



Analisis Likuifaksi Kota Padang dengan Menggunakan data CPT pada Metode Boulanger & Idriss

Muhammad Riyan Sabri

Teknik Sipil, Universitas Riau, Kampus Bina Widya Km 12,5 Simpang Baru Pekanbaru 28293 – Indonesia

INFO ARTIKEL

Diterima: 10 Juli 2020

ABSTRAK

Likuifaksi merupakan fenomena alam yang terjadi akibat tanah jenuh atau agak jenuh kehilangan kekuatannya yang disebabkan oleh gempa bumi atau perubahan tegangan secara mendadak, sehingga tanah yang padat berubah wujud menjadi cair. Padang merupakan daerah yang rawan terjadi likuifaksi karena letaknya dekat dengan pesisir pantai dan secara geologi tanah padang merupakan tanah aluvial. Salah satu gempa besar yang terjadi di padang yaitu gempa 2009 dengan kekuatan 7,6 SR yang banyak mengakibatkan kerusakan pada struktur tanah baik itu soil settlement, sand boil, lateral spreading, dan loss of bearing strength. Untuk itu penelitian ini bertujuan untuk menganalisis seberapa besar potensi likuifaksi yang terjadi di kota padang dengan metode boulanger dan idriss 2014 dengan studi kasus 37 titik data CPT yang tersebar di kota padang. Dari analisis yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa mayoritas kota padang adalah daerah yang memiliki potensi likuifaksi sangat tinggi yang mana hampir seluruh titik memiliki nilai LPI diatas 50 dengan persentase likuifaksinya 99% dan penurunan rata-rata lebih dari 20 cm.

Kata kunci: (Potensi likuifaksi padang; likuifaksi dengan metode boulanger & idriss)

E-MAIL

Email Penulis 1*
(m.riyansabri@gmail.com)

ABSTRACT

Liquefaction is a natural phenomenon that occurs as a result of saturated or rather saturated soil loses its power caused by earthquakes or sudden changes in stress, so that dense soils become liquid. Padang is an area that is prone to liquefaction because it is located close to the coast and geologically Padang is an alluvial land. One of the major earthquakes that occurred in Padang was the 2009 earthquake with a magnitude of 7.6 SR which caused a lot of damage to soil structures such as soil settlement, sand boil, lateral spreading, and loss of bearing strength. For this reason, this study aims to analyze how much the potential liquefaction that occurs in the city of Padang with the method of boulanger and idriss 2014 with a case study of 37 CPT data points scattered in the city of Padang. From the analysis it can be concluded that the majority of Padang cities are regions that have very high liquefaction potential where almost all points have LPI values above 50 with a liquefaction percentage of 99% and an average of settlement is more than 20 cm.

Kata kunci: (Potential of liquefaction in Padang; liquefaction with the boulanger & idriss method)

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan daerah yang rawan terjadi gempa sejak dulu kala. Hal ini terjadi karena aktifitas gunung berapi atau pergerakan lempengan bumi. Indonesia terletak di simpang pertemuan tiga lempeng aktif yaitu, Indo Australia di Selatan, Eurasia di Utara dan Pasifik di Timur yang menghasilkan lebih dari

290 sesar aktif dan belasan zona subduksi. Hal ini memunculkan jalur gempa dan rangkaian gunung aktif di seluruh Indonesia. Kota Padang merupakan wilayah Sumatera Barat rawan gempa bumi yang lokasinya berada diantara pertemuan dua lempeng benua besar yaitu lempeng Eurasia dan lempeng Indo-Australia dan patahan (sesar) Semangko. Di sekitar pertemuan

lempeng tersebut terdapat patahan Mentawai yang ketiganya merupakan seismic aktif. Gempa bumi dapat berdampak tsunami dan merusak bangunan-bangunan sekitarnya. Selain itu gempa bumi juga berdampak likuifaksi yang dapat merusak bangunan bahkan dapat menenggelamkan bangunan di atasnya. Likuifaksi adalah fenomena pada masa tanah yang kehilangan sebagian besar tahanan gesernya ketika mengalami pembebanan monotonik, siklik, mendadak dan mengalir menjadi cair sehingga tegangan geser pada masa tanah menjadi rendah seperti halnya tahanan gesernya (Sladen, et. Al., 1985).

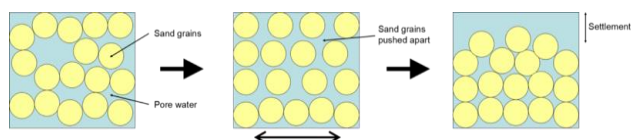
Gempa besar yang pernah dialami Kota Padang yaitu pada tahun 2009 dengan kekuatan 7,6 Skala Richter di lepas pantai Sumatera Barat sekitar 50 km barat laut Kota Padang. Gempa ini menyebabkan banyak kematian, kerusakan bangunan dan likuifaksi akibat besarnya tegangan siklik yang dihasilkan gempa tersebut.

Untuk menganalisis potensi likuifaksi suatu wilayah pada umumnya menggunakan menggunakan data standard penetration test (SPT) dan cone penetration test (CPT). Metode dengan SPT tidak seperti CPT yang semakin populer dan memiliki keunggulan seperti mudah dalam pengangkutan, pengulangan, cepat, dan dapat ditafsirkan dalam empiris serta sebagai dasar analisis dalam menentukan potensi likuifaksi

II. MATERIAL DAN METODE

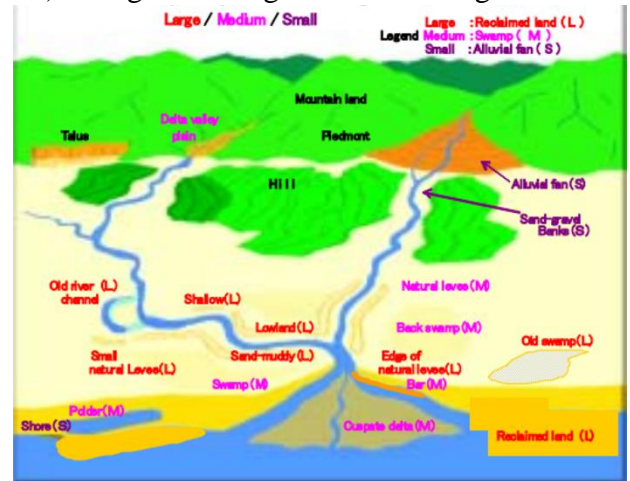
2.1 Likuifaksi

Likuifaksi adalah fenomena yang terjadi ketika tanah jenuh atau agak jenuh sehingga kehilangan kekuatan atau kekakuan akibat adanya tegangan seperti adanya gempa bumi atau perubahan ketegangan secara mendadak, sehingga tanah yang padat berubah wujud menjadi cairan. Sebelum terjadinya gempa, struktur tanah masih stabil dikarenakan adanya kontak antar butiran-butiran tanah. Selama gempa terjadi tekanan air pori meningkat secara mendadak yang mengakibatkan kontak antar butiran berkurang secara signifikan sehingga tanah seperti menjadi cair. Hal ini menyebabkan berkurangnya volume air pori pada tanah sehingga tanah menjadi lebih padat dan terjadi penurunan (Yusa, 2018). Hal ini dapat di ilustrasikan sebagai berikut.



Gambar 1. Mekanisme Likuifaksi (a) sebelum (b) selama gempa (c) setelah gempa (Yusa, 2018)

Tanah yang rentan kehilangan kepadatannya seperti tanah berpasir, lanau yang pada umumnya banyak terdapat di sungai, delta atau pesisir pantai. Likuifaksi gampang terjadi pada tanah yang muka air tanahnya dangkal. Dengan muka air tanah yang dangkal, tanah akan mudah jenuh dan kehilangan kekuatan antar partikelnya. Berdasarkan topografi dan geografinya kemungkinan terjadinya likuifaksi pada suatu kawasan dapat di klasifikasikan sebagai berikut : L (Large), Medium (M), dan Small (S) (AIJ, 2008) sebagaimana digambarkan sebagai berikut



Gambar 2 Probabilitas terjadinya likuifaksi berdasarkan topografi dan geografi (AIJ, 2008).

Penelitian ini menggunakan 37 data CPT yang tersebar di Kota Padang yang penulis dapatkan dari data-data penelitian terdahulu dan data dari LIPI. Data ini akan digunakan untuk menghitung potensi likuifaksi, *settlement*, LPI, dan probability.

Untuk menghitung besarnya potensi likuifaksi pada kota Padang dapat menggunakan metode Boulanger and Idriss (2014). Adapun tahapan metode tersebut antara lain :

- a. *Earthquake-induced cyclic stress ratio CSR*
CSR pada kedalaman tertentu dalam sebuah profil tanah biasanya dinyatakan sebagai tegangan geser siklik seragam yang sama. Nilai ini diambil biasanya 65% dari tegangan geser maksimum (Idriss., 1982). Adapun untuk mencari nilai CSR dapat menggunakan rumus berikut :

$$CSR_{M,\sigma_v'} = 0.65 \frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \frac{a_{max}}{g} r_d \quad (1)$$

Dimana a_{max} = percepatan maximum pada permukaan, g = gaya gravitasi, σ_v = tegangan total beban vertical, σ_v' = tegangan beban vertical efektif, dan r_d adalah faktor reduksi tegangan geser yang menerangkan tentang respon dinamik pada profil tanah. Di Indonesia

amax untuk periode gempa ulang tertentu bisa didapatkan pada peta gempa Indonesia tahun 2017. Dari peta dapat dilihat percepatan gempa pada dasar batuan, untuk menentukan percepatan gempa pada permukaan dapat dilakukan dengan mengalikan percepatan pada dasar batu dengan faktor amplifikasi yang tergantung pada lokasi tertentu.

b. *Cyclic resistance ration (CRR)*

Untuk menentukan nilai CRR didapat berdasarkan nilai CPT. Nilai CPT dikoreksi untuk tegangan *overburden pressure* menggunakan persamaa :

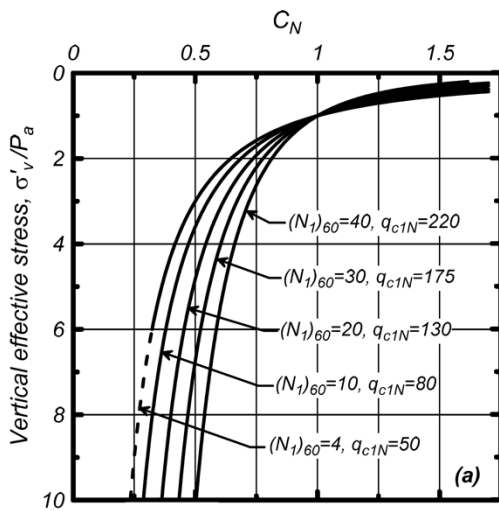
$$q_{c1N} = C_N q_{cN} = C_N \frac{q_c}{P_a} \quad (2)$$

Dimana C_N adalah factor koreksi overburden dan P_a adalah tekanan atmosfer. C_N bisa diestimasi berdasarkan persamaan Idriss dan Boulanger (2003) :

$$C_N = \left[\frac{P_a}{\sigma'_v} \right]^m \leq 1.7 \quad (3)$$

$$m = 1.338 - 0.249 (q_{c1Ncs})^{0.264} \quad (4)$$

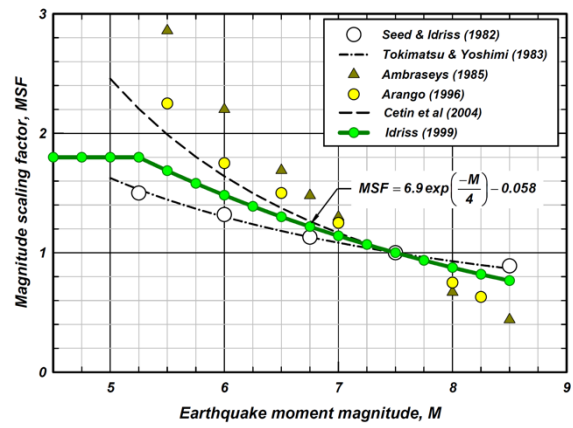
diperlukan iterasi untuk persamaan di atas q_{c1Ncs} dibatasi antara 21 sampai 254



Gambar 3 Grafik faktor koreksi *overburden* (boulanger & Idriss, 2014)

CRR juga tergantung pada durasi getaran (dapat dinyatakan dengan MSF) dan faktor koreksi tegangan overburden (dinyatakan dengan K_σ). MSF untuk tanah berpasir oleh Idriss dan Boulanger (2008) yang telah dikembangkan dari Idriss (1999) berasal dari hubungan berikut :

$$MSF = 6.9 \cdot \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 0.058 \leq 1.8 \quad (5)$$



Gambar 4 Grafik hubungan magnitude scaling factor (MSF)

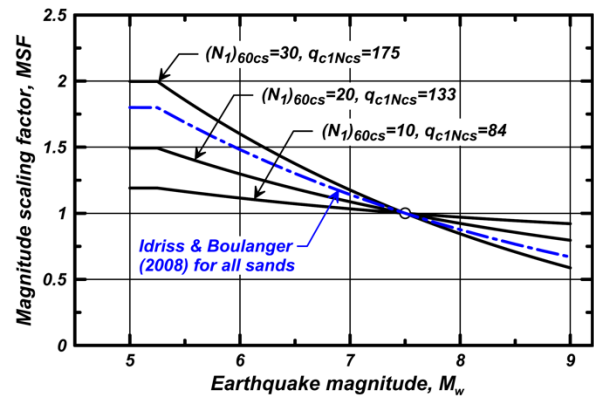
MSF oleh Boulanger and Idriss (2014, 2015) berasal dari himpunan data tes laboratorium dan rekaman gerakan tanah, termasuk ketergantungan pada karakteristik tanah dirumuskan sebagai berikut :

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) \left[8.64 \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 1.325 \right] \quad (6)$$

dimana MSF_{max} keterkaitan dengan nilai q_{c1Ncs}

$$MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{180} \right)^3 \leq 2.2 \quad (7)$$

Hasil hubungan MSF dengan nilai q_{c1Ncs} yang berbeda dapat dilihat pada gambar di bawah.



Gambar 5 Variasi Hubungan MSF dengan q_{c1Ncs} dengan $(N_1)_{60cs}$ untuk tanah tanpakohesi

Hubungan ini menghasilkan nilai $MSF_{max} = 1.8$ pada $q_{c1Ncs} \approx 160$ dan $MSF_{max} \approx 1.10$ untuk $q_{c1Ncs} < 60$.

Faktor koreksi tegangan overburden dinyatakan dengan rumus :

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) \leq 1.1 \quad (8)$$

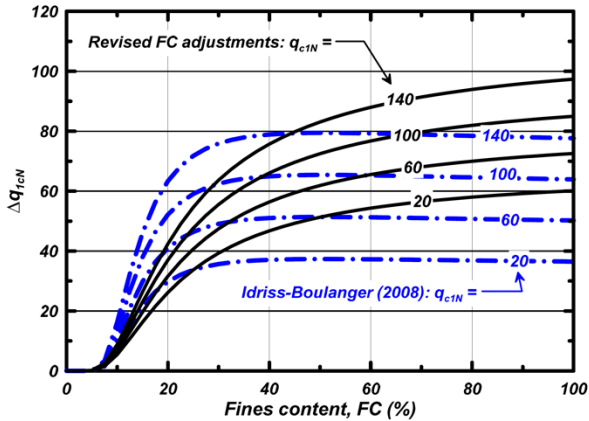
$$C_\sigma = \frac{1}{37.3 - 8.27 q_{c1Ncs}^{0.264}} \leq 0.3 \quad (9)$$

nilai koefisien C_σ dibatasi maksimum 0,3 dan $q_{c1Ncs} \leq 211$.

CRR juga dipengaruhi oleh FC (fines content) dimana hubungan tersebut dapat di ekspresikan sebagai berikut :

$$q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N} \quad (10)$$

$$\Delta q_{c1N} = \left(11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6} \right) \exp \left(1.63 - \frac{9.7}{FC + 2} - \left(\frac{15.7}{FC + 2} \right)^2 \right) \quad (11)$$



Gambar 6 Grafik faktor koreksi FC (fines content)

CRR dirumuskan sebagai berikut :

$$CRR_{M, \sigma_v'} = CRR_{M=7.5, \sigma_v'=1atm} \cdot MSF \cdot K_\sigma \quad (12)$$

$$CRR_{M=7.5, \sigma_v'=1atm} = \exp \left(\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000} \right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140} \right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137} \right)^4 - 2.8 \right) \quad (13)$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (14)$$

FS sama dengan *factor safety* yang menunjukkan likuifaksi atau tidak likuifaksi suatu wilayah. Jika $FS > 1$ (tidak likuifaksi).

2.2 Settlement

Likuifaksi dapat menyebabkan masalah serius terutama penurunan tanah yang terjadi karena regangan yang relatif kecil (*small strain*) setelah likuifaksi (*post liquefaction*). Ishihara dan Yoshimine (1992) merumuskan suatu hubungan antara regangan volumetrik (ε_v), kerapatan relative (D_r), dan faktor keamanan terhadap likuifaksi (FS_L) berdasarkan uji laboratorium yang diujikan oleh Nagase dan Ishihara (1988). Nilai regangan volumetrik tersebut sebagai akibat dari disipasi tekanan air pori saat goncangan gempa akan digunakan untuk perhitungan penurunan permukaan tanah. Zhang dkk(2002) mengganti kerapatan relatif dengan nilai tahanan ujung seismic (q_{c1N}).

Penurunan permukaan tanah dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut.

$$S = \sum_{i=1}^j \varepsilon_{vi} \Delta z_i \quad (15)$$

Dimana S merupakan likuifaksi yang menyebabkan penurunan pada lokasi CPT.

2.3 Indek Potensi Likuifaksi dan Probabilitas

Indeks Potensi Likuifaksi atau *Liquefaction Potential Index* (LPI) adalah suatu indeks yang digunakan untuk estimasi potensi likuifaksi yang menyebabkan kerusakan fondasi. Indeks Potensi Likuifaksi (LPI) mengacu pada formula Iwasaki (1986) yang mengatakan bahwa likuifaksi akan terjadi hingga kedalaman 20 m di bawah permukaan tanah. Indeks potensi likuifaksi merupakan integrasi dari fungsi faktor keamanan dan kedalaman litologi yang terlikuifaksi.

$$LPI = \int_0^{20m} F \cdot w(z) dz \quad (16)$$

Jika faktor keamanan $F_L \leq 1$ maka $F = 1 - F_L$ dan jika $F_L > 1$ maka $F = 0$ dan $w(z) = 10 - 0.5z$ (z kedalaman dalam m)

Menurut (Iwasaki, 1986), klasifikasi LPI terhadap resiko potensi likuifaksi adalah sebagai berikut :

Tabel 1 Nilai LPI berdasarkan klasifikasi (Iwasaki, 1986)

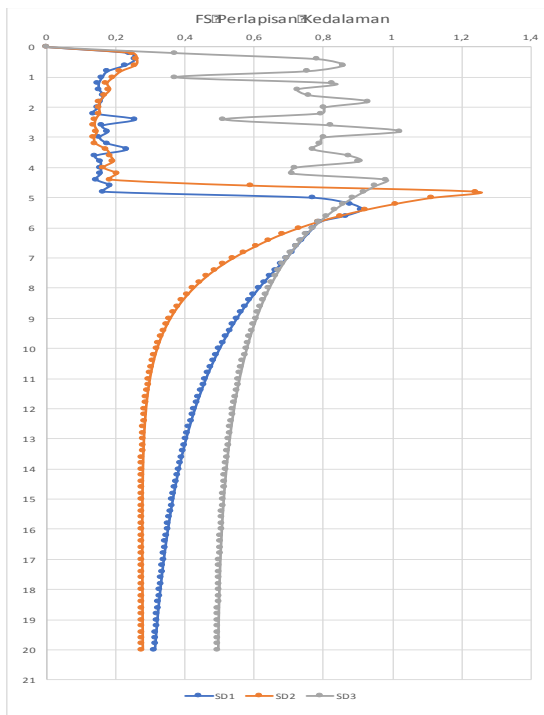
No	LPI	Potensi Likuifaksi
1.	LPI = 0	Sangat Rendah
2.	$0 < LPI \leq 5$	Rendah
3.	$5 < LPI \leq 15$	Tinggi
4.	$LPI > 15$	Sangat Tinggi

Untuk menghitung probabilitasnya dapat menggunakan formula (Papathanassiou, 2008) sebagai berikut :

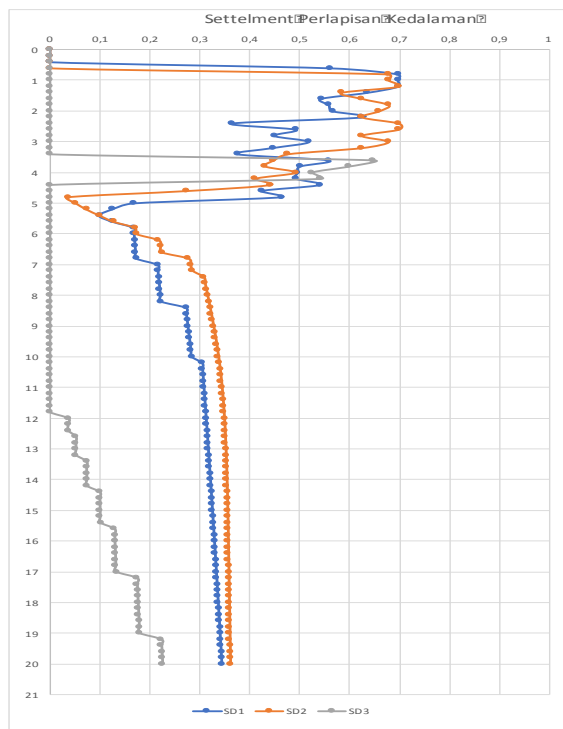
$$Prob(Liquefaction) = \left(\frac{1}{1 + e^{-(-3.092 + 0.218 \times LPI)}} \right) \quad (17)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil analisis penelitian ini, didapat nilai CSR, CRS, FS, settlement, LPI, dan probabilitas yang ditinjau per 20 cm per lapisan sedalam 20 m.



Gambar 7 Grafik FS vs kedalaman



Gambar 8 Grafik Settlement per lapisan kedalaman

Dari grafik di atas dapat kita lihat bahwa SD1, SD2, dan SD3 berpotensi tinggi likuifaksi pada kedalaman 0-4 m dengan FS < 1. Dilihat dari grafik 8 penurunan rata-rata per 20 cm lapisan adalah 0,5 cm sampai 0,7 cm. dapat disimpulkan tingkat penurunan yang diakibatkan likuifaksi bisa mencapai 3% dari tebal lapisan yang ditinjau.

Tabel 2 Rangkuman Analisis Likuifaksi

Kode	Lokasi	Settlement (cm)	LPI	Probabilitas	Gempa 2009
SD1	SMA2	33,59	60,215	100,00%	G.Settlement & S. Boiling
SD2	AlayPolri	36,00	64,747	100,00%	G.Settlement & S. Boiling
SD3	Simpangharu	7,54	29,320	96,44%	G.Settlement & S. Boiling
SD4	Kotobaru	13,41	17,675	68,16%	G.Settlement & S. Boiling
SD5	Bandarpuros	13,34	18,679	72,71%	G.Settlement & S. Boiling
SD6	Perum Belantiraya	31,63	50,594	99,96%	G.Settlement & S. Boiling
SD7	Ulakkarang	32,96	60,672	100,00%	G.Settlement & S. Boiling
SD8	Lapai	41,98	76,382	100,00%	G.Settlement & S. Boiling
SD9	Kuro,Seteba	26,26	34,544	98,83%	G.Settlement & S. Boiling
SD10	Tunggulhitam	27,56	44,860	99,88%	G.Settlement & S. Boiling
SD11	KpusUNP	24,62	33,498	98,54%	G.Settlement & S. Boiling
SD12	Dadok,Tghitam	26,17	41,725	99,75%	Lateral Spreading
SD13	Pacuankuda	27,04	38,739	99,53%	Lateral Spreading
SD14	BdaraTabing	27,88	42,315	99,78%	G.Settlement & S. Boiling
SD15	Perupukraya	29,42	58,671	99,99%	G.Settlement & S. Boiling
SD16	Rel,SMA3	30,81	60,490	100,00%	G.Settlement & S. Boiling
SD17	IAIN	27,16	40,617	99,69%	No Liquefaction
SD18	PerumAmpang	29,91	50,354	99,96%	G.Settlement & S. Boiling
SD19	TNITerendam	49,15	80,358	100,00%	G.Settlement & S. Boiling
SD20	HotelPadang	24,39	37,648	99,40%	G.Settlement & S. Boiling
SD21	SawahSHaru	44,96	82,059	100,00%	G.Settlement & S. Boiling
CPTu1	UNP	49,32	63,949	100,00%	G.Settlement & S. Boiling
CPTu2	PsirJambak	59,50	87,246	100,00%	G.Settlement & S. Boiling
CPTu3	KotoTengah	32,44	63,565	100,00%	G.Settlement & S. Boiling
CPTu4	BumiMinang	26,49	39,744	99,62%	No Liquefaction
CPTu5	Dahlan	40,27	77,149	100,00%	G.Settlement & S. Boiling
CPTu6	AirTawar	51,95	71,192	100,00%	G.Settlement & S. Boiling
CPTu7	Kurogadang	50,34	82,499	100,00%	G.Settlement & S. Boiling
CPTu8	KuroBarek	58,52	88,568	100,00%	G.Settlement & S. Boiling
CPT2	UNP gedung ICR	49,25	75,759	100,00%	G.Settlement & S. Boiling
CPT3	Gor haji Agus salim	45,59	83,499	100,00%	G.Settlement & S. Boiling
CPT4	RSUP M.Djamil	51,11	81,472	100,00%	G.Settlement & S. Boiling
CPT5	Gedung Telkomsel	6,95	28,447	95,73%	G.Settlement & S. Boiling
CPT6	Pasir Jambak Padan	33,29	64,229	100,00%	G.Settlement & S. Boiling
CPT7	Gudang Rokok Dju	21,69	41,729	99,75%	No Liquefaction
CPT8	By Pass KM 12	39,25	65,054	100,00%	No Liquefaction
CPT9	Universitas Dharma	40,68	77,915	100,00%	G.Settlement & S. Boiling

dari tabel 2 dapat dilihat kota padang rata-rata daerahnya sangat berpotensi likuifaksi jika menghadapi gempa 7,6 SR. Metode boulinger dapat membantu dalam menganalisis likuifaksi sehingga nantinya dapat meminimalisi bencana. Dari analisis yang dilakukan terdapat banyak kesesuaian antara analisis dengan metode boulinger dan idriss dan kondisi nyata di lapangan. Ada beberapa data yang tidak sesuai dikarenakan keterbatasan data. Secara geologi dan morfologi kota padang berdiri diatas tanah mayoritas alluvium dan berlokasi di pesisir pantai. Hal ini yang salah satu menyebabkan kota padang sangat berpotensi likuifaksi jika terjadi gempa.

IV. KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat di Tarik kesimpulan

1. Kota Padang merupakan kota yang sangat rentan terjadi likuifaksi
2. Tanah di kota padang mayoritas adalah alluvium
3. Rata-rata penurunan yang terjadi (s) > 20 cm – 60 cm
4. Nilai LPI kota padang rata-rata di atas 30 menurut iwasaki (1986) LPI > 15 masuk kategori sangat tinggi

5. Berdasarkan nilai probabilitas kota Padang memiliki probabilitas likuifaksi lebih dari 90%.

Sebagai saran data-data dan analisis dengan metode boullanger dan indris perlu ditinjau kembali dengan didukung data-data hasil tes laboratorium seperti data kembang susut tanah, berat jenis, *fine content* (%), ukuran butiran dan data lain yang dianggap perlu.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima penulis ucapkan kepada kepada orang tua yang selalu mendukung, dosen pembimbing 1 dan 2 yaitu Dr. Muhammad Yusa, M.Sc. dan Dr. Gunawan Wibisono, M.Sc., dosen dan seluruh staff Jurusan Teknik Sipil Universitas Riau, serta tidak lupa kepada Bapak Ir. Eko Soebowo yang membantu dalam melengkapi data-data yang penulis perlukan.

DAFTAR PUSTAKA

Iwasaki, T. (1986). Soil Liquefaction Studies in Japan : state-of-the-art. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5.

Papathanassiou, G. (2008). LPI-based approach for calibrating the severity of liquefaction-induced failures and for assessing the probability of liquefaction surface evidence. *Journal of Engineering Geology* 96.

Seed, H., Tokimatsu, K., Harder, L., & Chung, R. (n.d.). *INFLUENCE OF SPT PROCEDURES IN SOIL LIQUEFACTION RESISTANCE EVALUATIONS*. 1985.

Boullanger, R., & Idriss, I. (2016). CPT-Based Liquefaction Triggering Procedure.

Shibata, T., & Teeparaksa, W. (1988). Evaluation of Liquefaction Potentials of Soils Using Cone Penetration Tests.

Koyamada, K., Suzuki, Y., & Tokimatsu, K. (1997). Prediction of liquefaction resistance based on CPT tip resistance and sleeve friction.

Olsen, R. (2015). *International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*.

Idriss, H. B. (1982). Ground motions and soil liquefaction during earthquakes.

Shibata, T., & Teeparaksa, W. (1988, June). Evaluation of Liquefaction Potentials of Soils Using Cone Penetration Tests. *Soils and Foundations*.

Dr. Eng. Agus Setyo Muntohar, S. M. (2010, Agustus). Mikro-zonasi Potensi Likuifaksi dan Penurunan Tanah Akibat Gempa Bumi.

T. Iwasaki and K. Tokida, F. T. (1981, April). Soil Liquefaction Potential Evaluation with Use of the Simplified Procedure.

Robertson, P., & Wride, C. (1997, April). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test.

Boullanger, R., & Idriss, I. (2014, April). CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures.

Ishihara, K., & Yoshimine, M. (1992, March). Evaluation of Settlements in sand Deposits Following Liquefaction during Earthquakes. *Soil and Foundations*.

Zhang, G., Robertson, P., & Brachman, R. (2002). Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground.

Nagase, H., & Ishihara, K. (1988, March). Liquefaction-Induced Compaction and Settlement of Sand during Earthquakes. *Soil and Foundations*.

Youd, T., & Idriss, I. (2001). Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report From the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils.

Olsen, R. (1997). Cyclic Liquefaction based on the Cone Penetrometer Test.

Olsen, R., Koester, J., & Hynes, M. (1996, May). Evaluation of Liquefaction Potential using the CPT. *Proceeding of the 28th Joint Meeting of the US-Japan Cooperative Program in Natural Resources - Panel on Wind and Seismic Effects*.

Olsen, R., & Mitchell, J. (1995, October). CPT Stress Normalization and Prediction of Soil Classification. *Proceeding of the International Symposium on Cone Penetrometer Testing CPT'95*.

Olsen, R., & Farr, J. (1986). Site Characterization using the Cone Penetrometer Test. *Proceedings of In Situ 86 - Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering*.

Yusa, M. (2018). *Develop a Calibration Framework Between SWST and CPT for a liquefaction hazard assessment*. University of Riau.

Iqbal, P., Tohari, A., Sadisun, I., & Nugroho, D. (2014). Fasies sedimen Kuartar berpotensi likuifaksi Pesisir Kota Padang, Provinsi Sumatera Barat berdasarkan data inti bor dan CPTu. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*.

Tohari, A., Sugianti, K., & Soebowo, E. (2011, Desember). Liquefaction Potential at Padang

City : a Comparison of Predicted and Observed Liquefactions during the 2009 Padang Earthquake. *Riset Geologi dan Pertambangan*.