

Proceedings

24th Annual National Conference on Geotechnical Engineering
Jakarta - INDONESIA, 10-12 November 2020

Theme :

***“Geotechnical & Construction Challenges
During Global Pandemic”***

**HIMPUNAN AHLI TEKNIK TANAH INDONESIA
INDONESIAN SOCIETY FOR GEOTECHNICAL ENGINEERING (ISGE)
Graha HATTI Jl. Asmin No. 45 Susukan, Ciracas
Jakarta Timur 13750 – INDONESIA**

Reviewer : *Ir. Pintor Tua Simatupang, MT. Dr-Eng*
Dr. Aksan Kawanda, ST. MT
Prof. Ir. Widjojo Adi Prakoso, MSc. Ph.D.
Ir. Hendra Jitno, MAsc. Ph.D.
Ir. Nurly Gofar, MSCE, Ph.D
Ir. M. Farid Ma'ruf, MT. Ph.D.
Ir. Endra Susila, MT. Ph.D
Ir. Dr. Eng. Ardy Arsyad, ST, M.Eng.Sc

CHAIRMAN ADDRESS

Dear
Minister of Public Work, Republic of Indonesia,
Chairman of Engineering Board, Indonesian Academy of Science,
Invited Guest, Sponsors, Participants, and
Ladies and Gentlemen.

It is a great pleasure for me, on behalf of the organizing committee members, to welcome you this morning to this important event for our society. In this opportunity, we wish to express our sincere thanks to the keynote speakers and invited speakers for their coming to this annual conference for giving lecture and share their valuable experience in the field of geotechnical engineering.

Annual conference this time is most important to continue our organization in task of develop geotechnical engineering for serving infrastructure construction now and future. Especially now we are still facing global pandemic Covid19 which has impacted all aspect of our life including construction activity. The way of our working has been changing dramatically, our number and size of projects are decreasing and creating less job opportunities for our engineers. However, there are some good thing caused the pandemic, now we have had better way to learning and transfer of knowledge much cheaper than before. Flood of information through online international conference, webinar, meeting etc. are flowing with speed which never happen before. We can get knowledge of all thing faster than before, without spend much time to go out from our home, now everything is going digital. This year, our annual conference also is conducted online with some consequence better thing and bad thing accordingly. As committee, we already have done our best to manage our conference as good as previous years.

There is a new thing this year, that our organization now have young and student membership (AMM) or Anggota Muda dan Mahasiswa. This membership will be important to attract our young engineers and students since beginning to start their carrier as geotechnical engineers. In this annual meeting AMM also conducts AMM-halfday gathering and deliver one outstanding parallel session especially for their members writers.

As my report as chairman of conference that till today total number of registrants have been more than 900 participants and still increasing. This conference will deliver 10 keynote speakers, 10 technical sessions and 33 papers in four classes of paralel sessions. These numbers have shown to us that we are still moving ahead, and our members still wish to learn a lot.

Through this conference, it is hoping the participants can extract invaluable lessons from the keynote lectures and fruitful interaction between them even via online forums. Before ending allow me, on behalf of conference committee members, to wish the participants and sponsors our gratefully acknowledge. At last, we apologize if there is any mistake in our part.

Thank you for your attention,
Jakarta, 10 November 2020

Dandung Sri Harninto, ST. MT

PRESIDENT OF ISGE ADDRESS

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Salam Sejahtera bagi kita semua.

The Minister of Public Works and Housing, the Chairman of Engineering Board of the Indonesian Academy of Science, Keynote Speakers, Ladies and Gentlemen, the XXIV Annual National Conference on Geotechnical Engineering, on behalf of the National Board of Indonesian Society for Geotechnical Engineering (ISGE / HATTI), I would like to welcome you all to this wonderful conference. In particular, to the Minister of Public Works and Housing, let me express my sincere gratitude and highest appreciation for your willingness to address this conference.

Ladies and Gentlemen, the theme of this conference is "Geotechnical and Infrastructure Challenges during Global Pandemic". We have this annual conference online for the first time due to the COVID-19 pandemic, and members of our society are currently facing the subsequent business challenges in their professional lives. Nevertheless, we are optimistic that all these challenges will fade away in the near future, and thus we need to prepare ourselves to support further the economic development of Indonesia.

Dear Indonesian Society members, we would like to report that in this conference we have a range of different topics from prominent geotechnical experts, as well as a number of technical paper contributors. We have also a number of interesting technical presentations from the geotechnical engineering companies. In addition, we would like also to report that ISGE / HATTI has been accredited by the Minister of Public Works and Housing this year, an important step to develop further ISGE as a leading geotechnical engineering organization in Indonesia.

In closing, I extend my sincere gratitude to all participants and all sponsors, particularly the Platinum Sponsors: PT. Bauer Pratama Indonesia, PT. Geoforce Indonesia, PT. Geotechnical Sistemindo, PT. Geotekindo, PT. Lancarjaya Mandiri Bersama, PT. Teknindo Geosistem Unggul, and PT. Tetrasa Geosinindo. I wish you a very enlightening and successful conference. Thank you very much.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.
Jakarta, 10 November 2020

Prof. Ir. Widjojo A. Prakoso, MSc., Ph.D
President of ISGE

Pertemuan Ilmiah Tahunan XXIV
24th Annual National Conference on Geotechnical Engineering
Jakarta - INDONESIA, 10-12 November 2020

Theme :

**“Geotechnical & Construction Challenges
During Global Pandemic”**

ORGANIZING COMMITTEE

- Steering Committee : Ir. Soekrisno Rammelan
Prof. Ir. Chaidir Anwar Makarim, MSCE, Ph.D
Ir. Bigman H. Hutapea, MSc, Ph.D
Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE., Ph.D.
Prof. Ir. Widjojo Adi Prakoso, MSc, Ph.D
Ir. Pintor Tua Simatupang, MT. Dr-Eng
Ir. Idrus M. Alatas, MSc, Ph.D.
- Chairman : Dandung Sri Harninto, ST. MT.
- Vice Chairman : Ali Iskandar, ST. MT.
- Secretary : Dr. Yustian Heri Suprpto, ST. MSc
- Treasurer : Ir. Budiantari HL. MSc.
- Team Reviewer : Ir. Pintor Tua Simatupang, MT. Dr-Eng
Dr. Aksan Kawanda, ST. MT
Prof. Ir. Widjojo Adi Prakoso, MSc. Ph.D.
Ir. Hendra Jitno, MAsc. Ph.D.
Ir. Nurly Gofar, MSCE, Ph.D
Ir. M. Farid Ma'ruf, MT. Ph.D.
Ir. Endra Susila, MT. Ph.D
Ir. Dr. Eng. Ardy Arsyad, ST, M.Eng.Sc
- Editing : Yunan Halim, ST. MT.
Aswin Liem, ST. MT. Ph.D
Stephen Gunawan Handoko, ST. MT.
- Events : Ali Iskandar, ST. MT.
Edwin Laurencis, ST. MT.
Josephine Aristiti Setyarini, ST. MT.
Merry Natalia, ST. MT.
Christy Anandha, ST., MT
Satyaroong Intan Hupostasis, ST.
Nurfita Anjarsari, ST.
Jefry Rory Paath, ST
Rara Dwi Novianti, ST. MT.
Nadya Ayu Anindita, ST

Tatag Yufitra Rus, ST. MSc
Himatul Farichah, ST. MSc

- Sponsorship : Anthony Setiawan, MBA
Marcello Djunaedy, ST. MT.
Agus Himawan, ST. MT.
Ir. Wahyu Priya Kuswanda, MT.
- Secretariat : Sugino
Sya'bani
Muhammad Irfan
- Publisher : Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia
(*Indonesian Society for Geotechnical Engineering*)
- Address : Graha HATTI
Jl. Asmin No. 75 Susukan, Ciracas
Jakarta Timur 13750
Telp. : 021 - 22090009
Fax. : 021 - 22090009
Email : sekretariat@hatti.or.id; hattipusat@yahoo.com
Website : <http://www.hatti.or.id>
- ISBN No. : xxx-xxx-xxxxx-x-x

TABLE OF CONTENTS

Preface Committee Chairman	i
Message From President Of Indonesian Society For Geotechnical Engineering (ISGE)	iii
Organizing Committee	v
Table of Contents	vii
Keynote Speakers :	
5. Ir. FX. Toha, MSCE., Ph.D - <i>Challenges in Rendering Geotechnical Engineering Services during Global Pandemic</i>	1-10
7. Dr. Gouw Tjie Liong - <i>Vibro-Kompaksi; Perancangan, Pelaksanaan dan Studi Kasus</i>	11-34
8. Nurly Gofar, Ph.D - <i>Open Pit Mining Slopes Stability Analysis Incorporating Unsaturated Soil Mechanics Principles</i>	35-44
Session I : R.A1	
1. Prediction of Soil-Water Characteristic Curve Utilizing Index Properties for Compacted Crushed Mudrock from Cisomang Area (<i>Sugeng Krisnanto, Nurul Muhlisah, Hasnah Salsabila Ramadhani, Idrus Muhammad Alatas</i>).....	45-50
2. Analisis Potensi Bencana Tanah Longsor di Wilayah Kecamatan Herlang Kabupaten Bulukumba Sulawesi Selatan (<i>Busthan, Andi Zarkia Nur, Muh. Ilyas Rustam, Rahmat Abdillah</i>)	51-60
3. Determining Flow Limit Menggunakan Fall Cone Penetration Test (<i>Budijanto Widjaja</i>).....	61-64
4. Karakterisasi Tanah Lempung Vulkanik di Bogor dengan Uji CPTu dan Uji Dilatometer (<i>Stefanus Diaz Alvi, Paulus P Rahardjo</i>).....	65-72
5. Z Shape Steel Sheet Piles Used in Civil Construction For Retaining Wall Purposes (<i>Eric Leong</i>).....	73-82
6. Studi Aplikasi Ground Anchor Sebagai Perkuatan Dinding Penahan Tanah di Kabupaten Badung, Provinsi Bali (<i>I Made Dirgayusa, Sito Ismanti</i>)	83-90

7. Redesain Stabilitas Turap untuk Memperkuat Struktur Turap Interior Yang Sudah Dilakukan Dilapangan (*Musta'in Arif, Bambang Piscesa*)..... 91-96

Session II : R.A2

8. Development of Innovative Interlock Used in Steel Pipe Sheet Pile Walls For Harbour And Civil Construction (*Eric Leong*)..... 97-106
9. Evaluation Liquefaction and Lateral Flow on The Palu MW 7,5 Earthquake 2018 using Standard Penetration Test at Lolu Village Site (*Dandung Sri Harninto*)..... 107-116
10. Parametric Study of Laterally Loaded Prestressed Precast Spun Concrete Piles on Two-Layer Cohesive Soil System (*Ahmad Sulaiman, Ezra Rismantojo, Dandan Anugrah and Ghifariyatu Rohimah*)..... 117-124
11. Pembaruan GMPE pada Piranti Lunak USGS PSHA, Studi Kasus: Pulau Jawa (*Arifan Jaya Syahbana, Anggun Mayang Sari, Masyhur Irsyam, M Asrurifak, Hendriyawan*)..... 125-132
12. Post Compression Shrinkage Curve (*Martin Wijaya, Alfrendo Satyanaga*)..... 133-136
13. Current Approaches in Stability Analysis for Braced Excavations (*Ignatius Tommy Pratama*) 137-142
14. Diskontinuitas Sebaran dan Tebal Lapisan Tanah Keras pada Sub-Surface Zona Pesisir Kota Banda Aceh Untuk Pertimbangan Perencanaan Pondasi Dalam. (*Munirwansyah, Reza P Munirwan*)..... 143-148
15. Perbandingan Hasil dan Biaya Uji Integritas Fondasi Tiang Bor Dengan Metode CSL dan TIP (*Anthony Kesumah, Adisti Pratiwi, Gerraldi Pratama*)..... 149-154
16. Analisis Pencegahan Pencemaran Air Lindi di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Ngipik - Gresik (*Ria Asih Aryani Soemitro, Trihanyndio Rendy Satrya, Salma Rosita*)..... 155-162

Session I : R.B1

17. Evaluasi Kesesuaian Prediksi Besar Penurunan Konsolidasi dan Kenaikan Daya Dukung Tanah pada Perbaikan Tanah Metode Vakum di Proyek Tol Sumatera (*Andryan Suhendra, Ganny Saputra*) 163-170

18.	Studi Pergerakan Tanah di Trangkil, Sadeng dan Deliksari Kecamatan Gunungpati Semarang (<i>Maria Wahyuni, David Widiyanto, Budi Setiadi, Budi Santosa</i>).....	171-180
19.	A Study of Movement of Existing Tunnel Adjacent to an Excavation (<i>Syiril Erwin Harahap</i>).....	181-188
20.	Application of Foam Mortar for Road Reconstruction on Peat Soils (<i>Arif Salman Dabigi</i>).....	189-194
21.	Simulasi Numerik Lereng Badan Jalan yang Distabilisasi Secara Mekanis (MSE) Kombindasi Facing Beton (<i>Ahmad, Yudha Sandiyutama</i>).....	195-200
22.	Escape Hill sebagai Alternatif Tempat Evakuasi Sementara (TES) di Desa Tibang Kecamatan Syiah Kuala – Banda Aceh (<i>Halida Yunita, Munirwansyah, Marwan</i>).....	201-206
23.	Studi Potensi Likuefaksi di Daerah Istimewa Yogyakarta Berdasarkan Kecepatan Gelombang Geser (Vs30) (<i>Aditya Setyo Rahman, Fajri Syukur Rahmatullah, Sigit Pramono, Dadang Permana, Bambang Setiyo Prayitno</i>).....	207-212

Session II : R.B2

24.	Studi Eksperimental Perbaikan Tanah Pasir Lepas dengan Campuran Biopolimer Xanthan gum dan Guar gum (<i>Yohanes Albrecht, Fransisko Wiwarsono, Dirgantara Putra</i>).....	213-218
25.	Perbandingan Analisa Galian Dalam Menggunakan Metode Elemen Hingga Satu Dimensi dan Dua Dimensi (<i>Giovanni Binar Radityo, Aswin Lim, Siska Rustiani</i>).....	219-224
26.	Penentuan Lateral Subgrade Modulus Tanah Pasir Vulkanik pada Mini Bored Piles dengan Back Analysis dari Hasil Uji Pembebanan Lateral (<i>Kevin Lie, Stefanus Diaz Alvi, Paulus P Rahardjo</i>).....	225-230
27.	The Comparison of t-z Curve of Axially Loaded Pile in Soft Soil (<i>Yiska Vivian Christensen Wijaya, Aswin Lim, Aflizal Arafianto</i>).....	231-236
28.	Kajian Penahan Aliran Debris Menggunakan Sistem Ring Net Barrier (<i>Albert Johan</i>)	237-246
29.	3D Modeling of Vacuum Preloading (<i>Anthony Gunawan</i>).....	247-250
30.	On the use of Arduino Microcontroller and ADXL345 Accelerometer Sensor for Civil Engineering Application (<i>James Jatmiko Oetomo</i>).....	251-260

31.	Liquefaction-Induced Dam Failure Simulation – A Case for the Material Point Method (<i>Ezra Y. S. Tjung, Kenichi Soga</i>).....	261-266
32.	Studi Kasus Stabilisasi Timbunan Rest Area Tol Semarang Solo KM 456 dengan Sistem Geofram (<i>Nadya Ayu Anindita, Dandung Sri Harninto, Yustian Heri Suprpto</i>).....	267-274
33.	Perilaku Kekuatan Geser <i>Interface</i> Antara Batuan Andesit Dengan Variasi Material Timbunan Akibat Interusi Air (<i>Idrus M. Alatas</i>).....	275

Vibro-Kompaksi

Perancangan, Pelaksanaan dan Studi Kasus

GOUW Tjie-Liong

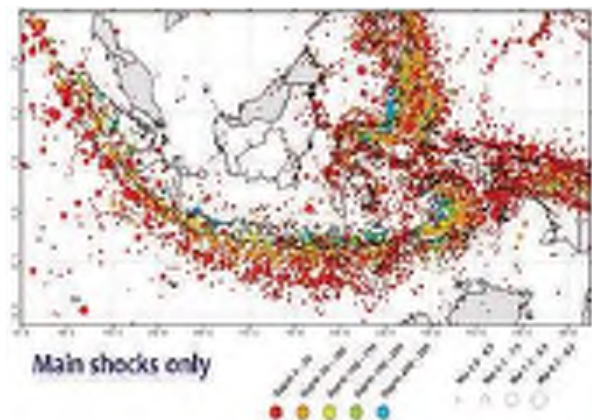
Universitas Katolik Parahyangan, Indonesia, gtloffice@gmail.com

ABSTRAK: Salah satu kerusakan/kegagalan struktur akibat gempa adalah terjadinya likuifaksi (*liquefaction*), yaitu suatu proses hilangnya daya dukung tanah akibat akumulasi peningkatan tegangan air pori secara berlebihan pada saat gempa sehingga tegangan efektif tanah menjadi nol. Peristiwa likuifaksi ini terutama terjadi pada tanah pasir halus jenuh air dan pada daerah dengan faktor kegempaan yang tinggi, seperti pada banyak daerah pesisir di Indonesia. Terjadinya gempa tidak dapat dicegah dan tidak dapat diprediksi, namun potensi likuifaksi dapat dicegah dengan melakukan langkah-langkah perbaikan tanah untuk meningkatkan kepadatan tanah pasir tersebut. Metoda perbaikan tanah yang sering diterapkan untuk mengurangi potensi likuifaksi ini adalah teknik vibro-kompaksi. Tulisan ini memuat aspek teori perancangan, pelaksanaan dan evaluasi hasil metoda perbaikan tanah tersebut. Disajikan pula beberapa studi kasus vibro-kompaksi.

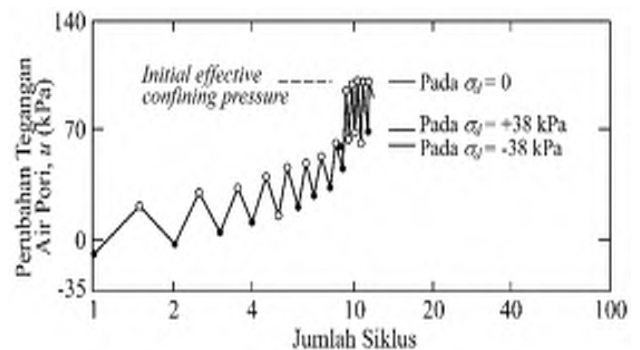
Kata Kunci: tanah pasir halus, likuifaksi, perbaikan tanah, vibro-kompaksi

1 PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan yang masuk dalam wilayah yang dikenal dengan nama cincin api (*ring of fire*), suatu istilah yang menandakan tingginya frekuensi gempa dan aktifitas vulkanik (Gbr. 1). Pada saat yang bersamaan banyak wilayah pesisir di kepulauan Indonesia yang memiliki tanah pasir halus jenuh air dengan tingkat kepadatan yang rendah. Kombinasi kegempaan dan pasir halus jenuh air dapat berakibat terjadinya peristiwa likuifaksi, yaitu suatu proses hilangnya daya dukung tanah akibat akumulasi tegangan air pori yang berlebihan pada saat gempa (Gbr. 2) sehingga tegangan air pori, u , tersebut menyamai atau melampaui tegangan in situ total tanah, σ_{vo} , dengan akibat tegangan efektif in situ tanah, σ'_{vo} menjadi nol dan tanah kehilangan daya dukungnya, sebagaimana digambarkan dalam formulasi Terzaghi, serta Mohr Coulomb pada Pers. (1) dan (2).



Gbr. 1. Indonesia dalam Wilayah Cincin Api. Irsyam (2012)



Gbr. 2. Akumulasi Tegangan Air Pori saat Gempa. Seed & Lee (1966); sumber Das (2011)

Rumus Terzaghi:

$$\sigma'_{vo} = \sigma_{vo} - u \quad (1)$$

saat gempa tegangan air pori, u meningkat cepat, bila u menyamai σ_{vo} maka $\sigma'_{vo} = 0$

Rumus kuat geser, τ , Mohr-Coulomb:
 untuk tanah pasir,

$$\tau = \sigma'_{vo} \tan \phi \quad (2)$$

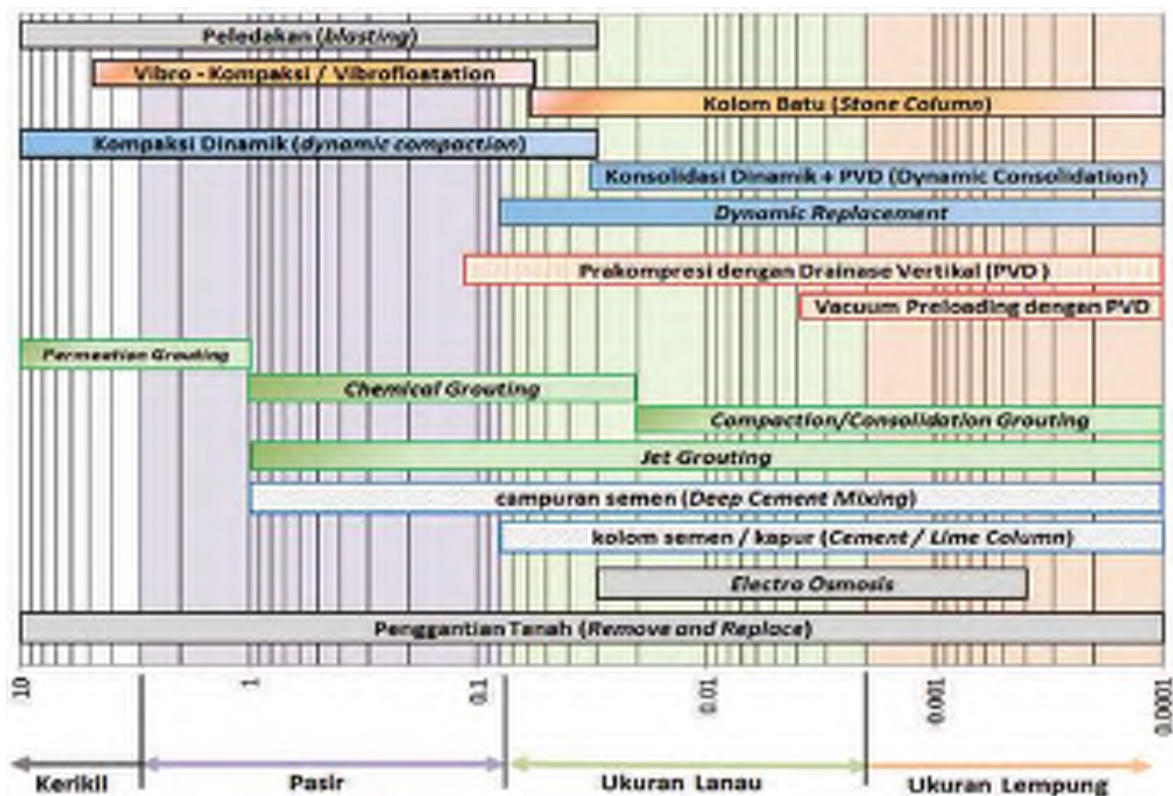
saat $\sigma'_{vo} = 0$ maka $\tau = 0$, berarti tanah kehilangan daya dukungnya dan terjadilah likuifaksi.

Akibat kehilangan daya dukung tersebut bangunan di atasnya dapat mengalami kerusakan atau bahkan keruntuhan. Gbr. 3 menunjukkan beberapa kerusakan yang terjadi akibat likuifaksi. Untuk mencegah terjadinya peristiwa likuifaksi, tanah pasir yang berpotensi likuifaksi perlu dipadatkan hingga derajat tertentu. Gbr. 4 menunjukkan berbagai teknik perbaikan tanah yang tersedia (SNI 8460:2017; Gouw 2018). Terlihat bahwa terdapat beberapa metoda perbaikan tanah yang dapat dilakukan untuk tanah pasir, diantaranya: peledakan,

kompaksi dinamis, vibro-kompaksi, *grouting* dan *deep mixing*.



Gbr. 3. Kerusakan akibat Likuifaksi. sumber: Kramer (1966); Internet



Gbr. 4. Teknologi Perbaikan Tanah dan Jenis Tanah untuk Aplikasinya. SNI 8460:2017; Gouw (2018)

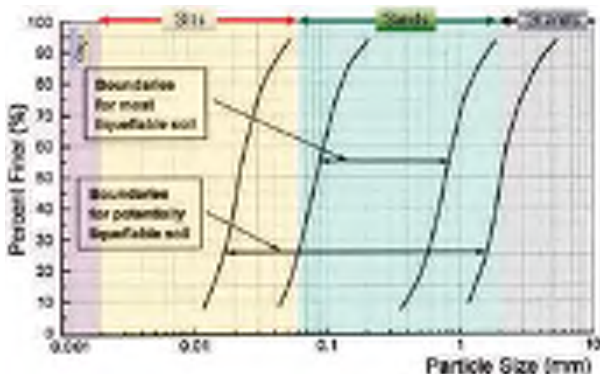
Selanjutnya tulisan ini dibatasi pada teknik perbaikan tanah dengan vibro-kompaksi, mulai dari perancangan, pelaksanaan, instrumentasi, monitoring hingga evaluasi hasil perbaikan tanah tersebut. Juga disajikan studi kasus dari proyek nyata.

2 POTENSI LIKUIFAKSI

Karena teknik vibro-kompaksi terutama sering kali ditujukan untuk meningkatkan kepadatan tanah dalam mengatasi potensi likuifaksi, maka tentunya untuk menjamin keberhasilan pelaksanaan sistem perbaikan tanah tersebut perlu dilakukan analisa potensi likuifaksi. Analisa potensi likuifaksi ini dapat dilakukan melalui data SPT Seed dan Idriss (1971, 1982), Seed et al. (1985), Idriss dan Boulanger (2004), Ishihara (1985), data uji sondir Stark dan Olson (1995), data uji cepat gelombang geser atau *shear wave velocity* Andrus dan Stokoe (2000).

2.1 Potensi Likuifaksi dari Ukuran Butiran

Sebelum dilakukan perhitungan potensi likuifaksi, ukuran butiran tanah pasir dapat dijadikan indikasi pertama apakah tanah tersebut berpotensi likuifaksi (Gbr. 5). Pada umumnya tanah sedalam 15 m dari permukaan lebih berpotensi mengalami likuifaksi dari pada tanah yang lebih dalam. Likuifaksi biasanya hanya terjadi pada tanah non kohesif yang berada di bawah muka air tanah dengan derajat kejenuhan di atas 80%.



Gbr. 5. Potensi Likuifaksi berdasarkan Ukuran Butiran. Tsuchida (1970)

2.2 Analisa Potensi Likuifaksi dari data SPT

Analisa potensi likuifaksi berdasarkan data uji SPT dapat dilakukan berdasarkan prosedur sebagai berikut:

- Hitung *Cyclic Stress Ratio*, CSR, yang timbul akibat gempa,

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} r_d \quad (3)$$

dimana:

a_{max} = percepatan gempa horizontal di permukaan tanah

g = gravitasi bumi

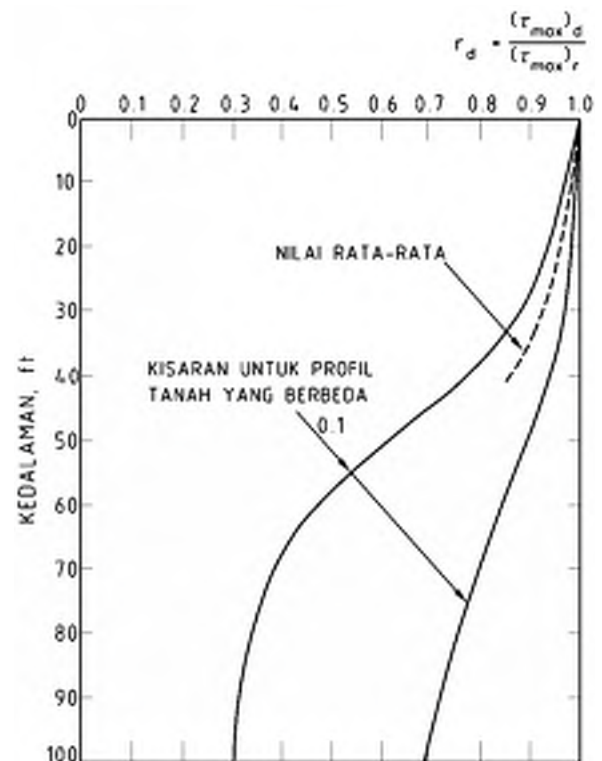
σ_{vo} = tegangan vertikal total tanah

σ'_{vo} = tegangan vertikal efektif tanah

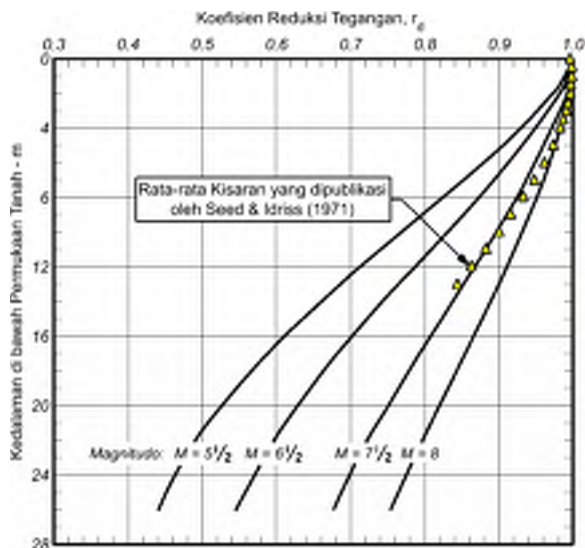
r_d = faktor reduksi tegangan

Tergantung dari kriteria ahli mana yang dipakai nilai r_d diambil dari Gbr. 6 atau Gbr. 7. Atau dihitung menurut formula Iwasaki dkk (1978) sbb:

$$r_d = 1.0 - 0.015z \quad (4)$$



Gbr. 6. Faktor Reduksi Tegangan (r_d). Seed & Idriss (1971)



Gbr. 7. Faktor Reduksi Tegangan (r_d). Idriss & Boulanger (2004)

- Nilai CSR yang dihitung di atas berlaku untuk besaran gempa sebesar $M = 7.5$. Untuk besaran gempa yang lain nilai $CSR_{M=7.5}$ perlu dibagi dengan faktor koreksi, M_{sf} , yang disajikan pada Tabel 1.

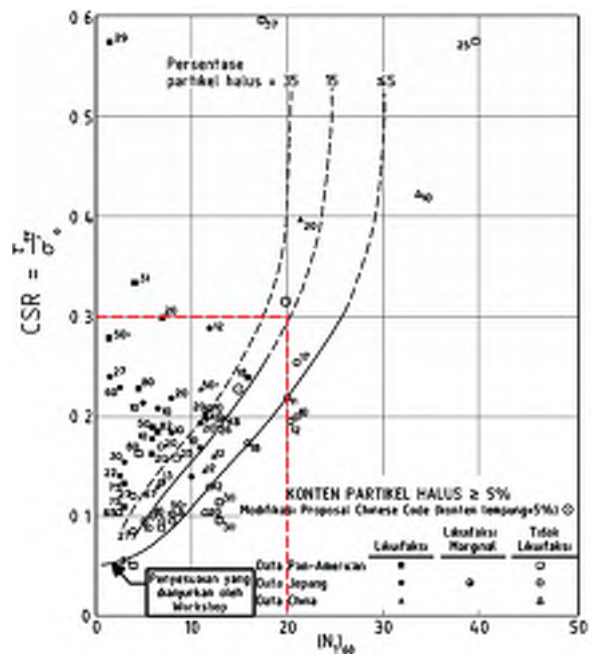
$$CSR_M = CSR_{M=7.5} / M_{sf} \quad (5)$$

Tabel 1. Faktor Koreksi Besaran Gempa, M_{sf} .

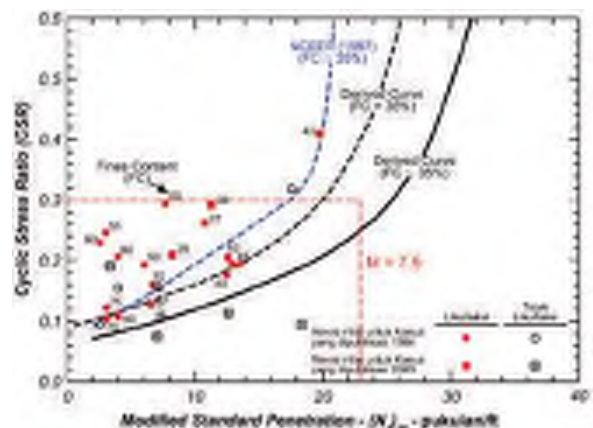
Earthquake Magnitude, M	Magnitude Scaling Factor, M_{sf}		
	Idriss & Boulanger (2004)	Seed et al. (1985)	Seed & Idriss (1982)
0.00	1.800	1.800	1.620
5.00	1.800	1.800	1.620
5.25	1.800	1.680	1.520
5.50	1.661	1.580	1.440
5.75	1.557	1.480	1.370
6.00	1.459	1.380	1.300
6.25	1.367	1.300	1.230
6.50	1.281	1.225	1.170
6.75	1.200	1.175	1.120
7.00	1.124	1.105	1.070
7.25	1.052	1.040	1.040
7.50	1.000	1.000	1.000
7.75	0.922	0.960	0.970
8.00	0.862	0.920	0.940
8.25	0.807	0.880	0.910
8.50	0.754	0.840	0.890

Contoh: bila CSR dari hitungan didapatkan 0.276; besaran gempa yang diantisipasi adalah $M=8$; berdasarkan rekomendasi Seed dkk (1985), didapatkan faktor koreksi sebesar $M_{sf}=0.276/0.92=0.3$.

- Berdasarkan nilai CSR pada besaran gempa sebesar M yang dihitung di atas, cari nilai batas SPT (N_1)₆₀ yang menentukan batas likuifaksi. Penggunaan kriteria dari grafik yang diberikan oleh Seed dkk, 1985 (Gbr. 8), atau Idriss & Boulanger, 2004 (Gbr. 9), atau Cetin, 2004 (Gbr. 10). Contoh: dari langkah sebelumnya didapatkan $CSR_M=0.3$, untuk kadar tanah berbutir halus 15% dari Gbr. 8 didapat nilai batas likuifaksi SPT sebesar (N_1)₆₀ = 20. Dari Gbr. 9 (N_1)₆₀ ≈ 23. Dari Gbr. 10, untuk *plastic limit* 20%, (N_1)₆₀ ≈ 28.

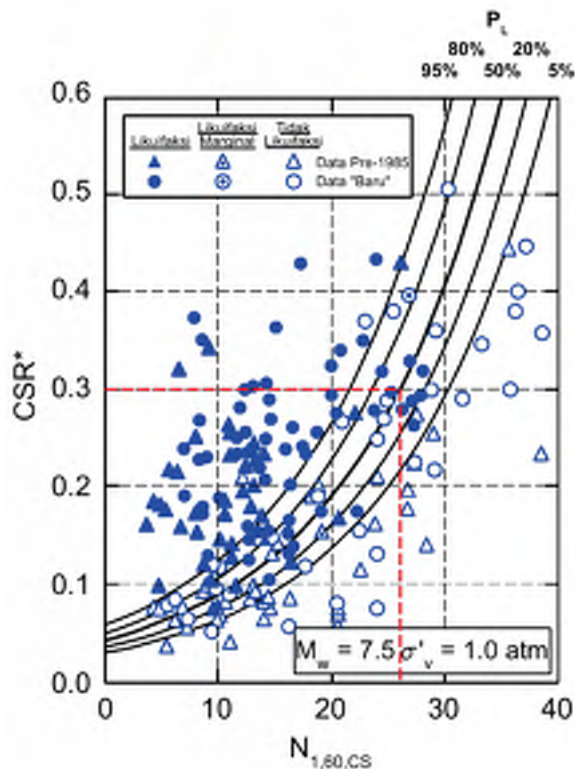


Gbr. 8. CSR vs (N_1)₆₀. Seed et al. (1985)



Gbr. 9. CSR vs (N_1)₆₀. Idriss & Boulanger (2004)

- Konversikan nilai (N_1)₆₀ ini menjadi nilai N SPT lapangan, N_{lap} , sesuai dengan alat SPT yang dipakai di lapangan pada saat pengujian SPT. Penggunaan rumus yang diperkenalkan oleh Skempton (1986) pada Pers. (6).



Gbr. 10. CSR vs $(N_1)_{60}$. Cetin (2004)

$$N_{Lap} = \frac{(N_1)_{60}}{\alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \left(\frac{Er}{60}\right) \cdot \sqrt{\frac{100}{\sigma'_{VO} \text{ (in kPa)}}}} \quad (6)$$

dimana:

N_{Lap} = Data SPT lapangan (pukulan/30 cm)
 $(N_1)_{60}$ = Nilai SPT dengan energi efektif 60% dan tegangan vertikal efektif sebesar 1 kg/cm² (100 kPa)

α, β, γ = Faktor koreksi panjang batang, mata SPT dan diameter lubang bor (Tabel 2)

Er = Rasio energi sistem palu SPT (Tabel 3)

Tabel 2. Faktor Koreksi SPT.

Faktor Koreksi α, β, γ			
Panjang Batang	> 10 m	α	1.00
	6 – 10 m		0.95
	4 – 6 m		0.85
	3 – 4 m		0.75
SPT tanpa pelapis		β	1.00
SPT dengan pelapis			1.25
Diameter Lubang Bor	65 – 115 mm	γ	1.00
	150 mm		1.05
	200 mm		1.15

Tabel 3. Rasio Energi SPT, Er.

Negara	Sistem Penjatuhan	Palu	ER (%)
Jepang	Otomatis (Tombi)	Donut	78
Jepang	T-K-P (2 putaran)	Donut	65
Inggris	Otomatis (Pilcon)	Donut (pilcon)	60
Inggris	T-K-P (1 putaran)	Selubung (old standard)	60
RRC	Otomatis (Pilcon)	Donut (pilcon)	60
RRC	Tambang & Katrol (Manual)	Donut	55
Amerika	T-K-P (2 putaran)	Pengaman (safety)	55
Inggris	T-K-P (2 putaran)	Selubung (old standard)	50
Amerika	T-K-P (2 putaran)	Donut	45

catatan: T-K-P = Tambang Katrol Pemutar
 Ukuran diameter tambang yg digunakan di Jepang 12-17mm dan di Amerika 19-25mm

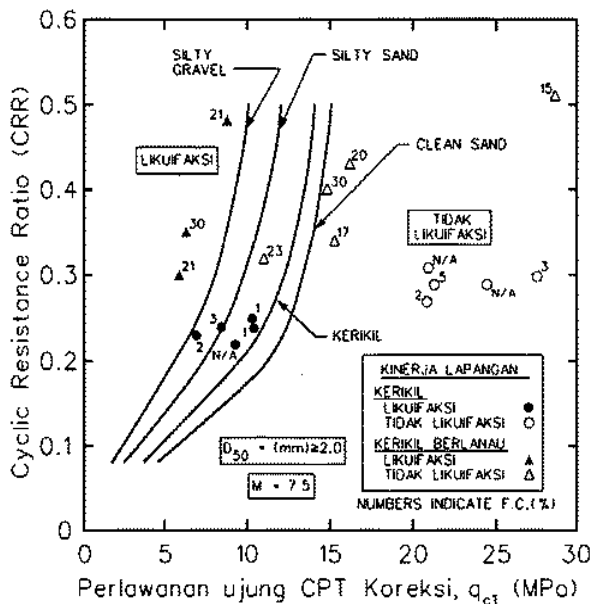
Contoh: asumsikan pada kedalaman 6 m, $\sigma'_{vo} = 40$ kPa, panjang batang SPT = 6 + 1 = 7 m, SPT tanpa pelapis; diameter lubang bor 150 mm; dari Tabel 2 didapatkan $\alpha = 0.95$, $\beta = 1$, $\gamma = 1.05$. SPT dengan sistem dari Jepang, penjatuhan otomatis dan dengan palu donut, dari Tabel 3 didapatkan $Er = 78\%$. Maka untuk $(N_1)_{60} = 20$, diperoleh:

$$N_{Lap} = \frac{20}{0,95 \cdot 1 \cdot 1,05 \cdot \left(\frac{78}{60}\right) \cdot \sqrt{\frac{100}{40}}} \approx 10$$

Ini berarti, batas SPT untuk tidak terjadi likuifaksi minimal nilai SPT lapangan harus lebih besar dari 10 pukulan/30 cm, atau nilai $(N_1)_{60} > 20$ (berdasarkan kriteria Seed dkk, 1985). Dengan cara demikian, perhitungan di setiap kedalaman dapat dilakukan dan dibuat batas nilai SPT dimana di bawah itu tanah pasiran akan mengalami likuifaksi. Garis batas nilai SPT ini menjadi kriteria batas likuifaksi, di mana setelah proses pemadatan teknik vibro-kompaksi, nilai SPT harus berada di atas garis batas likuifaksi tersebut. Bilamana diperlukan angka keamanan likuifaksi sebesar FS_{liq} , maka nilai CSR pada Pers. (3) dikalikan dengan nilai FS_{liq} yang dikehendaki.

2.3 Analisa Potensi Likuifaksi dari CPT

Perhitungan potensi likuifaksi dapat juga dilakukan dengan menggunakan data sondir atau CPT (*Cone Penetration Test*). Langkah-langkah yang dilakukan sama persis seperti pada metoda SPT. Hanya saja grafik yang digunakan dalam penentuan batas likuifaksi digunakan kriteria yang dibuat atas dasar uji CPT seperti disajikan pada Gbr. 11.



Gbr. 11. CSR (CRR) vs q_{c1} . Stark & Olson (2004)

CRR dalam Gbr. 11 berarti *Cyclic Resistance Ratio*, yang berarti rasio ketahanan terhadap beban siklik gempa. Ini sama saja dengan CSR, hanya saja CSR berarti rasio tegangan siklik akibat gempa. Nilai CPT pada sumbu X dinormalisasi / dikoreksi terhadap tegangan efektif sebesar $1 \text{ kg/cm}^2 \approx 100 \text{ kPa}$, dengan formula sbb:

$$q_{c1} = c_N q_c = \frac{1,8}{0,8 + \frac{\sigma'_{v0}}{100}} q_c \quad (7)$$

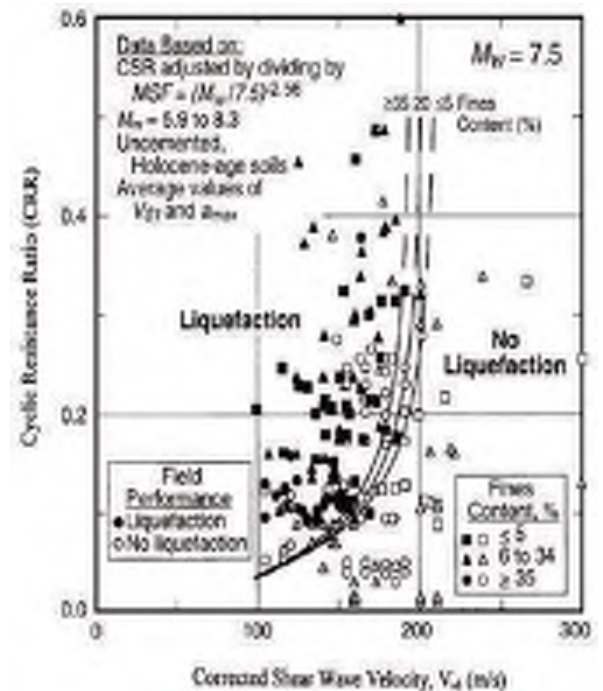
dimana:

σ'_{v0} = tegangan vertikal efektif tanah dalam kPa

2.4 Analisa Potensi Likuifaksi dari Cepat Rambat Gelombang Geser

Bila tersedia data kecepatan gelombang geser, V_s , yang dapat diukur dengan menggunakan uji seismic seperti *down-hole/cross-hole seismic test* atau SASW, maka analisa potensi likuifaksi dapat dilakukan melalui data pengukuran gelombang geser ini. Kriteria likuifaksi yang dipakai adalah grafik yang dibuat oleh Andrus

dan Stoeko (1999), sebagaimana disajikan pada Gbr. 12.



Gbr. 12. CSR (CRR) vs V_{s1} . Andrus & Stokoe (2004)

Sama seperti cara SPT atau CPT, nilai kecepatan gelombang geser, V_s , juga perlu dikoreksi terhadap tegangan efektif sebesar $1 \text{ kg/cm}^2 \approx 100 \text{ kPa}$, dengan formula sebagai berikut:

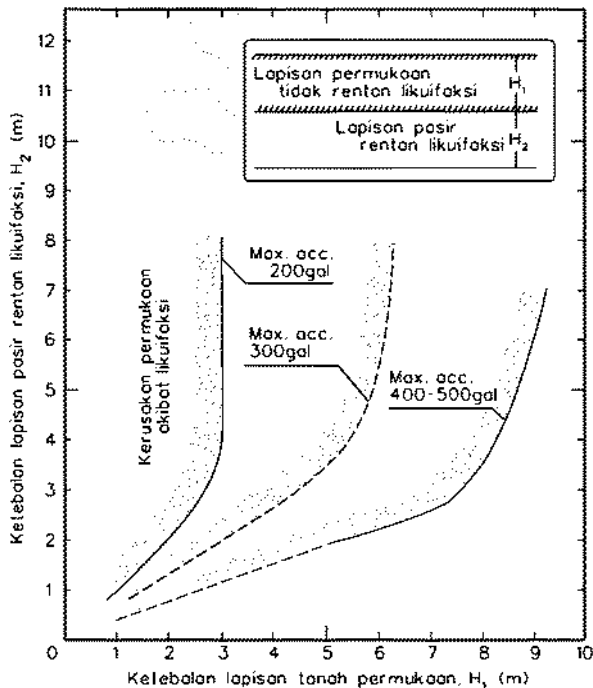
$$V_{s1} = V_s \left(\frac{100}{\sigma'_{v0}} \right)^{0,25} \quad (8)$$

dimana:

σ'_{v0} = tegangan vertikal efektif tanah dalam kPa.

2.5 Likuifaksi di Kedalaman Tanah

Ishihara (1995) mengemukakan bahwa pada tanah datar, bilamana terdapat lapisan tanah yang tidak berpotensi likuifaksi dengan ketebalan tertentu dari permukaan tanah, maka likuifaksi pada lapisan setelah itu tidak akan menimbulkan kerusakan pada struktur yang terletak di permukaan tanah. Gbr. 13 menunjukkan ketebalan yang diperlukan agar likuifaksi lapisan bawah tidak merusak struktur di permukaan tanah.



Gbr. 13. Tebal Permukaan yang Tidak Terlikuifaksi vs Tebal Lapisan Terlikuifaksi. Ishihara (1995)

3 VIBRO KOMPAKSI

Vibro-kompaksi merupakan proses pemadatan tanah, di atas dan di bawah muka air tanah, dengan cara memasukkan batang penggetar ke dalam tanah (Gbr. 14).



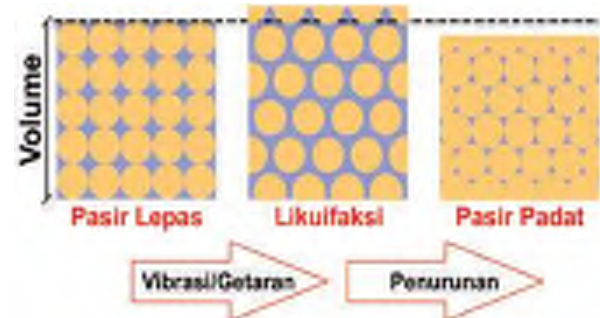
Gbr. 14. Ragam Batang Penggetar Vibro-Kompaksi.

Teknik vibro-kompaksi ini dikembangkan untuk memadatkan tanah pasir hingga mampu memikul beban di atasnya dengan perantara pondasi langsung. Tujuan ini dicapai dengan: meningkatkan kuat geser, mengurangi kompresibilitas, dan dalam area gempa mengurangi resiko likuifaksi. Untuk mencapai tujuan itu, harus terpenuhi kondisi sebagai berikut.

Dalam kondisi jenuh, getaran harus cukup cepat dan cukup kuat untuk menimbulkan

tegangan air pori berlebih hingga menyamai tegangan total tanah dan mengakibatkan terjadinya likuifaksi lokal pada tanah pasir di sekitar alat penggetar. Tegangan air pori berlebih tersebut kemudian harus dapat terdisipasi ke arah radial dan vertikal sepanjang batang getar sehingga pori-pori tanah dapat berkurang dan tanah menjadi lebih padat (Gbr. 15).

Dalam kondisi tanah tidak jenuh, getaran alat getar harus cukup kuat untuk mengatasi kuat geser awal tanah sehingga partikel-partikel tanah dapat bergulir satu sama lain menuju kondisi lebih padat. Bilamana digunakan *water jetting*, yaitu semprotan air bertekanan tinggi, maka air yang disemprotkan itu akan menyebabkan tanah pasir di sekitar *water jet* menjadi jenuh air, dan tanah pasir menjadi terlikuifaksi, selanjutnya proses pemadatan yang terjadi sama seperti kondisi pasir jenuh.



Gbr. 15. Proses Pemadatan Pasir Jenuh.

Dalam tanah kohesif, getaran tidak dapat menghilangkan faktor kohesi, dengan demikian partikel tanah tidak dapat terlepas satu sama lain. Karena itu untuk meningkatkan daya dukung tanah kohesif ini, lubang yang terbentuk di sekitar batang penggetar (atau melalui *casing* batang penggetar) dimasukkan material pengisi berupa kerikil, sehingga terbentuk kolom-kolom batu (*stone columns*) di antara tanah lempung lunak. Tanah lempung lunak dan kolom-kolom batu tersebut membentuk material komposit yang memiliki kompresibilitas lebih rendah dan daya dukung yang lebih tinggi dari tanah asli.

3.1 Jenis dan Pelaksanaan Vibro-Kompaksi

Vibro-kompaksi dapat dibedakan berdasarkan jenis vibrator yang digunakan dan berdasarkan penggunaannya air atau tidak dalam pelaksanaan.

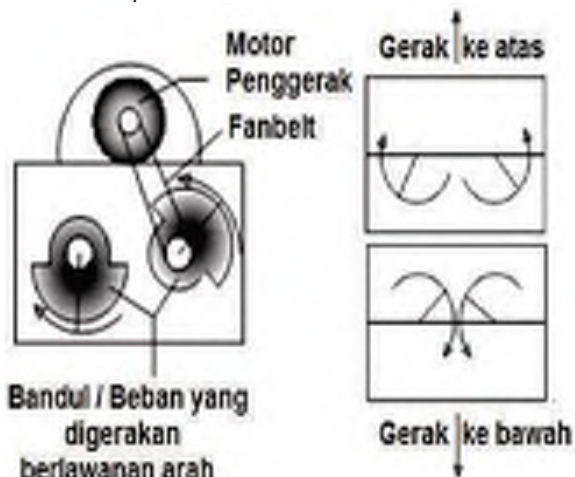
Top Mounted Vibrator: Getaran ditimbulkan oleh vibrator vertikal yang dipasang di atas batang penggetar sebagaimana diperlihatkan dalam Gbr. 16. Di sini digunakan vibrator yang

bergetar secara vertikal, sebagaimana yang biasa dijumpai pada pemasangan turap, namun dalam vibro-kompaksi umumnya digunakan vibrator berfrekuensi rendah.

Pada prinsipnya di dalam vibrator yang digunakan terpasang dua buah bandul eksentrik yang berputar secara berlawanan arah (Gbr. 17), dengan demikian gaya sentrifugal yang terjadi hanya saling menguatkan dalam arah vertikal dan vibrator hanya bergetar dalam arah vertikal.



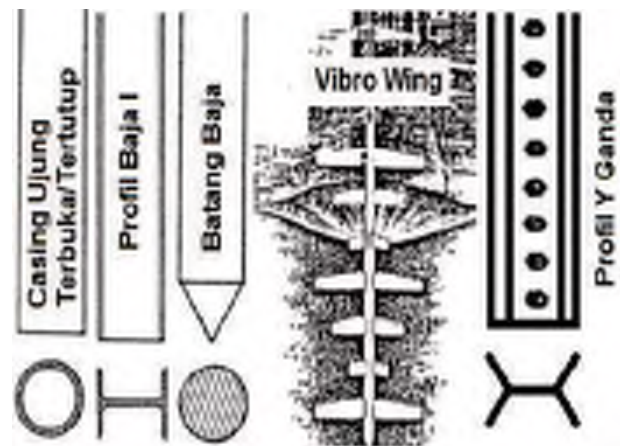
Gbr. 16. Top Mounted Vibrator.



Gbr. 17. Prinsip Getar Vertikal.

Getaran vertikal vibrator bersama berat sendiri vibrator dan batang penggetar mengakibatkan batang penggetar menembus dan masuk ke dalam tanah. Di sini tidak digunakan air untuk membantu pemasukkan batang penggetar ke dalam tanah, karena itu metoda ini disebut juga proses kering (*dry process*). Batang penggetar yang digunakan

pada umumnya berupa pipa (*casing*) dengan ujung tertutup atau ujung terbuka Anderson (1974), profil I, atau baja bulat Mitchell & Katti (1981), batang baja bersirip (*vibro-wing*, Broms & Hasson, 1984), atau baja berprofil huruf Y ganda yang berlubang-lubang sepanjang batang penggetarnya (Gbr. 18).



Gbr. 18. Jenis Batang Penggetar.

Batang penggetar yang dimasukkan ke dalam tanah dalam vibrator vertikal ini tidak mendorong tanah asli keluar dari dalam tanah, karena itu metoda ini juga dikenal dengan nama Vibro-Desak (*Vibro-Displacement*). Setelah batang penggetar mencapai kedalaman rencana, batang vibro digetarkan naik turun sejarak 30-50 cm beberapa kali untuk memadatkan tanah pasir disekitar ujung batang penggetar.

Kontrol pemadatan dilakukan melalui ukuran ampere vibrator yang digunakan, saat pasir belum padat ukuran ampere vibrator masih rendah, saat tanah sudah memadat maka ampere vibrator menjadi tinggi. Setelah ampere vibrator tinggi tercapai, maka batang penggetar ditarik ke atas 50-80 cm, kemudian digerakan naik turun kembali untuk memadatkan lapisan tanah selanjutnya. Demikian selanjutnya hingga proses pemadatan mencapai permukaan tanah. Proses di atas cocok untuk tanah non kohesif (pasir) yang dapat dipadatkan tanpa material pengisi (*backfill material*).

Untuk tanah kohesif, sebagaimana dijelaskan sebelumnya, perlu ditambahkan material pengisi berupa pasir atau kerikil ke dalam tanah, untuk membentuk material komposit berupa kolom – kolom pasir atau kolom – kolom batu.

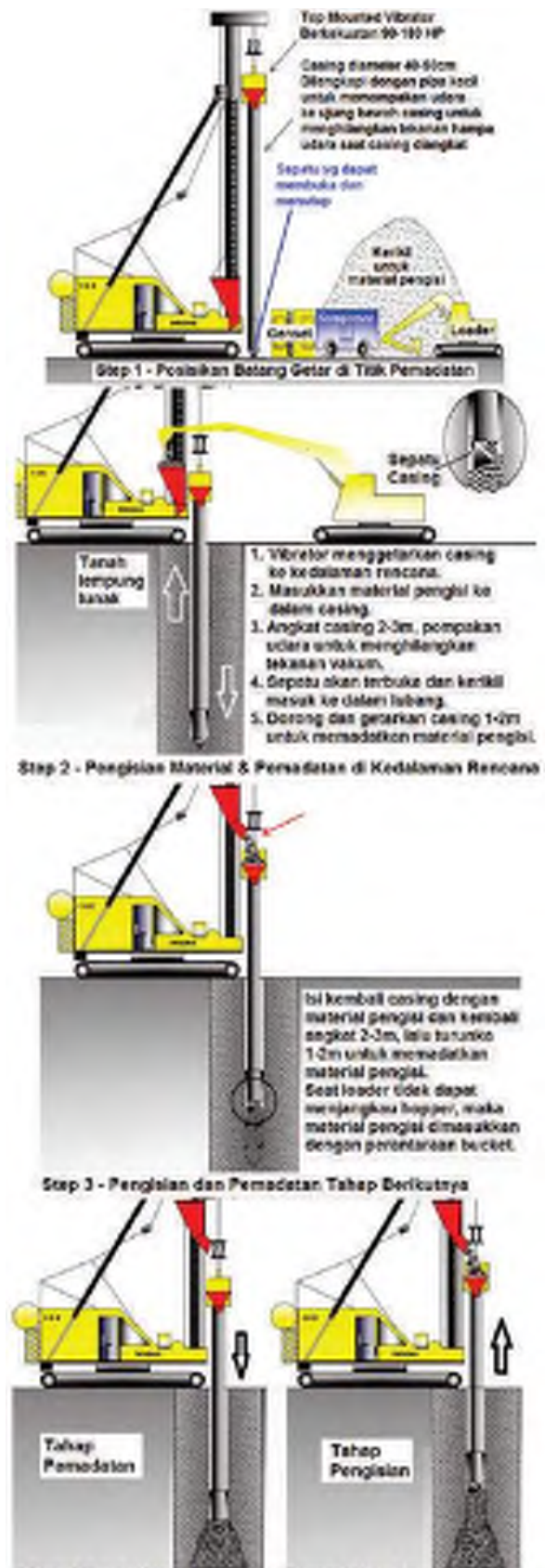
Susunan peralatan yang digunakan disajikan dalam Gbr. 19. Dalam hal ini perlu digunakan batang penggetar berupa pipa atau *casing* dengan ujung yang dapat terbuka dan tertutup dengan bantuan sepatu *casing* berbentuk konus.

Saat *casing* digetarkan masuk ke dalam tanah, ujung *casing* dalam posisi tertutup. Setelah mencapai kedalaman rencana, *casing* diisi sebagian dengan material pengisi (umumnya kerikil) dengan bantuan *loader*, kemudian *casing* ditarik sekitar 200-300 cm, saat ditarik ujung bawah *casing* akan terbuka dan material kerikil keluar mengisi lubang yang terbentuk.



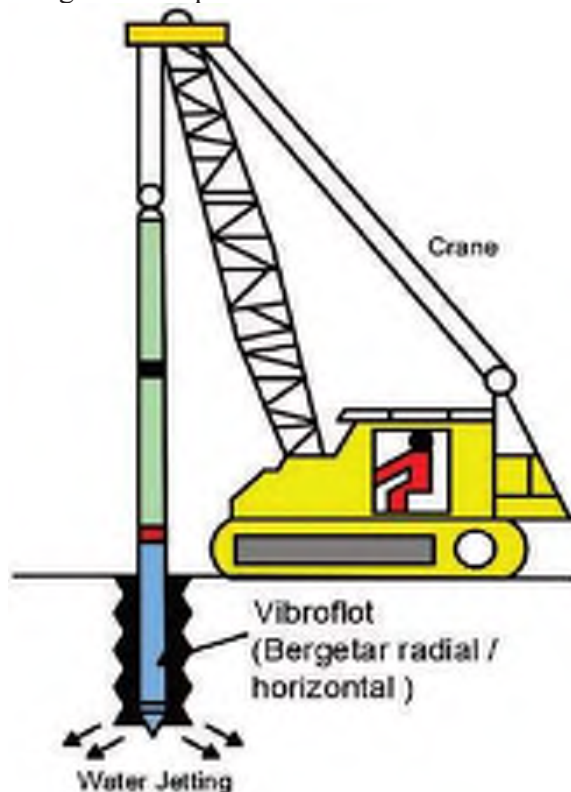
Gbr. 19. Peralatan Vibro-Kompaksi bila digunakan Material Pengisi.

Untuk mengatasi tekanan vakum udara dari lubang yang terbentuk saat *casing* ditarik, gunakan kompresor untuk memompakan udara melalui pipa kecil yang terpasang sepanjang *casing*. Kemudian *casing* didorong turun sejauh 1000-2000 cm, dan otomatis sepatu *casing* akan menutup lubang *casing*. Gerakan *casing* ke bawah dan getaran *casing* akan mendorong dan memadatkan material pengisi. Proses ini diulangi beberapa kali hingga ampere vibrator meninggi. Kemudian *casing* ditarik ke atas secukupnya untuk memadatkan lapisan tanah selanjutnya, demikian seterusnya. Saat *loader* tidak lagi dapat mencapai corong (*hopper*) di atas bibir *casing*, maka pengisian material dilakukan dengan perantaraan *bucket*. Gbr. 20 menunjukkan proses tahapan pemadatan vibro-kompaksi dengan material pengisi ini. Proses ini pertama kali dikembangkan di Jepang dan dikenal dengan nama *Compozer method* Murayama dan Ichimoto (1982).



Gbr. 20. Proses Vibro-Kompaksi dengan Material Pengisi (*Stone Columns*).

Vibroflot: Getaran ditimbulkan oleh vibrator horizontal yang dipasang di ujung penggetar sebagaimana diperlihatkan dalam Gbr. 21.



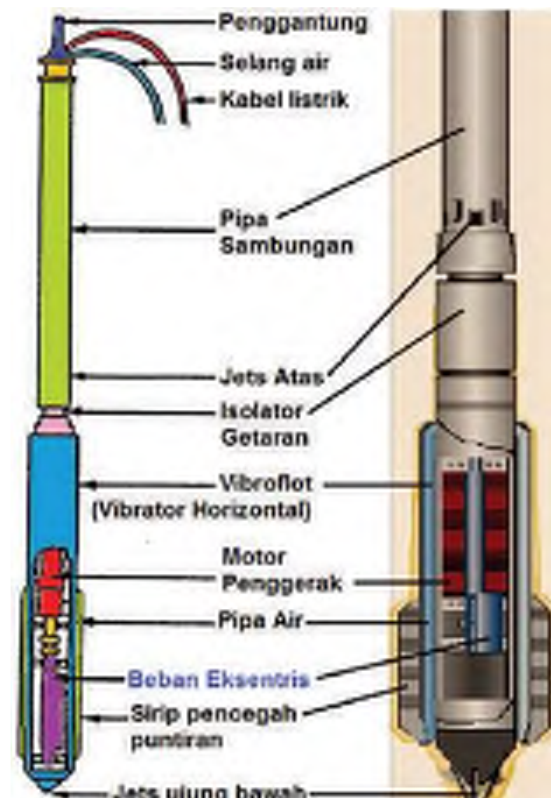
Gbr. 21. Vibroflot.

Penggetar horizontal ini terdiri dari tiga bagian utama, yaitu: bagian yang bergetar atau kepala getar yang berbentuk silinder baja berdiameter 300-500 mm dengan panjang 2.0-4.5 m dan massa sekitar 2 ton. Kepala getar ini dikenal dengan nama vibroflot; isolator yang mengisolasi pipa sambungan (*extension tube / follower*) terhadap getaran vibroflot; dan pipa penyambung untuk memperpanjang batang getar hingga dapat mencapai kedalaman yang dikehendaki.

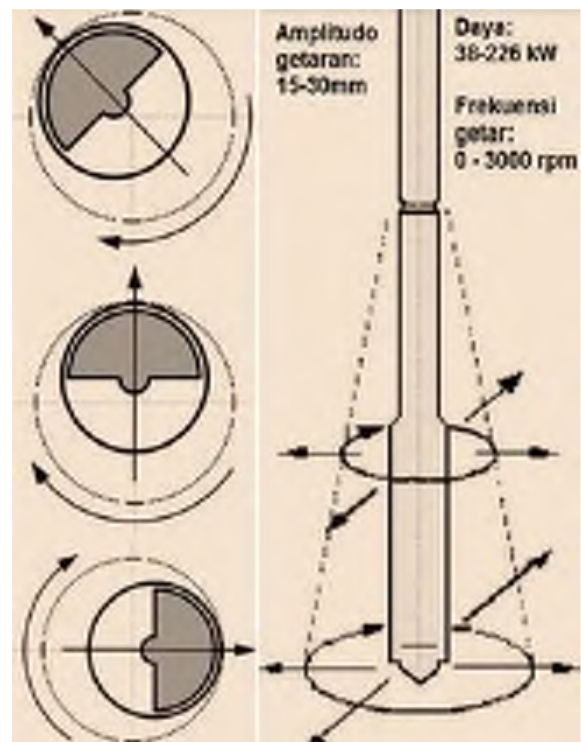
Bagian-bagian dan detail potongan vibroflot ini disajikan dalam Gbr. 22. Getaran horizontal atau radial dihasilkan oleh masa eksentris yang diputar secara horizontal terhadap sumbu longitudinal batang penggetar (Gbr. 23). Gaya sentrifugal yang dihasilkan dapat mencapai 300 kN atau lebih.

Bilamana dalam penggetar vertikal vibrator tidak ikut masuk ke dalam tanah, vibrator horizontal atau vibroflot yang dipasang di ujung bawah susunan batang penggetar dimasukkan ke dalam tanah, jadi tidak seperti vibrator vertikal yang kuat getar nya berkurang bersama kedalaman, kuat getar vibroflot konstan bersama kedalaman. Vibroflot ini dilengkapi dengan sistem *water jetting* di

bagian ujung bawah dan ujung atas untuk menyemprotkan air bertekanan tinggi.



Gbr. 22. Detail Vibroflot.



Gbr. 23. Getaran Vibroflot.

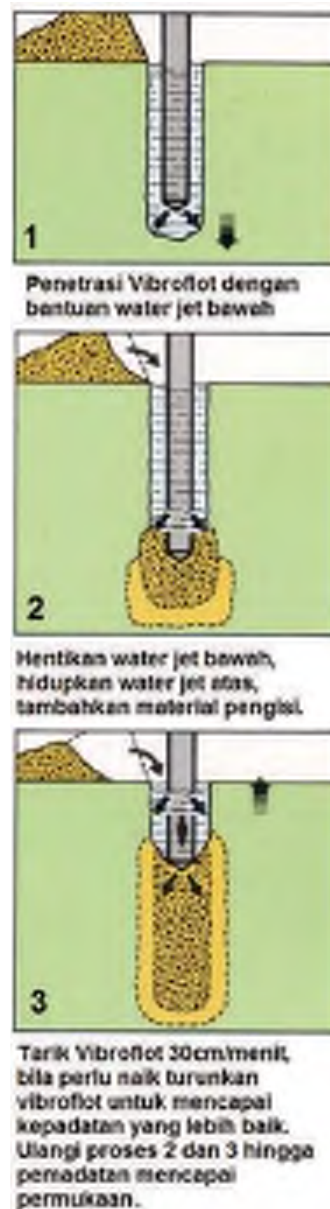
Untuk memasukkan vibroflot ke dalam tanah hingga kedalaman rencana, *water jets* ujung bawah dibuka dan air bertekanan tinggi

disemprotkan dengan kecepatan alir yang jauh lebih tinggi daripada permeabilitas tanah sehingga tanah disekitar ujung vibroflot mengalami likuifaksi dan susunan batang penggetar dapat masuk ke kedalaman tanah dengan mudah. Kecepatan air yang tinggi, umumnya sekitar 7.5 m³/menit, juga dimaksudkan agar air dapat mengalir ke atas tanah dari sekeliling batang getar dan terbentuk lubang anular di sekitar batang getar. Kecepatan tipikal penetrasi vibroflot ke dalam tanah berkisar 1-2 m per menit.

Setelah vibroflot mencapai kedalaman rencana, *water jet* ujung bawah dimatikan, *water jet* bagian atas dijalankan dengan kecepatan pemompaan air yang lebih rendah. *Water jet* bagian bawah dihentikan karena sudah tidak diperlukan untuk merusak tanah dan memasukkan vibroflot. *Water jet* bagian atas dijalankan untuk menjaga agar lubang yang terbentuk dari proses pemasukan batang getar dapat dipertahankan. Kemudian material pengisi yang berupa pasir bergradasi baik untuk dipadatkan (bila tanah asli berupa pasir) atau kerikil (bila tanah asli berupa lempung) dimasukkan melalui lubang anular di sekeliling batang penggetar. Berat sendiri material pengisi akan membawanya turun ke dasar lubang di sekitar vibroflot, getaran vibroflot akan memadatkan material pengisi dan tanah (pasir) di sekitarnya.

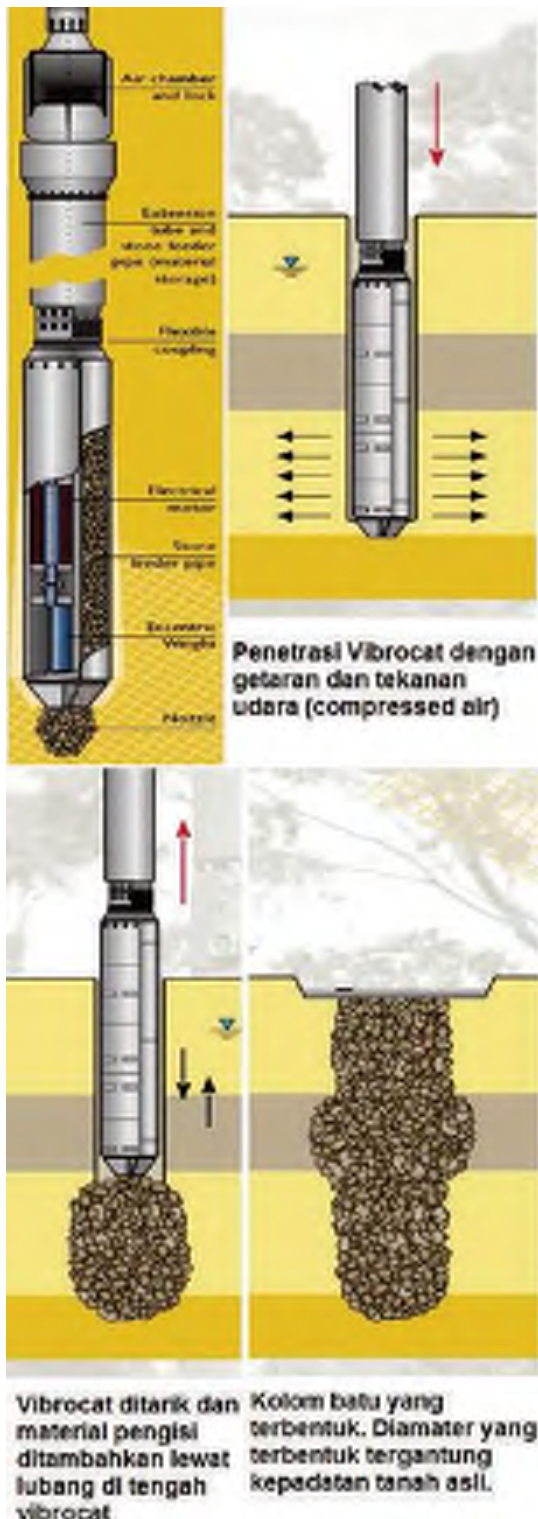
Kecepatan penarikan vibroflot saat pemadatan dilakukan umumnya berkisar 0.3 m/menit. Volume tipikal material pengisi adalah sekitar 1.5 m³ per meter penetrasi. Area yang terpengaruh oleh energi getaran sekitar 1.5 - 4.0 m. Skema proses pemadatan ini diperlihatkan dalam Gbr. 24.

Karena digunakan air dalam pelaksanaan vibro-kompaksi ini, maka proses ini dikategorikan sebagai proses basah (*wet process*) dan proses pemadatan dengan vibroflot ini dikenal dengan nama vibroflotation. Teknik ini diaplikasikan pada tanah pasir, baik dengan material pengisi ataupun tidak. Juga dapat diterapkan pada tanah lempung dengan tambahan material pengisi berupa kerikil untuk membentuk kolom-kolom batu (*stone columns*).



Gbr. 24. Proses *Vibroflotation*.

Teknik *vibroflotation* yang menggunakan *water jetting* ini mengeluarkan volume tanah asli dan menggantikannya dengan material pengisi, karena itu disebut juga dengan nama vibro-ganti (*vibro-replacement*). Kelemahan teknik *vibroflotation* ini adalah penggunaan air yang terlalu banyak, sehingga sulit diterapkan di lokasi dimana air sulit diperoleh, dan juga pada tanah lempung akan menyebabkan lokasi menjadi sangat berlumpur bila tidak dilakukan pengelolaan air dengan baik. Karena itu kemudian dikembangkan teknik pengisian material pengisi melalui lubang di tengah batang penggetar, sehingga tidak diperlukan air dalam jumlah besar untuk mempertahankan lubang disekitar vibroflot dan pipa penyambungannya (Gbr. 25). Teknik ini dikenal dengan nama Vibrocat, Keller (2013).

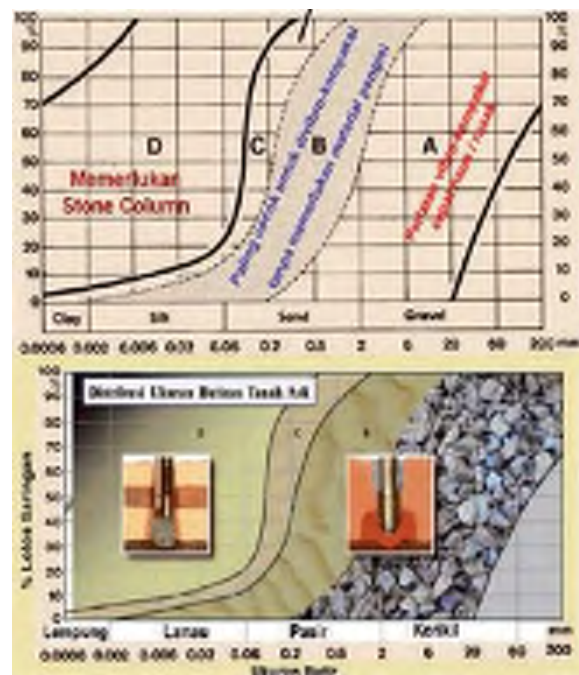


Gbr. 25. Vibrocat. Keller (2013)

3.2 Perancangan Vibro-Kompaksi

Brown (1977) memberikan suatu kriteria kecocokan aplikasi teknik vibro-kompaksi untuk diterapkan dalam memperbaiki tanah yang dihadapi. Kriteria Brown ini didasarkan dari hasil uji ukuran butiran tanah asli (*grain*

size distribution curve) seperti disajikan dalam Gbr. 26.



Gbr. 26. Kriteria Kecocokan Teknik Vibro-Kompaksi (Brown, 1977)

Tanah yang jatuh dalam daerah A, walaupun dapat ditingkatkan kepadatannya dengan teknik vibro-kompaksi, namun tidak disarankan karena butir-butir tanah yang mayoritas berupa kerikil dapat dengan cepat merusak batang penggetar. Tanah yang masuk daerah B merupakan tanah yang sangat cocok untuk divibro-kompaksi karena dapat dipadatkan tanpa material pengisi. Tanah yang masuk dalam daerah C memerlukan material pengisi berupa pasir bergaradasi baik. Tanah di daerah D yang masuk kategori tanah berbutir halus memerlukan material pengisi berupa kerikil untuk membentuk kolom-kolom batu (*stone columns*).

Brown (1977) juga memberikan kriteria material pengisi yang dapat dipakai melalui angka kecocokan material pengisi (*backfill suitability number*), S_n , yang diformulasikan sebagai berikut:

$$S_n = 1,7 \sqrt{\frac{3}{(D_{50})^2} + \frac{1}{(D_{20})^2} + \frac{1}{(D_{10})^2}} \quad (9)$$

Dengan D_{50} , D_{20} , dan D_{10} adalah diameter efektif (dalam mm) ukuran butir lolos saringan pada 50, 20 dan 10%. Kriteria angka kecocokan ini ditabulasikan pada Tabel 4.

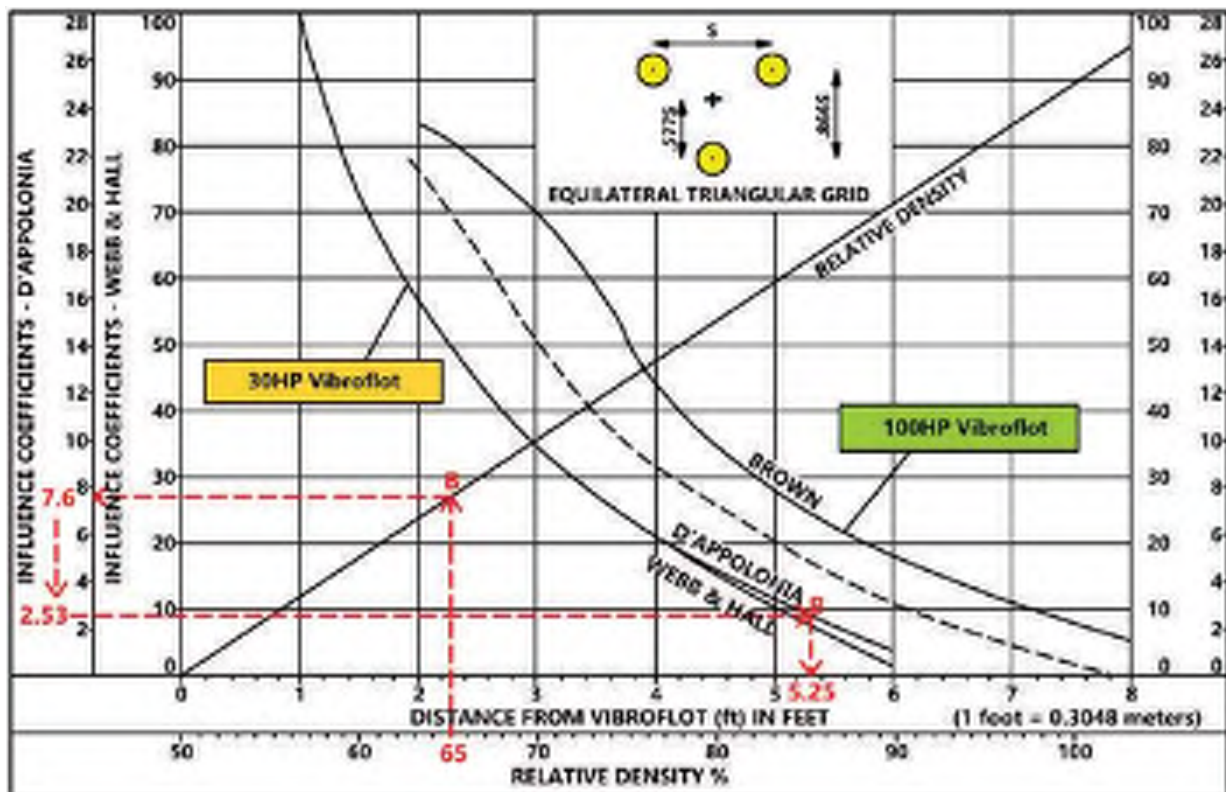
Tabel 4. Angka Kecocokan Material Pengisi. (Brown, 1977)

S_n	Rating
0 – 10	Sangat Bagus
10 – 20	Bagus
20 – 30	Sedang
30 – 50	Buruk
> 50	Tidak Cocok

Untuk perkiraan jarak as ke as titik – titik vibro-kompaksi, sebagai patokan awal dapat digunakan diagram desain D’Apolonia dan Brown, Glover J.C (1982) untuk vibro-kompaksi yang diperlihatkan dalam Gbr. 27. Contoh penggunaan diagram desain tersebut sbb:

- Misalkan pola pemasangan segitiga.
- Target kepadatan relatif (*relative density*) yang ingin dicapai, $D_r = 65\%$.
- Kekuatan vibroflot 30 HP.
- Dari sumbu X tentukan angka kepadatan relatif (*relative density*), $D_r = 65\%$.
- Dari angka 65% ini tarik garis vertikal ke atas hingga memotong garis diagonal ‘relative density’ di titik A.

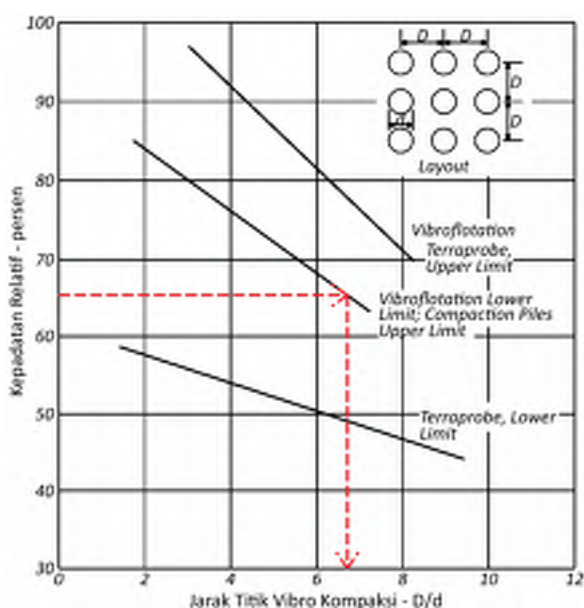
- Tarik garis horizontal dari titik A ke kiri menuju sumbu X yang tertulis *Influence Coefficients* (koefisien pengaruh) – D’Appolonia yang berlaku untuk vibroflot berkekuatan 30 HP.
- Baca koefisien pengaruh D’Appolonia yang didapat, dalam kasus ini koefisiennya adalah $I = 7.6$.
- Untuk pola pemasangan segitiga, ada tiga titik vibro-kompaksi yang berpengaruh terhadap titik berat dari pola segitiga, maka angka koefisien pengaruh dibagi tiga, $7.6 / 3 = 2.53$.
- Tarik garis vertikal turun dari angka 7.6 ke angka 2.53, kemudian tarik garis horizontal ke kanan hingga memotong kurva D’Appolonia di titik B. Tarik garis vertikal turun hingga memotong sumbu jarak (*distance from vibroflot, R*), didapat angka $R = 5.25$ ft.
- Maka jarak as ke as, S , pola segitiga titik – titik vibro-kompaksi adalah R dibagi dengan jarak ke titik berat segitiga sama sisi, yaitu: $S = R/0.577 = 5.25/0.577 = 9.1\text{ft} = 2.75\text{ m}$.



Gbr. 27. Diagram Desain Penentuan Jarak Titik – Titik Vibro-Kompaksi. Glover (1982)

- Bila dipergunakan pola segi empat, maka ada 4 titik vibro-kompaksi yang mempengaruhi titik tengah dari pola segi empat, jadi angka koefisien pengaruh dibagi 4, $I/4 = 7.6/4 = 1.9$; dari angka 1.9 ditarik garis horizontal ke kurva D'Appolonia, didapatkan $R = 5.6$; Jarak terjauh dari 4 titik vibroflot ke tengah – tengah pola segi empat adalah $0.7071S$ (letak titik berat pola segi empat sama sisi bersisi S), maka didapat $S = R/0.7071 = 7.92 \text{ ft} = 2.41 \text{ m}$.
- Bila digunakan vibroflot berkekuatan 100 HP, maka cara mencari jarak adalah sama, yaitu penggunaan *Influence Coefficient* D'Appolonia dan kurva Brown yang berlaku untuk vibroflot berkekuatan 100 HP. Dari contoh yang sama untuk pola segitiga, tarik garis vertikal dari angka $D_r = 65\%$ hingga memotong garis diagonal *relative density*, lalu tarik garis diagonal ke sumbu vertikal, didapatkan $I = 7.6$, lalu $I/3 = 2.53$, dari $I = 2.53$ tarik garis horizontal ke kurva Brown, didapatkan $R = 7.25$, dan $S = 7.25/0.577 = 12.6 \text{ ft} = 3.48 \text{ m}$.

Gbr. 28 juga dapat dipergunakan untuk memperkirakan jarak as ke as titik-titik Vibro-kompaksi Mitchell dan Katti (1981). Contoh: dengan teknik *vibroflotation*, untuk mencapai tingkat kepadatan relatif $D_r = 65\%$ didapatkan $D/d = 6.8$; bila diameter kolom yang dihasilkan adalah 50 cm, maka jarak as ke as titik *vibroflotation* dalam pola segi empat adalah $D=6.8 \times 0.5 = 3.4 \text{ m}$.



Gbr. 28. Kepadatan Relatif vs Jarak Titik Vibro-kompaksi. Mitchell & Katti (1981)

Untuk menentukan tingkat kepadatan relatif pasir dapat dipergunakan nilai $(N_1)_{60}$ uji SPT pada Tabel 5 atau menggunakan Pers. (10) Skempton (1986).

Tabel 5. Kepadatan Relatif vs SPT. (Skempton, 1986)

Kepadatan Relatif	D_r (%)	$(N_1)_{60}$	N^*
Sangat Lepas	< 15	< 3	< 4
Lepas	15 – 35	3 – 8	3 – 8
Sedang	35 – 65	8 – 25	8 – 25
Padat	65 – 85	25 – 42	25 – 42
Sangat Padat	85 – 100	> 42	> 42

* untuk energi efektif SPT = 45% dan tegangan vertikal efektif 73 kPa

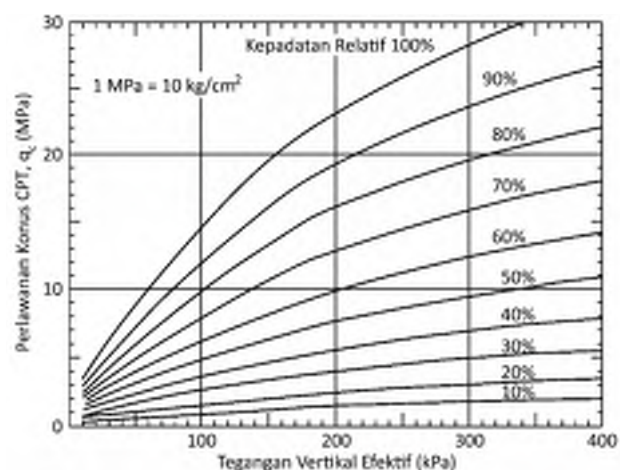
$$(N_1)_{60}/D_r^2 = 60 \quad (10)$$

Misalkan dikehendaki tingkat kepadatan sebesar 65%, maka dapat dihitung target nilai $(N_1)_{60}$ yang harus dicapai pada setiap kedalaman yang akan diperbaiki, yaitu:

$$(N_1)_{60} \geq 60 \times D_r^2 = 60 \times 0,65^2 \geq 25$$

Dari nilai target $(N_1)_{60}$ ini dan nilai tegangan vertikal efektif tanah di setiap kedalaman, melalui Pers. (6) dapat diturunkan nilai SPT lapangan, N_{Lap} pada setiap kedalaman.

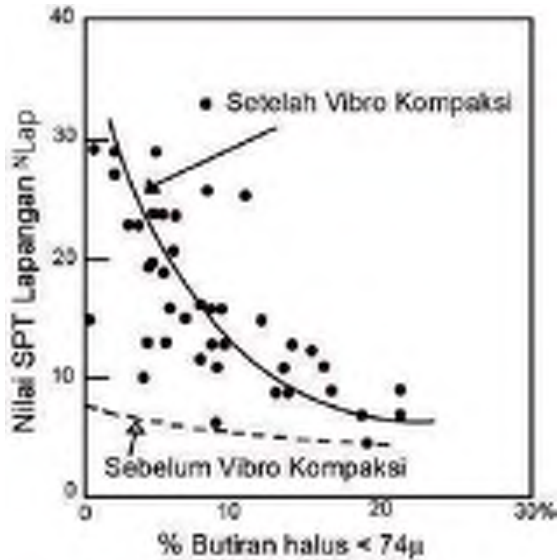
Target tingkat kepadatan dapat juga diturunkan melalui korelasi CPT (sondir) seperti disajikan pada Gbr. 29 Schmertmann (1975). Dari sini dapat pula diturunkan target nilai konus CPT, q_c , pada setiap kedalaman tanah.



Gbr. 29. Kepadatan Relatif vs CPT. Schmertmann (1975, 1978)

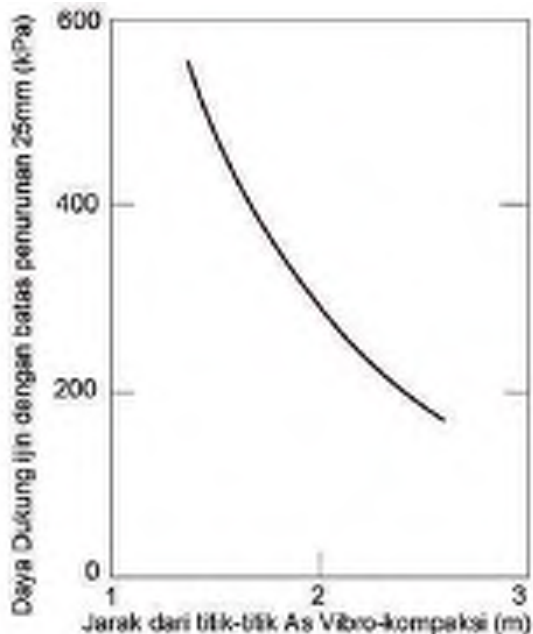
Tingkat perbaikan tanah pasir yang dapat dicapai dengan menggunakan teknik vibro-kompaksi ini sangat tergantung kepada

keberadaan butiran tanah halus seperti terlihat pada Gbr. 30 Saito (1977), sumber: Mitchell & Katti (1981). Diperkiraan nilai N_{Lap} yang dipakai Saito dalam menurunkan grafiknya adalah didasarkan atas SPT sistem Jepang yang ber-energi efektif sebesar 65%.



Gbr. 30. Tingkat Perbaikan Vibro-Kompaksi. Saito (1977); sumber: Mitchell & Katti (1981)

Daya dukung ijin dengan penurunan batas sebesar 25 mm, hasil perbaikan tanah pasir dengan teknik vibro-kompaksi dapat diperkirakan berdasarkan Gbr. 31 Thornburn (1975).



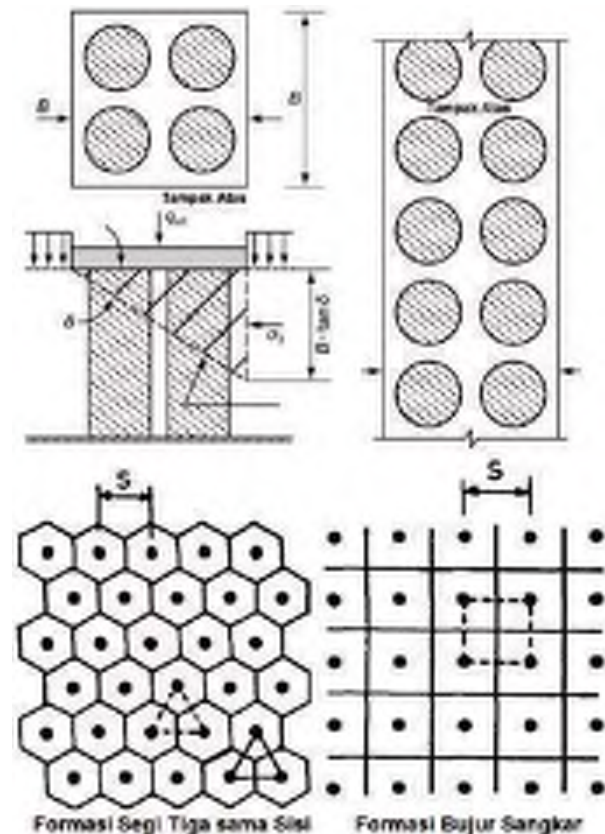
Gbr. 31. Daya Dukung Ijin Hasil Vibro-Kompaksi. Thornburn (1975)

3.3 Perancangan Stone Column

Untuk tanah berbutir halus yang tidak dapat dipadatkan dengan vibrasi perlu ditambahkan material pengisi berupa kerikil, dengan demikian terbentuk material komposit dari kolom-kolom batu dengan tanah asli. Kolom-kolom batu yang terbentuk berfungsi:

- Meningkatkan daya dukung tanah.
- Permeabilitas kolom batu yang lebih besar dari tanah di sekitarnya dapat mempercepat disipasi tegangan air pori berlebih, sehingga kolom batu juga berfungsi sebagai vertikal drain.
- Meningkatkan stabilitas lereng, karena kolom batu yang terbentuk dapat menahan gaya geser lebih tinggi daripada tanah asli.

Formasi kolom-kolom batu ini dapat diatur sesuai keperluan. Untuk memikul pondasi langsung (pondasi dangkal) kolom batu dapat diatur dalam formasi bujur sangkar, segi lima, lingkaran atau dalam barisan. Untuk area perbaikan yang luas, formasi kolom batu dapat diatur dalam pola segitiga sama sisi atau pola bujur sangkar dengan jarak as ke as berkisar antara 1.5 hingga 3.0 m (Gbr. 32).



Gbr. 32. Formasi Kolom Batu (Stone Column).

Daya dukung satu kolom batu ditentukan oleh kuat geser material kerikil yang dipadatkan dan perlawanan tekanan tanah pasif di sekitarnya:

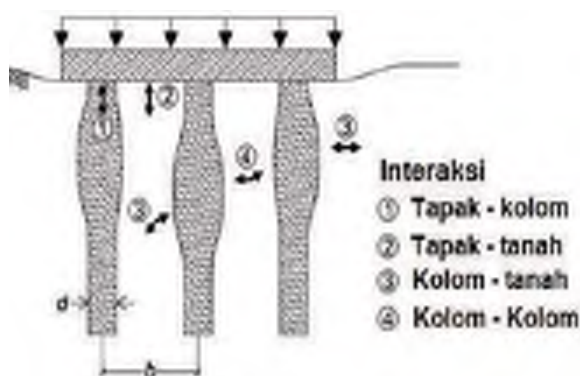
$$\sigma_v = \sigma_{hs} \cdot \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi_c'}{2} \right) \quad (11)$$

$$\sigma_{hs} = k_p \cdot \sigma'_v + k_p \cdot q \quad (12)$$

dimana:

- σ_v = tegangan vertikal kolom batu
- σ_{hs} = perlawanan pasif tanah disekitar (termasuk efek dari beban).
- ϕ_c' = sudut geser dalam kolom batu = $35^\circ - 40^\circ$
- k_p = koefisien tekanan tanah pasif = $(1 + \sin f_s') / (1 - \sin f_s')$
- ϕ_s' = sudut geser dalam tanah asli
- ϕ_v' = tegangan vertikal efektif tanah yang belum diperbaiki
- q = beban merata di permukaan.

Gbr. 33 menunjukkan interaksi antara kolom batu dengan tanah.



Gbr. 33. Mekanisme Kerja Kolom Batu. Kirch & Kirsch (2010)

Berdasarkan asumsi bahwa keruntuhan pengembangan (*bulging failure*) kolom batu dan keruntuhan tanah lempung di sekelilingnya berlangsung pada saat yang sama, maka daya dukung satu kolom juga dapat dihitung dari kuat geser *undrained* tanah lempung dimana kolom batu dibuat:

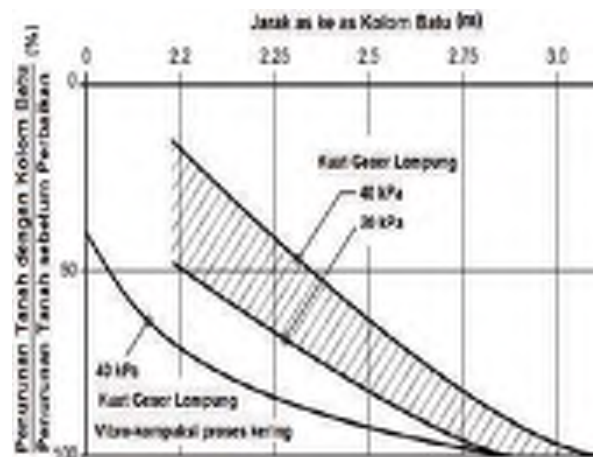
$$\sigma_v = 25 c_u \quad (13)$$

Dengan mengambil faktor keamanan, FK, sebesar 3, daya dukung ijin satu buah kolom batu dihitung sebagai berikut:

$$q_{c-ijin} = \frac{\sigma_v}{FK} = \frac{\sigma_v}{3} \quad (14)$$

Parameter tipikal dalam perhitungan daya dukung sebuah kolom batu adalah:

- Daya dukung tipikal kolom batu berkisar 200 – 300 kN/kolom.
- Dengan beban sebesar daya dukung ijin, penurunan satu buah kolom batu umumnya berkisar antara 5 – 10 mm.
- Penurunan group kolom batu bisa lebih dari 100 mm. Penurunan kolom batu ini dapat diperkirakan dari Gbr. 34 Greenwood (1970); sumber: Kirch and Kirsch (2010)
- Modulus Young kolom batu bervariasi antara 40 – 70 MPa.



Gbr. 34. Penurunan Formasi Kolom Batu. Kirch & Kirsch (2010)

Metoda perhitungan daya dukung kolom batu pada Pers. (11) hingga (14) didasarkan atas asumsi bahwa semua beban dipikul oleh kolom batu. Metoda lain adalah dengan mengasumsikan beban yang bekerja dipikul bersama-sama oleh kolom batu dan tanah di sekelilingnya. Daya dukung dalam metoda kedua ini dihitung sebagai berikut:

$$(A_s + A_c) \sigma = A_s \sigma_s + A_c \sigma_c \quad (15)$$

dimana:

- A_c = luas penampang satu kolom batu
- A_s = luas area tanah yang diperbaiki oleh satu kolom (tidak termasuk A_c)
- σ = tegangan rata – rata yang dipikul oleh kolom batu dan tanah
- σ_c = tegangan vertikal di kolom batu
- σ_s = tegangan vertikal di tanah

Definisikan rasio penggantian (*replacement ratio*), a_c :

$$a_c = \frac{A_c}{A_c + A_s} \quad (16)$$

dan rasio konsentrasi tegangan (*stress concentration ratio*), n :

$$n = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} \quad (17)$$

Pada umumnya rasio konsentrasi tegangan n bervariasi antara 2 – 6, dan biasanya diambil sekitar 3 – 4.

Substitusikan Pers. (16) dan (17) ke Pers. (15), maka akan didapatkan:

$$\sigma_s = \frac{\sigma}{1 + (n-1)a_c} = \mu_s \sigma \quad (18)$$

dan:

$$\mu_s = \frac{1}{1 + (n-1)a_c} \quad (19)$$

Dengan mengasumsikan kolom – kolom batu dan tanah turun bersamaan, maka penurunan tanah, S_c' yang telah diperbaiki adalah:

$$S_c' = \mu_s \times m_v \times \sigma \times H \quad (20)$$

m_v adalah koefisien kompresibilitas tanah asli sebelum diperbaiki dengan *stone column*.

Contoh perhitungan:

- Kuat geser tanah lempung asli $c_u = 30$ kPa
- Diameter casing kolom batu = 40 cm
- Diameter jadi kolom batu = 60 cm
- Beban yang akan dipikul, $\sigma = 40$ kPa
- Pola segitiga berjarak $S = 2.20$ m
- Daerah pengaruh 1 kolom untuk pola segitiga = 1.05×2.20 m = 2.31 m²
- Kedalaman perbaikan 10 m
- Hitung daya dukung ultimate, $\sigma_{v_ult} = 25 c_u = 25 \times 30 = 750$ kPa
- Daya dukung ijin, $q_{c-all} = \sigma_{v_ult} / 3 = 250$ kPa
- Asumsikan konsentrasi tegangan $n = 5$
- $A_c = 0.25 \times 3.14 \times 0.6^2 = 0.283$ m²
- Area perbaikan per kolom, $A_{1kolom} = 0.25 \times 3.14 \times (2.31)^2 = 4.19$ m²
- $A_s = 4.19 - 0.283 = 3.908$ m²
- $a_c = A_c / A_{1kolom} = 0.283 / 4.19 = 0.067$
- $\mu_s = 1 / \{1 + (5 - 1) \times 0.067\} = 0.788$
- Bila $m_v = 0.00025$ kPa⁻¹, dan kedalaman perbaikan adalah 10 m. Penurunan menjadi:

$$\begin{aligned} S_c' &= \mu_s \times m_v \times \sigma \times H \\ S_c' &= 0.788 \times 0.00025 \times 40 \times 10 \\ S_c' &= 0.0788 \text{ m} = 78 \text{ mm} \end{aligned}$$

3.4 Stone Column untuk Kestabilan Lereng

Dalam menghitung kestabilan lereng yang diperbaiki dengan kolom-kolom batu, kuat geser tanah dirata-ratakan sebagai berikut:

$$\tan f_{ave} = m \tan f_c + (1 - m) \tan f_s \quad (21)$$

$$c_{ave} = (1 - m)c \quad (22)$$

$$m = a_c \frac{\sigma_c}{\sigma} \quad (23)$$

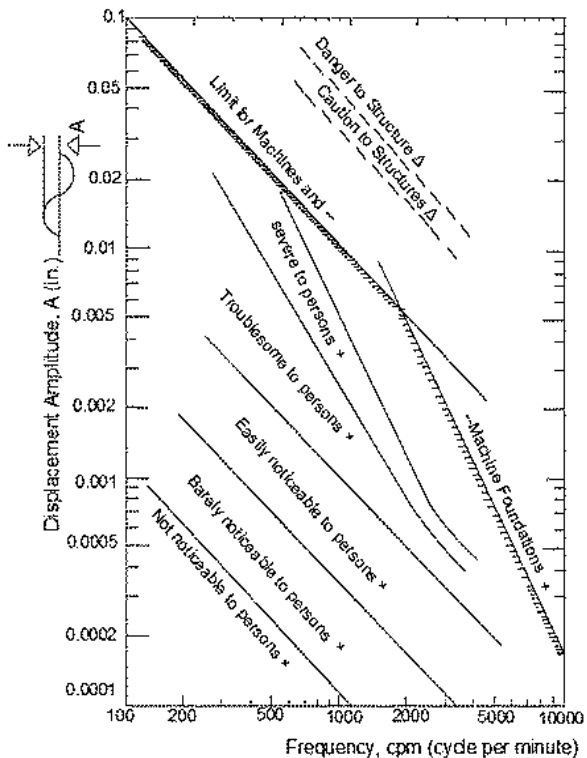
4 MONITOR GETARAN

Pelaksanaan perbaikan tanah dengan metoda penggetaran, dapat menimbulkan gangguan pada kenyamanan penduduk sekitar dan bahkan bila dilaksanakan dengan kurang bijaksana dapat menimbulkan kerusakan pada bangunan rumah-rumah di sekitarnya. Karena itu sangat disarankan agar pada waktu melakukan uji coba penentuan jarak titik-titik kompaksi dilakukan monitor getaran dengan menggunakan peralatan *vibration monitoring* yang kini sudah banyak tersedia (Gbr. 35).

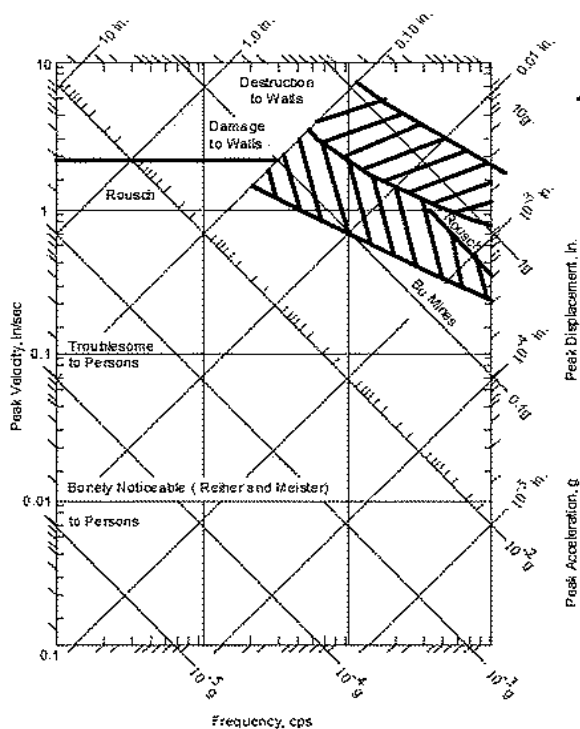


Gbr. 35. Alat Monitoring Gerakan.

Peralatan *monitoring* getaran ini mengukur besaran percepatan, kecepatan partikel dan pergeseran (*displacement*) getaran. Dengan menggunakan kriteria pada Gbr. 36 dan Gbr. 37 dapat diketahui seberapa besar pengaruh getaran tersebut Richart et al. (1970).



Gbr. 36. Batas Amplitudo Pergeseran akibat Getaran. Richart et al. (1970)



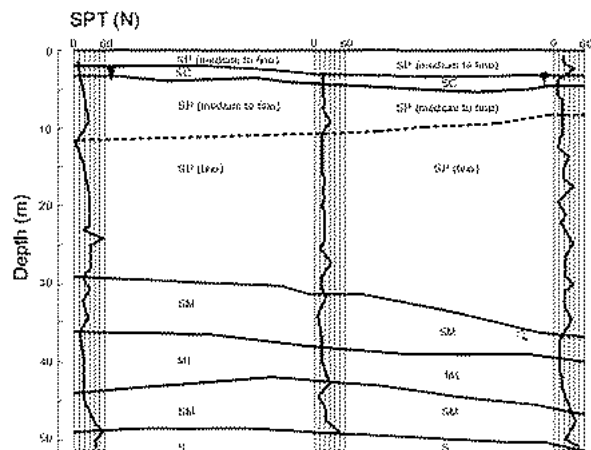
Gbr. 37. Batas Response Spectra akibat Getaran. Richart et al. (1970)

5 STUDI KASUS VIBROFLOTATION

5.1 Area Reklamasi Pantai, Arun, Aceh

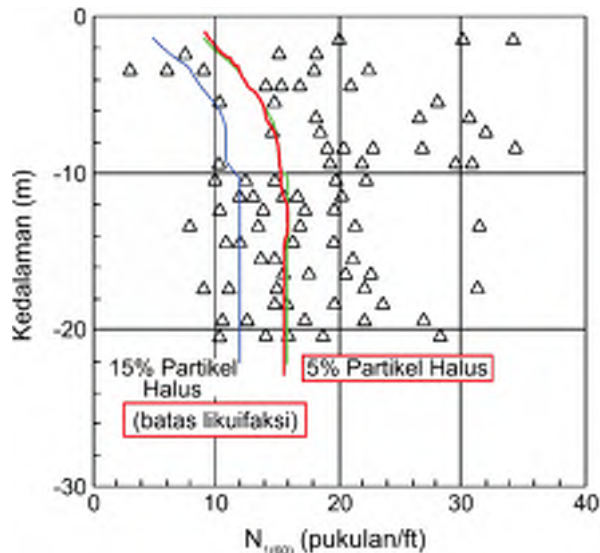
5.1.1 Latar Belakang Proyek

Di atas area reklamasi pantai di Arun, Lhokseumawe, Aceh, di era 90an didirikan beberapa buah tanki LNG berdiameter 70 m dan dengan ketinggian 26 m. Tanki-tanki tersebut didirikan di area yang berdampingan satu sama lain. Penyelidikan tanah menunjukkan bahwa kondisi tanah di posisi ketiga tanki tersebut relatif sama. Lapisan tanah terutama terdiri dari pasir lepas dengan kadar butir halus bervariasi bersama kedalaman, mulai dari 5% hingga 15%. Di kedalaman 3 – 6 m, dijumpai lensa tipis berupa tanah lempung pasir setebal lebih kurang 1m. Nilai SPT bervariasi dari 5 hingga 30 pukulan/30 cm. Profil tanah ditunjukkan pada Gbr. 38.



Gbr. 38. Profil Tanah Proyek LNG. Gouw et al. (2013)

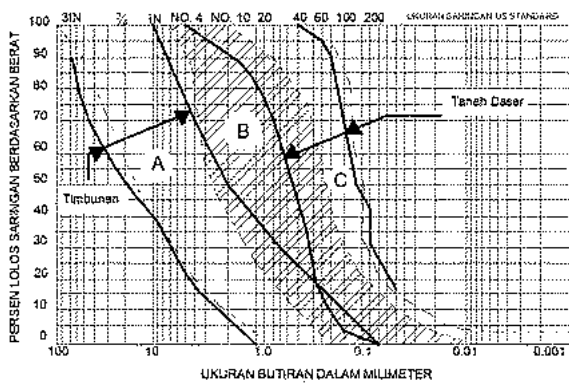
Perencana mensyaratkan perbaikan tanah untuk mengatasi potensi likuifaksi dengan besaran percepatan maksimum dipermukaan tanah sebesar 0.18g dengan besaran gempa $M=7.5$. Gbr. 39 menunjukkan hasil analisa potensi likuifaksi dimana jelas terlihat bahwa tanah berpotensi mengalami likuifaksi. Disamping itu juga dikhawatirkan terjadi perbedaan penurunan akibat kekerasan tanah yang cukup bervariasi. Tanah dasar salah satu tanki diperbaiki sedalam 16 m dengan teknik *vibrofloatation*.



Gbr. 39. Potensi Likuifaksi.

5.1.2 Vibroflotation (Vibro-Replacement)

Teknik *vibroflotation* dilakukan untuk memperbaiki tanah pasir di proyek ini hingga kedalaman 16 m. Hasil analisa ukuran butiran (Gbr. 40) menunjukkan bahwa gradasi butiran tanah jatuh dalam zona C kurva kecocokan vibro-kompaksi (Gbr. 26), artinya diperlukan material pengisi, gradasi material pengisi terlihat dalam Gbr. 40.



Gbr. 40. Gradasi Butiran Tanah Asli dan Material Pengisi.

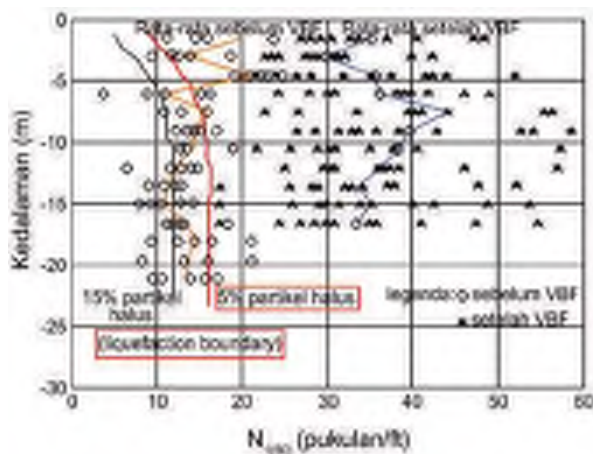
Teknik *vibroflotation* ini dilaksanakan dengan menggunakan vibroflot berkekuatan 30 HP, berdiameter 381 mm, panjang 1.85 m dan berat 18 kN, beroperasi pada putaran 1800 rpm dan menimbulkan gaya sentrifugal sebesar 100 kN. Memiliki dua tipe *water jet* yaitu di bagian ujung bawah dan bagian atas vibroflot. Pada waktu penetrasi, vibroflot dilakukan menuju kedalaman rencana, *water jet* bagian atas dimatikan dan *water jet* bagian ujung bawah dijalankan untuk memompakan air bertekanan-



Gbr. 41. Proses Rangkaian Pelaksanaan *Vibroflotation* di Lapangan.

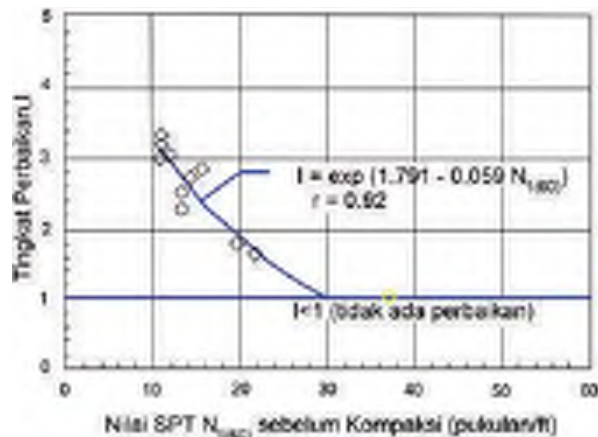
tinggi. Pada saat kedalaman rencana tercapai, *water jet* bagian bawah dimatikan, dan *water jet* bagian atas dijalankan untuk menjaga agar lubang yang terbentuk tidak mengalami keruntuhan dan material pengisi dapat ditambahkan. Pompa air yang dipergunakan adalah 3000 l/min, dan air yang dipergunakan adalah air laut. Proses pemadatan dilakukan dengan menaikkan vibroflot secara perlahan-lahan dan kecepatan penaikan tidak melebihi 30cm/menit, sambil tetap terus menambahkan material pengisi. Kosumsi material pengisi rata-rata adalah 0.8 m³ per meter kedalaman. Titik-titik kompaksi berupa pola segitiga sama sisi dengan jarak as ke as sebesar 2.4 m. Gbr. 41 menunjukkan rangkaian pelaksanaan *vibroflotation* di lapangan.

Gbr. 42 menunjukkan perbandingan uji SPT sebelum dan sesudah *vibroflotation*. Terlihat bahwa setelah proses *vibroflotation* semua titik uji SPT berada di luar garis batas likuifaksi, artinya tidak lagi berpotensi likuifaksi. Saat dan setelah gempa Aceh 26 Desember 2004 yang berkekuatan 9.1 - 9.3 Mw yang menggoncang seluruh wilayah Aceh dan menimbulkan tsunami, tidak terdapat laporan yang mengatakan adanya kerusakan struktural ataupun fungsional pada tanki tersebut.



Gbr. 42. Uji SPT sebelum dan sesudah *Vibroflotation* (notasi bentuk wajik kosong adalah data SPT sebelum VBF, bintang SPT setelah VBF).

Pengamatan terhadap distribusi nilai SPT setelah proses perbaikan menunjukkan bahwa efektifitas *vibroflotation* dapat dikatakan tidak berkurang bersama kedalaman dan relatif seragam. Gbr. 43 menunjukkan tingkat perbaikan (*degree of improvement*) yang dihasilkan. Teknik *vibroflotation* ini hanya berhasil memperbaiki tanah bila nilai SPT sebelum perbaikan tanah kurang dari 30, ($N_{100} < 30$).



Gbr. 43. Tingkat Perbaikan *Vibroflotation*. Gouw dkk (2013)

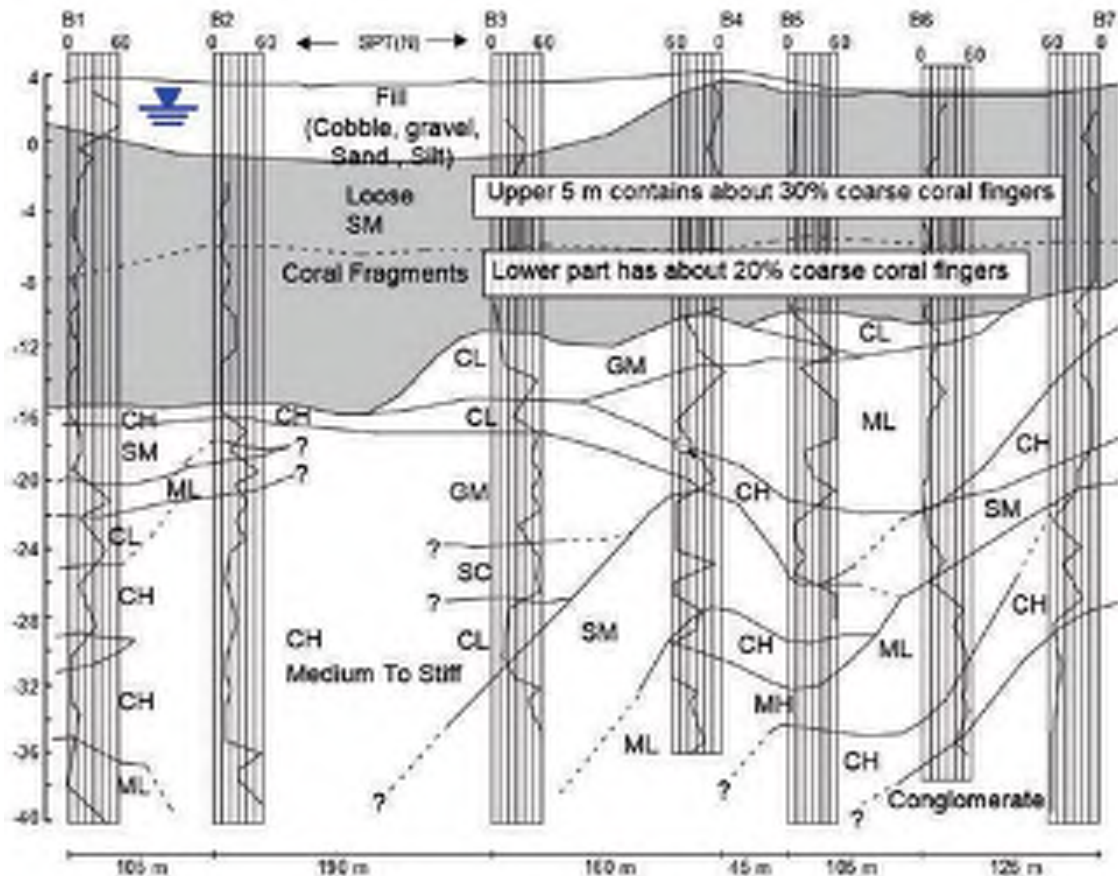
5.2 Pelabuhan Batu bara, Tarahan, Lampung

5.2.1 Latar Belakang Proyek

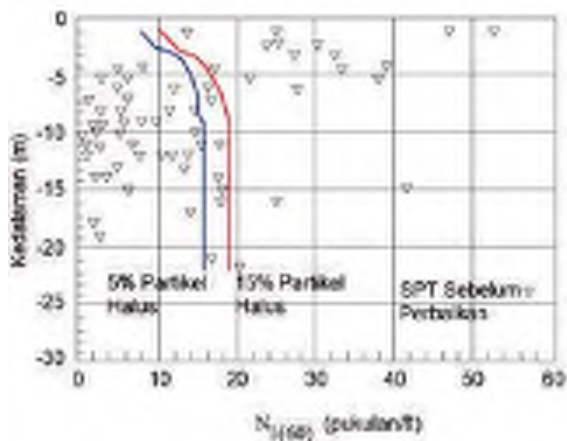
Di daerah Tarahan, Lampung, dibangun pelabuhan batu bara. Penyelidikan tanah menunjukkan bahwa kondisi tanah dasar terutama terdiri dari:

- 0.5 – 4 m tebal material timbunan yang terdiri dari kerakal, kerikil, pasir dan lanau, disusul oleh,
- 12 – 16 m tebal tanah berkerang (*corraline soil*). Tanah berkerang ini terutama terdiri dari pasir lepas kelanauan dengan kadar kulit kerrang yang cukup banyak. Lapis 5 m teratas mengandung sekitar 30% kulit kerang yang butirannya tertahan saringan no. 4 (ukuran bukaan saringan 4.76 mm). Di bawah 5 m, kadar kulit kerrang berkisar 20%.
- Tanah berkerang ini didasari oleh tanah lempung kaku, diikuti dengan batuan konglomerat di area utara dan lempung keras di area selatan.
- Air tanah dijumpai pada kedalaman yang bervariasi antara 1.5 m di sebelah utara lokasi hingga 2.5 m di sebelah selatan.
- Profil tanah ditunjukkan pada Gbr. 44.

Perencana mensyaratkan perbaikan tanah untuk mengatasi potensi likuifaksi dengan besaran percepatan maksimum dipermukaan tanah sebesar 0.25g dengan besaran gempa $M=7.5$. Gbr. 45 menunjukkan hasil analisa potensi likuifaksi dimana jelas terlihat bahwa tanah di lokasi ini sangat berpotensi mengalami likuifaksi.



Gbr. 44. Profil Tanah Proyek Tarahan, Lampung. Gouw (2018)



Gbr. 45. Potensi Likuifaksi – Tarahan.

5.2.2 *Vibro-Kompaksi (Vibro-Displacement)*
 Pada daerah dimana terdapat beban berat yang tidak dapat didukung secara langsung oleh tanah permukaan diputuskan untuk melakukan pemadatan dengan vibro-kompaksi. Berdasarkan pertimbangan ketersediaan vibrator di daerah Lampung saat itu, dipilih untuk melakukan teknik *vibro-displacement* dengan menggunakan *top mounted vibrator* (Gbr. 46) yang dirangkaikan dengan pipa casing berdiameter 40 cm, casing dilengkapi dengan pipa diameter 1 inch untuk

memompakan udara melalui kompresor guna mengatasi tekanan hampa udara saat casing ditarik ke atas dari posisi di dalam tanah.

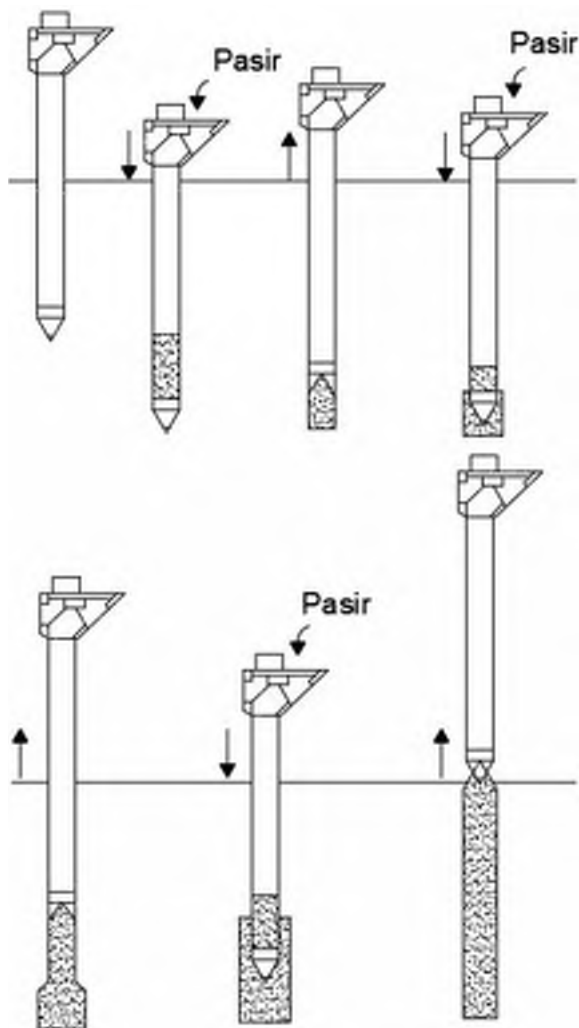


Gbr. 46. Alat Vibro-Kompaksi – Tarahan.

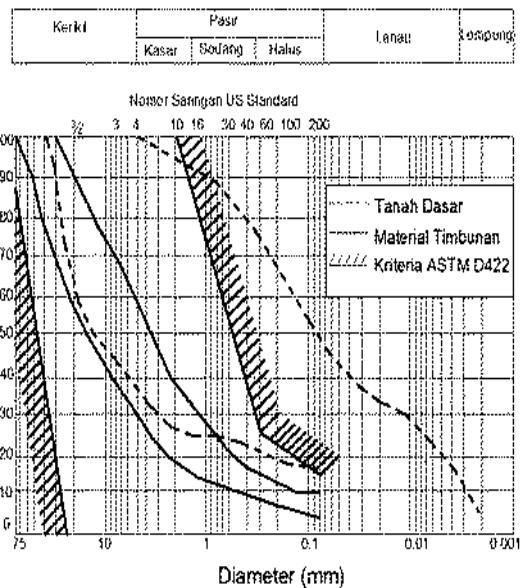
Ujung casing dilengkapi dengan dengan sepatu yang dapat membuka saat casing ditarik ke atas dan menutup saat casing didorong ke

dalam tanah. Target perbaikan adalah memadatkan tanah dan membuat *sand compaction piles* hingga kedalaman 18 m.

Dalam sistem *vibro-displacement* ini, bila *casing* dan *hopper* diisi secara sekaligus hingga penuh maka material pengisi pasir akan mengalami *bottle neck* di ujung *casing*, dan memadat disana sehingga material tidak dapat keluar mengisi mulut *casing* di bagian bawah. Di samping itu, sistem menjadi terlalu berat dan mudah mengalami kerusakan. Untuk menghindari hal di atas, material pengisi dimasukkan secara bertahap seperti diperlihatkan dalam Gbr. 47. Gradasi material pengisi yang digunakan diperlihatkan dalam Gbr. 48.

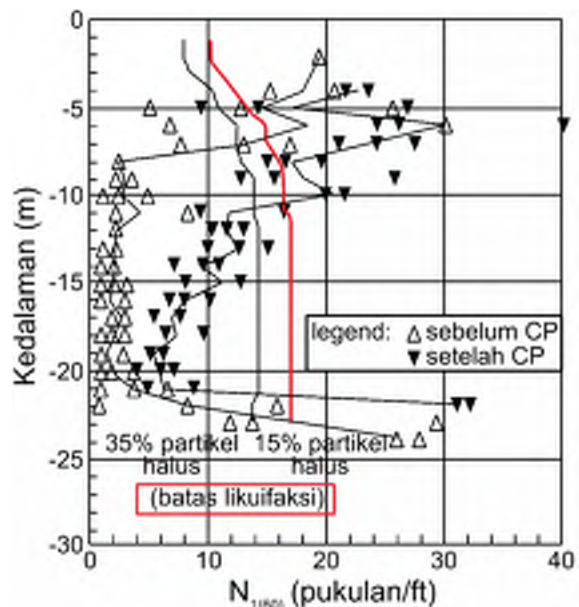


Gbr. 47. Pengisian Material Pengisi melalui *Casing* secara bertahap.



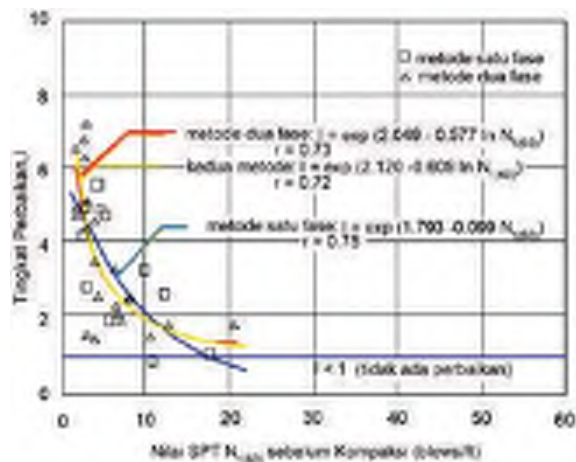
Gbr. 48. Gradasi Tanah Asli dan Material Pengisi – Tarahan.

Pemadatan dilakukan dengan pola segitiga sama sisi dengan jarak as ke as sebesar 1.8 m. Hasil pemadatan teknik *vibro-displacement* yang menghasilkan *sand compaction piles* ini berhasil meningkatkan nilai SPT tanah hingga kedalaman 20 m. Namun hanya berhasil membawa nilai SPT di atas garis batas likuifaksi hingga kedalaman 11 m saja (Gbr. 49).



Gbr. 49. Hasil *Vibro-Displacement* (*Sand Compaction Piles*) – Tarahan.

Dalam pelaksanaan dicoba untuk melakukan vibro-kompaksi dalam satu fase dan dua fase. Pematatan satu fase berarti semua jarak dilakukan berjarak 1.8 m. Pematatan dua fase dimulai dengan memadatkan titik-titik berjarak 3.6 m, kemudian dilakukan pematatan kembali diantara titik-titik sebelumnya sehingga jarak titik ke titik menjadi 1.8 m. Hasilnya praktis tidak menghasilkan tingkat kepadatan yang berbeda seperti terlihat dalam Gbr. 50. Pematatan hanya dapat dilakukan bila nilai SPT awal, $(N_1)_{60}$ kurang dari 20.



Gbr. 50. Tingkat Perbaikan *Vibro-Displacement* – Tarahan.

6 KESIMPULAN

Metoda vibro-kompaksi dan *vibroflotation* dapat meningkatkan kepadatan tanah dan mengurangi resiko likuifaksi. Efektifitas teknik vibro-kompaksi dengan vibrator yang dipasang di kepala batang penggetar berkurang bersama kedalaman. Sedangkan efektifitas teknik *vibroflotation* dimana penggetar masuk ke dalam tanah memberikan efektifitas yang seragam dan dapat dikatakan tidak berkurang bersama kedalaman. Namun demikian, walaupun teknik *vibroflotation* efektif memperbaiki tanah, teknik ini memerlukan pemakaian volume air yang sangat banyak, karena itu sulit diterapkan di tempat yang ketersediaan airnya terbatas.

DAFTAR PUSTAKA

Anderson, R.D. 1974. *New Method for Deep Sand Vibratory Compaction* (Jour. Constr. Div., ASCE) Vol. 100: pp. 79-95.
 Andus, R.D. & Stokoe, K.H. 1999. *A Liquefaction Evaluation Procedure Based on Shear Wave*

Velocity. Tsukuba, Japan: Proc. Joint Meeting US/Japan Natural Resources Development Program.
 Broms, B.B. & Hasson, O. 1984. *Deep Compaction with the Vibro-Wing Method*. Ground Engineering, July Edition.
 Brown, R.E. 1977. *Vibroflotation Compaction of Cohesionless Soils*. (Jour. Geotech. Eng. Div., ASCE) Vol. 103: pp. 1437-1451.
 Cetin, K.O., Seed, R.B, Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Kayen, R.E., & Moss, R.E.S. 2004. *SPT-Based Probabilistic and Deterministic Assesment of Seismic Soil Liquefaction Potential*. (J. Geotech. And Geoenv. Engrg., ASCE) Vol. 130(12): pp.1314-1340.
 Das, B.M. 2011. *Principle of Soil Dynamics, 2nd Ed*. Stamford, USA: PWS-Kent.
 D'Appolonia, E. 1953. *Loose Sands – Their Compaction by Vibroflotation*. (Symp. On Dynamic Tests of Soils, ASTM) STP 156: pp. 138-162.
 Glover, J.C. 1982. *Sand Compaction and Stone Columns by Vibroflotation Process*. (Proc. Symp. Recent Developments in Ground Improvement Techniques) Bangkok: pp. 3-15.
 Gouw, T.L., Irsyam, M., & Gunawan, A. 2013. *The Application of Ground Improvement Techniques in Indonesia*. (Keynote lecture) Singapore: 18th South East Asian Geotechnical Conference.
 Gouw, T.L. 2018. *Proposed Design Guideline of Dynamic Compaction for Practicing Engineers*. (Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA) Vol. 49 No.2 June 2018: ISSN 0046-5828.
 Greenwood, D.A. 1970. *Mechanical Improvement of Soils Below Ground Surface*. (Ground Engineering) London: The Institution of Civil Engineers.
 Idriss, I.M., & Boulanger, R.W. 2004. *Semi-empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes*. (Proc. of 11th ICSDEE and ICEGE) Berkeley, California, USA: pp. 32-56.
 Ishihara, K. 1985. *Stability of Natural Deposits during Earthquake*. (Proc. 11th ICSMFE, 1). Tokyo: pp 249-252.
 Irsyam M. 2012. *Personal Communication*.
 Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K., & Yasuda, S. 1978. *A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan*. (Proc. of the 2nd International Conference on Microzonation for Safer Construction - Research and Application) Vol. II, San Francisco, CA: pp.885-896.
 Keller Corp., 2013. *Vibro-compaction Technical Brochure*. Germany.
 Kirsch, K. & Kirsch, F. 2010. *Ground Improvement by Deep Vibratory Methods*. London: Spon Press.
 Kramer, S.L. 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, NJ, USA.
 Mitchell, J.K., & Katti, R.K. 1981. *Soil Improvement – State of the Art*. (Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Stockholm) Vol. 4: pp. 509-575.
 Murayama, S. & Ichimoto, E. 1982. *Sand Compaction Pile (Compozer Method for Deep Compaction)*. Bangkok: Proc. Symp. on Recent Developments in Ground Improvement Techniques.

- Richart, R.E., Hall, J.R., & Woods, R.D. 1970. *Vibrations of Soils and Foundations*. New Jersey: Prentice Hall Inc.
- Schmertmann, J.H. 1975. *The Measurement of In-Situ Strength*. Raleigh, North Carolina: Proc. ASCE Specialty Conf. on In-Situ Measurement of Soil Properties.
- Schmertmann, J.H. 1978. *Guidelines for Cone Penetration Tests: Performance and Design*. FHWA-TS-78-209, US Dept. of Transportation.
- Seed, H.B. & Idriss, I.M. 1971, *Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential*. (J. Geotech. Engrg., ASCE) Vol. 97 (9): pp.1249-1273.
- Seed, H. B. & Idriss, I. M. 1982. *Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes*. Monograph No. 5, Earthquake Engineering Research Institute. Berkeley, California: pp. 134.
- Seed H.B, K. Tokimatsu, L.F. Harder, & Riley M. Chung 1985. *Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations*. (J. Geotech. Engrg., ASCE) Vol. 111(12): pp.1425-1445.
- Skempton, A.W. 1986. *Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation*. Geotechnique 36(3): pp.425-447.
- SNI 8640:2017. 2017. *Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Stark, T. D. & Olson, S. M. 1995. *Liquefaction Resistance Using CPT and Field Case Histories*. (Journal of Geotechnical Engineering, ASCE) Vol. 121, no. 12: pp. 856–869
- Thorburn, S. 1975. *Building Structures Supported by Stabilized Ground*. Geotechnique, Vol. 25: pp 83-94.
- Tsuchida, H. 1970. *Prediction and Countermeasure against Liquefaction in Sand Deposits*. (Proc. Seminar of the Port and Harbour Research Institute) Japanese: Ministry of Transport, Yokosuka Japan: pp. 3.1-3.33.