

LAPORAN PENELITIAN

“PERBAIKAN TANAH MENGGUNAKAN METODE DYNAMIC COMPACTION PADA TANAH PASIR BERPOTENSI LIKUIFAKSI DI AREA”

Desti Santi Pratiwi, ST., MT
Dr.techn. Indra Noer Hamdhan



**INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL
BANDUNG - 2019**

PERBAIKAN TANAH MENGGUNAKAN METODE DYNAMIC COMPACTION PADA TANAH PASIR BERPOTENSI LIKUIFAKSI DI AREA RUNWAY BANDARA NEW YOGYAKARTA INTERNATIONAL AIRPORT

Desti Santi Pratiwi

Institut Teknologi Nasional

Indra Noer Hamdhan

Institut Teknologi Nasional

Masyhur Irsyam

Institut Teknologi Bandung

Andhika Sahadewa

Institut Teknologi Bandung

ABSTRAK: Likuifaksi merupakan suatu fenomena hilangnya kuat geser tanah karena adanya penambahan tekanan air pori akibat beban gempa yang terjadi pada tanah non-kohefif. Tanah berpotensi likuifaksi akan berubah sifatnya menjadi cairan sehingga membahayakan bangunan yang berada di atasnya. Oleh karena itu, perlu adanya upaya perbaikan pada tanah berpotensi likuifaksi. Dynamic Compaction (DC) merupakan salah satu metode perbaikan tanah yang paling sering digunakan untuk mitigasi likuifaksi. Prinsip dari DC yaitu meningkatkan kekuatan tanah pasir lepas dengan cara memberikan energi pada tanah sehingga tanah menjadi padat. Pada penelitian ini akan dilakukan analisis pengaruh perbaikan tanah menggunakan DC pada area runway di Proyek Pembangunan New Yogyakarta International Airport (NYIA). Analisis yang dilakukan yaitu membandingkan nilai kepadatan relatif (D_r) sebelum dan setelah perbaikan menggunakan DC. Hasil dari analisis menunjukkan bahwa adanya kenaikan nilai D_r sebesar 43% pada tanah padat sedang, 30% pada tanah padat, dan 1 % pada tanah sangat padat.

Kata Kunci: Likuifkasi, mitigasi, dynamic compaction, New Yogyakarta International Airport, kepadatan relatif

ABSTRACT: Liquefaction is a phenomenon of lose in shear strength in saturated non-cohesive soil due to pore water pressure increase associated with earthquake. Behavior of soil with liquefaction potential can introduce issue for building and infrastructure on the ground. Therefore, ground improvement is needed for soil with liquefaction potential. Dynamic Compaction (DC) is one of the most applied soil improvement methods to mitigate liquefaction hazard. In principle, DC imposes energy to the ground that results in densification of loose sand followed by strength increase. In this study, evaluation of the DC effect on soil densification would be taken in runway area of the New Yogyakarta International Airport Project. The analysis was carried by comparing the relative density (D_r) values of soil before and after the improvement. The results showed that there were increases in D_r values by 43% in medium dense soil, 30% in dense soil, and 1% in very dense soil.

Keyword: Liquefaction, mitigation, dynamic compaction, New Yogyakarta International Airport, relative density

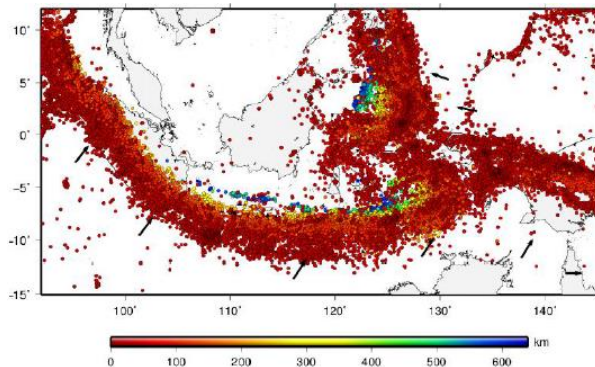
1 PENDAHULUAN

Likuifaksi merupakan suatu fenomena hilangnya kekuatan tanah yang terjadi pada tanah non-kohefif dikarenakan adanya penambahan tekanan pori akibat beban gempa. Tanah yang kehilangan semua kekuatan gesernya akan bersifat seperti cairan (liquid), sehingga dapat merusak struktur yang dibangun di atasnya (Pramana, 2015).

Lapisan tanah yang terlikuifaksi akan memiliki kuat geser yang rendah dan menyebabkan deformasi yang cukup besar. Karena deformasi yang cukup besar, maka akan menyebabkan kerusakan bangunan di atasnya (*ground failures*). Kerentanan terhadap likuifaksi tergantung dari beberapa parameter, seperti kepadatan relatif tanah (D_r), jumlah partikel lempung di antara partikel granular, dan drainase yang terjadi (Jitno, 2015). Syarat terjadinya likuifaksi:

1. Pasir lepas dan jenuh air
2. Beban gempa atau pembebanan yang cepat
3. Ketika tegangan efektif sama dengan nol

Indonesia merupakan wilayah rawan terhadap bahaya gempa, karena Indonesia berada di antara tiga lempeng besar bumi yang aktif. Peristiwa gempa yang sering terjadi di Indonesia merupakan akibat dari proses pergerakan lempeng tektonik. Katalog kejadian gempa di Indonesia dapat dilihat pada Gbr. 1.



Gambar 1 Katalog kejadian gempa di Indonesia (Pusgen, 2017).

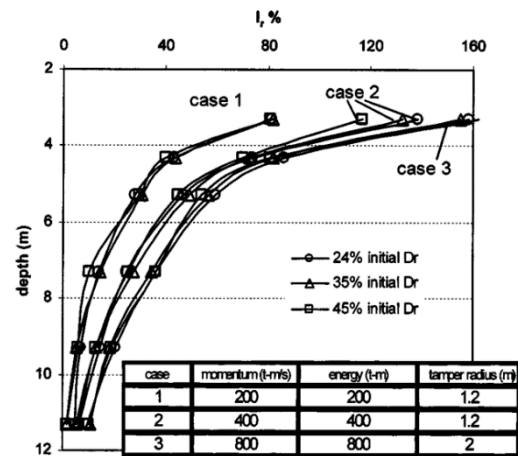
Saat ini metode perbaikan tanah di Indonesia sering digunakan untuk mengatasi berbagai permasalahan geoteknik. Salah satu metode perbaikan tanah yang sudah cukup lama dikenal untuk menangani tanah yang berpotensi likuifaksi adalah *Dynamic Compaction* (DC). Perbaikan tanah dengan DC dapat meningkatkan kepadatan pada tanah, sehingga meningkatkan kekuatan tanah dan mengurangi penurunan (*settlement*). Prinsip dari DC yaitu meningkatkan kekuatan tanah dengan cara memberikan energi pada tanah yang dihasilkan dari tumbukan beban tamper pada ketinggian tertentu dan dilakukan secara berulang-ulang di titik yang sama. DC cukup efektif dalam segi biaya untuk area perbaikan yang luas.

Pada tahun 2004, Lee dan Gu mengembangkan tentang pengaruh kepadatan relatif (D_r) yang terjadi akibat perbaikan tanah dengan DC. Hubungan kenaikan nilai derajat kepadatan tanah (I_r) kondisi awal atau sebelum perbaikan (D_{r0}) dengan nilai derajat kepadatan setelah perbaikan (D_r) menggunakan DC dapat mengikuti **Pers. (1)**

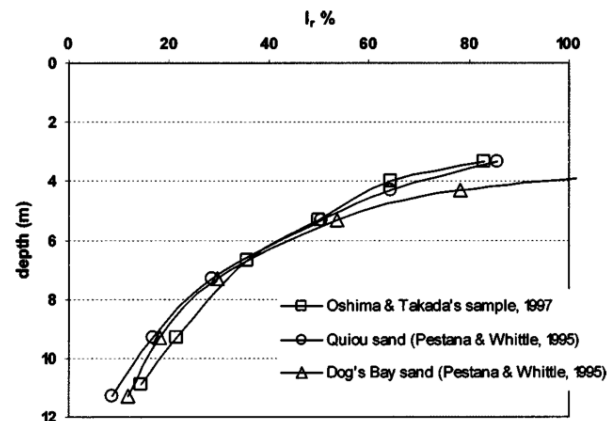
$$I_r = \frac{D_r - D_{r0}}{100 - D_{r0}} \times 100(\%) \quad (1)$$

Gbr. 2 merupakan beberapa contoh kenaikan derajat kepadatan menggunakan DC dengan

beberapa nilai derajat kepadatan awal. Sedangkan Gbr. 3 menunjukkan variasi beberapa kenaikan derajat kepadatan (I_r) berbanding kedalaman untuk lokasi yang berbeda.



Gambar 2 Kenaikan derajat kepadatan (I_r) untuk beberapa nilai D_r (Lee dan Gu, 2004)



Gambar 3 Variasi kenaikan derajat kepadatan (I_r) terhadap kedalaman untuk lokasi Pestana dan Whittle 1995 (Oshima dan Takada, 1997)

Berdasarkan pemaparan di atas, adapun rencana dari penelitian ini yaitu mengetahui pengaruh metode *Dynamic Compaction* (DC) sebagai solusi dalam upaya mitigasi likuifaksi berdasarkan kenaikan nilai kepadatan relatif tanah (D_r) dengan studi kasus berlokasi di area Pembangunan Bandara *New Yogyakarta International Airport* di Kulon Progo Yogyakarta. Pada penelitian ini akan dilakukan analisis terhadap data-data lapangan berupa nilai SPT yang berhasil dikumpulkan.

2 DYNAMIC COMPACTION

Pengertian *Dynamic Compaction* (DC) menurut Han (2015), yaitu metode perbaikan tanah dengan cara menurunkan beban (*tamper*) secara bebas dari ketinggian tertentu ke permukaan tanah dengan pola untuk

memadatkan geomaterial yang bermasalah hingga kedalaman yang cukup dalam. Adapun berat tamper yang umum digunakan yaitu sebesar 5-40 ton dan tinggi jatuhnya setinggi 10-40 m, yang dapat memperbaiki tanah hingga kedalaman lebih dari 10 m.

Menard dan Broise (1975) mengusulkan teori *Dynamic Consolidation* untuk menjelaskan bahwa tanah berbutir halus yang jenuh dapat diperkuat dengan cara menjatuhkan *tamper* secara berulang. Para peneliti tersebut menghubungkan *Dynamic Compaction* dengan 4 (empat) mekanisme utama, yaitu:

1. Kompresibilitas tanah jenuh
2. *Generation* dan disipasi tekanan air pori berlebih
3. Perubahan permeabilitas
4. *Thixotropic recovery*

Menurut Han (2015), terdapat beberapa faktor-faktor yang sangat berpengaruh terhadap hasil dari metode DC, yaitu sebagai berikut:

1. Jenis tanah yang cocok untuk DC
2. Kedalaman perbaikan yang dapat dihitung dengan Pers. (2).

$$D_i = n_c \sqrt{W_t H_d} \quad (2)$$

halmana:

D_i = kedalaman perbaikan (m)

W_t = berat tamper (ton)

H_d = tinggi jatuh (m)

n_c = konstanta, tergantung pada jenis tanah, derajat kejenuhan, dan kecepatan tumbukkan.

3. Bentuk dan Berat tamper
4. Tinggi jatuh dan energi yang dapat dihitung dengan Pers. (3).

$$H_d = (W_t H_d)^{0.54} \quad (3)$$

$W_t H_d$ merupakan energi per tumbukan dari tamper (ton-m), yang ditentukan dari persamaan menghitung kedalaman perbaikan yang dibutuhkan.

5. Pola dan spasi tumbukan
6. Kedalaman crater yang dapat dihitung dengan Pers. (4).

$$d_{cd} = 0.028 N_d^{0.55} \sqrt{W_t H_d} \quad (4)$$

7. Jumlah tumbukan dan fase yang dapat dihitung dengan Pers. (5).

$$AE = \frac{N_d W_t H_d}{A_e} \quad (5)$$

halmana:

N_d = jumlah tumbukan pada satu lintasan di titik tumbuk (umumnya 5-10 tumbukan)

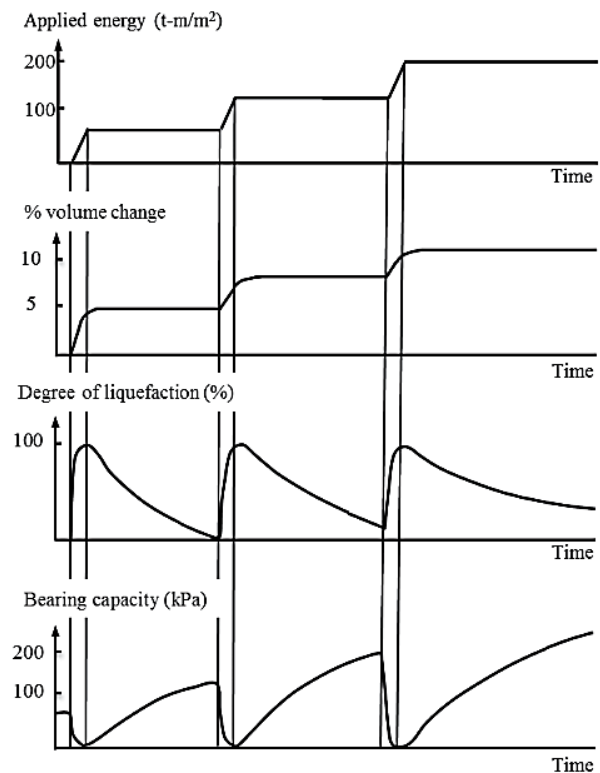
W_t = berat tamper (ton)

H_d = tinggi jatuh (m)

A_e = luas pengaruh (ekuivalen) di titik pemadatan ($A_e = s^2$ untuk pola segiempat atau $0.867 s^2$ untuk pola triangular)

s = spasi tumbukan (m)

Gbr. 4 menunjukkan perubahan volume, tekanan air pori berlebih, dan kekuatan tanah selama dan setelah tumbukan.



Gambar 4 Perbedaan volume, tekanan air pori berlebih, dan kekuatan tanah selama dan setelah proses tumbukan (setelah Menard dan Broise, 1975)

3 LOKASI STUDI KASUS

Lokasi studi kasus yang akan ditinjau yaitu di area Pembangunan *New Yogyakarta International Airport* (NYIA) di Kulon Progo Yogyakarta. Pada lokasi tersebut merupakan daerah yang memiliki kecepatan pergerakan lempeng tektonik yang cukup besar.

Kondisi tanah di lokasi Pembangunan NYIA merupakan pasir lepas jenuh air dan berada di wilayah tektonik yang tinggi, sehingga akan berpotensi mengalami likuifaksi (Gbr. 5). Oleh karena itu perlu upaya mitigasi dari bahaya likuifaksi.

Pada Pekerjaan Pembangunan Bandara NYIA ini, metode perbaikan DC diusulkan untuk menangani masalah tanah pasir lepas yang berpotensi likuifaksi. Adapun pekerjaan DC dilakukan untuk sisi udara, yaitu *runway*, *taxiway*, *appron*. Perbaikan tanah dengan DC di lokasi Pembangunan NYIA ditunjukkan pada Gbr. 6 di bawah ini, sedangkan Gbr.7 menunjukkan pembentukan *crater* akibat pemadatan dengan DC.



Gambar 5 Kondisi tanah eksisting di lokasi NYIA



Gambar 6 Pekerjaan *Dynamic Compaction* di NYIA



Gambar 7 Crater yang terbentuk akibat DC

4 METODE PENELITIAN

4.1 Penentuan Lokasi yang akan Ditinjau

Lokasi yang akan diteliti di seluruh area Pembangunan NYIA ini yaitu area *runway*. Pada area *runway*, pekerjaan SPT dilakukan sebanyak 16 titik untuk *pre-DC* (warna kuning)

dan 30 titik untuk *post-DC* (warna merah) yang ditunjukkan pada Gbr. 8.



Gambar 8 Lokasi titik bor *pre-DC* dan *post-DC*

Berdasarkan ketersediaan data SPT maka hanya beberapa data yang akan ditinjau pada area *runway* untuk analisis nilai Dr nya. Lokasi yang akan ditinjau merupakan area yang berdekatan antara pengujian SPT *pre* dan *post* DC yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Rekapitulasi Lokasi *Runway* yang Ditinjau

No.	Nama Area	No. Titik bor sebelum DC	No. Titik bor setelah DC
1	RW 2	DB 12	SPT R 2
2	RW 7	DB 11	SPT R 4
3	RW 16	DB 10	SPT R 9
4	RW 21	DB 9	SPT R 11
5	RW 26	DB 8	SPT R 14
6	RW 31	DB 7	SPT R 16
7	RW 35	DB 6	SPT R 18
8	RW 42	DB 5	SPT R 22
9	RW 47	DB 4	SPT R 24
10	RW 52	DB 3	SPT R 27
11	RW 57	DB 2	SPT R 29

4.2 Evaluasi Potensi Likuifaksi

Analisis potensi likuifaksi di lokasi bandara perlu dilakukan karena lokasi berada pada area dengan potensi bahaya gempa yang tinggi. Periode ulang gempa yang akan digunakan yaitu 1000 tahun dengan Magnitude 7. Klasifikasi situs yang didapat, yaitu SC (tanah keras) dan SD (tanah sedang) dengan faktor amplifikasi 1.069 dan 1.169 sehingga nilai percepatan puncak di permukaan (PSA) sebesar 0.4 g.

Analisis potensi likuifaksi dilakukan berdasarkan data SPT yang didapatkan dari pengujian di lapangan sebelum dilakukannya perbaikan tanah (*pre-DC*). Metode analisis yang digunakan yaitu dengan metode

perhitungan yang diusulkan oleh Seed dan Idris (1971).

Tahapan evaluasi potensi likuifaksi menurut Seed dan Idriss (1971), yaitu:

1. Menentukan nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR)
2. Menentukan nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) berdasarkan data N-SPT
3. Menentukan nilai *Magnitude Scaling Factor* (MSF)
4. Menghitung nilai *Factor of Safety* terhadap likuifaksi

Analisis potensi likuifaksi ditentukan dengan beberapa persyaratan, yakni letak muka air tanah, nilai faktor keamanan, nilai (N1)60, kedalaman, dan jenis tanah. Kondisi likuifaksi terjadi apabila memenuhi 5 (lima) persyaratan tanah terlikuifaksi sebagai berikut:

1. Berada di bawah muka air tanah
2. Nilai faktor keamanan kurang dari 1.3
3. Nilai (N1)60 kurang dari 30 (Youd dkk, 2001)
4. Kedalaman kurang dari 20 meter
5. Jenis tanah, yaitu tanah pasir

4.3 Evaluasi Nilai Kepadatan Relatif Tanah

Berdasarkan data uji yang telah dilakukan oleh Gibbs dan Holtz (1957), Meyerhof (1957) mengusulkan korelasi antara nilai N SPT dan kepadatan relatif tanah (Dr) untuk pasir bersih. Menurut Meyerhof (1957) menjelaskan bahwa, resistensi penetrasi diasumsikan meningkat dengan kuadrat dari kepadatan relatif dan berbanding lurus dengan tekanan *overburden* efektif pada pasir yang dapat dilihat pada Pers. 6 dan Pers. 7.

$$N = \left(17 + 24 \frac{\sigma_v'}{98}\right) Dr^2 \quad (6)$$

N adalah nilai dari SPT, σ_v' adalah tekanan *overburden* efektif dalam kPa dan Dr adalah kepadatan relatif yang dinyatakan sebagai rasio, bukan persentase. Nilai Dr dapat dicari dengan persamaan berikut, dimana nilai Dr yang dihasilkan dinyatakan dalam persen.

$$Dr = 21 \left(\frac{N}{\sigma_v' + 0.7} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Pada pekerjaan pembangunan bandara ini, telah dibuat sebuah kriteria desain berupa nilai parameter tanah minimum agar tanah dapat kuat menahan beban gempa sehingga tidak menyebabkan terjadinya likuifaksi. Kriteria

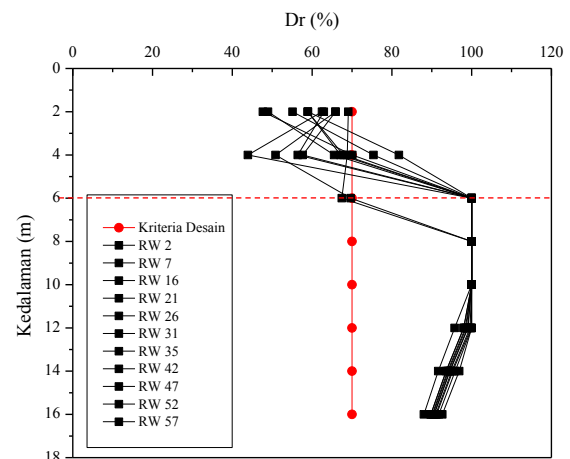
desain minimum yang digunakan untuk nilai Dr yaitu sebesar 70%.

5 HASIL DAN PEMBAHASAN

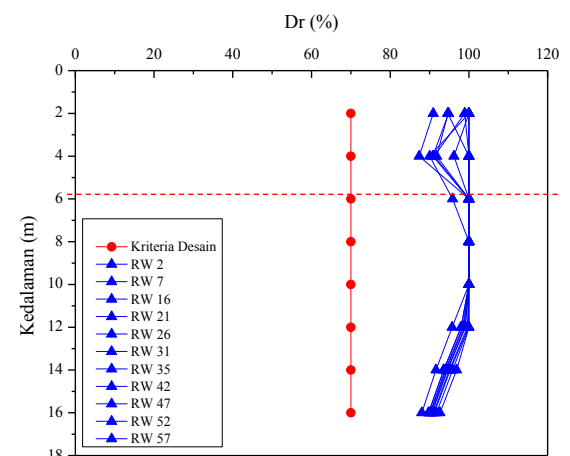
Hasil analisis potensi likuifaksi sebelum adanya perbaikan (*pre-DC*) ditunjukkan pada Tabel 2.

Pada area *runway* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa tanah yang berpotensi likuifaksi rata-rata berada di kedalaman 2 – 4 m, akan tetapi terdapat titik bor dengan kedalaman tanah berpotensi likuifaksi mencapai 6 – 8 m.

Hasil dari analisis pada kedalaman 0 – 6 m saat kondisi *pre-DC* menunjukkan bahwa rata-rata nilai Dr tidak mencapai desain kriteria, sedangkan untuk kondisi *post-DC* nilai Dr untuk semua lokasi yang ditinjau menunjukkan lebih tinggi dari desain kriteria. Grafik hubungan antara nilai Dr dengan kedalamana, pada kondisi *pre-DC* dan *post-DC* ditunjukkan pada Gbr. 8 dan Gbr. 9.



Gambar 8 Grafik hubungan antara nilai Dr pre-DC dengan kedalaman kondisi pre-DC



Gambar 10 Grafik hubungan antara nilai Dr pre-DC dengan kedalaman kondisi post-DC

Tabel 1 Hasil Analisis Potensi Likuiifikasi Area *Runway Pre-DC*

Kedalaman	DB															
(m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	22	78	81
2	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	L	L	L	L	TL	TL	TL	TL	TL
4	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	TL	L	L	TL
6	L	TL	L	L	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	L
8	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	L
10	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL
12	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL
14	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL
16	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL

Tabel 1 Hasil Analisis Potensi Likuiifikasi Area *Runway Pre-DC*

Kedalaman	SPT																													
(m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
2	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL
4	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL
6	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL
8	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL
10	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL
12	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL
14	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL
16	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL

L Berpotensi Likuiifikasi
 TL Tidak Berpotensi Likuiifikasi

Pada tanah eksisting dengan kedalaman 0 – 6 m, kepadatan tanah akan dikelompokkan menjadi 3 (tiga) bagian berdasarkan nilai derajat kepadatan awalnya (Dr_0), yaitu tanah dengan kepadatan *medium dense*, *dense*, dan *very dense*. Tanah dengan kelompok *medium dense* memiliki nilai Dr_0 sebesar 40 – 60%, kelompok *dense* dengan nilai Dr_0 sebesar 60 – 80%, sedangkan *very dense* dengan nilai Dr_0 sebesar 80 – 100%. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada tanah pasir *medium dense* rata-rata kenaikan nilai Dr yaitu sebesar 43%, untuk kelompok *dense* sebesar 30%, sedangkan untuk kelompok *very dense* hanya sebesar 1%,.

6 KESIMPULAN

Setelah dilakukannya analisis pengaruh DC terhadap tanah berpotensi likuiifikasi, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan analisis potensi likuiifikasi, kondisi tanah di lokasi pembangunan NYIA pada area runway memiliki potensi likuiifikasi pada kedalaman 0 – 6 m.
2. Pada kondisi *pre-DC*, nilai kepadatan relatif awal (Dr_0) kurang dari kriteria desain yaitu di bawah 70% pada kedalaman tanah berpotensi likuiifikasi.

3. Perbaikan tanah menggunakan DC dapat meningkatkan nilai Dr sebesar 43% untuk tanah *medium dense*, 30% untuk tanah *dense*, dan 1% untuk tanah *very dense*.
4. Metode perbaikan dengan *Dynamic Compaction* dapat mengurangi potensi likuiifikasi di lokasi pembangunan NYIA pada area runway berdasarkan nilai kepadatan relatifnya.

DAFTAR PUSTAKA – REFERENCES

- Gibbs, H. J., & Holtz, W. G. (1957). Research on determining the density of sands by spoon penetration testing. *Proc. 4th Int. Conf. on SMFE, I*, pp. 35-39.
- Han, J. (2015). *Principles and Praticice of Ground Improvement*. New Jersey, Canada: John Wiley & Sons.
- Jitno, H. (2015): Catatan Kuliah Topik Khusus Rekayasa Geoteknik, 2015
- Lee, F. H., & Gu, Q. (2004). Method for Estimating Dynamic Compaction Effect on Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(2), 139-152.
- Menard, L., & Broise, Y. (1975). Theoretical and practical aspects of dynamic compaction. *Geotechnique*, 25(1), 3 - 18.
- Meyerhof, G. G. (1957). Discussion on research on determining the density of sands by spoon

penetration testing. *Proc. 4th Int. Conf. on SMFE*, 3, p. 110.

- Oshima, A., & Takada, N. (1997). Relation between compacted area and ram momentum by heavy tamping. *14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Hamburg.
- Pusgen. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Jakarta: Pusat Litbang Perumahan dan Permukiman.
- Pramana, I.M.W. (2015): Analisis Potensi Likui-faksi dengan Data SPT dan CPT (Studi Kasus: Kawasan Benoa Denpasar). Bachelor Thesis, Universitas Udayana.
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified Procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, 97 (SM9), 1249 - 1273.
- Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., . . . Stokoe II, K. H. (2001). Liquefaction Resistance of Soils, Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEERR/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.