

BAB 3

LANDASAN TEORI

3.1 Tanah

Tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong diantara partikel-partikel padat tersebut (Das, 1995).

Tanah merupakan dasar sebuah konstruksi yang berfungsi sebagai penahan dan penerima akhir dalam sistem pembebanan struktur yang berada di atasnya baik berupa konstruksi bangunan, jalan maupun bangunan air yang harus memiliki stabilitas dan daya dukung yang cukup (Pandiangan et al., 2016).

Tanah memiliki peran penting sebagai bahan konstruksi dalam berbagai proyek teknik sipil dan juga sebagai pendukung fondasi bangunan. Oleh karena itu, seorang insinyur sipil perlu mempelajari sifat-sifat dasar tanah, termasuk asal-usulnya, distribusi ukuran butiran, kemampuan permeabilitas, sifat pemampatan ketika diberi beban (*compressibility*), kekuatan geser, kapasitas daya dukung terhadap beban, dan lain-lain. (Das, 1995).

Pembentukan tanah terjadi melalui proses fisik atau kimiawi. Proses fisik melibatkan perubahan batuan menjadi partikel-partikel kecil yang disebabkan oleh faktor seperti angin, erosi, es, aktivitas manusia, suhu, atau cuaca. Sementara itu, proses kimiawi terjadi karena pengaruh zat-zat di sekitarnya, seperti oksigen, karbon dioksida, air terutama yang mengandung asam atau alkali dan reaksi kimia lainnya. Tanah yang hasil pelapukannya masih berada di lokasi asal disebut tanah residual, sedangkan tanah yang hasil pelapukannya berpindah dari tempat asalnya disebut tanah terangkut. (Mina et al., 2018a).

3.1.1 Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah merupakan sistem yang mengatur dalam pengelompokan beberapa jenis tanah berbeda namun memiliki sifat yang sama berdasarkan

pemakaiannya (Das, 1995). Sistem klasifikasi tanah yang umum digunakan ialah AASHTO (*American Association of State Highway Transportation Officials*) dan USCS (*Unified Soil Classification System*). Sistem klasifikasi AASHTO berkembang sebagai *Public Road Administration Classification System* pada tahun 1929. Setelah dilakukan beberapa perbaikan, pada tahun 1945 berlaku versi terbaru yang diajukan oleh *Committee on Classification of Materials for Subgrade and Granular Type Road of the Highway Research Board* (ASTM Standard no D-3282, AASHTO metode M145). Pada sistem klasifikasi AASHTO, tanah diklasifikasikan menjadi 2 ialah tanah berbutir (lolos ayakan No. 200 $\leq$ 35%) dan tanah lanau-lempung (lolos ayakan No. 200 $>$ 35%) juga berdasarkan pada kriteria plastisitas (Das, 1995).

Tabel 3.1 Sistem Klasifikasi Tanah Berdasarkan AASHTO

Klasifikasi umum	Tanah berbutir (35% atau kurang dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No.200)						
Klasifikasi kelompok	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Analisis ayakan (% lolos) No. 10 No. 40 No. 200	Maks 50 Maks 30 Maks 15	Maks 50 Maks 25	Min 51 Maks 10	Maks 35	Maks 35	Maks 35	Maks 35
Sifat fraksi yang lolos ayakan No. 40 Batas cair (<i>LL</i>) Indeks plastisitas (<i>PI</i>)	Maks 6		NP	Maks 40 Maks 10	Min 41 Maks 10	Maks 40 Min 11	Min 41 Min 11
Tipe material yang paling dominan	Batu pecah, kerikil dan pasir		Pasir halus	kerikil dan pasir yang berlanau atau berlempung			
Penilaian sebagai bahan tanah dasar	Baik sekali sampai baik						
Klasifikasi umum	Tanah lanau - lempung (Lebih dari 35% dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No.200)						
Klasifikasi kelompok	A-4		A-5	A-6		A-7 A-7-5 A-7-6	
Analisis ayakan (% lolos) No. 10 No. 40 No. 200	Min 36		Min 36	Min 36		Min 36	
Sifat fraksi yang lolos ayakan No. 40 Batas cair (<i>LL</i>) Indeks plastisitas (<i>PI</i>)	Maks 40 Maks 10		Maks 41 Maks 10	Maks 40 Min 11		Min 41 Min 11	
Tipe material yang paling dominan	Tanah berlanau			Tanah berlempung			
Penilaian sebagai bahan tanah dasar	Biasa sampai jelek						

Sumber : Braja M. Das (1995)

Sistem klasifikasi USCS dikembangkan oleh *Cassagrande* pada tahun 1942 dan digunakan oleh *The Army Corps of Engineers* pada pekerjaan pembuatan lapangan terbang. Kemudian diadopsi oleh ASTM (*American Society for Testing and*

Materials) sebagai metode klasifikasi tanah (ASTM D 2487) pada tahun 1969. Pada sistem klasifikasi USCS, tanah diklasifikasikan menjadi 2 ialah tanah berbutir kasar (lolos ayakan No. 200 $\leq$ 50%) dan tanah berbutir halus (lolos ayakan No. 200 $>$ 50%) juga berdasarkan pada kriteria plastisitas (Das, 1995).

Tabel 3.2 Sistem Klasifikasi Tanah Berdasarkan USCS

Divisi Utama	Simbol Kelompok	Nama Jenis	Nama Jenis
Tanah berbutir kasar 50% butiran lebih halus daripada no. 200 (0.075 mm)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir-kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $P_L < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $P_L > 7$ $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $P_L < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $P_L > 7$
	GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir-kerikil atau tidak mengandung butiran halus	
	GM	Kerikil berlanas, campuran kerikil-pasir-lempung	
	GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung	
	SW	Pasir gradasi baik, pasir berlanas, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	
	SP	Pasir gradasi buruk, pasir kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	
Pasir lebih dari 50% butiran lolos ayakan no. 4 (4.75 mm)	SM	Pasir berlanas, campuran pasir-lanas	Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $P_L < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $P_L > 7$
	SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lempung	
Tanah berbutir halus 50% atau lebih lebih halus daripada no. 200 (0.075 mm)	ML	Lempung tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanas atau berlempung	
	CL	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanas, lempung kurus (lean clays)	
	OL	Lempung organik dan lempung berlanas organik dengan plastisitas rendah	
	MH	Lempung tak organik atau pasir halus distomae, lempung elastis	
Lempung dan lempung berlanas lebih dari 50%	CH	Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk (fat clays)	Diagram plastisitas: Untuk mengklasifikasi tanah berbutir halus yang berlanas dalam tanah berbutir halus dan tanah berbutir kasar, batas-batas Atterberg yang tertera dalam diagram yang harus berdasar kriteria klasifikasi menggunakan dua simbol. Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488
	OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi	
Tanah dengan kadar organik tinggi	P _t	Gambut (peat) dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi	

Sumber : Braja M. Das (1995)

3.2 Gempa Bumi

3.2.1 Pengertian Gempa Bumi

Gempa bumi terjadi ketika energi yang terkumpul di dalam bumi dilepaskan secara tiba-tiba, menyebabkan lapisan batuan di kerak bumi retak. Energi ini dihasilkan dari pergerakan lempeng tektonik. Saat energi dilepaskan, maka akan menyebar ke segala arah dalam bentuk gelombang gempa bumi, sehingga getarannya dapat dirasakan hingga ke permukaan bumi (Ukuran, n.d.).

Pusat gempa yang merupakan tempat pelepasan energi akibat patahan, mengirimkan getaran yang merambat melalui lapisan batuan dan terus berlanjut melalui lapisan-lapisan tanah hingga mencapai permukaan tanah (Soehaimi, 2008).

Definisi-definisi yang berkaitan dengan gempa tektonik mencakup berbagai istilah dan konsep yang menjelaskan fenomena ini :

- a. Pusat gempa (*focus*) adalah titik di bawah tanah tempat energi gempa pertama kali dilepaskan, yang juga dikenal sebagai hiposenter atau hipofokus.
- b. Kedalaman gempa (*focus depth*) adalah jarak vertikal dari permukaan tanah ke pusat gempa. Jika kedalaman pusat gempa berada antara 300 km hingga 700 km, maka itu disebut gempa dalam. Jika kedalamannya antara 70 km hingga 300 km, disebut gempa sedang, dan jika kurang dari 70 km, disebut gempa dangkal. Di Indonesia, gempa dangkal adalah jenis gempa yang paling sering terjadi.
- c. Intensitas adalah ukuran efek kerusakan yang disebabkan oleh gempa tektonik di suatu lokasi, dinyatakan dalam beberapa tingkatan dan bersifat objektif.
- d. Seismisitas merujuk pada kumpulan data yang mencatat persebaran gempa, termasuk gempa utama yang merupakan gempa yang terjadi pertama kali. Tingkat seismisitas suatu wilayah dapat diindikasikan oleh banyaknya titik yang terdapat pada peta persebaran seismisitas.
- e. Pelepasan energi terjadi ketika lapisan bumi yang terdeformasi mengumpulkan energi secara terakumulasi, yang pada suatu saat menyebabkan bergesernya lapisan bumi di patahan yang sudah ada atau bahkan dapat menciptakan patahan baru. Proses ini dimulai dari titik paling lemah pada patahan, di mana tekanan meningkat di sekitarnya sehingga menyebabkan bergesernya titik-titik tersebut. Bergesernya ini dapat menjalar hingga beberapa kilometer dari titik awal.

Pusat-pusat gempa bumi dangkal sering terjadi di zona-zona khusus. Salah satu penyebabnya adalah pergerakan magma atau sirkulasi magma yang menyebabkan penipisan pada lempeng samudera. Proses ini lambat laun dapat menyebabkan terbentuknya patahan atau fenomena yang dikenal sebagai *sea floor spreading*, yang dapat menjadi sumber gempa dangkal. Sumber gempa dangkal lainnya adalah sesar bawah laut yang memotong pegunungan tengah samudera, serta zona subduksi dari interaksi dua lempeng tektonik. Di zona ini, terjadi banyak patahan yang dapat mencapai permukaan bumi dan menyebabkan gempa bumi (Purbandini et al., 2017).

Ketika lempeng tektonik bergerak kembali, getaran besar dan kuat dapat merambat ke atas melalui zona-zona yang sudah melemah, seperti patahan-patahan. Akibat

penekanan lempeng, terjadi gesekan antara dua lempeng yang menghasilkan pelelehan batuan yang terakumulasi di suatu titik. Magma ini kemudian naik ke permukaan dan membentuk gunung berapi. Selain itu, pada zona ini juga terbentuk patahan-patahan transform yang secara alamiah merupakan sumber gempa dangkal (Purbandini et al., 2017).

3.2.2 Proses Terjadinya Gempa Tektonik

Gempa tektonik adalah jenis gempa bumi yang terjadi karena pergeseran tiba-tiba antara dua atau lebih lempeng tektonik. Pergeseran ini terjadi dalam berbagai jenis sesar, sesuai dengan arah geraknya. Umumnya, setelah gempa tektonik terjadi, seringkali diikuti oleh gempa-gempa susulan lainnya, tergantung pada kedalaman pusat gempa. Dampak dari gempa tektonik termasuk potensi tsunami yang dapat terjadi. Selain itu, gempa tektonik juga dapat menyebabkan likuifaksi, di mana tanah yang longgar menjadi cair akibat getaran, yang bisa menyebabkan runtuhnya bangunan yang berdiri di atasnya secara mendadak (Reni Anggraini, 2023).

3.2.3 Besaran Kekuatan Gempa

Terdapat dua metode dasar untuk mengukur kekuatan gempa bumi, yaitu berdasarkan magnitudo gempa (*earthquake magnitude*) dan berdasarkan intensitas kerusakan yang diakibatkannya (*earthquake intensity*). Magnitudo gempa tidak bergantung pada jenis konstruksi bangunan di wilayah tersebut. Sementara itu, intensitas gempa terkait dengan kerusakan yang dialami bangunan dan respons masyarakat di suatu wilayah, serta tekanan berlebih yang terjadi pada kedalaman tertentu. Nilai "amax" dapat diperoleh dari peta zona gempa Indonesia (Mina & Kusuma, 2013).

a. Magnitudo Gempa (*Earthquake Magnitude*)

Jika ingin membandingkan besarnya gempa di berbagai lokasi tanpa bergantung pada intensitas gempa, kepadatan penduduk, atau jenis bangunan di wilayah tersebut, maka dapat menggunakan metode perhitungan berdasarkan magnitudo gempa. Magnitudo gempa adalah skala kuantitatif yang dapat diterapkan pada daerah dengan penduduk maupun tanpa penduduk, sehingga memungkinkan perbandingan yang lebih obyektif terhadap kekuatan gempa di berbagai lokasi.

1) *Local Magnitude Scale*

Pada tahun 1935, Prof Charles Richter dari Institut Teknologi California mengembangkan skala besaran gempa untuk gempa dangkal dan lokal serta memiliki episentrum berjarak kurang dari 600 km di daerah selatan California. Skala besaran gempa ini disebut sebagai skala besaran Richter karena skala besaran gempa ini dikembangkan untuk gempa dangkal dan lokal. Richter mendefinisikan magnitudo lokal gempa maksimum dalam micron direkam menggunakan seismograf *wood-Anderson* yang terletak pada jarak 100 km dari episentrum gempa.

$$ML = \log A - \log A_0 = \log A/A_0 \quad (3.1)$$

Dimana:

ML = Besaran gempa

A = Amplitudo maksimum jejak gempa (mm) yang direkam oleh seismograf standar Wood-Anderson dengan periode natural 0,8 detik, faktor redaman 80%, dan magnifikasi statis sebesar 2800 adalah hasil dari pengukuran yang menunjukkan intensitas getaran maksimum yang terjadi selama gempa tersebut.

A_0 = 0,001 mm (Skala gempa lokal non yang berhubungan dengan besaran gempa terkecil yang pernah direkam)

2) *Surface Wave Magnitude Scale*

Skala yang digunakan untuk mengukur besaran gempa yang dominan ditimbulkan oleh gempa permukaan dengan periode sekitar 20 detik, terutama pada gempa yang episentrumnya cukup jauh (lebih dari 200 km) dari tempat pengukuran, didasarkan pada pengukuran amplitudo gelombang gempa permukaan tersebut. Guenberg mendefinisikan jenis gempa ini berdasarkan pengukuran amplitudo gelombang gempa permukaan dengan periode 20 detik (Mina et al., 2018a).

3) *Body Wave Magnitude*

Gempa yang memiliki fokus dalam cenderung menghasilkan sedikit gelombang permukaan. Oleh karena itu, untuk mengukur besaran gempa ini, penting untuk mengukur amplitudo gelombang P. Gelombang P merupakan jenis gelombang primer yang tidak dipengaruhi oleh kedalaman fokus sumber gempa, sehingga memberikan informasi yang lebih konsisten

dalam menentukan kekuatan seismik dari gempa tersebut (Mina et al., 2018a).

4) *Moment Magnitude*

Besaran gempa dengan magnitudo menggunakan pendekatan momen seismik langsung berhubungan dengan ukuran seismik sumber gempa yang dihitung menggunakan persamaan terkait. Metode ini mengukur jumlah energi yang dilepaskan oleh gempa, yang dapat memberikan gambaran lebih akurat tentang kekuatan sebenarnya dari gempa tersebut :

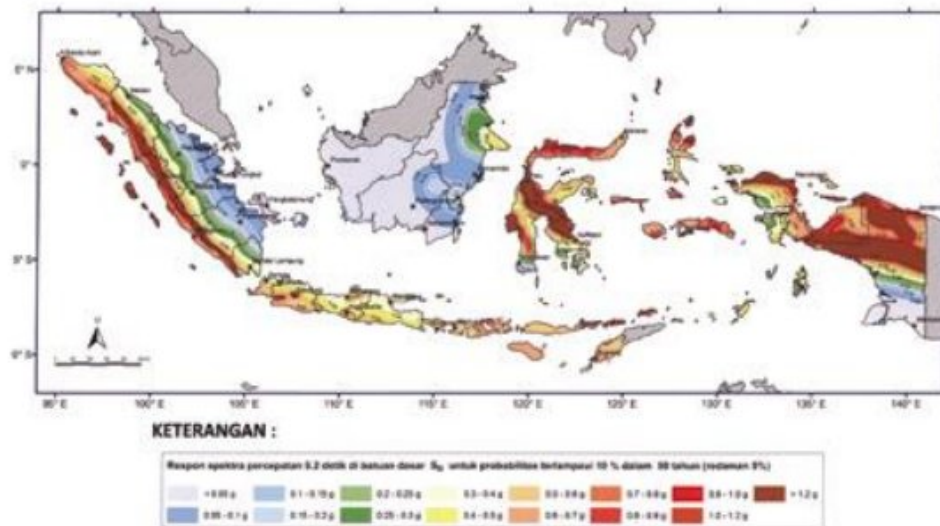
$$M_w = (\log M_o / 1,5) - 10,7 \quad (3.2)$$

dimana :

M_o = Momen seismic (dyn-cm)

b. Skala Intensitas Gempa (*Earthquake Intensity*)

Skala intensitas gempa bumi pertama kali dikembangkan oleh de Rossi dari Italia dan Forel dari Swiss pada tahun 1880, kemudian diperbaiki dan dikembangkan lebih lanjut oleh Mercalli pada tahun 1931. Versi lain dari skala ini juga disusun oleh O Wood dan Frank Neumann, serta Jepang juga mengembangkan versi intensitas gempa mereka sendiri.



Gambar 3.1 Peta Zona Gempa Indonesia

Sumber : Simantu.pu.go.id

3.2.4 Sumber Gempa Wilayah Banten

Wilayah Banten lebih dari 45% merupakan daerah rawan gempa. Wilayah selatan dan barat Banten memiliki potensi yang signifikan untuk mengalami gempa

tektonik. Selain dari interaksi lempeng Indo-Australia dan Eurasia, lempeng mikro Sunda juga berkontribusi sebagai sumber gempa di Banten. Terdapat beberapa zona penunjaman lempeng mikro di sekitar Banten serta struktur seismogenik yang dapat memicu atau telah menyebabkan gempa, khususnya di Selat Sunda. Di sepanjang pesisir barat Banten, selain rawan gempa tektonik, juga terdapat potensi untuk gempa vulkanik (Mina et al., 2018a).

3.3 Likuifaksi

3.3.1 Pengertian Likuifaksi

Likuifaksi adalah fenomena dimana kekuatan dan kekakuan tanah menurun karena gempa bumi atau pembebanan cepat lainnya. Ini terjadi ketika sifat tanah berubah dari keadaan padat menjadi keadaan cair akibat tekanan air pori yang meningkat mendekati atau melebihi tegangan vertikal selama gempa. Sebelum gempa terjadi, tekanan air dalam tanah biasanya rendah. Namun, setelah terjadi getaran gempa, tekanan air pori meningkat secara signifikan, yang memungkinkan partikel tanah untuk bergerak dengan lebih bebas.

3.3.2 Faktor-Faktor yang mempengaruhi terjadinya potensi likuifaksi

Berdasarkan pengamatan lapangan, uji laboratorium, dan studi ilmiah yang telah dilakukan oleh para ahli, dapat disimpulkan bahwa ada banyak faktor yang dapat meningkatkan potensi terjadinya likuifaksi pada suatu lapisan tanah (Mina et al., 2018b).

a. Intensitas dan durasi dari gempa bumi

Getaran merupakan faktor utama yang diperlukan untuk terjadinya likuifaksi. Sumber getaran yang paling umum adalah gempa bumi. Karakteristik gerakan gempa bumi, seperti percepatan dan durasi getaran, sangat menentukan tingkat regangan geser yang akan menggerakkan partikel-partikel tanah. Dorongan ini mengurangi kontraksi atau ikatan antara butiran-butiran tanah, yang pada akhirnya menyebabkan terjadinya likuifaksi.

Efek dari gempa bumi yang paling berpengaruh dalam meningkatkan potensi terjadinya likuifaksi adalah energi yang dilepaskan saat gempa terjadi. Potensi likuifaksi meningkat seiring dengan meningkatnya intensitas gempa bumi dan durasi getarannya. Oleh karena itu, gempa bumi dengan magnitudo besar dan

durasi yang lama merupakan yang paling berpotensi menyebabkan likuifaksi yang berbahaya. Selain gempa bumi, kondisi lain juga dapat menyebabkan likuifaksi, seperti ledakan di bawah permukaan tanah, pemancangan tiang pondasi, serta getaran dari lalu lintas dan kereta api.

b. Posisi letak permukaan air tanah

Tanah yang berpotensi mengalami likuifaksi adalah yang memiliki lapisan air tanah mendekati permukaan tanah. Lapisan tanah yang tak jenuh di atas lapisan air tanah dekat permukaan tanah dapat mengalami likuifaksi, sedangkan lapisan tanah yang tak jenuh di atas air tanah yang lebih dalam cenderung tidak mengalami likuifaksi. Oleh karena itu, lahan yang terletak di atas air tanah yang tidak mungkin terendam umumnya tidak perlu dievaluasi untuk potensi likuifaksi.

Di lokasi-lokasi di mana permukaan air tanah sering berfluktuasi, potensi terjadinya likuifaksi juga akan bervariasi. Secara umum, dalam analisis likuifaksi, tingkat tertinggi dari permukaan air tanah yang tercatat dalam sejarah harus dipertimbangkan, kecuali ada informasi lain yang menunjukkan adanya tingkat air tanah yang lebih rendah atau lebih tinggi.

c. Jenis tanah

Secara umum, banyak jenis tanah di bumi berpotensi mengalami likuifaksi. Ishihara (1985) menyatakan bahwa "Tanah yang berisiko likuifaksi selama gempa bumi biasanya ditemukan dalam lapisan tanah yang terdiri dari butiran pasir halus hingga sedang, serta pasir yang mengandung debu dengan plastisitas rendah." Namun, likuifaksi juga dapat terjadi pada tanah berkerikil. Oleh karena itu, jenis tanah yang rentan terhadap likuifaksi adalah tanah yang tidak berplastisitas (*non-plastic*) atau memiliki plastisitas rendah (*low plasticity*). Jika diurutkan dari yang paling kecil sampai yang paling besar daya tahannya terhadap likuifaksinya maka akan diperoleh data sebagai berikut:

- 1) Pasir bersih
- 2) Pasir berlanau tidak berplastis
- 3) Lanau tidak berplastis
- 4) Kerikil-kerikil

d. Rapat *relative* tanah (D_r)

Berdasarkan uji lapangan, tanah dengan kepadatan rendah dan rapat relatif rendah diketahui memiliki potensi likuifaksi yang tinggi. Pada pasir lepas yang tidak berplastisitas, kenaikan tegangan air pori saat gempa akan lebih cepat dibandingkan dengan pasir padat. Poulos et al. (1985) menyatakan bahwa jika suatu lapisan tanah bersifat relatif padat, maka tidak perlu dievaluasi terhadap likuifaksi, karena tegangan geser basah pada tanah yang relatif padat lebih besar dibandingkan dengan tegangan geser keringnya.

e. Gradasi ukuran partikel

Butiran tanah yang seragam cenderung membentuk tanah yang kurang stabil dibandingkan dengan tanah yang memiliki gradasi baik. Pada tanah yang bergradasi baik, butiran-butiran yang lebih kecil mengisi rongga-rongga yang ada, sehingga mengurangi ruang-ruang yang dapat diisi oleh air. Hal ini membantu mengurangi tekanan air pori saat terjadi gempa.

f. Letak geologis tanah

Tanah yang berada di dalam air lebih cenderung mengalami likuifaksi karena partikel tanah di daerah tersebut biasanya memiliki sifat butiran yang lepas. Misalnya, tanah di sungai, danau, atau samudra memiliki partikel tanah yang tidak saling mengikat. Saat terjadi getaran, tanah dengan partikel yang lepas akan terurai lebih cepat dibandingkan dengan tanah yang partikel-partikelnya saling terikat.

Oleh karena itu, potensi likuifaksi lebih besar pada tanah dengan butiran lepas. Jenis tanah yang cenderung memiliki butiran lepas meliputi tanah lakustrin (danau), tanah endapan, dan tanah atau daratan yang terbentuk akibat turunnya muka air laut.

g. Kondisi-kondisi drainase

Jika air dalam suatu lapisan tanah dapat segera dialirkan, maka likuifaksi tidak akan terjadi pada lahan tersebut. Oleh karena itu, pembangunan sistem drainase pada lahan yang berpotensi mengalami likuifaksi sangat penting untuk memastikan air dapat segera dialirkan keluar dari lahan tersebut.

h. Tegangan selimut

Semakin besar tegangan selimut pada suatu lapisan tanah, semakin kecil potensi likuifaksi pada lapisan tersebut. Tegangan selimut di lapisan tanah yang lebih

dalam biasanya lebih tinggi dibandingkan dengan di permukaan tanah. Dari beberapa kasus likuifaksi, diketahui bahwa daerah yang berpotensi mengalami likuifaksi biasanya hanya sampai kedalaman sekitar 50 kaki (15 meter). Pada lapisan tanah yang lebih dalam, likuifaksi umumnya tidak terjadi karena tegangan selimut yang lebih tinggi.

Namun, ini tidak berarti bahwa analisis likuifaksi hanya perlu dilakukan sampai kedalaman 15 meter saja. Dalam beberapa kasus, likuifaksi juga terjadi pada kedalaman lebih dari 15 meter. Oleh karena itu, analisis likuifaksi harus dilakukan pada setiap lapisan tanah yang memiliki rongga berisi air, walaupun kedalamannya melebihi 15 meter.

i. Bentuk partikel

Bentuk partikel tanah juga mempengaruhi potensi terjadinya likuifaksi. Tanah dengan partikel berbentuk bulat cenderung memiliki lebih banyak rongga atau pori dibandingkan dengan tanah yang partikel-partikelnya bersudut. Banyaknya rongga ini memungkinkan lebih banyak air mengisi tanah, sehingga meningkatkan potensi terjadinya likuifaksi dibandingkan dengan tanah yang partikel-partikelnya bersudut.

j. Lamanya waktu konsolidasi

Potensi terjadinya likuifaksi pada tanah timbun yang belum terkonsolidasi lebih besar dibandingkan dengan tanah yang sudah terkonsolidasi dalam jangka waktu yang lama. Semakin lama tanah tersebut dibiarkan terkonsolidasi, semakin besar daya tahannya terhadap bahaya likuifaksi. Hal ini disebabkan oleh ikatan antar partikel yang lebih kuat pada tanah yang sudah terkonsolidasi dibandingkan dengan tanah yang belum terkonsolidasi. Oleh karena itu, lamanya waktu konsolidasi suatu lapisan endapan tanah berbanding lurus dengan daya tahan lapisan tanah tersebut terhadap potensi likuifaksi.

k. Beban bangunan

Konstruksi bangunan yang berat di atas lapisan pasir dapat mengurangi ketahanan tanah terhadap likuifaksi. Hal ini dapat dianalogikan seperti sebuah permukaan tanah yang memikul beban berat dari endapan pasir akan mengalami penurunan ketahanan terhadap likuifaksi. Dasar keset akan menyebabkan tegangan geser pada tanah. Tegangan geser ini akan mempercepat terjadinya

likuifaksi apabila ada tambahan tegangan geser saat gempa terjadi. Secara ringkas, lokasi dan jenis tanah paling berpotensi terjadinya likuifaksi adalah sebagai berikut:

1) Lokasi Tanah

a) Lokasi yang dekat dengan episenter atau sumber getaran dari suatu gempa bumi yang utama.

b) Lokasi yang memiliki letak permukaan air tanah yang dekat dengan permukaan bumi.

2) Jenis Tanah

Pasir yang mempunyai gradasi yang seragam dengan partikel tanah berbentuk bulat yang tersebar.

3.3.3 Syarat Terjadinya Likuifaksi

Likuifaksi hanya bisa terjadi dengan syarat tertentu, apabila suatu tanah tidak memenuhi syarat-syarat tersebut, maka tanah tersebut tidak berpotensi untuk terjadi likuifaksi. Oleh karena itu perencana pembangunan harus menghindari tanah-tanah yang telah memenuhi syarat-syarat terjadinya likuifaksi. Likuifaksi biasanya terjadi pada tanah atau lahan yang tidak padat atau tanah lepas. Misalnya tanah yang terbentuk dari pasir, endapan bekas delta sungai, dan bahan-bahan lainnya (Mina et al., 2018b). Tanah semacam itu cenderung tidak padat sehingga memiliki rongga yang banyak. Secara umum dapat disimpulkan bahwa syarat-syarat terjadinya likuifaksi pada suatu wilayah adalah :

- a. Lapisan tanah berupa pasir atau lanau
- b. Lapisan tanah jenuh air
- c. Lapisan tanah bersifat lepas (tidak padat)
- d. Terjadi gempa bermagnitudo di atas 5,0, dan
- e. Berkecepatan gempa lebih dari 0.1 g.

3.3.4 Proses terjadinya likuifaksi

Dalam memahami proses terjadinya likuifaksi, penting untuk memahami bahwa suatu endapan tanah terdiri dari partikel-partikel yang saling berdekatan dan saling menopang satu sama lain. Kondisi ini menguntungkan tanah karena beban yang diterapkan di atasnya akan dipikul bersama oleh seluruh partikel, dan akhirnya

beban tersebut akan ditransmisikan ke lapisan batuan dasar di bagian bawah lapisan tanah tersebut. Namun, saat terjadi gempa, getaran yang berulang dan cepat menyebabkan air dalam tanah tidak memiliki waktu cukup untuk keluar melalui rongga-rongga tanah. Akibatnya, air ini mendorong partikel-partikel tanah menjauh satu sama lain. Akibatnya, partikel-partikel tanah tidak lagi dapat mendistribusikan beban dengan baik.



Gambar 3.2 Kondisi Partikel Tanah Saat Normal

Sumber : M.Mabrur (2009)

Pada kondisi tanah di atas, terlihat banyaknya rongga antar partikel tanah yang diisi oleh air. Biasanya, dalam kondisi normal, air akan terdesak dan meningkatkan tekanannya untuk mencari jalan keluar. Namun, saat terjadi gempa, air tidak memiliki waktu cukup untuk keluar dari tanah melalui rongga-rongga tersebut. Sebagai gantinya, air ini mendorong partikel-partikel tanah sehingga beberapa partikel yang sebelumnya saling berdekatan menjadi menjauh. Akibatnya, partikel tanah tidak lagi dapat mendistribusikan beban dengan efektif.



Gambar 3.3 Kondisi Partikel Tanah saat Mengalami Getaran

Sumber : M.Mabrur (2009)

Pada kondisi seperti ini, sebagian besar beban diangkat oleh air, menyebabkan pemikulan beban pada tanah menjadi tidak stabil. Analoginya adalah seperti kapal yang mengapung di atas air; jika air tidak dapat menahan beban kapal, kapal akan

tenggelam. Hal serupa terjadi pada gedung yang berdiri di atas tanah yang mengalami likuifaksi; gedung tersebut bisa tenggelam ke dalam tanah.

Dalam kasus yang lebih ekstrem, tekanan air pori bisa sangat tinggi sehingga lebih banyak partikel tanah terdorong dan tidak lagi bersentuhan satu sama lain. Dalam situasi seperti ini, kekuatan tanah menjadi sangat rendah dan berperilaku lebih seperti zat cair daripada zat padat.

3.3.5 Bahaya yang disebabkan oleh peristiwa likuifaksi

Likuifaksi terjadi hanya pada tanah yang tersaturasi air, sehingga dampaknya seringkali hanya terlihat di area yang dekat dengan badan air seperti sungai, danau, atau laut. Efek dari likuifaksi dapat berupa longsor besar atau terbentuknya retakan-retakan pada tanah sejajar dengan badan air. Ketika likuifaksi terjadi, kekuatan tanah berkurang dan kemampuannya untuk mendukung pondasi bangunan di atasnya juga menurun. Likuifaksi juga dapat menimbulkan tekanan besar pada dinding penahan tanah, yang dapat menyebabkan dinding tersebut miring atau bergeser.

Selama kejadian likuifaksi, kekuatan tanah berkurang dan kemampuannya untuk mendukung pondasi bangunan di atasnya juga menurun. Likuifaksi juga dapat menimbulkan tekanan besar pada dinding penahan tanah, yang dapat menyebabkan dinding tersebut miring atau bergeser. Naiknya tekanan air pori juga dapat memicu terjadinya longsor.

3.3.6 Parameter Untuk Menganalisis Potensi Likuifaksi

Pada dasarnya, analisis potensi likuifaksi adalah mencari 2 parameter utama yaitu : *Cyclic Stress Ratio* (CSR), yang menggambarkan tegangan siklik yang terjadi selama gempa dibagi dengan tegangan efektif, dan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR), yang menunjukkan kemampuan tanah untuk menahan likuifaksi.

a. Tegangan Tanah

Tegangan pada lapisan tanah yang berasal dari beban tanah di atasnya, tanpa memperhitungkan tegangan air pori (μ), disebut sebagai tegangan vertikal total. Pada kondisi tanah kering, ini merujuk pada tekanan pada bidang datar di dalam

tanah. Tanah dapat bermacam-macam sesuai dengan γ kering = γ_d , atau basah = γ_{sat} . Jika tanah berlapis-lapis dan ada beban, maka tekanan pada tanah dasar:

$$\gamma = h_1 \gamma_1 + h_2 \gamma_2 \quad Q \quad (3.3)$$

Tekanan pada tanah yang terdapat air tanah dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu tekanan total dan tekanan pori (tekanan air pori atau tekanan hidrostatik). Tanah terdiri dari dua lapis yaitu :

- 1) Muka air sedalam h_1 dari muka tanah, dengan berat volume tanah γ
- 2) Tanah dasar sedalam h_2 dari muka air tanah, dengan berat volume tanah kenyal air γ_{sat} .

Tekanan total sama dengan berat total prisma tanah, maka tekanan pada tanah :

$$\sigma = \gamma \times h \quad (3.4)$$

b. Percepatan Gempa Dasar (a_{max})

Percepatan puncak muka tanah yang disebut juga sebagai *Peak Ground Acceleration* (PGA) atau dapat dilambangkan dengan a_{max} adalah hasil dari getaran gempa bumi yang terjadi. Perhitungan PGA untuk wilayah Indonesia dapat menggunakan berbagai data literatur yang telah tersedia sebelumnya, seperti Peta Zona Gempa Indonesia (SNI 03-1726-2002), standar SNI 2012, perhitungan fungsi atenuasi yang bergantung pada kondisi alam di suatu area, data dari Pusat Studi Gempa Bumi dan Tsunami (PusKIM), serta perangkat lunak seperti *Deepsoil*.

c. Faktor Reduksi (r_d)

Secara umum, faktor reduksi mencerminkan hubungan antara tegangan dan kekuatan batuan di bawah permukaan tanah. Nilai faktor reduksi juga mengindikasikan kemampuan untuk mengurangi tegangan dalam tanah. Seiring dengan kedalaman tanah, nilai faktor reduksi cenderung menurun. Variasi nilai faktor reduksi terjadi pada setiap kedalaman tertentu dan harus dihitung secara spesifik untuk masing-masing kedalaman tersebut. Faktor reduksi (r_d) memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) di lapisan tanah. Semakin kecil nilai r_d , semakin rendah pula nilai CSR, sehingga potensi likuifaksi juga akan menurun. Nilai r_d dapat diketahui dengan rumus dibawah ini :

$$rd = \frac{(1-0,4113z^{0,5}+0,04052z+0,001753z^{1,5})}{(1-0,4177z^{0,5}+0,05729z-0,006205z^{1,5}+0,001210z^2)} \quad (3.5)$$

dimana z merupakan nilai kedalaman tanah (m) yang ditinjau.

d. *Cyclic Stress Ratio (CSR)*

CSR adalah rasio antara tegangan geser rata-rata yang disebabkan oleh gempa dan tegangan vertikal efektif di setiap lapisan. Nilai CSR di sebuah lapisan tanah dipengaruhi secara signifikan oleh percepatan gempa (a). Seed dan Idriss (1971) merumuskan persamaan untuk menghitung rasio tegangan siklik (CSR), yaitu :

$$CSR = \left(\frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} \right) = 0,65 \left(\frac{amax}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) rd \quad (3.6)$$

Dimana :

α_{max} = Percepatan horizontal maksimum tanah (g)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

σ'_{vo} = tegangan vertikal overburden efektif (kN)

Menurut metode yang disarankan oleh Seed dan Idriss, tegangan geser yang menyebabkan likuifaksi dapat dihitung dari tegangan geser siklik τ_{av} yang dihasilkan pada setiap titik pada lapisan tanah, dan dinyatakan dengan rumus :

$$\tau_{av} = 0,65 \cdot \gamma \cdot z \cdot \frac{amax}{g} \cdot rd \quad (3.7)$$

Dimana :

z = kedalaman (m)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

α_{max} = percepatan horizontal maksimum tanah (g)

rd = faktor reduksi kedalaman

Faktor 0,65 adalah asumsi bahwa tegangan geser seragam ekuivalen adalah 65% dari tegangan geser maksimum absolut yang dihasilkan oleh gempa.

c. *Cyclic Resistance Ratio (CRR)*

CRR adalah salah satu parameter penting dalam menghitung potensi likuifaksi. Ini mencerminkan ketahanan lapisan tanah terhadap tegangan siklik (CSR) atau likuifaksi. Sebelum menghitung CRR, perlu menghitung faktor skala gempa dan faktor koreksi overburden. Metode perhitungan CRR didasarkan pada

metode NCEER/NSF tahun 1998 yang menggambarkan analisis potensi likuifaksi. Metode ini melibatkan evaluasi nilai CRR menggunakan hasil uji SPT (*Standard penetration test*) yang telah dikoreksi selama bertahun-tahun, menghasilkan kurva hubungan antara *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dengan nilai N-spt yang terkoreksi. Metode ini hanya berlaku untuk perhitungan dengan magnitudo 7.5 SR.

NCEER atau *National Center for Earthquake Engineering Research* adalah *workshop* yang melibatkan ahli dan pengamat yang pertama kali dilaksanakan pada tahun 1985. Tujuannya adalah untuk menyusun laporan tentang pengetahuan terkait likuifaksi dan bahayanya. Laporan ini telah menjadi standar atau referensi yang umum digunakan dalam penelitian tentang bahaya likuifaksi hingga saat ini.

Nilai *Cyclic Resistance Ratio* dapat diperoleh melalui pengujian lapangan seperti *Standart Penetration Test* (SPT). Dalam mengevaluasi potensi likuifaksi menggunakan metode SPT, terdapat beberapa langkah penting yang harus dilakukan :

- 1) Menentukan nilai (N1)60.

Youd dan Idriss (2001) dan Cetin dll (2004) menjelaskan koreksi-koreksi untuk memperoleh nilai (N1)60:

$$(N1)60 = N_m C_N C_E C_B C_R C_S \quad (3.8)$$

Dimana :

N_m = Nilai N SPT yang diperoleh dari test lapangan

C_N = Faktor normalisasi N_m terhadap tegangan overburden pada Umumnya

Karena nilai N-SPT meningkat seiring dengan meningkatnya tegangan overburden efektif, perlu digunakan faktor koreksi tegangan overburden (Seed dan Idriss, 1980). Faktor ini umumnya digunakan dari persamaan berikut (Seed dan Idriss, 1982) :

$$C_N = \frac{2,2}{(1,2 + \frac{\sigma'_v}{p_a})} \quad (3.9)$$

$C_E = 1$

$$CB = 1$$

$$CR = 0,75$$

$$CS = 1$$

$$(N1)_{60} = N_m \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \quad (3.10)$$

Di mana nilai C_N tidak boleh melebihi 1,7 dan nilai faktor koreksi (normalisasi) untuk *Standard penetration test* (SPT) harus diperhatikan.

2) Menghitung *magnitude scale factor*.

Untuk mencari nilai MSF digunakan rumus sebagai berikut :

$$MSF = \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}} \quad (3.12)$$

Dimana M_w merupakan besaran magnitudo yang terjadi.

3) Menentukan nilai $CRR_{7.5}$.

Menentukan nilai CRR pada besaran skala gempa (M_w) 7.5 :

$$CRR_{7.5} = \left[\frac{1}{34-x} + \frac{x}{135} + \frac{50}{(10x+45)^2} - \frac{1}{200} \right] \quad (3.13)$$

Dimana nilai x adalah $N_{(60)}$

4) Menghitung CRR_M

Nilai CRR dapat dihitung dengan mengalikan nilai $CRR_{7.5}$ dan MSF

$$CRR_M = CRR_{7.5} \times MSF \quad (3.14)$$

d. *Factor of Safety* (FS)

Factor of safety merupakan nilai yang digunakan untuk menentukan faktor keamanan terhadap likuifaksi. Faktor keamanan tanah terhadap likuifaksi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$FS = CRR/CSR \quad (3.15)$$

Jika $FS < 1$ (terjadi Likuifaksi)

Jika $FS = 1$ (kondisi kritis)

Jika $FS > 1$ (tidak terjadi Likuifaksi)

Jika hasil akhir perhitungan faktor keamanan kurang dari 1, maka tanah berpotensi mengalami likuifaksi. Jika hasilnya sama dengan 1, kondisi tanah dianggap kritis. Namun, jika hasilnya lebih dari 1, tidak ada potensi likuifaksi di area tersebut.

3.4 Stone column

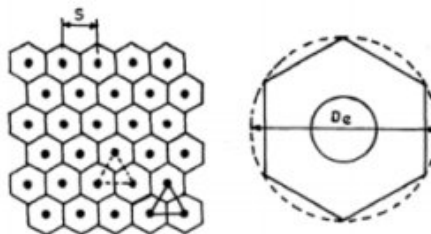
Stone column adalah metode penggalian yang menggantikan sebagian tanah yang akan digunakan sebagai dasar konstruksi dengan kolom vertikal yang dipadatkan. Fungsi utama dari pemasangan *stone column* adalah untuk meningkatkan daya dukung tanah yang kurang stabil, sehingga mampu menahan beban yang lebih besar dan mengurangi penurunan tanah (Barksdale & Bachus, 1983). Menurut Barksdale dan Bachus (1982), selain untuk meningkatkan daya dukung tanah, pemasangan *stone column* juga memiliki fungsi tambahan lainnya, fungsi lain dari *stone column* adalah :

- Mengurangi total *settlement* tanah.
- Memperpendek waktu konsolidasi.
- Mengurangi bahaya *liquefaction*.

Dalam perencanaan *stone column*, terdapat tiga parameter umum yang harus ditentukan terlebih dahulu, yaitu :

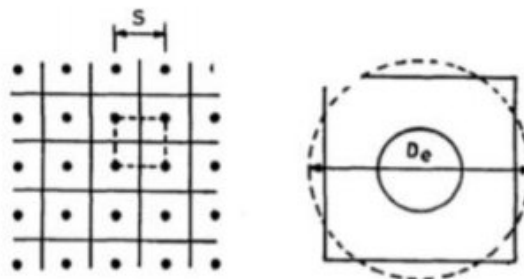
- Konfigurasi pemasangan *stone column*

Konfigurasi pemasangan *stone column* umumnya terdiri dari konfigurasi *Triangular* dan *Square*



Gambar 3.4 Pola Pemasangan *Stone column* Triangular

Sumber : Cardina (2022)



Gambar 3.5 Pola Pemasangan *Stone column* Square

Sumber : Cardina (2022)

b. Diameter *stone column*

Ukuran diameter *stone column* ditentukan berdasarkan seberapa efektif diameter tersebut dibutuhkan untuk mencapai tujuan perencanaan (Listiyanti et al., 2022).

c. Jarak atau spasi antar *stone column*

Jarak atau spasi antar *stone column*, dari pusat ke pusat, disesuaikan dengan kebutuhan untuk mencapai desain yang efektif (Listiyanti et al., 2022).

Kedua bentuk penampang, yaitu pola persegi dan pola segitiga sama sisi, dapat dihitung menggunakan bentuk lingkaran dengan D_c (diameter ekuivalen) sebagai berikut :

$$D_c = 1,05 + s \text{ (untuk pola segitiga sama sisi)} \quad (3.16)$$

$$D_c = 1,13 + s \text{ (untuk pola persegi)} \quad (3.17)$$

dimana s adalah jarak antar *stone column* (Listiyanti et al., 2022).

Volume tanah yang digantikan oleh *stone column* memiliki pengaruh penting terhadap hasil perkuatan tanah (Barksdale, R.D. and Bachus, 1983). Untuk menghitung jumlah pergantian tanah, ditetapkan rasio pergantian luas *stone column* (a_c) dan rasio pergantian luas tanah (a_s) menggunakan rumus sebagai berikut :

$$a_s = \frac{A_c}{A} \quad (3.18)$$

$$a_s = \frac{A - A_c}{A} \quad (3.19)$$

dimana :

A = luas penampang (m^2)

A_c = luas penampang *stone column* (m^2)

Nilai basic improvement merupakan nilai yang dibutuhkan dalam perencanaan desain *stone column* adapun rumusnya adalah sebagai berikut :

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} \left[\frac{5 - \frac{A_c}{A}}{4K_{ac} (1 - \frac{A_c}{A})} - 1 \right] \quad (3.20)$$

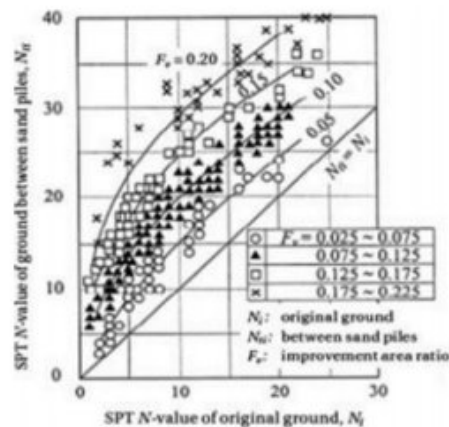
Dimana K_{ac} adalah koefisien tekanan tanah aktif, nilai sudut geser material *Stone Column* pada sudut $40^\circ - 45^\circ$ terbukti efektif karena mampu meningkatkan daya dukung tanah yang cukup besar, nilai sudut geser yang diambil yaitu 45° (Fathonah et al., 2021). Selanjutnya untuk menghitung K_{ac} sebagai berikut.

$$K_{ac} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_c}{2} \right) \quad (3.21)$$

Kemampuan material stone column ini memiliki pengaruh reduksi terhadap basic improvement factor (n_0) sehingga menghasilkan nilai reduksi (n_1). Perhitungan besarnya nilainya reduksi dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$n_1 = 1 + \frac{\bar{A}_c}{A} \left[\frac{5 - \frac{\bar{A}_c}{A}}{4K_{ac} \left(1 - \frac{\bar{A}_c}{A} \right)} - 1 \right]$$

Peningkatan N-SPT tanah diantara *stone column* yang diakibatkan oleh getaran *vibroprobe* yang digambarkan oleh grafik hubungan kenaikan N-SPT dengan area *replacement ratio* (a_s). penggunaan grafik ini pada desain *stone column* merupakan adaptasi dari metode perbaikan tanah *sand compaction pile* (Sihombing, 2012). Grafik yang dimaksud adalah sebagai berikut.



Gambar 3.6 Grafik hubungan kenaikan N-SPT dengan nilai a_s

Sumber : Cardina (2022)

Nilai N-SPT tanah di antara *stone column* akan digunakan dalam perhitungan untuk menentukan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR), yang kemudian akan digunakan untuk menghitung nilai tahanan tanah terhadap likuifaksi. Hal ini akan menghasilkan nilai FS' (faktor keamanan) setelah pemasangan *stone column* (Listiyanti et al., 2022)