

GEOLOGI TEKNIK SEDIMEN KUARTER DAN BAHAYA AMBLESAN, LIKUIFAKSI DI SERANGAN – TUBAN – TANJUNG BENOA, BALI

Engineering Geology of the Quarternary Sediment of Bali related to the subsidence and liquefaction hazard potentials

Eko Soebowo

Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI

ABSTRAK Wilayah pesisir pada cekungan sedimen Kuartar di daerah Serangan – Tuban – Tanjung Benoa, Bali Selatan sebagai kawasan pengembangan tataruang dan infrastruktur perlu mendapat perhatian terkait dengan kondisi geologi teknik bawah permukaan dan ancaman bahaya geologinya. Tulisan ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik geologi teknik sedimen bawah permukaan berkaitan dengan ancaman bahaya amblesan dan likuifaksi. Metode penelitian meliputi pemboran teknik, pengujian penetrasi konus, pengujian laboratorium geoteknik dan analisis geologi teknik. Hasil penelitian menunjukkan ketebalan sedimen Kuartar mencapai kurang lebih 20 meter, terdiri dari tanah penutup, lempung, lanau – lempung, perselingan lanau - pasir lempungan, sisipan kerikil, pasir kasar dan batugamping sebagai batuan dasar. Keberadaan lapisan lempung sangat lunak hingga lunak, plastitas tinggi, kuat geser rendah, dicirikan nilai tahanan konus $q_t < 2$ MPa dan nilai N-SPT < 2 pada kedalaman -0,5 hingga -20 meter tersebar di Serangan – Tuban, mengindikasikan ancaman bahaya amblesan. Sedangkan keberadaan lapisan lanau – pasir sangat lepas-lepas, dicirikan nilai tahanan konus $q_t < 5$ MPa dan nilai N-SPT < 10 di permukaan hingga kedalaman -15 m tersebar di daerah

Kedonganan – Tanjung Benoa – Serangan, mengindikasikan kerentanan terhadap likuifaksi akibat gempa bumi. Gambaran sifat keteknikan secara vertikal dan spasial dapat memberikan informasi untuk perencanaan dan pencegahan risiko ancaman amblesan dan likuifaksi pada sedimen cekungan Kuartar Bali Selatan.

Kata kunci: geologi teknik, bahaya geologi, Kuartar, Bali Selatan.

ABSTRACT The rapid development in the coastal area on the Quaternary sedimentary basin of Serangan - Tuban - Tanjung Benoa, South Bali requires attention regarding its subsurface engineering geology and associated geological hazard. This paper presents the characteristics of subsurface sediments from engineering geology related to the potential hazards of subsidence and liquefaction. The utilized methods included geotechnical boring, cone penetration test, geotechnical laboratory tests and engineering geology analysis. Results showed that the thickness of Quarternary sediment reaches 20 m, consisting of top soil, clay, clay - silt, intercalation of silt and clayey sand, gravel, coarse sand and limestone as the badrock. The occurrence of very soft to soft clay, highly plastic with low shear strength at the depth of -0.5 to -10 m, characterized by cone resistance $q_t < 2$ MPa and N-SPT value < 2 is distributed in Serangan – Tuban and indicated to be subsidence prone. Meanwhile the very loose to loose silt-clay of cone resistance $q_t < 5$ MPa and N-SPT value < 10 is distributed in Kedongan – Tanjung Benoa – Serangan, and indicated to be susceptible to earthquake - induced liquefaction. The spatial and vertical engineering profiles of the subsurface geology provide valueable information for planning and mitigation of subsidence and

Naskah masuk : 03 Maret 2016
Naskah direvisi : 15 April 2016
Naskah diterima : 10 Mei 2016

Eko Soebowo
Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI
Komplek LIPI, Jl. Sangkuriang, Bandung 40135
E-mail : soebowoeko@yahoo.com

liquefaction hazards in the sediment from Quaternary basin of South Bali.

Keywords: *engineering geology, geological hazards, Quaternary, South Bali.*

PENDAHULUAN

Daerah Serangan – Tuban – Tanjung Benoa, Bali Selatan merupakan wilayah yang termasuk salah satu kawasan pengembangan infrastruktur dan tata ruang wilayah pesisir (Perda Kota Denpasar no.27 tahun 2011). Daerah studi tersusun oleh endapan aluvial berupa perselingan lempung, lanau, pasir dan kerikil yang mengisi cekungan lembah Serangan, Tuban, Tanjungbenoa berumur Kuarter (Hadiwidjojo *et al.*, 1998), dengan potensi kegempaan yang cukup tinggi (Daryono, 2011). Mempertimbangkan kondisi geologi berupa sedimen muda yang belum terkonsolidasi dan berada pada daerah rawan guncangan gempa maka pengetahuan karakteristik geologi teknik bawah permukaan penting untuk diketahui. Model geologi teknik berupa karakteristik kondisi geologi teknik bawah permukaan secara vertikal dan spasial dapat menjadi dasar perencanaan tapak maupun kajian dampak ancaman bahaya geologi (Royse *et al.*, 2009; Valverde *et al.*, 2014). Model geologi teknik dapat digunakan untuk mengidentifikasi permasalahan geologi teknik dan memperkirakan sifat material secara realistik (Delgado *et al.*, 2003).

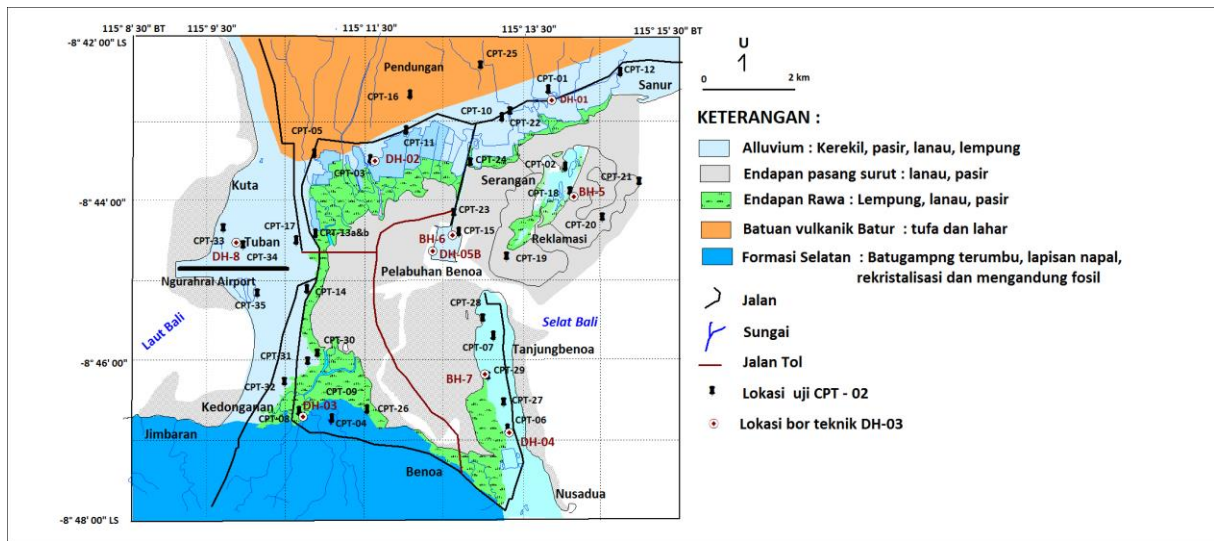
Ditinjau dari kondisi geologinya maka secara keteknikan daerah ini berpotensi terkena dampak bahaya likuifaksi akibat guncangan gempabumi dan masalah penurunan/amblesan (*settlement*) pada lempung lunak. Tulisan ini bertujuan untuk menghasilkan model geologi teknik yang dapat menjelaskan potensi bahaya geologi amblesan dan likuifaksi pada sedimen cekungan Kuarter di Bali Selatan. Metode yang digunakan adalah analisis data bor teknik, data sifat fisik dan keteknikan tanah, interpretasi data uji penetrasi konus (CPT), interpretasi lingkungan pengendapan Kuarter dan penyusunan model geologi teknik. Interpretasi stratigrafi dan estimasi sifat keteknikan dari data CPTu dilakukan menggunakan metode Robertson (1986). Gabungan data bor teknik dan CPTu digunakan untuk rekonstruksi sekuen stratigrafi secara menerus, identifikasi fasies dan korelasi stratigrafi (Amorosi dan Marchi, 1999; Mio dan Giacheti, 2007; Styllas, 2013).

Pemahaman batas dan distribusi vertikal dan spasial sifat keteknikan bawah permukaan pada endapan sedimen cekungan Kuarter daerah Serangan-Tuban-Tanjung Benoa penting untuk perencanaan masa depan wilayah pesisir dan upaya mitigasi dalam pengurangan risiko bahaya geologi pada jalur kegempaan tinggi.

LOKASI PENELITIAN

Wilayah pesisir Serangan – Kuta – Tanjung Benoa, Bali Selatan dan sekitarnya terletak pada koor dinat 115^{08'30"} – 115^{015'30"} Bujur Timur dan 08^{042'0"} - 08^{048'0"} Lintang Selatan, dengan ketinggian antara +0,45 m sampai dengan +6,00 m di atas permukaan laut (dpl). Wilayah pesisir ini merupakan suatu paparan endapan dataran pantai, fluviatil, pematang pantai, laguna pesisir dan alluvium, dicirikan oleh endapan dataran pantai Holosen yang berhadapan dengan Samudera Hindia. Penyebaran endapan Kuarter di daerah ini sempit mengikuti morfologi pantai. Geologi daerah Bali Selatan dan sekitarnya mulai dari tua ke muda disusun oleh endapan batugamping terumbu, setempat napal, yang termasuk dalam Formasi Selatan, di atasnya diendapkan hasil produk gunungapi Batur, yang terdiri dari tufa dan lahar, selanjutnya secara tidak selaras di atasnya diendapkan aluvium berupa pasir lepas, lanau, pasir, kerikil (Gambar 1, Hadiwijoyo *et al.*, 1998).

Endapan Kuarter ini dicirikan oleh perulangan satuan pasir yang cukup dominan dengan ukuran butiran mulai halus hingga kasar diselingi dengan lapisan lanau dan lempung dan sisipan kerakal-kerikil. Kedalaman endapan Kuarter di Bali Selatan mencapai kurang lebih 20 meter (Soebowo *et al.*, 2011). Sebaran kedalaman muka air tanah di daerah ini berkisar antara - 0,45 – 3,5 m dan di beberapa lokasi lebih dalam dari – 3,5 meter. Pantai Bali Selatan merupakan wilayah dengan kerentanan bahaya gempabumi tinggi, terletak ± 100 - 150 km di sebelah utara zona subduksi aktif (McCaffrey dan Nabalek, 1987 ; Daryono, 2011). Sejarah kegempaan di daerah ini telah mencatat peristiwa gempabumi besar seperti pada tahun 1862 : MMI VII, tahun 1890: MMI VII, tahun 1917 : MMI VII, tahun 1938 : MMI VII, tahun 1961 : MMI VII tahun 1976 : MMI VIII, tahun 1979 : MMI VII - VIII, tahun 1985 : 6.2 SR, tahun 1987 : 5.7 SR, tahun 2004: 6.1 SR, 6.2 SR, 5.5 SR selatan Bali dan terakhir 13 Oktober tahun 2011 dengan 6.8 SR (USGS dan BMKG).



Gambar 1. Peta geologi dan lokasi bor teknik dan uji penetrasi konus di daerah Bali Selatan (modifikasi dari Hadiwijoyo *et al.*, 1998)

Dalam peta zonasi gempa yang dikeluarkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum tahun 2010 daerah Bali Selatan masuk dalam kategori zona seismik 3, 4, dan 5.

METODE

Investigasi geologi teknik meliputi pemboran teknik sebanyak 8 titik dan pengujian CPTu (*Cone penetration test with pore water measurement*) sebanyak 35 titik telah dilakukan di daerah studi dengan sebaran lokasi pada Gambar 1. Data N-SPT dari pemboran teknik yang telah dikoreksi terhadap kedalaman dan energi penekanan digunakan untuk menginterpretasi kondisi keteknikan bawah permukaan (Rogers, 2006): pada tanah kohesif untuk estimasi konsistensi dan kohesi (Tabel 1) dan pada tanah non kohesif untuk estimasi tingkat kepadatan dan sudut geser dalam (Tabel 2)

Tabel 1. Interpretasi konsistensi dan kuat geser tak teralirakan tanah kohesif dari data N-SPT (Rogers, 2006).

Konsistensi	Kohesi (kPa)	N-SPT
Sangat lunak	12	< 2
Lunak	12-24	2-4
Teguh	24-48	4-8
Kaku	48-96	8-15
Sangat kaku	96-192	15-30
Keras	192	>30

Tabel 2. Interpretasi tingkat kepadatan dan sudut geser dalam tanah non kohesif dari data N-SPT (Meyerhoff, 1956).

Tingkat Kepadatan	Kepadatan Relatif (%)	Sudut Geser Dalam (°)	N-SPT
Sangat lepas	< 0,2	< 30	< 4
Lepas	0,2 – 0,4	30 – 35	4 - 10
Agak padat	0,4 – 0,6	35 – 40	10 - 30
Padat	0,6 – 0,8	40 – 45	30 - 50
Sangat Padat	> 0,8	> 45	> 50

Pengujian CPTu menghasilkan stratifikasi lapisan bawah permukaan dan sifat keteknikan secara kontinu. Parameter respon tanah yang diperoleh adalah profil kontinu tekanan konus (q_c), tahanan gesek (f_s), tekanan pori (u_2). Nilai tahanan konus (q_c) mengindikasikan kepadatan dan konsistensi tanah, sementara tahanan gesek (f_s) dinyatakan dalam parameter rasio friksi (FR) yang merupakan indikator perubahan ukuran butir dan tekstur. Nilai rasio friksi (FR) didapatkan dari :

$$FR (\%) = f_s/q_c \times 100 \tag{1}$$

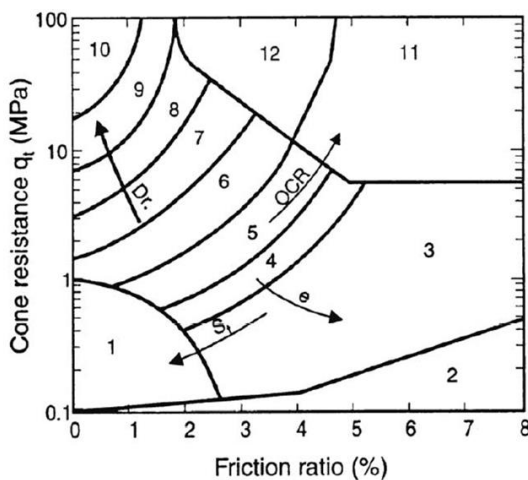
f_s = tahanan gesek (MPa); q_c = tahanan konus (MPa)

Nilai tahanan konus (q_c) dikoreksi terhadap tekanan pori, sehingga didapatkan nilai tahanan konus terkoreksi (q_i) sebagai:

$$q_t = q_c + u(1 - a) \quad (2)$$

q_c = tahanan konus (MPa); u = tekanan pori (MPa); a = rasio area konus

Metode interpretasi stratigrafi dari data CPTu menggunakan kurva SBT dari Robertson (1986) yang memiliki korelasi baik dengan klasifikasi tanah berbasis ukuran butir (USCS) (Amorosi *et al.*, 1999). Plot tahanan konus (q_t) terhadap *friction ratio* merupakan ekspresi dari besar butir, tekstur dan konsistensi, sehingga dapat digunakan untuk mendapatkan profil stratigrafi bawah permukaan (Robertson, 1986) (Gambar 2).



Zone	Soil Behavior Type
1	Sensitive fine grained
2	Organic material
3	Clay
4	Silty Clay to clay
5	Clayey silt to silty clay
6	Sandy silt to clayey silt
7	Silty sand to sandy silt
8	Sand to silty sand
9	Sand
10	Gravelly sand to sand
11	Very stiff fine grained*
12	Sand to clayey sand*

Gambar 2. CPT Soil Behaviour Chart (SBT) (Robertson, 1986) (modifikasi dari Robertson, 2006).

Estimasi parameter keteknikan seperti kuat geser tak teralirkan, kepadatan relatif dan rasio overkonsolidasi dapat dilakukan menggunakan data CPTu (Robertson, 2006).

Perhitungan kuat geser tak teralirkan dari data CPT/CPTu (Robertson, 1990) :

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_v}{N_{kt}}$$

$$N_{kt} = 10,50 + 7 \log F_r$$

dengan S_u = kuat geser tak teralirkan (kPa); q_t = tahanan konus (MPa); σ_v = tegangan vertikal awal (MPa); F_r = rasio friksi (%)

Perhitungan kepadatan relatif (D_r) dari data CPT/CPTu (Robertson, 1990):

$$D_r = \frac{1}{c_2} \ln \frac{q_{c1}}{c_0}$$

$$q_{c1} = \frac{(q_c/p_a)}{(\sigma'_{vo}/p_a)^{0.5}}$$

dengan c_2 dan c_0 adalah konstanta tanah, q_{c1} adalah tahanan konus yang dikoreksi terhadap tekanan *overburden*.

Perhitungan nilai *overconsolidation ratio* (OCR) tanah lempung dari data CPT/CPTu (Robertson, 1990):

$$OCR = k \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{vo}} \right)$$

dengan q_t : tahanan konus terkoreksi (MPa); σ_{v0} : tegangan vertikal (MPa); σ'_{vo} : tegangan vertikal efektif (MPa).

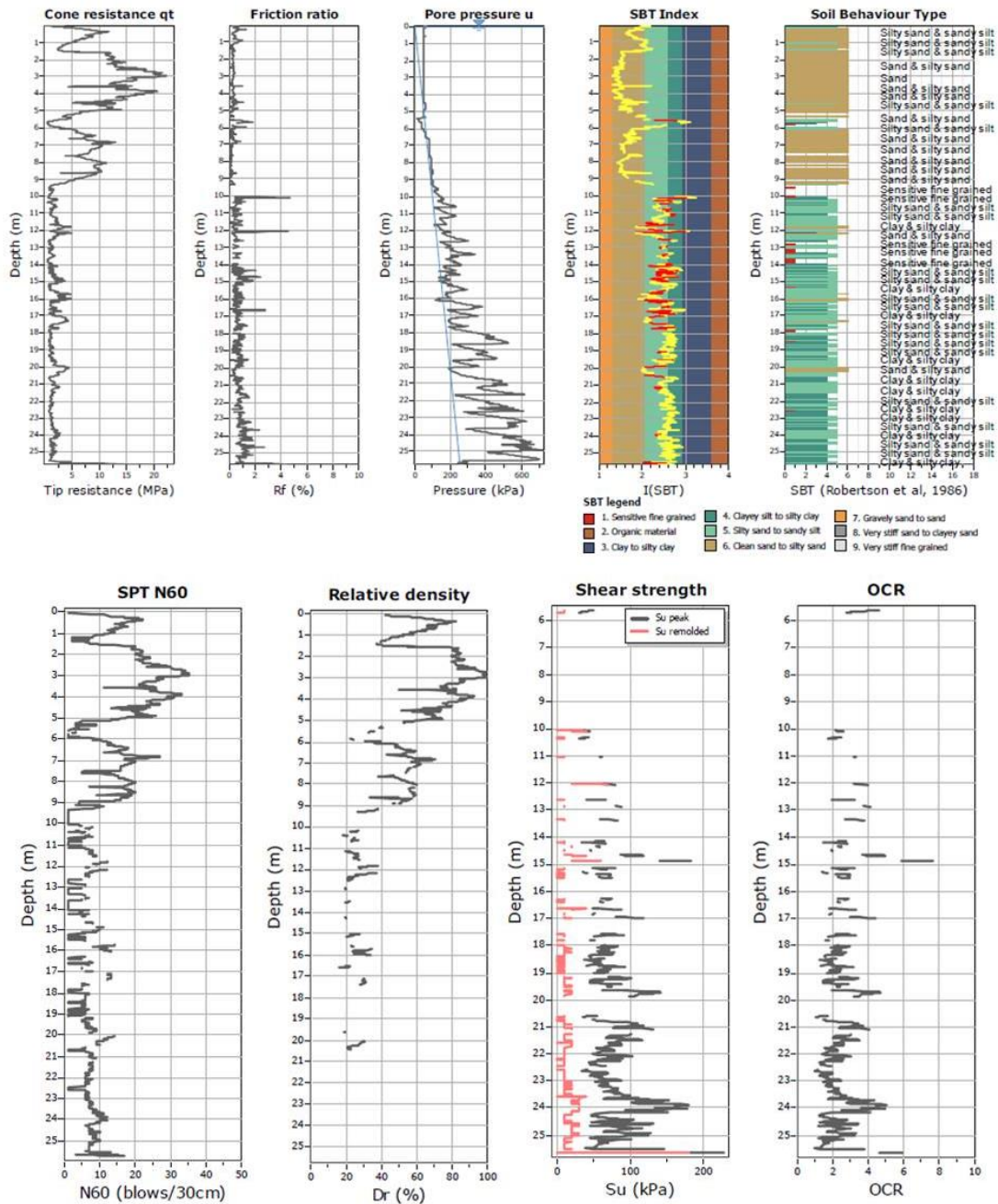
Nilai OCR didefinisikan sebagai rasio tegangan yang pernah diterima sebelumnya pada masa pengendapan dibandingkan dengan tegangan yang diterima saat ini. Berdasarkan nilainya maka rasio overkonsolidasi (OCR) dapat diklasifikasikan sebagai berikut (US Army Corps of Engineers, 1990):

- $OCR > 1$: terkonsolidasi berlebih (*overconsolidated*)
- $OCR > 1 - 3$: terkonsolidasi sedikit berlebih (*lightly overconsolidated*)
- $OCR > 6$: terkonsolidasi banyak (*heavily overconsolidated*)
- $OCR = 1$: terkonsolidasi normal (*normally consolidated*)
- $OCR < 1$: belum terkonsolidasi / tanah masih mengalami proses konsolidasi (*underconsolidated*)

Aplikasi beban pada lempung dengan nilai $OCR \leq 1$ menghasilkan amblesan (*settlement*) yang lebih besar dari lempung yang sudah terkonsolidasi ($OCR > 1$). Tipikal hasil interpretasi data CPTu terlihat pada Gambar 3.

Analisis geologi teknik dilakukan dengan menyusun stratifikasi bawah permukaan dan sifat keteknikan berdasarkan litologi, interpretasi nilai N-SPT dan data CPTu, parameter densitas relatif dan OCR dan hasil laboratorium.

Selanjutnya dilakukan korelasi antar penampang yang dapat menggambarkan sifat keteknikan dan interpolasi spasial variasi kedalaman dan ketebalan lapisan agar diperoleh gambaran karakteristik sifat keteknikan secara horisontal dan spasial. Korelasi dan interpolasi tersebut menggambarkan zona kemampuan daya dukung tanah kohesif dan non kohesif yang dapat menginformasikan potensi bahaya amblesan dan likuifaksi.



Gambar 3. Hasil pengukuran CPTu – 03 di daerah Serangan – Tuban – Tanjung Benoa, Bali.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Geologi Bawah Permukaan

Kondisi bawah permukaan lintasan A - A' di bagian utara (Gambar 4) tersusun oleh lapisan lempung - lanau yang cukup tebal mencapai kurang lebih 15 meter, dicirikan warna abu-abu kehitaman, lunak, plastis, terkadang mengandung material organik berupa akar dan cangkang fosil. Asosiasi fasies ini dicerminkan oleh nilai tahanan konus (q_t) < 2 MPa dan nilai rasio gesekan (FR) 4 - 5 %, ditafsirkan sebagai endapan laguna pesisir (*lagoon deposits*). Juga terjadi perulangan perlapisan lempung - lanau dengan pasir lepas (*unconsolidated*) yang kadang mengandung pecahan cangkang. Asosiasi fasies ini dicirikan nilai tahanan konus (q_t) 2 - 5 MPa dan nilai rasio gesekan (FR) 1 - 2 %, ditafsirkan sebagai pematang pantai (*beach deposits*).

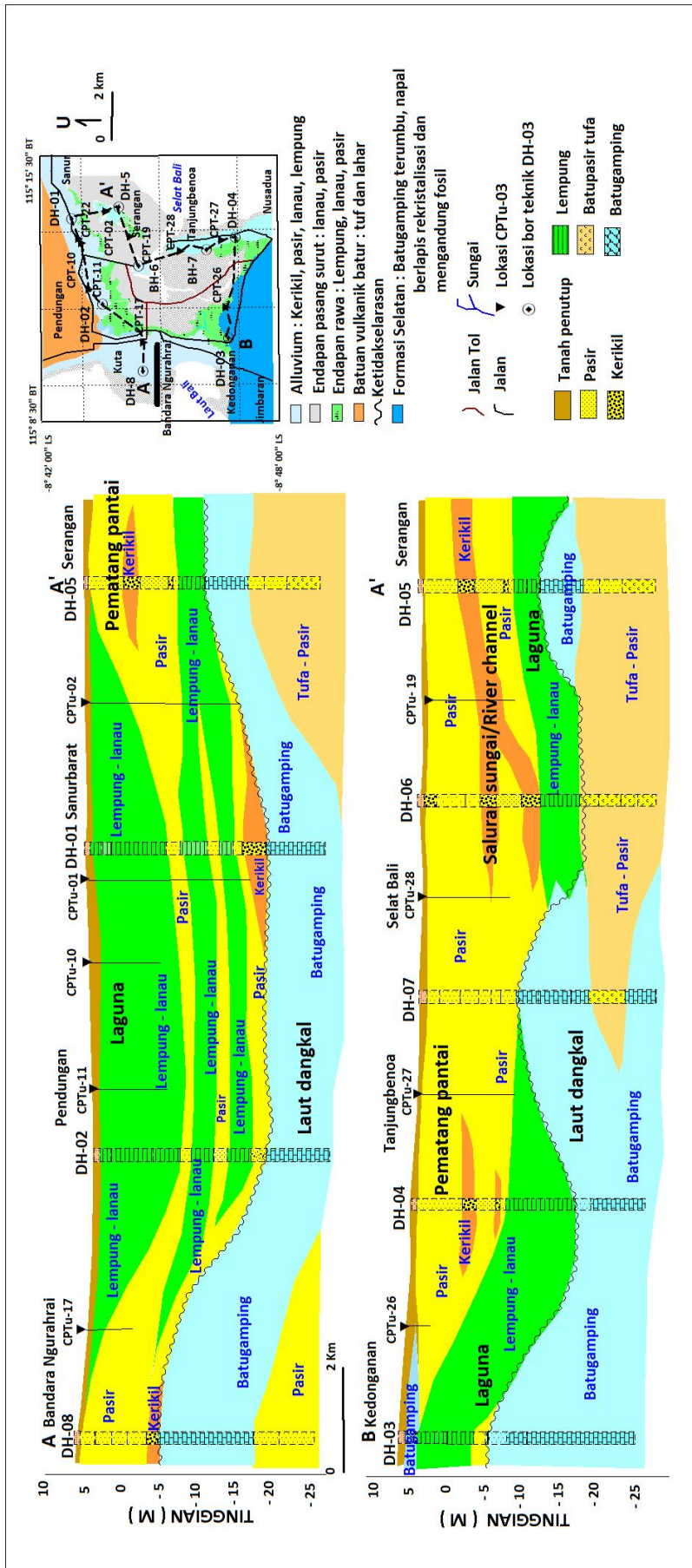
Perkembangan sikuen fasies lempung - lanau, lempung dan pasir saling membaji di beberapa tempat dengan ketidakteraturan. Di bagian tengah penampang ini fasies lempung menebal dengan membentuk cekungan hingga mencapai kedalaman - 20 meter. Kondisi bawah permukaan lintasan B - A' bagian selatan tersusun oleh lapisan lempung mulai kedalaman 5 hingga 18 meter, di bagian atas diendapkan pasir dan setempat kerikil yang ditandai dengan nilai tahanan konus (q_t) yang tinggi > 10 MPa dan nilai FR kecil (0,4 - < 1%), menunjukkan kecenderungan menghalus ke atas dan nilai-nilai yang sangat kontras, ditafsirkan sebagai endapan fluvial yang berupa saluran sungai (*river channel deposits*) (Boggs, 2006). Berdasarkan penampang yang diperoleh ini menunjukkan bahwa ketebalan endapan Kuartar di cekungan ini mencapai kedalaman kurang lebih 20 meter, selanjutnya di bagian bawah merupakan batuan dasar berupa batugamping yang masif.

Karakteristik geologi teknik pada sedimen cekungan Kuartar di daerah Serangan - Tuban - Tanjung Benoa, Bali Selatan dari hasil uji N-SPT, CPTu dan uji laboratorium terdapat pada Tabel 3. Terlihat bahwa pada kedalaman mulai 0 hingga - 20 meter di bagian utara seperti di Sanur Barat - Pendungan - Serangan terdapat lapisan lempung, lanau dan sedikit tanah organik, nilai N-SPT antara 1 - 4, nilai tahanan konus q_t < 5 MPa, nilai fraksi rasio 1 - 5 persen, nilai OCR rendah < 1 - 2. Pengujian Atterberg contoh lempung dan lanau menghasilkan rentang batas cair 18,45 - 158,5%,

batas plastis 42,5 - 72, 38%, indeks plastis 32,45 - 102,26 %, dengan demikian satuan lempung-lanau dapat diklasifikasikan sebagai lempung, lanau dan tanah organik dengan plastisitas tinggi (CH, MH, OH), serta lanau dan tanah organik plastisitas sedang (ML, OL). Sedangkan di bagian selatan seperti di Kedonganan - Tanjung Benoa - Serangan pada kedalaman 0 hingga - 20 meter didominasi oleh lapisan lanau, pasir halus, pasir sedang. Nilai N-SPT antara 4 - < 10, nilai tahanan konus q_t < 10 MPa, nilai fraksi rasio < 1%, distribusi butiran material cenderung mengandung berukuran pasir - lanau. Sebaran muka airtanah di daerah ini cenderung dangkal dengan kisaran kedalaman -1 hingga -3 meter.

Konsistensi dan Kepadatan Relatif Kaitannya dengan Bahaya Geologi Bawah Permukaan

Permasalahan geologi teknik utama di daerah ini yaitu keberadaan material sedimen berbutir halus, kohesif, konsistensi sangat lunak hingga lunak dan material sedimen pasir - lanau dengan kepadatan relatif sangat lepas - lepas. Berdasarkan kriteria dan ciri litologi dari pemboran teknik dan pola kurva CPTu, menunjukkan bahwa pada sedimen Kuartar Cekungan Bali Selatan terjadi perulangan litofasies yang dipengaruhi oleh proses pengangkatan dan penurunan akibat tektonik disertai gelombang pasang surut, kondisi arus dan geometri cekungan. Hal ini terlihat dari sikuen litofasies yang tidak menerus dan terlihat saling membaji di beberapa kedalaman mulai - 1 hingga - 20 m, dimana penampang arah barat - timur bagian utara daerah Pendungan - Sanur Barat - Serangan yang didominasi oleh material sedimen lempung dan lanau sangat lunak - lunak. Zona ini terbentuk oleh kondisi arus tenang, tekstur dan butiran halus yang menggambarkan lingkungan pengendapan laguna pantai. Sedangkan penampang arah barat - timur bagian selatan Kedonganan - Tanjung Benoa - Serangan yang didominasi endapan material lanau - pasir halus lepas - pasir, berukuran pasir halus - sedang dan setempat campuran pecahan material kerang, pengaruh arus gelombang pasang surut sehingga garis pantai sering berpindah seiring berjalannya waktu sebagai respon dari perubahan *sea level* ataupun pasokan sedimen, tekstur butiran menghalus ke arah atas yang menggambarkan lingkungan pengendapan pematang pantai.



Gambar 4. Penampang geologi bawah permukaan di daerah Bandara – Pendungan – Sanur Barat – Serangan dan Kedonganan – Tanjungbenoa – Serangan, Bali Selatan.

Tabel 3. Karakteristik keteknikan sedimen Kuarter Serangan-Tuban-Tanjungbenoa, Bali Selatan.

Kedalaman (m)	Lokasi	Lingkungan Sedimen Kuarter dan Material	N-SPT	Tahanan Konus, q_t (Mpa) FR (%)	Konsistensi dan OCR	Kepadatan Relatif (%)	USCS	Kuat Geser Tak teralirkan Su (kPa)	Bahaya
0,5 - 15	DH-01, 02, CPT 01, 02, 10	Laguna pesisir Lempung, lanau sedikit organik	1 - 2	< 2 2 - 5	Sangat lunak < 1 - 2	-	ML, MH, OL	0,5 - 8	Amblesan, Likuifaksi
0 - 4, 12 - 20	DH-01, 02, 03, 04, 05, 06; CPT 17, 02, 28	Dataran pantai Lanau, lempung	2 - 4	2 - 5 1 - 2	Lunak 1 - 2	Sangat lepas > 15	CH, OH	12 - 25	Amblesan, Likuifaksi
0 - 15	DH-01, 02, CPT 01, 02, 10	Pematang pantai Lanau, pasir halus - sedang	4 - 8	5 - 10 < 1		Sangat lepas > 15	SW-SM	25 - 50	Likuifaksi
1,5 - 15	DH-01, 02, 04, 05, 06, 07, CPT 1,3,6, 15, 18, 29	Endapan Saluran /channel deposits pasir kasar, kerikil, gravel	8 - 15	8 - 10 < 1		Lepas 15 - 30	SP-SW	50 - 100	
1,5 - 10	DH-01, 02, 05, 08, CPT 1,3,18,33, 34	Penghalang pantai/beach barrier Pasir halus- kasar	15 - 30	10 - 15		Padat 35	SW-SP	100 - 200	
10 - 25	DH-01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08; CPT 1,3,6, 8, 15, 18, 29,	Laut dangkal Batugamping Batupasir tuf masif	46 - .> 50	.>15		Agak padat 60 - 85	SP	.> 200	

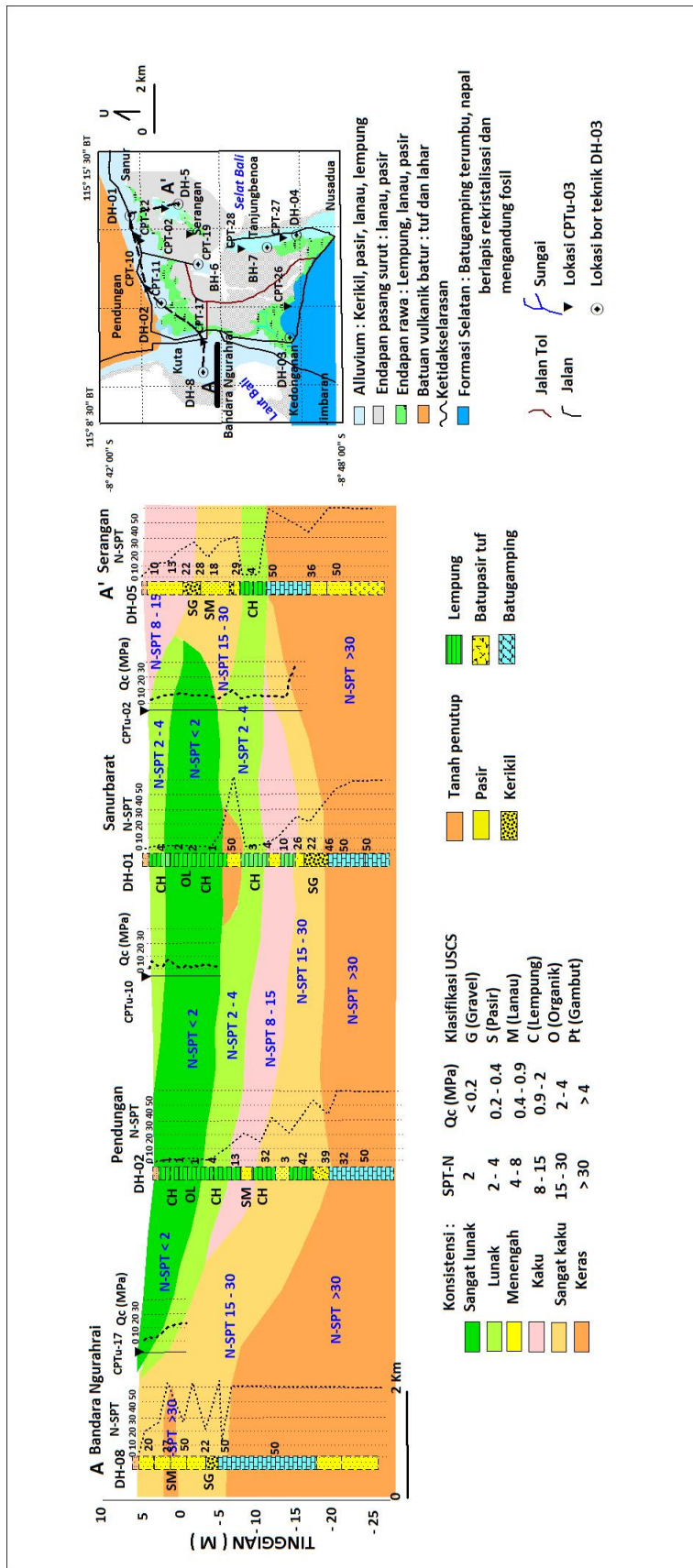
Gambar 5 menyajikan penampang geologi teknik dan konsistensi material lempung lunak – sangat lunak dan sebaran ketebalan lempung lunak. Karakteristik dicirikan dengan nilai N-SPT 1 – 4, nilai $q_t < 0.4$ MPa, nilai OCR ≤ 1 hingga 2, nilai kuat geser tak teralirkan (Su) pada lanau - lempung 0,5 - 25 kPa menunjukkan konsistensi tanah lunak hingga sangat lunak (Das, 1997). Gambar 6 memperlihatkan material lempung sangat lunak – lunak terkonsentrasi di kedalaman –0,5 hingga –20 meter membentuk pola cekungan yang tersebar di Pendungan – Sanur Barat – Serangan. Dengan demikian, pada zona ini, material lempung memiliki daya dukung rendah dan berpotensi ambles.

Gambar 7 dan 8, memperlihatkan penampang geologi teknik dan sebaran ketebalan material sedimen pasir sangat lepas – lepas, butiran halus – lanau dengan muka airtanah yang dangkal –0,4 hingga -1 meter. Dalam kondisi dinamik akibat guncangan gempa bumi, material lanau, pasir sangat lepas – lepas dapat mengalami kenaikan tekanan pori transien secara cepat, sehingga kekuatan ikatan antar butir tanah pasir hilang dan terjadi likuifaksi. Material rentan likuifaksi ini mempunyai kepadatan sangat lepas - lepas, nilai N-SPT < 4 - 10, $q_t < 5$ MPa dengan

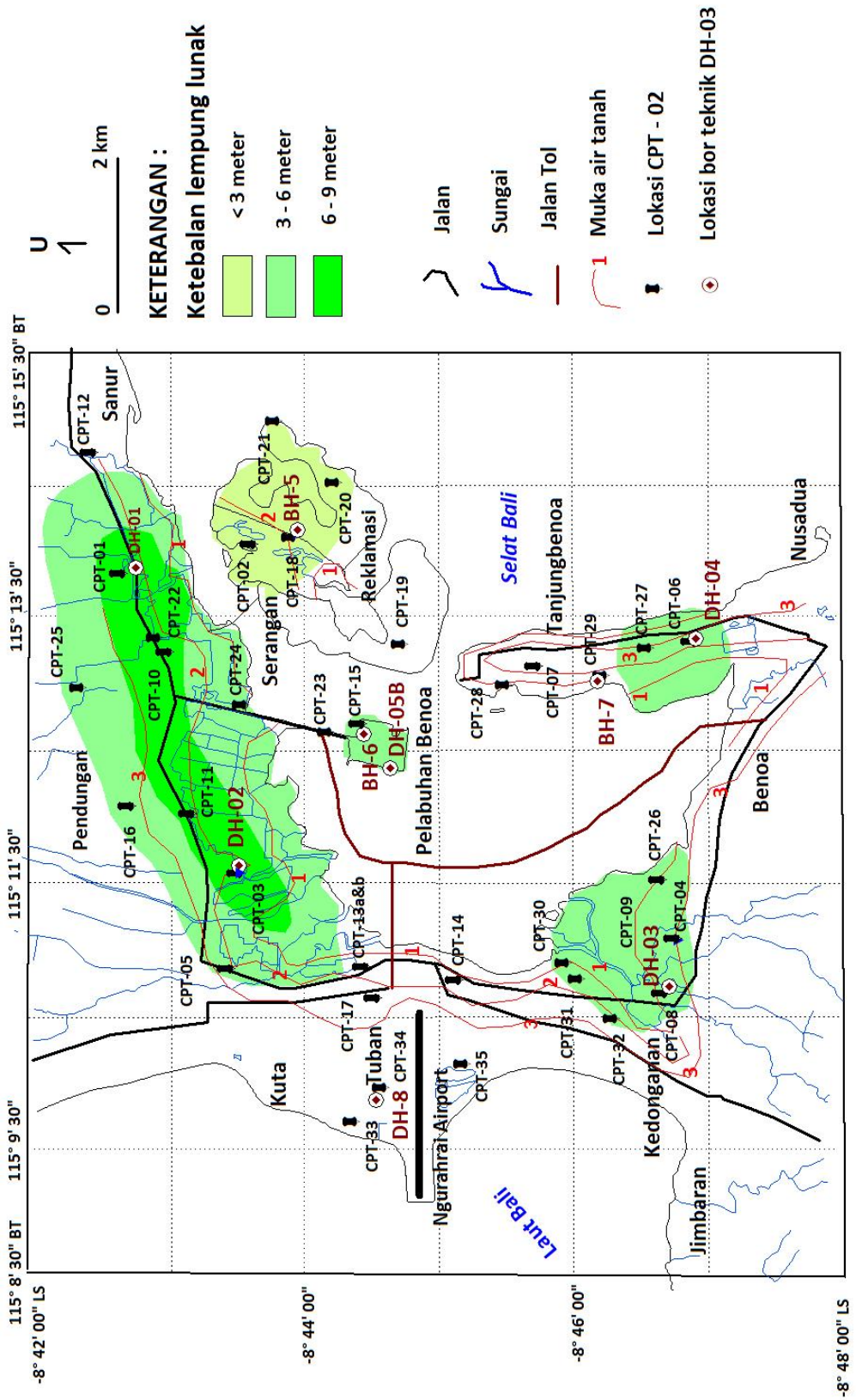
ketebalan 0,2 – 12 m. Sebaran endapan rentan likuifaksi ini terdapat di daerah Kedonganan, Tanjung Benoa, Serangan, dan bagian selatan Pendungan merupakan bagian dari pematang pantai dan sebagian pada wilayah reklamasi di Serangan.

KESIMPULAN

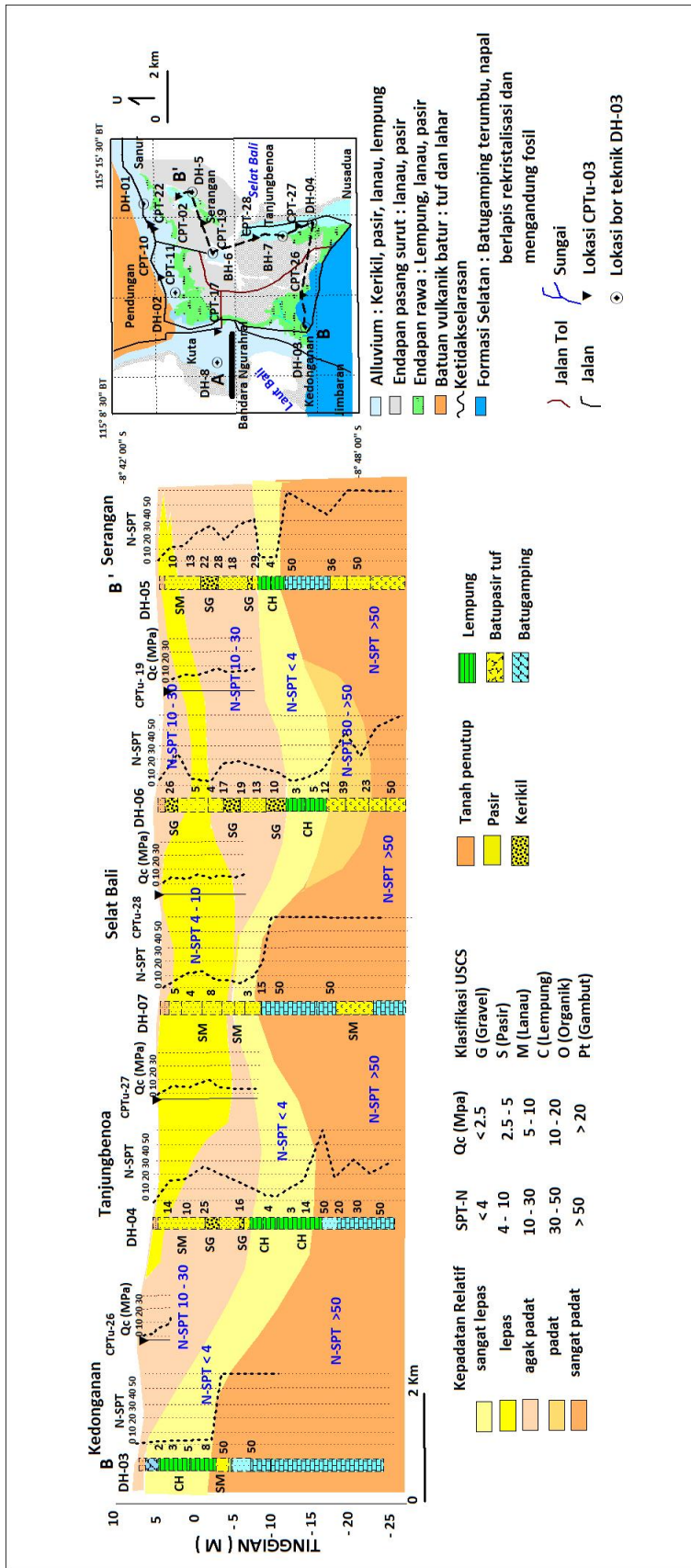
Hasil analisis geologi dan geologi teknik menunjukkan bahwa sedimen Kuarter di daerah Pendungan – Sanur Barat, Bali Selatan merupakan endapan laguna pantai yang dicirikan oleh material lempung dengan ketebalan sekitar 20 meter, tingkat konsistensi lempung sangat lunak hingga lunak dengan nilai $q_t < 5$ MPa dan nilai N-SPT < 4 mengindikasikan rentan amblesan. Daerah Kedonganan – Tanjungbenoa – Serangan yang merupakan endapan pematang pantai berupa material pasir berukuran halus – sedang, tingkat kepadatan sangat lepas hingga lepas dengan nilai $q_t < 10$ MPa dan nilai N-SPT < 10 mengindikasikan kerentanan likuifaksi apabila terjadi guncangan gempa bumi berskala cukup besar. Dengan demikian di lokasi-lokasi tersebut perlu mendapat perhatian dalam upaya pengurangan risiko bahaya amblesan dan likuifaksi.



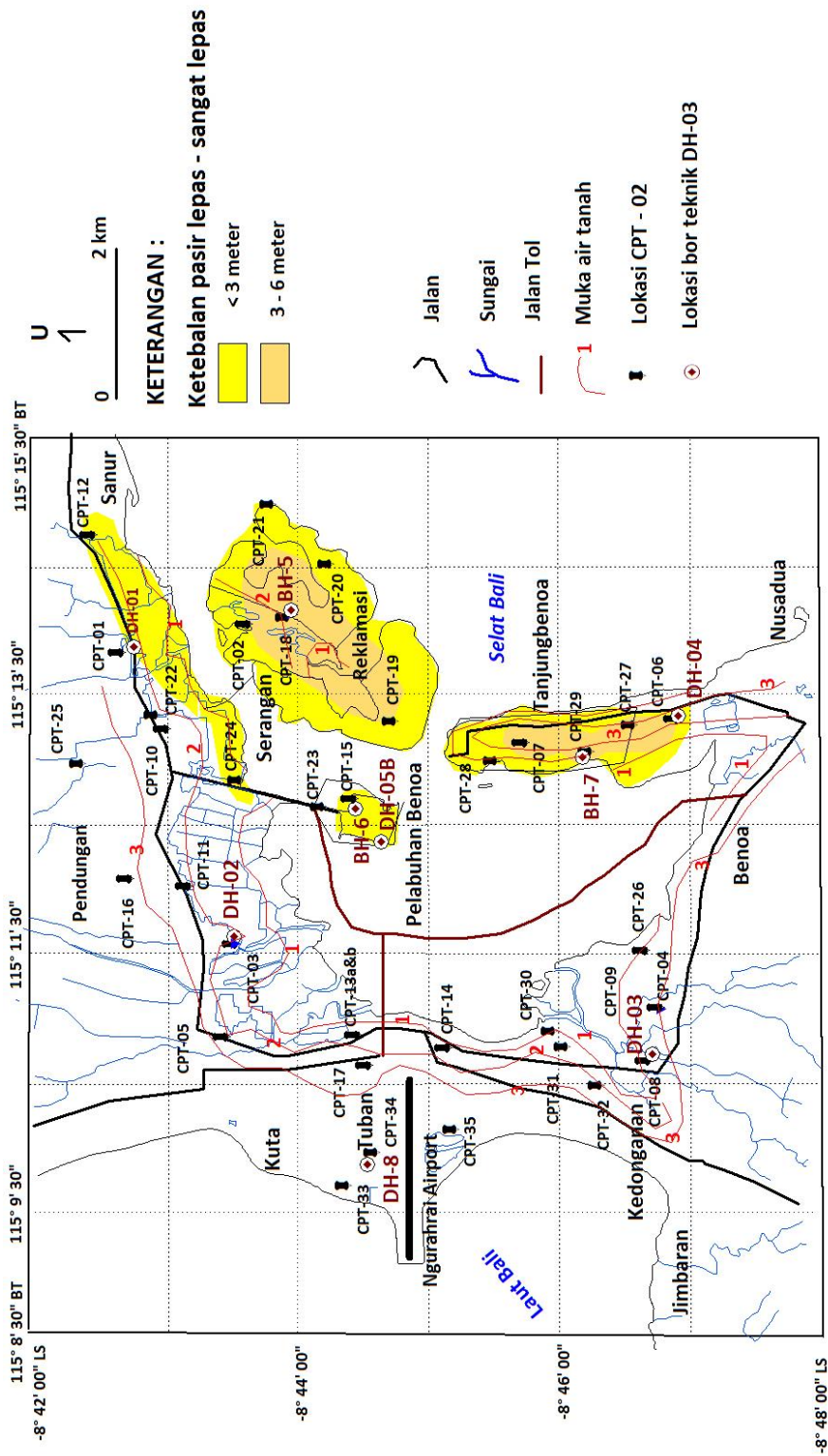
Gambar 5. Penampang geologi teknik dan sifat konsistensi bawah permukaan di Ngurahrai – Pendungan – Sanur Barat - Serangan, Bali Selatan.



Gambar 6. Peta sebaran ketebalan lempung lunak dalam kaitannya dengan ancaman bahaya amblesan di Pendungari – Sanur Barat - Serangan – Tanjung Benoa, Bali Selatan.



Gambar 7. Penampang geologi teknik dan kepadatan relatif bawah permukaan di Kedonganan – Tanjung Benoa – Serangan, Bali Selatan.



Gambar 8. Peta sebaran ketebalan pasir sangat lepas – lepas dalam kaitannya dengan ancaman bahaya likuifaksi di Kedonganan – Tanjung Benoa - Serangan, Bali Selatan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kepala Pusat Penelitian Geoteknologi-LIPI yang telah memberikan kesempatan dan kepercayaan untuk melakukan penelitian ini. Ucapan yang sama juga disampaikan kepada seluruh pengelola anggaran DIPA tahun 2010, 2011. Juga kepada rekan-rekan teknisi Lab Geologi Teknik yang telah membantu terlaksananya kegiatan di lapangan dan laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

- Amorosi, A., & Marchi, N., 1999. High-resolution sequence stratigraphy from piezocone tests: an example from the Late Quaternary deposits of the southeastern Po Plain. *Sedimentary Geology*, 128 (1), 67-81.
- Boggs, S., 2006. *Principles of Sedimentology and Stratigraphy* (4th edition). Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, pp. 289 – 332.
- Daryono, 2011. Identifikasi Sesar Belakang Busur (*Back Arc Thrust*) Daerah Bali Berdasarkan Seismisitas dan Solusi Bidang Sesar, Artikel Kebumihan, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, www.bmkg.go.id, 5 Januari 2011.
- Das, B.M., 1997. *Advanced Soil Mechanics*, Second edition. Taylor & Francis Publishers, Washington, 457 pp.
- Delgado, J., Alfaro, P., Andreu, J. M., Cuenca, A., Doménech, C., Estévez, A., and Yébenes, A., 2003. Engineering - geological Model of the Segura River Flood Plain (SE Spain) : a Case Study for Engineering Planning Engineering. *Engineering Geology*, 68 (3), 171-187.
- Hadiwidjojo, P, MM, Samodera, H dan Amin, T.C., 1998. Peta Geologi Lembar Bali, Nusa Tenggara, Skala 1 : 100.000, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Irsyam, M., Sengara, W., Aldiamar, F., Widiyantoro, S., Triyoso, W., Kertapati, E., Natawidjaja, D. H., Meilano, I., Soehardjono, Asrurifak, Ridwan, M., 2010. Peta Zonasi Gempa Indonesia, Kementerian Pekerjaan Umum.
- McCaffrey R. and Nabalek, J., 1987. Earthquake, Gravity, and the Origin of the Bali Basin: An Example of Nascent Continental Fold and Thrust Belt, *J. Geophys. Res.*, 441 – 459.
- Mio, G. D. and Giacheti, H. L., 2007. The Use of Piezocone Tests for High-resolution Stratigraphy of Quaternary Sediment Sequences in the Brazilian Coast. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 79 (1), 153 - 170.
- Meyerhoff, G.G., 1956. Penetration Test and Bearing Capacity of Cohesionless Soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 82 (1), 1-19.
- Robertson. P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., and Greig, J., 1986. Use of Piezometer Cone Data. In-Situ'86 Use of In-situ testing in Geotechnical Engineering, GSP 6, ASCE, Reston, VA, Special Publication, 1263 - 1280.
- Robertson, P.K., 1990. Soil Classification Using the Cone Penetration Test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1), 151-158.
- Robertson, P. K., 2006. *Guide to In Situ Testing*. Gregg Drilling and testing Incorporated.
- Rogers, J. D., 2006, Subsurface Exploration Using the Standard Penetration Test and the Cone Penetrometer Test, *Environmental & Engineering Geoscience*, 12(2), 161–179.
- Royse, K. R., Rutter, H. K., & Entwisle, D. C., 2009. Property attribution of 3D geological models in the Thames Gateway, London: New ways of visualising geoscientific information. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68 (1), 1 - 16.
- Sejarah gempa Bali Selatan., 2016. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/historical.php> dan <http://balai3.denpasar.bmkg.go.id/sejarah-gempa-merusak> (diakses 15 Maret 2016)
- Soebowo, E, Kumoro, Y, Ruslan, M, Daryono, M.R, Sukaca, Widodo, 2011. Model Mitigasi Bahaya Likuifaksi Untuk Daerah Rawan Gempabumi di Daerah Sanur –

Benoa, Bali Selatan, Laporan Teknis,
Puslit Geoteknologi – LIPI, Bandung.

Styllas, M., 2013. A Simple Approach to Define
Holocene Sequence Stratigraphy Using
Borehole and Cone Penetration Test Data.
Sedimentology, 61 (2), 444 - 460.

Valverde-Palacios, I., Valverde-Espinosa, I.,
Irigaray, C., & Chacón, J., 2014.
Geotechnical map of Holocene alluvial
soil deposits in the metropolitan area of
Granada (Spain): a GIS approach. *Bulletin
of Engineering Geology and the
Environment*, 73 (1), 177 – 192.