

KERENTANAN LIKUIFAKSI WILAYAH KOTA BANDA ACEH BERDASARKAN METODE UJI PENETRASI KONUS

Cone Penetration Test (CPT)-Based Liquefaction Susceptibility of Banda Aceh City

Adrin Tohari¹, Khori Sugianti¹, Arifan Jaya Syahbana¹ dan Eko Soebowo¹

¹Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI

ABSTRAK. Pengetahuan mengenai kerentanan likuifaksi di suatu wilayah kota pesisir yang rawan gempabumi besar sangat diperlukan dalam perencanaan tata ruang untuk mengurangi bencana seismik. Makalah ini menyajikan hasil evaluasi potensi likuifaksi di wilayah Kota Banda Aceh berdasarkan metode uji penetrasi konus untuk menghasilkan mikrozonasi kerentanan penurunan lapisan tanah akibat likuifaksi di wilayah ini. Hasil analisis menunjukkan bahwa potensi likuifaksi terdapat pada lapisan tanah pasir dan campuran pasir dan lanau, yang dicirikan oleh nilai tahanan konus dan hambatan setempat masing-masing lebih kecil dari 15 MPa dan 150 kPa pada kedalaman dan ketebalan yang bervariasi. Berdasarkan hasil perhitungan penurunan tanah, wilayah Banda Aceh dapat dibagi menjadi lima zona kerentanan. Zona kerentanan tinggi terutama terdapat di Kecamatan Kuta Alam dan Syah Kuala, sedangkan zona kerentanan rendah terutama terdapat di wilayah Kecamatan Banda Raya. Dengan demikian, investigasi geoteknik detail sangat diperlukan untuk mencegah kerusakan pada bangunan dan infrastruktur akibat likuifaksi di wilayah Kota Banda Aceh.

Kata kunci : gempabumi, likuifaksi, mikrozonasi, penurunan tanah, uji penetrasi konus.

Naskah masuk : 30 Juni 2015
Naskah direvisi : 08 Desember 2015
Naskah diterima : 10 Desember 2015

Adrin Tohari
Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI, Jalan Cisitua
Sangkuriang 40135, Bandung, Jawa Barat
E-mail: adrin@geotek.lipi.go.id

ABSTRACT. Knowledge of liquefaction susceptibility is very important for spatial planning of a coastal city prone to big earthquakes. This paper presents the results of liquefaction potential evaluation based on cone penetration test to produce a microzonation map of liquefaction-induced ground settlement for Banda Aceh City. Results of the analysis show that liquefaction would occur in layers of loose to medium sand and silt-sand mixtures with the values of tip resistance and sleeve friction of less than 15 MPa and 150 kPa, respectively, at various depths. On the basis of ground settlement calculation, the city can generally be divided into five zones. High susceptible zone to ground settlement is mainly concentrated within the Kuta Alam and Syah Kuala Sub-District. Meanwhile, the zone of low susceptibility is within the Banda Raya Sub-District. Thus, detailed geotechnical investigation is necessary to mitigate liquefaction damage on buildings and infrastructures in Banda Aceh City.

Keywords: cone penetration test, earthquake, ground settlement, liquefaction, microzonation.

PENDAHULUAN

Peristiwa gempabumi besar dapat menimbulkan dampak primer seperti guncangan, kenaikan dan penurunan tektonik, patahan permukaan, dan dampak sekunder seperti tsunami, longsoran dan likuifaksi. Fenomena likuifaksi akibat gempabumi merupakan peristiwa hilangnya kekuatan lapisan pasir lepas akibat kenaikan tekanan airpori karena menerima getaran gempabumi. Dengan demikian, peristiwa likuifaksi akan terjadi di daerah rawan gempabumi besar yang tersusun oleh endapan pasir jenuh air dengan kepadatan rendah, dan di daerah dengan pergerakan permukaan ko-seismik

melebihi nilai batas ambangnya (Seed & Idriss, 1971).

Potensi likuifaksi dapat dipelajari dengan menggunakan tiga metode pengujian lapangan, yaitu uji penetrasi standard, uji penetrasi konus dan pengukuran kecepatan geser. Dari ke tiga metode ini, uji penetrasi konus sering digunakan karena keunggulan dalam kontrol kualitas dan pengulangan data, dan mendeteksi variasi jenis lapisan tanah (Youd *et al*, 2001). Dengan demikian, kedalaman dan ketebalan lapisan tanah yang mempunyai potensi likuifaksi dapat diketahui dengan lebih akurat dibandingkan dengan jenis metode lainnya. Tohari *et al* (2011) menggunakan metode uji penetrasi konus untuk memprediksi kerentanan likuifaksi di wilayah Kota Padang. Hasil prediksi memperlihatkan kesesuaian dengan fenomena likuifaksi yang terjadi saat gempa bumi tahun 2009.



Gambar 1. Fenomena penurunan pondasi bangunan bertingkat akibat likuifaksi saat gempa bumi 24 Desember 2004 (Tohari *et al*, 2007).

Peristiwa gempa bumi Aceh tahun 2004 (Mw 9,3) juga menyebabkan fenomena likuifaksi di Kota Banda Aceh. Kerusakan-kerusakan bangunan dan infrastruktur yang terjadi umumnya akibat hilangnya kapasitas dukung lapisan tanah (Gambar 1), dan tersebar di dataran aluvium sekitar pantai dan Sungai Krueng Aceh, seperti penurunan pondasi bangunan (Tohari *et al*, 2007) dan penurunan tanggul pada sisi kiri lokasi *Aceh Water Sharing* (Tobita *et al*, 2006). Penelitian potensi likuifaksi berdasarkan data SPT, dengan menggunakan metode Seed dan Idriss (1971), di daerah pesisir di Krueng Raya mengindikasikan bahwa lapisan pasir yang berpotensi likuifaksi

berada pada kedalaman antara 3 dan 15 m (Munirwan dan Gunawan, 2012).

Bukti-bukti fenomena likuifaksi tersebut menunjukkan bahwa lapisan tanah endapan aluvial di wilayah Kota Banda Aceh berpotensi untuk mengalami likuifaksi. Mengingat informasi potensi likuifaksi di wilayah Kota Banda Aceh masih sangat terbatas pasca gempa bumi 2004, maka daerah-daerah rentan terhadap likuifaksi belum dapat terpetakan secara menyeluruh. Makalah ini menyajikan hasil studi kerentanan penurunan tanah akibat likuifaksi di wilayah Kota Banda Aceh berdasarkan metode uji penetrasi konus. Sedangkan sasaran dari studi ini adalah untuk (1) mengevaluasi potensi likuifaksi lapisan tanah berdasarkan data penetrasi konus, (2) menentukan besaran penurunan tanah akibat likuifaksi, dan (3) menyusun peta mikrozonasi kerentanan likuifaksi berdasarkan besaran penurunan tanah.

LOKASI STUDI

Lokasi studi terletak di wilayah Kota Banda Aceh, Propinsi Nanggroe Aceh Darussalam. Secara geografis, Kota Banda Aceh terletak antara 05°16'15" – 05°36'16" Lintang Utara dan 95°16'15" – 95°22'35" Bujur Timur, dengan ketinggian antara -0,45 m sampai dengan +1,00 m di atas permukaan laut (dpl), dengan rata-rata 0,8 m dpl (sumber: RTRW 2009-2029).

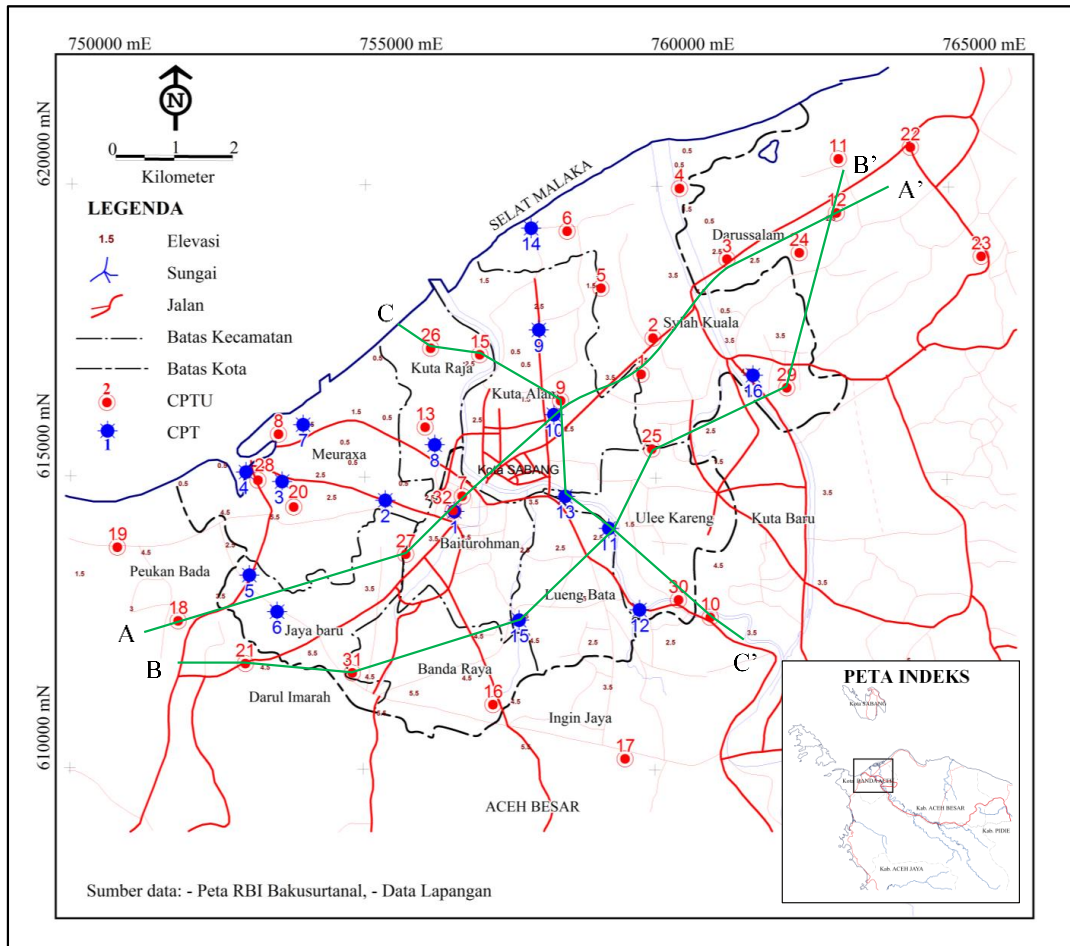
Kondisi Geologi

Berdasarkan peta geologi lembar Banda Aceh, Sumatera (Bennet *et al*, 1981), wilayah Kota Banda Aceh umumnya tersusun oleh endapan kuartar yang terdiri dari endapan pematang pantai, endapan rawa, dan endapan aluvial berumur Pleistosen dan Holosen. Berdasarkan data pemboran, lapisan endapan aluvial dekat dengan pantai dapat mencapai ketebalan 206 m di bawah permukaan tanah di daerah Cot Paya di sebelah Timur Sungai Krueng Aceh. Sementara itu, beberapa puluh kilometer ke arah hulu di daerah Lambaro, endapan aluvium mempunyai ketebalan minimum 70 m dengan proporsi 20% pasir dan 80% lempung pasir hingga pasir lempungan (Ploethner dan Siemon, 2006).

Kondisi Seismo-Tektonik

Pola tektonik wilayah Propinsi Nanggroe Aceh Darussalam dipengaruhi oleh pergerakan lempeng pada zona subduksi yang terletak ±250 km di sebelah Barat pulau Sumatera. Berdasarkan peta

Kondisi seismo-tektonik ini menyebabkan wilayah Kota Banda Aceh termasuk dalam zona bahaya seismik tinggi. Irsyam *et al* (2010) memperlihatkan bahwa wilayah Kota Banda Aceh mempunyai nilai percepatan puncak di batuan dasar sebesar 0,3 – 0,4 g untuk periode ulang 475



Gambar 2. Peta lokasi titik pengujian penetrasi konus dan pemboran teknik di daerah studi. Lintasan setiap penampang diberikan dengan garis hijau

seismisitas tahun 1900-2012 (Hayes *et al*, 2010), pergerakan lempeng ini seringkali menghasilkan gempa bumi dengan magnitudo 4,5 atau lebih, yang umumnya berpusat di laut sebelah Barat dari Kota Banda Aceh dengan kedalaman 0 – 69 km.

Ancaman gempa bumi juga dapat berasal dari segmen Aceh dan segmen Seulimum dari Zona Patahan Sumatera yang berada dekat dengan wilayah Kota Banda Aceh. Menurut Sieh & Natawidjaja (2000), gempa bumi pernah terjadi pada segmen Seulimum pada tahun 1964 dengan magnitudo Ms 6,5.

tahun, dan sebesar 0,5 – 0,6 g untuk periode ulang 2475 tahun. Hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan Young *et al* (1997), untuk gempa bumi pada jarak 100 km dengan kedalaman 30-60 km dan magnitudo gempa Mw sebesar 9,0 hingga 9,3 memberikan nilai PGA sebesar antara 0,3g hingga 0,4g. Mempertimbangkan kondisi lapisan tanah lunak yang tebal, maka nilai percepatan maksimum di permukaan tanah di wilayah Kota Banda Aceh dapat 1,5 hingga 2,0 kali lebih besar.

METODE

Evaluasi Potensi Likuifaksi

Gambar 2 menyajikan titik-titik lokasi pengujian penetrasi konus untuk mendapatkan profil tahanan ujung konus (q_c), hambatan setempat (f_s) yang diperlukan dalam evaluasi potensi likuifaksi lapisan tanah di lokasi studi. Pengujian penetrasi konus dilakukan dengan menggunakan metode *piezocone* (CPTU) pada 32 lokasi, dan menggunakan metode penetrasi konus mekanik (CPT) pada 16 lokasi.

Evaluasi potensi likuifaksi dengan metode uji penetrasi konus dilakukan dengan 3 (tiga) tahapan yaitu (1) perhitungan rasio tegangan siklik (*Cyclic Stress Ratio* - *CSR*), (2) perhitungan rasio hambatan siklik (*Cyclic Resistance Ratio* - *CRR*), dan (3) evaluasi potensi likuifaksi dengan menghitung faktor keamanan (*FK*) lapisan tanah granular terhadap likuifaksi.

Perhitungan *CSR* menggunakan persamaan Seed dan Idriss (1971) sebagai berikut:

$$CSR = 0.65 \left(a_{\max} / g \right) \times \left(\sigma_{vo} / \sigma'_{vo} \right) r_d$$

dimana a_{\max} adalah percepatan horizontal maksimum pada permukaan lapisan tanah, g adalah percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/detik}^2$), σ_{vo} adalah tegangan beban vertikal total, dan σ'_{vo} adalah tegangan beban vertikal efektif, and r_d adalah faktor pengurangan tegangan menurut Liao dan Whitman (1986). Mempertimbangkan percepatan maksimum di batuan dasar sebesar $0,3g$, dan faktor amplifikasi sebesar $1,5$ untuk lapisan tanah lunak di wilayah Kota Banda Aceh, maka a_{\max} sebesar $0,45$ akan dipergunakan dalam perhitungan *CSR*. Nilai percepatan maksimum ini sesuai dengan Sengara (2008).

Sementara itu, perhitungan rasio hambatan siklik (*CRR*) berdasarkan data CPT menggunakan prosedur Robertson dan Wride (1998), sebagai berikut:

$$CRR_{7,5} = \begin{cases} 0,833 \cdot \left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right] + 0,05 & \text{untuk } (q_{c1N})_{cs} < 50 \\ 93 \cdot \left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right]^3 + 0,08 & \text{untuk } 50 < (q_{c1N})_{cs} < 160 \end{cases}$$

dimana $CRR_{7,5}$ adalah nilai rasio hambatan siklik untuk gempabumi dengan magnitudo M_w sebesar $7,5$ dan $(q_{c1N})_{cs}$ adalah nilai ekuivalen pasir bersih untuk hambatan penetrasi konus ternormalisasi (q_{c1N}), yang dipengaruhi oleh indeks perilaku tanah. Hasil perhitungan *CSR* dan $CRR_{7,5}$ akan dipergunakan dalam perhitungan faktor keamanan (*FK*) lapisan tanah terhadap likuifaksi dengan menggunakan persamaan dibawah ini:

$$FK = \left(\frac{CRR_{7,5}}{CSR} \right) \cdot MSF$$

dimana MSF adalah faktor kelipatan besaran gempabumi yang diberikan dengan persamaan berikut ini (Youd *et al*, 2001) :

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M^{2.56}}$$

dimana M adalah besaran gempa yaitu sebesar $9,3$. Batasan faktor keamanan (*FK*) yang digunakan dalam studi ini yaitu $FK > 1,0$ untuk mengindikasikan lapisan tanah aman terhadap likuifaksi, dan $FK < 1,0$ untuk mengindikasikan lapisan tanah tidak aman terhadap likuifaksi.

Zonasi Penurunan Tanah Total

Zonasi kerentanan penurunan tanah akibat likuifaksi diperoleh dengan menghitung penurunan tanah total di setiap titik uji penetrasi konus, dengan menggunakan metode Ishihara dan Yoshimine (1992). Hasil perhitungan penurunan lapisan tanah dipergunakan untuk mendapatkan zonasi kerentanan penurunan tanah akibat likuifaksi berdasarkan klasifikasi pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi zonasi kerentanan penurunan tanah akibat likuifaksi (dimodifikasi dari Ishihara dan Yoshimine, 1992).

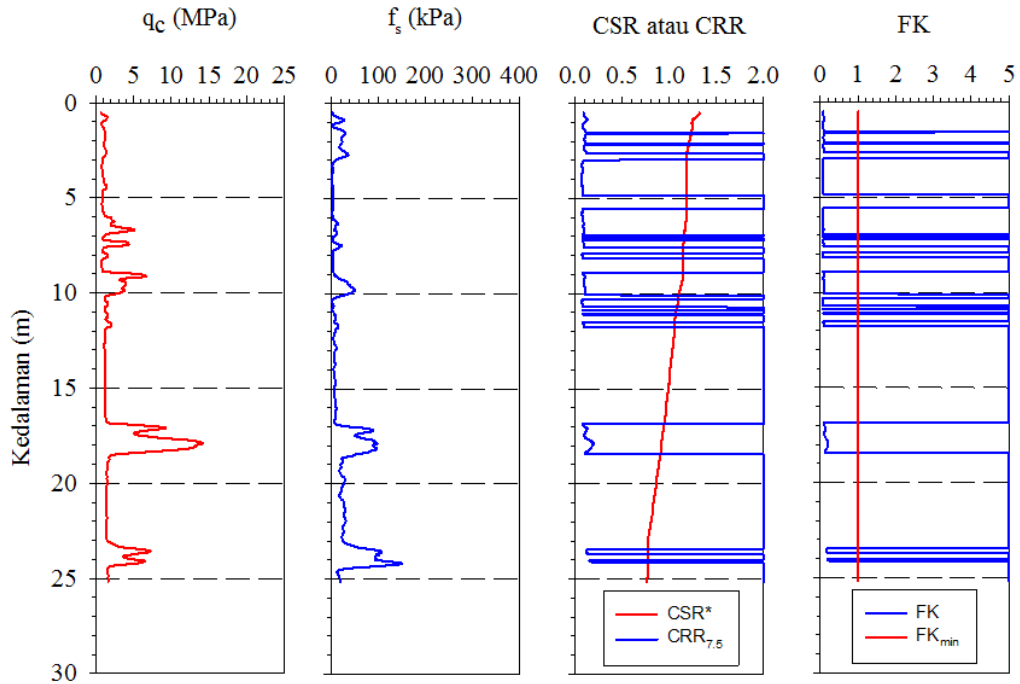
No.	Penurunan tanah (cm)	Zonasi kerentanan likuifaksi
1.	< 5.0	Sangat rendah
2.	5.0 – 10.0	Rendah
3.	10.0 – 20.0	Sedang
4.	20.0 – 40.0	Tinggi
5.	> 40.0	Sangat tinggi

HASIL DAN PEMBAHASAN

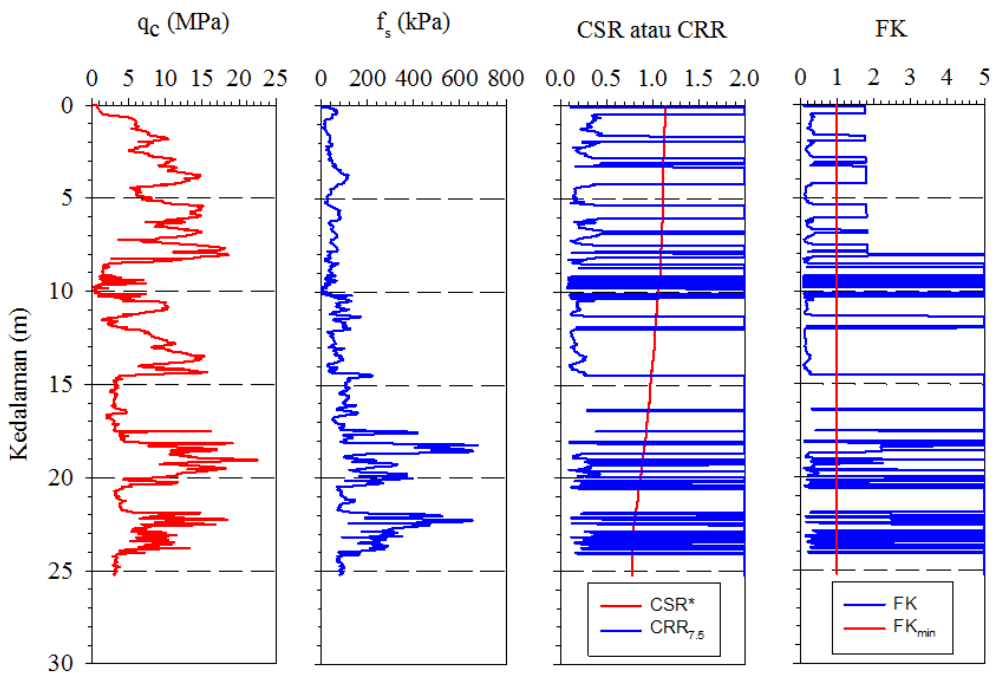
Potensi Likuifaksi

Gambar 3 hingga 5 memperlihatkan hasil analisis potensi likuifaksi berdasarkan data uji penetrasi

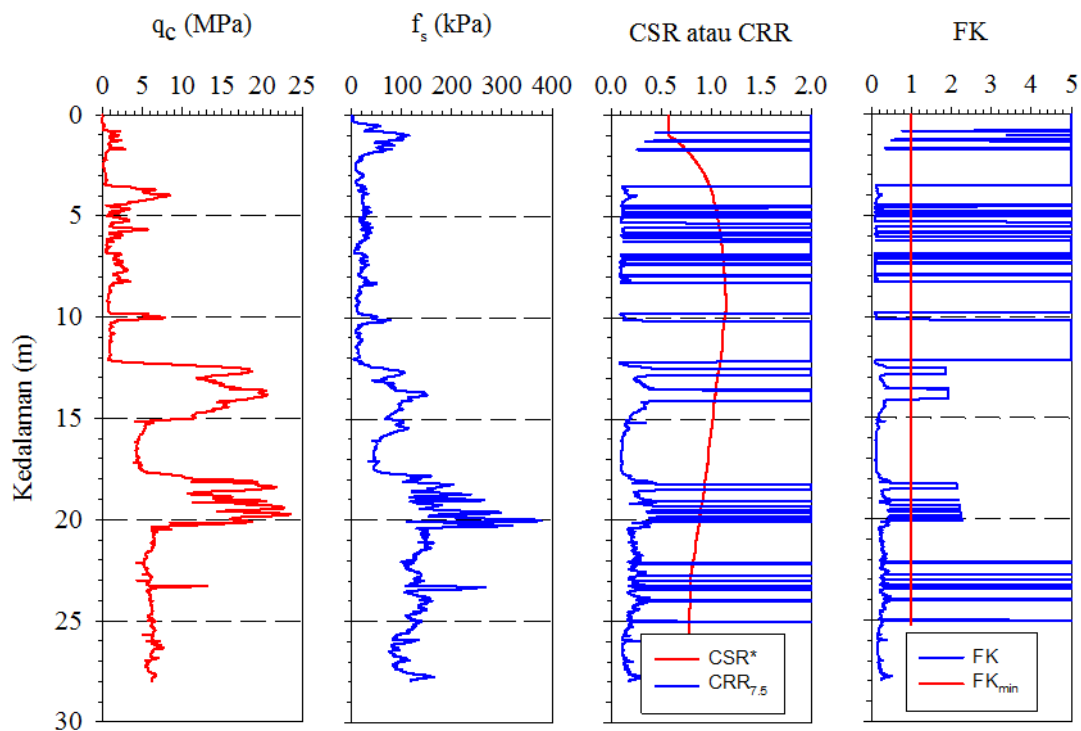
konus untuk beberapa titik pengujian. Lapisan tanah yang berpotensi untuk likuifaksi dicirikan oleh nilai *CRR* lebih kecil dari nilai *CSR* atau nilai *FK* lebih kecil dari 1,0.



Gambar 3. Grafik hasil uji piezocone dan potensi likuifaksi untuk lokasi CPTU-09.



Gambar 4. Grafik hasil uji piezocone dan potensi likuifaksi untuk lokasi CPTU-18.



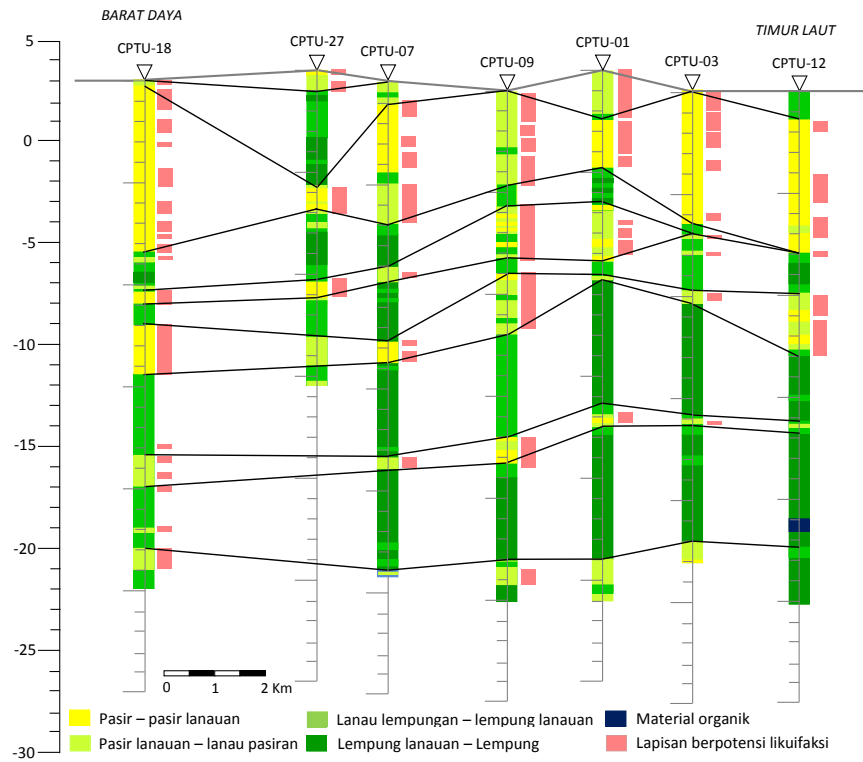
Gambar 5. Grafik hasil uji piezocone dan potensi likuifaksi untuk lokasi CPTU-28.

Berdasarkan grafik-grafik tersebut, potensi likuifaksi bervariasi dari satu lokasi ke lokasi lainnya. Hal ini disebabkan oleh perbedaan profil q_c dan f_s yang mengontrol jenis lapisan tanah di setiap lokasi. Pada umumnya likuifaksi dapat terjadi pada lapisan tanah pasir hingga kedalaman 25 m, yang dicirikan oleh nilai q_c kurang dari 15 MPa dan nilai f_s kurang dari 150 kPa. Karena potensi likuifaksi dipengaruhi oleh nilai a_{max} , maka semakin rendah nilai a_{max} , semakin rendah kriteria nilai q_c dan f_s untuk lapisan tanah pasir yang akan mengalami likuifaksi. Grafik-grafik potensi likuifaksi ini juga menunjukkan bahwa lapisan tanah yang dicirikan oleh nilai q_c lebih kecil dari 5 MPa dan f_s lebih kecil dari 125 kPa cenderung untuk tidak dapat mengalami likuifaksi. Menurut klasifikasi Robertson (1990), rentang nilai q_c dan f_s tersebut mencirikan lapisan tanah berperilaku lempung.

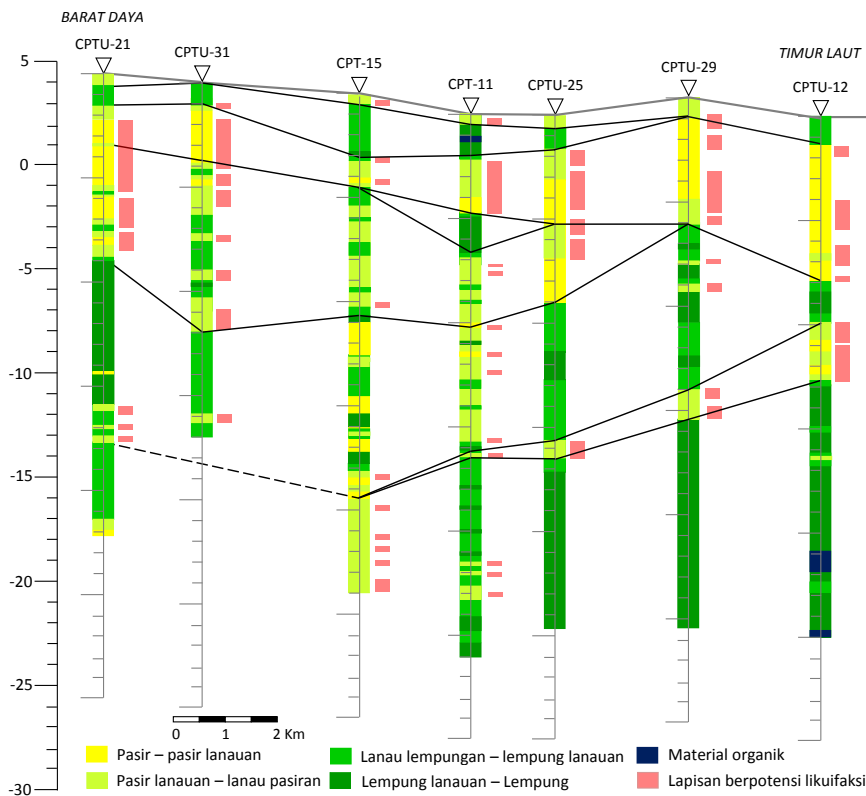
Gambar 6 hingga 8 memperlihatkan gambaran jenis, kedalaman dan ketebalan lapisan tanah. Jenis lapisan tanah pada setiap profil lapisan tanah ditentukan berdasarkan indeks perilaku tanah menurut Robertson (1990). Kedalaman dan ketebalan lapisan tanah yang mengalami likuifaksi ditunjukkan dengan simbol berwarna merah muda.

Berdasarkan Gambar 6, likuifaksi umumnya terjadi mulai dari lapisan tanah pasir dan lanau di permukaan hingga kedalaman 10 m, meskipun likuifaksi masih dapat terjadi pada lapisan pasir dan lanau pada kedalaman lebih dari 15 m. Ketebalan lapisan tanah yang terlikuifaksi cenderung bervariasi dari satu lokasi ke lokasi yang lain, karena terasosiasi dengan faktor variasi kepadatan tanah, yang dikontrol oleh nilai q_c dan f_s . Pada umumnya, lapisan pasir terlikuifaksi dapat mencapai 4 m, sementara lapisan tanah lanau yang terlikuifaksi dapat mencapai ketebalan 3 m.

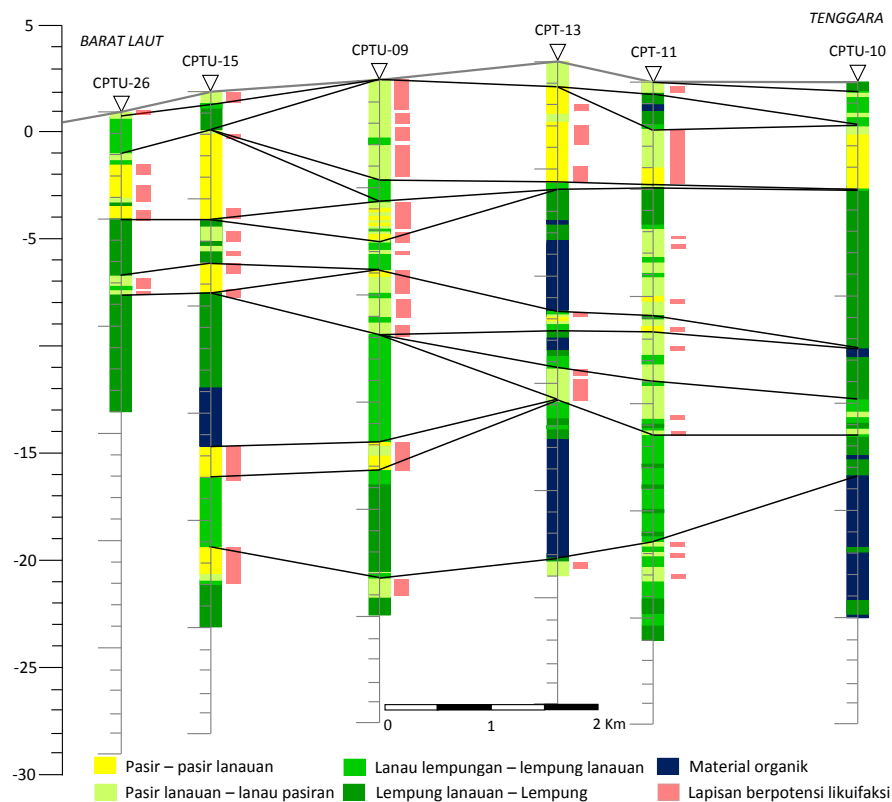
Jika dibandingkan dengan Gambar 6, Gambar 7 memperlihatkan bahwa likuifaksi cenderung tidak terjadi pada lapisan tanah di permukaan di daerah yang semakin jauh dari pinggir pantai. Hal ini disebabkan oleh keberadaan lapisan tanah berbutir lebih halus (lanau lempungan hingga lempung lanauan) yang lebih mendominasi hingga kedalaman 2.0 m dari permukaan tanah. Akan tetapi, keberadaan lapisan tanah ini tidak akan mengurangi potensi lapisan pasir dibawahnya untuk mengalami likuifaksi. Dengan kata lain, lapisan pasir lepas hingga medium yang berada di bawah lapisan tanah lempung yang tebal akan tetap dapat mengalami likuifaksi.



Gambar 6. Penampang lapisan tanah yang berpotensi likuifaksi untuk lintasan A-A'.Garis hitam penuh menggambarkan korelasi jenis lapisan tanah.



Gambar 7. Penampang lapisan tanah yang berpotensi likuifaksi untuk lintasan B-B'.Garis hitam penuh menggambarkan korelasi jenis lapisan tanah.



Gambar 8. Penampang lapisan tanah yang berpotensi likuifaksi untuk lintasan C-C'. Garis hitam penuh menggambarkan korelasi jenis lapisan tanah.

Penampang lapisan tanah yang berpotensi likuifaksi untuk lintasan tegak lurus pantai disajikan pada Gambar 8. Potensi likuifaksi cenderung meningkat pada bagian tengah penampang yang didominasi oleh lapisan pasir lanauan hingga lanau pasiran. Sementara itu, lapisan tanah di bagian Tenggara cenderung tidak mengalami likuifaksi karena didominasi oleh lapisan lempung lanauan hingga material organik. Dengan demikian, potensi likuifaksi akan berkurang pada wilayah-wilayah di bagian Tenggara, yang tersusun oleh lapisan lempung yang tebal.

Mikrozonasi Kerentanan Penurunan Tanah Akibat Likuifaksi

Tabel 2 menyajikan hasil perhitungan penurunan lapisan tanah akibat likuifaksi, berdasarkan metode Ishihara dan Yoshimine (1992), untuk setiap titik uji penetrasi konus. Berdasarkan tabel tersebut, nilai penurunan tanah di permukaan sangat bervariasi mulai dari 1,5 hingga mencapai 53 cm, karena variasi jenis dan kepadatan lapisan tanah di setiap lokasi. Dengan kata lain, kondisi

lapisan tanah secara spesifik akan mengontrol besaran penurunan lapisan tanah akibat likuifaksi di wilayah Kota Banda Aceh.

Berdasarkan nilai penurunan tanah pada Tabel 2 dan klasifikasi kerentanan penurunan tanah (Tabel 1), maka dihasilkan peta mikrozonasi kerentanan penurunan tanah akibat likuifaksi sebagaimana disajikan pada Gambar 9. Ringkasan kerentanan setiap kecamatan disajikan pada Tabel 3. Berdasarkan peta mikrozonasi tersebut, wilayah Kota Banda Aceh dibagi menjadi 5 zona kerentanan penurunan tanah akibat likuifaksi, dari zona kerentanan sangat rendah hingga kerentanan sangat tinggi.

Zona kerentanan tinggi hingga sangat tinggi hampir terdapat di semua wilayah kecamatan di Kota Banda Aceh, kecuali wilayah kecamatan Baiturahman. Pada zona kerentanan ini, penurunan tanah yang dapat terjadi lebih besar dari 20 cm. Zona kerentanan ini sangat tepat diperuntukkan sebagai kawasan lindung, ruang terbuka hijau, kawasan pariwisata dan kawasan hutan bakau. Menurut pola ruang saat ini dalam

Tabel 2. Nilai penurunan tanah (S_{total}) akibat likuifaksi untuk setiap titik uji penetrasi konus berdasarkan metode Ishihara dan Yoshimine (1992).

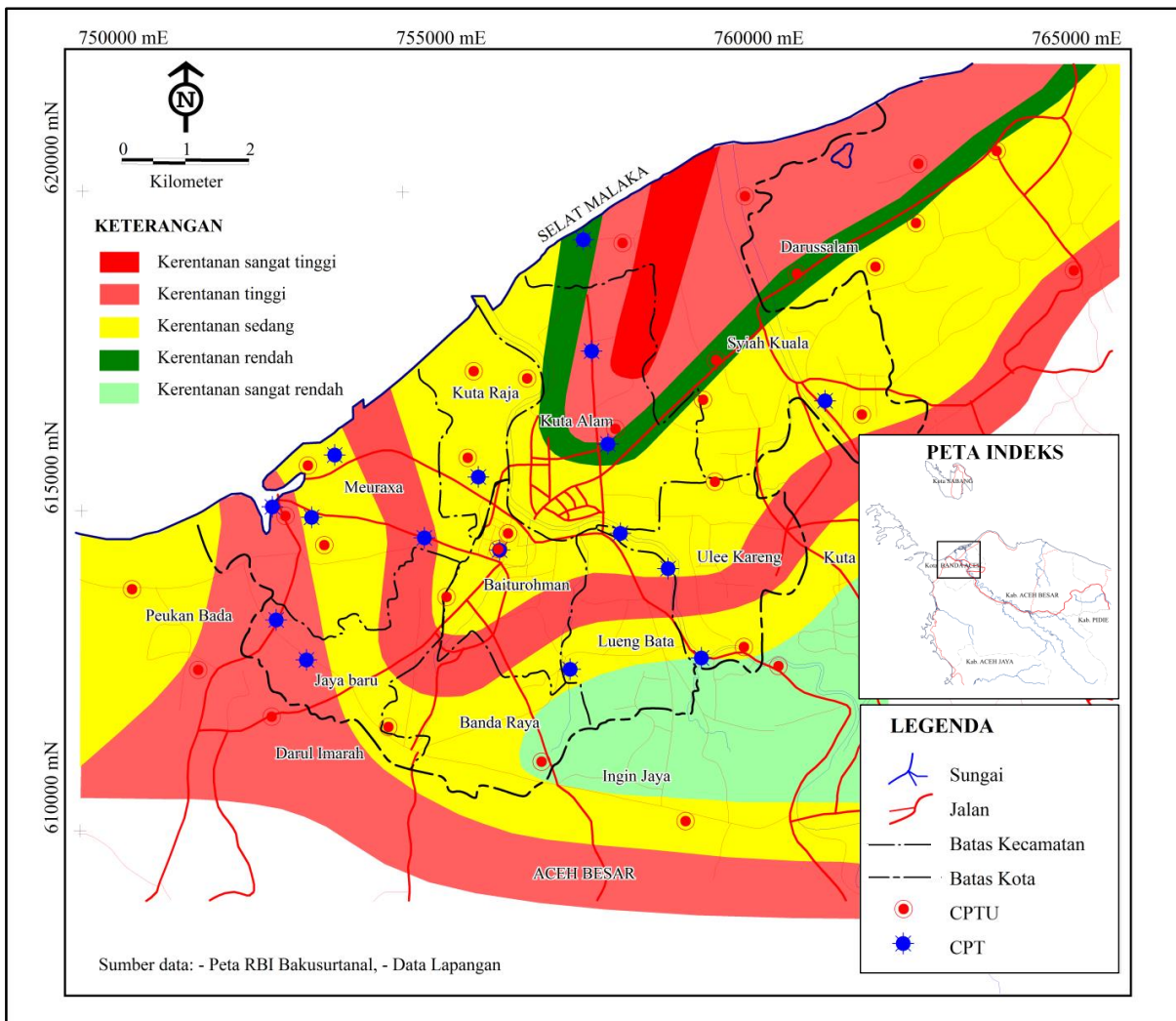
Kode	S_{total} (cm)	Kode	S_{total} (cm)	Kode	S_{total} (cm)
CPT-01	8.94	CPTU-01	19.22	CPTU-18	24.57
CPT-02	22.87	CPTU-02	5.27	CPTU-19	12.57
CPT-03	9.6	CPTU-03	8.22	CPTU-20	17.35
CPT-04	10.17	CPTU-04	31.82	CPTU-21	21.49
CPT-05	7.13	CPTU-05	52.5	CPTU-22	10.04
CPT-06	27.3	CPTU-06	23.67	CPTU-23	23.7
CPT-07	13.79	CPTU-07	16.63	CPTU-24	20.27
CPT-08	22.35	CPTU-08	25.37	CPTU-25	14.84
CPT-09	20.55	CPTU-09	38.17	CPTU-26	6.1
CPT-10	8.68	CPTU-10	9.45	CPTU-27	8.94
CPT-11	14.64	CPTU-11	28.36	CPTU-28	39.86
CPT-12	5.49	CPTU-12	14.96	CPTU-29	10.82
CPT-13	9.35	CPTU-13	14.51	CPTU-30	2.04
CPT-14	9.9	CPTU-15	19.34	CPTU-31	13.09
CPT-15	10.52	CPTU-16	1.78	CPTU-32	11.49
CPT-16	4.41	CPTU-17	9.55		

RTRW Kota Banda Aceh 2009-2029, beberapa kawasan perumahan, perdagangan dan jasa serta layanan umum berada pada zona kerentanan tinggi ini (Tabel 3). Selain itu, infrastruktur penting, seperti jembatan dan jalan, berada pada zona kerentanan ini. Oleh karena itu, perlu dilakukan evaluasi ulang kesesuaian pondasi terutama pada bangunan tinggi dan infrastruktur jembatan sehingga dapat dilakukan upaya rekayasa untuk mengurangi potensi penurunan pada pondasi.

Zona kerentanan sedang terdapat pada sebagian besar daerah pesisir dan bagian tengah kota di semua kecamatan di Kota Banda Aceh, kecuali Kecamatan Banda Raya. Pada zona kerentanan ini, penurunan tanah yang dapat terjadi sebesar berkisar 10 hingga 20 cm. Pembangunan pada zona ini masih dapat dilakukan dengan menggunakan upaya mitigasi likuifaksi seperti proses pemadatan tanah, aplikasi drainase vertikal, dan pemilihan jenis pondasi yang sesuai. Investigasi geoteknik detil sangat diperlukan untuk dapat menentukan secara spesifik upaya

mitigasi tersebut secara tepat. Zona kerentanan menengah ini dapat diperuntukkan sebagai kawasan budidaya, seperti kawasan perkantoran, perdagangan, pariwisata, dan pelayanan umum. Berdasarkan pola ruang saat ini dalam RTRW Kota Banda Aceh tahun 2009-2029, kawasan perumahan dan kawasan perkantoran, dan layanan umum umumnya berada pada zona kerentanan menengah (Tabel 3), sehingga perlu dilakukan kajian kesesuaian fondasi bangunan dan infrastruktur penting pada kawasan tersebut.

Pada sebagian kecil wilayah Kota Banda Aceh juga terdapat zona kerentanan penurunan tanah rendah hingga sangat rendah, terutama di Kecamatan Banda Raya (Tabel 3). Pada zona kerentanan ini, penurunan tanah yang dapat terjadi kurang dari 10 cm. Kerusakan pada bangunan dan infrastruktur sangat kecil, terutama pada bangunan dengan pondasi dalam. Wilayah yang berada dalam zona kerentanan ini dapat diperuntukkan sebagai kawasan perumahan dan pelayanan umum.



Gambar 9. Peta mikrozonasi kerentanan penurunan permukaan tanah akibat likuifaksi untuk wilayah Kota Banda Aceh.

Berdasarkan hasil mikrozonasi kerentanan penurunan tanah ini, pola ruang dalam RTRW Kota Banda Aceh 2009-2029 memerlukan penyesuaian dengan memperhatikan dan mempertimbangkan potensi penurunan tanah akibat likuifaksi di setiap kawasan. Penyesuaian pola ruang ini dapat memperkecil dampak dari likuifaksi terhadap kerusakan bangunan dan infrastruktur di seluruh wilayah Kota Banda Aceh. Selain itu, peta mikrozonasi ini merupakan pedoman awal untuk mengetahui tingkat kerentanan suatu wilayah terhadap penurunan tanah akibat likuifaksi. Oleh karena itu, investigasi dan kajian potensi likuifaksi secara lebih detil sangat diperlukan terutama pada kawasan-kawasan dimana terdapat bangunan dan infrastruktur strategis serta jaringan penopang

hidup (jaringan PDAM, pipa gas dan listrik bawah tanah) yang berada dalam zona kerentanan menengah dan tinggi.

KESIMPULAN

Hasil evaluasi potensi likuifaksi berdasarkan data uji penetrasi konus, dengan mempertimbangkan gempabumi dengan magnitudo Mw 9,0 dan percepatan puncak di permukaan tanah sebesar 0,45g memberikan informasi kemungkinan ketebalan lapisan likuifaksi dan pembagian zona kerentanan penurunan tanah di wilayah Kota Banda Aceh. Lapisan pasir dan lanau dengan nilai tahanan konus kurang dari 15 MPa dan hambatan setempat kurang dari 150 kPa, berpotensi untuk mengalami likuifaksi hingga kedalaman 15 m, dengan variasi ketebalan lapisan yang mengalami

Tabel 3. Ringkasan zonasi kerentanan penurunan permukaan tanah akibat likuifaksi dan peruntukan kawasan untuk setiap kecamatan di Kota Banda Aceh.

Kecamatan	Peruntukan Kawasan *)	Zonasi Kerentanan
Baiturrahman	Perumahan, perkantoran, perdagangan dan jasa, cagar budaya	Sedang
Meuraxa	Perumahan, cagar budaya	Sedang hingga sangat tinggi
Jaya Baru	Perumahan, ruang terbuka non hijau	Rendah hingga tinggi
Kute Raja	Perdagangan dan jasa, ruang terbuka hijau, cagar alam	Rendah hingga tinggi
Kute Alam	Perumahan, perkantoran, perdagangan dan jasa, layanan umum,	Rendah hingga tinggi
Syiah Kuala	Perumahan, layanan umum, perkantoran perikanan, perdagangan dan jasa, ruang terbuka hijau	Rendah hingga sangat tinggi
Ulee Kareng	Perumahan, perdagangan dan jasa, ruang terbuka hijau	Sangat rendah hingga tinggi
Lueng Bata	Perdagangan dan jasa, perumahan, layanan umum	Rendah hingga sedang
Banda Raya	Perumahan, layanan umum	Sangat rendah hingga rendah

*) berdasarkan dokumen RTRW Kota Banda Aceh Tahun 2009-2029 (Qanun Kota Banda Aceh No. 4 Tahun 2009)

likuifaksi mencapai 4 m. Berdasarkan data tersebut, wilayah Kota Banda Aceh, dapat diklasifikasikan menjadi 5 zonasi kerentanan penurunan tanah. Pada zona kerentanan tinggi, terutama di Kecamatan Kuta Alam dan Syah Kuala, penurunan lapisan tanah akibat likuifaksi dapat mencapai lebih dari 40 cm. Sementara zona kerentanan rendah terutama terdapat di wilayah Kecamatan Banda Raya. Sebagian besar kawasan perumahan, perdagangan dan jasa, serta layanan umum berada pada zona kerentanan penurunan tanah menengah hingga tinggi. Oleh karenanya, penyelidikan geoteknik detil dan kajian mikrozonasi lokal pada kawasan-kawasan ini menjadi penting dilakukan sebelum konstruksi bangunan dilaksanakan untuk mengurangi risiko ancaman penurunan tanah akibat likuifaksi

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai melalui DIPA Puslit Geoteknologi LIPI pada tahun 2006, 2007 dan 2013. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Profesor Paulus P. Rahardjo dari Universitas Katolik Parahyangan yang telah memberikan bimbingan berharga dalam pengujian *piezocone*. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada para teknisi Laboratorium geomekanik

Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI yang membantu dalam pengambilan data *piezocone*.

DAFTAR PUSTAKA

- Bennet, J.D., Bridge, D.McC., Cameron, N. R., Djunuddin, A., Ghazali, S. A., Jeffrey, D. H., Kartawa, W., Rock, M. N. S., Thomson, S. J., Whandoyo, R., 1981. Peta Geologi Lembar Banda Aceh, Sumatera, Puslitbang Geologi, Bandung.
- Hayes, G. P., Bernadino, M., Dannemann, F., Smoczyk, G., Briggs, R., Benz, H. M., Furlong, K. P., Villasenor, A., 2013. Seismicity of the earth 1900-2012 Sumatera and vicinity, USGS Open-File Report 2010-1082-L, scale 1:6.000.000, <http://pubs.usgs.gov/of/2010/1083/1/>. Diunduh pada tanggal 18 Juli 2015.
- Irsyam, M., Sengara, W., Aldiamar, F., Widiyantoro, S., Triyoso, W., Natawidjaja, D.H., Kertapati, E., Meilano, I., Suhardjono, Asrurifak, M., Ridwan, M., 2010. Ringkasan hasil studi tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010, <http://www.preventionweb.net/files/>

- 14654_AIFDR.pdf. Diunduh pada tanggal 24 Mei 2015.
- Ishihara, K., Yoshimine, M., 1992. Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundations*, 32(1), 173-188.
- Munirwan, R. P., Gunawan, H., 2012. Evaluasi potensial likuifaksi pesisir pantai Krueng Raya, Aceh Besar, Provinsi Aceh. *Jurnal Teknik Sipil, Universitas Syah Kuala*, 1(2), 131-142.
- Ploethner, D., Siemon, B., 2006. Hydrogeological reconnaissance survey in the Province Nanggroe Aceh Darussalam Northern Sumatra, Indonesia survey area: Banda Aceh/ Aceh Besar 2005. Report BGR Project, HELP ACEH, Helicopter Project Aceh, C1, 1-33.
- Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kota Banda Aceh 2009-2029, Qanun Kota Banda Aceh No. 4 Tahun 2009.
- Robertson, P.K., 1990. Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1), 151-158.
- Robertson, P.K., Wride, C.E., 1998. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3), 442-459.
- Seed, H.B., Idriss, I.M., 1971. Simplified procedure for evaluation soil liquefaction potential. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 97(SM9), 1249 – 1273.
- Sengara, I. W., 2008. Seismic hazard and microzonation for a district in Banda Aceh City Post 2004 Great Sumatra Earthquake, Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China
- Sieh, K., Natawidjaja, D. H., 2000. Neotectonics of the Sumatran Fault, Indonesia. *Journal of Geophysical Research*, 105(B12), 28.295-28.326.
- Tobita, T., Iai, S., Chairullahanta, B., Asper, W., 2006. Reconnaissance report of the 2004 great Sumatra-Andaman, Indonesia Earthquake–damage to geotechnical works in Banda Aceh and Meulaboh . *Journal of Natural Disaster Science*, 28(1), 35-41.
- Tohari, A., Soebowo, E., Wardana, D. D., Irianto, B., Widodo., 2007. Potensi bahaya likuifaksi di daerah Banda Aceh dan sekitarnya. Laporan Teknis, Mitigasi Bahaya Gerakan Tanah di Daerah Tropis dan Tektonik Aktif, Puslit Geoteknologi LIPI, 51 hal.
- Tohari, A., Sugianti, K., Soebowo, E., 2001. Liquefaction potential at Padang City: a comparison of predicted and observed liquefactions during the 2009 Padang earthquake. *Journal Riset Geologi dan Pertambangan*, 21(1), 7-18.
- Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, E., Finn, W. D. L., Harder Jr, L. F., Hynes, M. F., Ishihara, K., Koester, J., Liao, S. S. C., Marcuson, W. F., Martin, R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., Stokoe, K. H., 2001. Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(10), 817-833.
- Young, R. R., Chiou S. J., Silva, W. J., Humphrey, J. R., 1997. Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological Research Letter*, 68, 58–73.