil sampel yang digunakan untuk uji laboratorium. Nilai N-SPT umumnya digunakan untuk memperkirakan kapasitas dukung tiang pancang dan perlu dievaluasi dengan data uji laboratorium untuk proyek asesmen jetty
CPTu	Lapangan	Data CPTu dapat dikorelasikan dengan data N-SPT. CPTu memiliki tingkat presisi yang lebih baik daripada N-SPT, terutama untuk memperkirakan kekakuan pegas horizontal tanah (horizontal spring stiffness) menggunakan metode Ménard-Brinch Hansen (Geodelft, 2004). Kekakuan pegas horizontal digunakan untuk pemodelan struktural struktur jetty eksisting
Triaxial	Laboratorium	Uji triaxial UU dan CU untuk proyek ini digunakan untuk memverifikasi estimasi parameter kohesi undrained dari korelasi SPT. Kohesi undrained yang diperoleh dari uji triaxial dapat digunakan untuk menentukan kapasitas dukung tiang yang ada.
Oedometer (Konsolidasi)	Laboratorium	Uji Oedometer pada dasarnya adalah untuk memahami keadaan stress history tanah. Meski pada kasus jetty tidak terjadi penurunan konsolidasi, tes oedometer digunakan untuk mengestimasi kondisi long term jetty karena pengaruh creep settlement pada kondisi beban konstan (Bjerrum Isochrone theory, 1967). Tes ini dapat digunakan untuk memverifikasi ketinggian deck masa depan yang juga dapat dihubungkan dengan kenaikan muka air laut. Tes ini dapat digunakan untuk memeriksa diferensial

Test	Type	Keterangan
		settlement jangka panjang pada segmen jetty utama dengan koneksi ke struktur terdekat seperti mooring dolphin dan breasting
		dolphin yang biasanya terhubung dengan catwalk. Hasil Preconsolidation stress dari uji oedometer dapat digunakan untuk memverifikasi parameter kohesi undrained pada desain pondasi.
Index propertis dan Atterberg Limits	Laboratorium	Indeks propertis tanah dan Atterberg limit digunakan untuk memahami parameter dasar tanah. Selain itu, parameter tersebut dapat digunakan untuk analisis geoteknik menggunakan metode korelasi guna memperkirakan parameter kompresibilitas dan kekuatan tanah sebagai <u>alternatif dan perbandingan.</u>

VIII. KESIMPULAN

Proyek Dumai adalah salah satu dari banyak kasus yang membuktikan tentang pentingnya pemahaman yang jelas tentang kondisi *site* dan pemahaman tentang perilaku tanah sebelum pekerjaan desain. Usaha untuk meminimalkan upaya dalam fase ini guna mempersingkat waktu dan menekan anggaran seringkali menyebabkan kerugian waktu, uang, dan bahkan nyawa. Panduan mengenai kuantitas minimum penyelidikan lokasi yang direkomendasikan oleh SNI sebaiknya digunakan sebagai dasar sebelum melakukan penyelidikan lokasi. Selain itu, banyak referensi internasional lainnya juga menyarankan pendekatan serupa yang mengkonfirmasi tentang pentingnya penyelidikan lokasi.

Secara keseluruhan hanya 5 borehole yang dieksekusi dan tersedia untuk proses desain. Jarak borehole - borehole tersebut dengan struktur utama memang terlampaui sangat jauh (tabel 1). Selain itu, borehole yang dieksekusi perlu dilaksanakan pada kedalaman yang lebih dalam dari ujung tiang pancang dan borehole tersebut harus dilaksanakan pada lokasi yang tepat misalkan terletak persis pada struktur - struktur utama (Jetty, Dolphins, Platform). Borehole - borehole juga seharusnya dilaksanakan dengan jarak tengah ke tengah maksimal 50 m.

Pada kondisi terbatas ini, sulit untuk menginterpretasi kondisi geologis dan geoteknik yang representatif dan tepat karena *borehole* yang dieksekusi terlalu jauh dari struktur utamanya; hal ini diilustrasikan pada Gambar 3. Asumsi (ekstrapolasi) bahwa profil tanah di jetty utama akan serupa dengan *borehole* terdekat yang tersedia (BH-1) dipastikan terlalu optimis, yang telah dikonfirmasi berdasarkan penyelidikan tanah kedua dimana *soil profile* nya jauh berbeda.

Konsekuensi dari tidak memiliki data penyelidikan tanah yang reliabel berujung kesalahan pada fase desain dan berimbas pada hasil akhir konstruksi. Desain tiang pancang (baik tahanan lateral maupun daya dukung vertikal) tidak dapat diprediksi tanpa investigasi lokal. Dalam kasus jetty Dumai ini, seluruh desain tiang pancang menggunakan data yang tidak reliabel dimana tanah aktual lebih buruk dari aslinya, sehingga hal ini bisa menjadi salah satu penyebab jetty goyang sebelum beroperasi. Sering dijumpai di *water front area* bahwa suspensi tanah yang sangat lunak sebagai endapan sementara memiliki ketebalan yang bervariasi dan bisa mencapai ketebalan yang signifikan. Jika terjadi abrasi, maka temporary sedimen ini akan semakin dalam, sehingga seabed juga akan semakin dalam. Sehingga daya dukung tiang lateral dan vertikal tidak dapat diukur secara akurat tanpa mengetahui profil tanah aktual. Pada kawasan *waterfront area*, sering juga ditemukan lensa - lensa pasir pada kedalaman tertentu sehingga desainer harus berhati - hati dalam menentukan apakah *stratum* pasir tersebut *continue*/menerus atau hanya sebatas lensa.

IX. REKOMENDASI

Dalam proyek apapun data yang reliabel merupakan hal yang sangat esensial dalam proses desain. Data yang tidak valid menyebabkan kesalahan interpretasi dalam desain yang bisa berdampak pada produk jadi akhir. Reliabilitas data dapat berarti dua aspek; yaitu kualitas dan kuantitas. Misalnya, melakukan penyelidikan tanah yang berkualitas tinggi dan diawasi secara ketat yang dilakukan oleh spesialis akan memberikan input yang baik untuk insinyur dalam men-desain. Kuantitas pada setiap tes investigasi membantu mengurangi ketidakpastian (misal, lebih banyak *borehole* akan memberikan lebih banyak wawasan tentang kondisi *subsurface*).

Mengkombinasikan kualitas dan kuantitas akan mengurangi risiko bagi insinyur desain untuk tidak melakukan interpretasi yang salah selama proses desain, meskipun di Indonesia beberapa pemilik proyek tidak benar-benar memberikan prioritas tinggi dalam melakukan penyelidikan tanah yang berkualitas, hal ini karena alasan tingginya biaya. Penelitian lebih lanjut dapat dilakukan untuk menentukan persentasi estimasi biaya pengeluaran penyelidikan lokasi dari total biaya proyek yang *reasonable* pada kawasan *waterfront area* terutama di Indonesia, di mana hal tersebut membutuhkan *data base* yang besar dari sejarah - sejarah proyek yang pernah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Barber, A.J., Crow, M.J. and Milsom, J.S. (2005), Sumatra: Geology, Resources and Tectonic Evolution, Geological Society Memoir No. 31, London.
- [2] Bjerrum, L. (1967), Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings, Seventh Rankine lecture, Geotechnique, Vol. 17, pp. 83-118
- [3] Cecil, C.B., Dulong, F.T., Cobb, J.C. and Supardi (1993), Allogenic and autogenic controls on sedimentation in the central Sumatra basin as an analogue for Pennsylvanian coal-bearing strata in the Appalachian basin, Geological Society of America, special paper 286.
- [4] Cameron, N.R., Kartawa, W. and Thompson, S.J. (1982), Geological map of the Dumai and Bagansiapiapa quadrangles, Sumatra, Geological Research and Development Centre, Bandung, Indonesia.
- [5] Clayton, C.R.I. (2001), Managing geotechnical risk: Time for change? Proceedings of the ICE, Geotechnical Engineering, Vol. 149(1), pp. 3-11.
- [6] De Vries (2017), Pile Foundation in Challenging Soft Soil Conditions The Importance of Geotechnical and Geological Knowledge
- [7] GeoDelft. (2004). MSheet user manual - Release 6.1. Delft
- [8] Goldsworthy, J.S. (2006), Quantifying the risk of geotechnical site investigations. PhD thesis, University of Adelaide, Australia
- [9] Kausarian, H., Sumantyo, J.T.S., Kuze, H. and Wiyono, S. (2017), The origin and distribution of silica mineral on the recent surface sediment area, northern coastline of Rupert Island, Indonesia, Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 12, no. 4.
- [10] Mott MacDonald and Soil Mechanics Ltd (1994). Study of the efficiency of site investigation

- practice”, Project report 60, E063A/HG, TRRL ,
Berkshire.
- [11] Peacock, W. S., and Whyte, I. L. (1988). Site investigation practice. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Municipal Engineers, 5, pp. 235-245.
 - [12] Poulos, H.G. (2017), Tall Building Foundation Design, CRC Press, 1st Ed., Boca Raton, FL.
 - [13] PT Witteveen+Bos Indonesia (2016), Review of Detailed Engineering Design (DED) and as built drawings, INA859-1/agui/030
 - [14] PT Witteveen+Bos Indonesia (2016), Technical note 06 - Jetty Dumai full Geotechnical analysis, INA859-2/agui/061
 - [15] Rifardi (2001), Study on sedimentology from the Mesjid river estuary and its environs in the Rupert Strait, the east coast of Sumatera Island, Journal of Coastal Development, vol. 4, no. 2, 87-98.
 - [16] SNI 8640:2017, 2017, BSN Jakarta, Persyaratan Perancangan Geoteknik.