

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sejarah Aktivitas Gempabumi Pulau Bali

Berdasarkan catatan sejarah, daerah Bali dan sekitarnya dikenal sebagai daerah yang rawan gempabumi. Tercatat beberapa kali gempa besar yang menyebabkan korban jiwa dan kerugian harta benda, diantaranya gempa tahun 1917, gempa Seririt 1976, gempa Culik 1979 dan gempa Karangasem 2004[17]. Sejarah aktivitas gempabumi Pulau Bali semenjak tahun 1862 diterangkan dalam Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2. 1 Catatan sejarah aktivitas gempabumi Pulau Bali[18]

Tahun	Magnitudo	Korban
1862	7.0	Tidak ada korban jiwa
1890	-	Tidak ada korban jiwa
1917	6.6	1500 orang meninggal
1930	-	Tidak ada korban jiwa
1938	-	Tidak ada korban jiwa
1976	6.2	559 orang luka berat dan lebih dari 3200 orang luka ringan
1977	5.0	Tidak ada laporan korban jiwa
1979	5.6	5 orang meninggal, 34 orang luka berat dan 250 luka ringan
1979	6.0	2 orang meninggal dan 40 orang luka-luka
1979	5.7	4 orang luka-luka
1985	6.2	Tidak ada korban jiwa
1987	5.7	Beberapa orang luka-luka
2004	5.5	1 orang meninggal dan 33 orang luka-luka
2017	6.4	1 orang luka-luka
2018	6.4	564 orang meninggal dan 1.584 orang luka-luka
2018	7.0	468 orang meninggal dan 1.416 orang luka-luka

2018	6.3	Tidak ada korban jiwa
------	-----	-----------------------

2.2 Geologi Pulau Bali

2.2.1 Morfologi

Morfologi wilayah Provinsi Bali terdiri dari daerah dataran rendah pantai, sungai, rawa, danau, dataran vulkanik, serta dataran sedimen yang berbentuk landai dengan kemiringan 0-5 % dan ketinggian berkisar 0-25 m di atas permukaan laut. Kondisi morfologi di Bali untuk jenis tanah sebagian besar didominasi oleh jenis tanah berikut[5]:

1. Tanah Latasol sangat rawan terjadinya erosi yang terdapat di bagian barat, jenis tanah ini secara keseluruhan meliputi 44.90% dari luas Pulau Bali
2. Tanah Regusol sangat rawan terjadinya erosi yang terdapat di bagian timur, jenis tanah ini meliputi sekitar 39.93% dari luas Pulau Bali.
3. Tanah Andosol rawan terjadinya erosi terdapat di daerah sekitar Baturiti, tanah Mediteran tidak terlalu rawan terjadinya erosi terdapat di daerah sekitar Nusa Penida dan tanah Alluvial yang tidak rawan akan terjadinya erosi terdapat di sekitar dataran Negara. Ketiga jenis tanah ini meliputi sekitar 15.49% dari luas Pulau Bali.

2.2.2 Stratigrafi

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Bali (Gambar 2.1) yang disusun oleh Hadiwidjojo (1998), wilayah permukaan Pulau Bali tersusun atas berbagai batuan gunungapi. Dengan urutan stratigrafi daerah penelitian dari yang muda ke yang tua adalah sebagai berikut[19], [20]:

1. Formasi Palasari (Qd)
Formasi ini berumur kuartar bawah terdiri atas konglomerat, batupasir, batugamping terumbu, tufa, dan lahar. Batuan ini terdapat di wilayah dataran rendah Kabupaten Jembrana, meyebar hingga pesisir dekat pantai Kecamatan Selemadeg Barat Kabupaten Tabanan dan Labuhan Lalang Kabupaten Buleleng.

2. Formasi Selatan (Msl)

Batuan berumur Pliosen terdiri atas lava, breksi, tufa batu apung, batu gamping terumbu, dan napal. Batuan ini terdapat di daerah Bukit Kabupaten Badung dan Kepulauan Nusa Penida.

3. Endapan Alluvium (Qal)

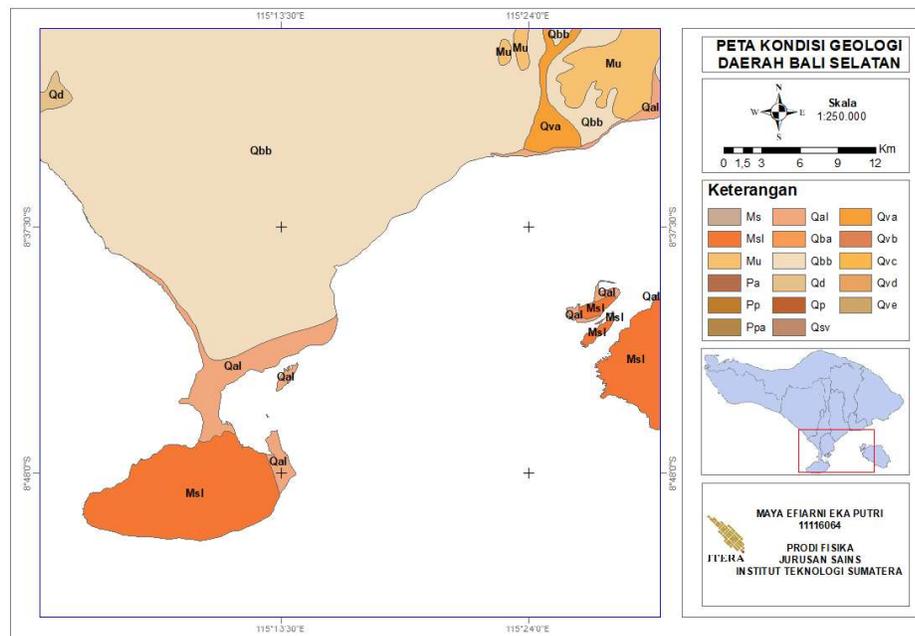
Endapan aluvium berumur kuartar yang merupakan endapan termuda, terdiri atas lempung, pasir, lanau, dan kerikil dengan campuran endapan sungai, danau, dan pantai di daerah sepanjang Prapat Agung, wilayah pesisir dekat pantai di Kabupaten Buleleng (Kecamatan Gerokgak, Seririt, Banjar, Sawan dan sebagian Buleleng), pesisir dekat pantai Kabupaten Jembrana (Kecamatan Negara, Jembrana dan Mendoyo), Kabupaten Badung (Tanjung Benoa dan Kuta), Kota Denpasar (dekat pantai Denpasar Selatan dan Pulau Serangan asli).

4. Formasi Ulakan (Mu)

Formasi ini merupakan batuan tertua yang berumur Miosen bawah. Terdiri atas breksi gunungapi, lava, dan tufa dengan sisipan batuan gamping. Sebaran formasi ini berada di sekitar Teluk Padang Bali dan Labuhan Amuk.

5. Batuan Gunungapi Buyan Bratan dan Batur (Qbb)

Batuan yang berupa breksi, kerikil, pasir, material tuff, dan aliran lahar.



Gambar 2. 1 Peta Geologi Lembar Bali

2.2.3 Struktur Geologi

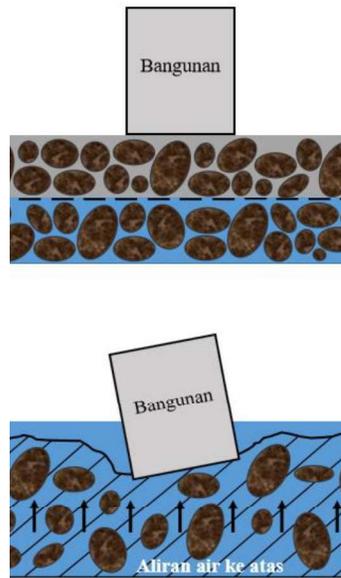
Pulau Bali merupakan bagian dari busur kepulauan Sunda Kecil yang terbentuk akibat proses subduksi lempeng Indo-Australia ke bawah lempeng Eurasia. Proses subduksi ini tidak hanya menimbulkan aktivitas tektonik tetapi juga dapat menimbulkan aktivitas vulkanik. Gempabumi dangkal akibat proses subduksi umumnya terjadi di Selatan Bali di Palung Jawa yang berjarak antara 150-200 km dari pesisir selatan Pulau Bali. Namun, aktivitas gempabumi dangkal juga terdapat di daratan Pulau Bali dan Cekungan Bali di arah Utara Pulau Bali. Cekungan ini terjadi akibat adanya struktur geologi sesar naik belakang busur. Penelitian-penelitian terdahulu telah menemukan adanya patahan di utara pulau Alor dan Pantar di sisi timur busur belakang zona subduksi Jawa yang dikenal sebagai sesar naik belakang busur[21].

2.3 Likuifaksi

2.3.1 Teori Likuifaksi

Secara umum likuifaksi didefinisikan sebagai proses berkurangnya kekuatan lapisan tanah dan kenaikan tegangan air pori akibat getaran. Getaran yang dimaksud dapat berupa getaran yang berasal dari gempabumi maupun yang berasal dari pembebanan lainnya. Ketika mengalami getaran tersebut sifat lapisan tanah berubah menjadi seperti cairan sehingga tak mampu menopang beban bangunan di dalam atau di atasnya[11]–[13].

Pada saat mengalami getaran, air akan memberikan suatu tekanan di partikel-partikel tanah sehingga mempengaruhi kepadatan dari tanah tersebut. Sebelum terjadinya gempabumi, tekanan air pada suatu tanah relatif rendah. Tekanan air dalam tanah akan meningkat setelah menerima getaran, sehingga partikel-partikel tanah dapat bergerak dengan mudah. Partikel-partikel tanah tersebut tidak lagi memiliki kekuatan atau daya dukung, sehingga daya dukung tanah sepenuhnya berasal dari tegangan air pori. Pada kondisi seperti ini, tanah telah berbentuk cairan dan tidak lagi memiliki kestabilan. Sehingga beban-beban yang ada di atas tanah seperti beban dari struktur bangunan akan ambles ke dalam tanah (Gambar 2.2)[22].



Gambar 2. 2 Bangunan yang ambles karena hilangnya daya dukung tanah akibat likuifaksi (.digambar ulang oleh penulis)[23]

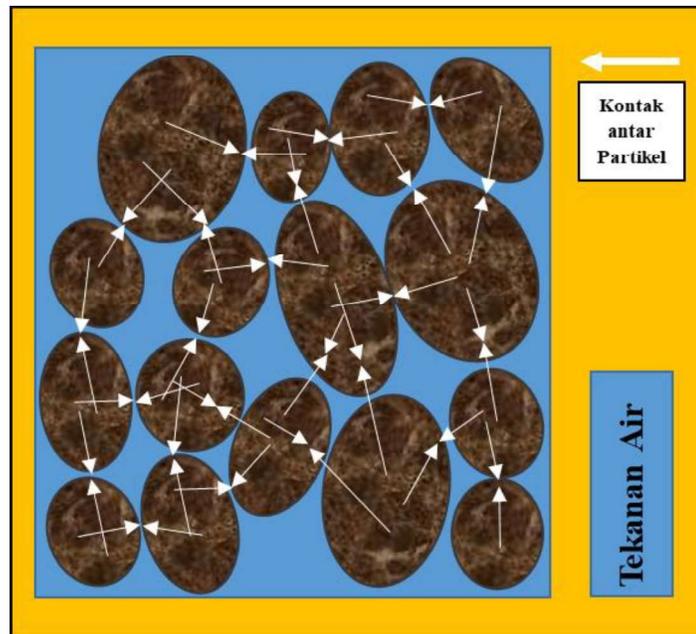
Pada Gambar 2.2 merupakan kondisi bangunan sebelum dan saat terjadinya gempa bumi. Sebelum terjadinya gempa bumi, tegangan yang dimiliki tanah yaitu gaya berat dan gaya normal (tegangan vertikal). Lapisan tanah akan tetap stabil dikarenakan tidak ada gangguan, sehingga tidak ada gaya yang bekerja. Pada saat terjadinya gempa bumi, gempa akan memiliki gelombang yang bergerak ke segala arah. Gelombang gempa tersebut memiliki tegangan geser (gelombang permukaan) dan mengakibatkan perubahan dari gaya yang bekerja. Gaya yang bekerja berasal dari percepatan tanah pada saat terjadinya gempa bumi, tegangan air menjadi tidak seimbang dan mengakibatkan adanya gaya angkat pada partikel-partikel tanah. Akibat kondisi tersebut tekanan air relatif tinggi, sehingga air akan menuju pada tekanan yang cenderung lebih rendah. Tekanan air tersebut mengakibatkan hilangnya daya dukung antar partikel tanah yang akan menyebabkan terjadinya likuifaksi.

Likuifaksi terjadi hanya pada tanah yang jenuh air, sehingga kedalaman muka air tanah berpengaruh terhadap kerentanan likuifaksi. Kerentanan terhadap likuifaksi akan menurun dengan bertambah dalamnya muka air tanah. Faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya likuifaksi dapat dikelompokkan menjadi dua bagian yaitu gaya gempa (intensitas dan arah getaran) serta kondisi tanah dan lingkungan

(properti tanah, kondisi geografi, topografi, muka air tanah dsb)[12], [22], [24], [25].

2.3.2 Proses Terjadinya Likuifaksi

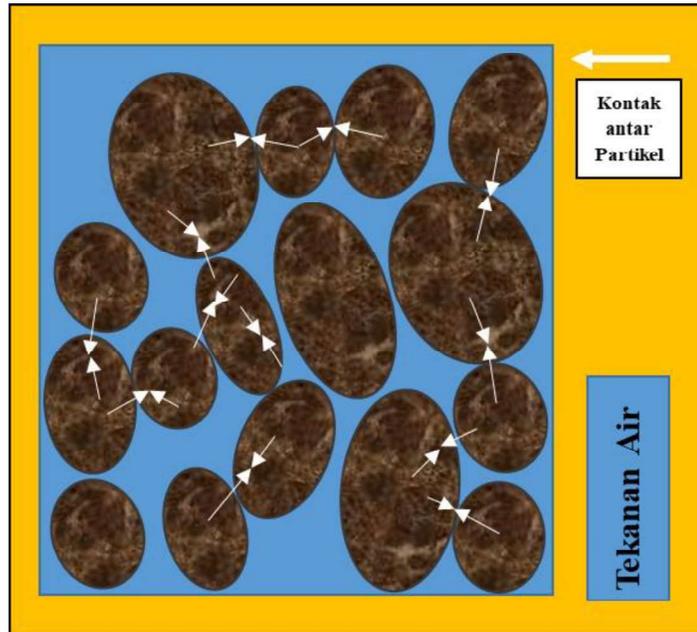
Untuk memahami proses terjadinya likuifaksi, perlu diketahui bahwa suatu endapan tanah terdiri dari partikel-partikel. Setiap partikel tersebut letaknya saling berdekatan, sehingga partikel memiliki kontak dengan partikel yang lain (Gambar 2.3). Dengan adanya kontak antar partikel tersebut, tanah memiliki suatu kekuatan untuk menahan beban di atasnya, sebab kondisi seperti ini menjadikan beban yang berada di atas tanah akan dipikul secara bersamaan oleh seluruh partikel. Sehingga pada akhirnya beban tersebut akan disalurkan ke lapisan batuan dasar di bagian bawah lapisan tanah tersebut.



Gambar 2. 3 Kondisi partikel tanah saat normal sebelum terjadinya kenaikan tegangan air pori (.digambar ulang oleh penulis)[26]

Pada kondisi tersebut (Gambar 2.3), sebagian besar rongga antar partikel tanah dipenuhi oleh air. Air akan terdesak ketika menerima tekanan dari getaran secara tiba-tiba, sehingga tekanan air meningkat untuk mencari jalan keluar. Namun, pada saat terjadinya gempa, air tidak memiliki waktu yang cukup untuk berdispersi

keluar dari tanah melalui rongga-rongga tanah. Sebagai gantinya air tersebut mendesak partikel-partikel tanah, sehingga beberapa partikel tanah yang sebelumnya berhubungan akan menjadi menjauh (Gambar 2.4). Pada akhirnya partikel tanah tidak dapat mendistribusikan beban dengan maksimal.



Gambar 2. 4 Kondisi partikel tanah saat mengalami getaran (.digambar ulang oleh penulis)[26]

Pada kondisi tersebut (Gambar 2.4), sebagian besar beban dipikul oleh air. Tekanan air pori dapat menjadi sangat meningkat, sehingga akan lebih banyak partikel yang terdorong sehingga tidak ada lagi partikel tanah yang saling berhubungan[26].

2.3.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Likuifaksi

Banyak faktor yang akan mempengaruhi terjadi atau tidaknya potensi likuifaksi. Diantara faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya likuifaksi adalah sebagai berikut[27]:

1. Karakteristik Getaran (*Vibration Characteristics*)

Peristiwa likuifaksi akan dipengaruhi oleh tipe getaran, seperti getaran akibat gempa bumi. Kemungkinan terjadinya likuifaksi juga dipengaruhi oleh percepatan tanah dan durasi gempa. Semakin besar percepatan tanah akibat gempa dan durasi getaran gempa semakin lama, maka potensi likuifaksi akan

semakin besar. Percepatan tanah yang besar dan durasi getaran yang lama menunjukkan hubungan gempa dengan magnitudo yang besar. Getaran yang harmonik kontinu (*steady state vibrations*) hanya akan menimbulkan terjadinya kenaikan tegangan air pori yang akan menyebabkan likuifaksi setelah beberapa kali diberikan beban siklik.

2. Jenis Tanah

Jenis tanah yang dimaksud bukan hanya tanah kohesif (*cohesive soil*) maupun tanah non-kohesif (*non-cohesive soil*), tetapi juga adanya kandungan lempung (*finer*) dan indeks plastisitas (PI). Beberapa peneliti menyampaikan bahwa potensi likuifaksi akan mudah terjadi pada tanah non-kohesif (*non-cohesive soil*) atau tanah pasir lepas dengan butir-butir halus/kecil maupun sedikit tanah campuran dengan kandungan indeks plastisitas (PI) yang rendah. Kandungan lempung (*finer*) yang relatif besar akan memperbaiki gradasi butiran dan meningkatkan kapasitas, sehingga akan menurunkan potensi likuifaksi.

3. Muka Air Tanah (*Ground Water Table*)

Kedudukan muka air tanah dipengaruhi oleh beberapa hal diantaranya adalah curah hujan, elevasi tanah dan jenis tanah. Telah disampaikan sebelumnya, likuifaksi hanya akan terjadi apabila pada kondisi jenuh air. Lingkungan yang terdapat tanah pasir seperti bantaran hilir sungai, danau, persawahan atau di tepi laut memiliki muka air tanah relatif tinggi yang akan berpotensi terjadinya likuifaksi. Muka air tanah yang tinggi akan mengakibatkan lapisan atas tanah pasir yang memiliki tekanan overburden total (*overburden pressure*) relatif kecil dan akan bersifat jenuh air. Likuifaksi akan mudah terjadi apabila *overburden pressure* yang relatif kecil, butir-butir pasir halus yang seragam dan kondisi jenuh air.

4. Distribusi Diameter Butir

Hasil test laboratorium menunjukkan bahwa tanah pasir yang digetarkan akan dipengaruhi oleh distribusi diameter butir-butir. Presentase dari kerikil, pasir, lanau, dan lempung yang dikandung oleh tanah dapat ditentukan dari grafik

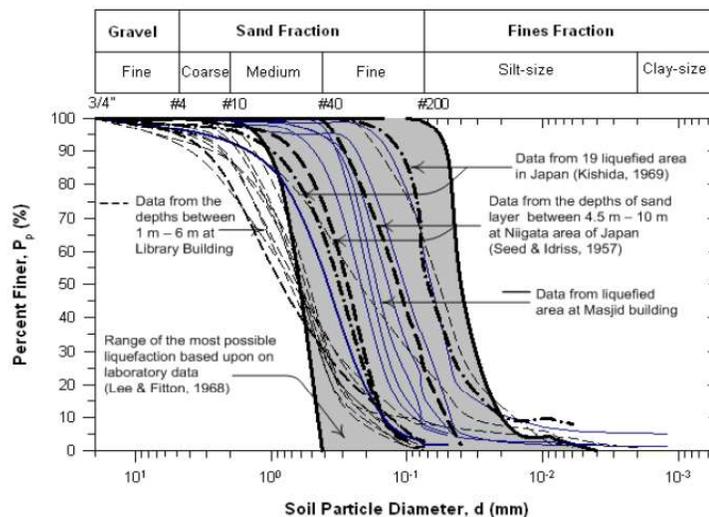
distribusi diameter pasir (Gambar 2.5). Dalam USCS (*Unified Soil Classification System*), suatu tanah diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama yaitu[28]:

a. Tanah berbutir kasar (*coarse-grained soils*)

Dalam kelompok tanah berbutir kasar yaitu tanah yang lolos melalui saringan kurang dari 50% dan memiliki ukuran butiran lebih kecil dari 0.06 mm. Sifat tanah berbutir kasar bergantung pada ukuran butirnya, maka dibagi menjadi dua kelompok yaitu kerikil dan pasir.

b. Tanah berbutir halus (*fine-grained soils*)

Dalam kelompok tanah berbutir halus yaitu tanah yang lolos melalui saringan lebih dari 50% dan memiliki ukuran butiran lebih kecil dari 0.06 mm. Pada tanah berbutir halus, ukuran butir tidak digunakan untuk klasifikasi karena bergantung pada jenis mineralnya. Oleh karena itu, pembagian menjadi dua kelompok, yaitu lanau dan lempung.



Gambar 2. 5 Distribusi diameter pasir[29]

Menurut Prakash (1981) dan Day (2002) butir-butir pasir yang halus dan seragam cenderung lebih berbahaya terhadap potensi likuifaksi dibandingkan dengan butir-butir yang relatif kasar. Sebaliknya, distribusi butiran yang baik yaitu butir-butir yang lebih halus (misalnya *fines*) mengisi di antara butir-butir yang lebih kasar dan akan mengakibatkan massa tanah pasir lebih tahan terhadap kemungkinan terjadinya likuifaksi. Hal ini disebabkan oleh butir-butir yang halus dan peningkatan tegangan air pori selama beban dinamik akan lebih mudah

direduksi dibandingkan dengan butir-butir yang halus dan seragam. Apabila butir-butir yang halus dan seragam cenderung lebih mudah terjadi likuifaksi maka sebaliknya butir-butir pasir yang besar/kasar akan relatif sulit terjadi likuifaksi.

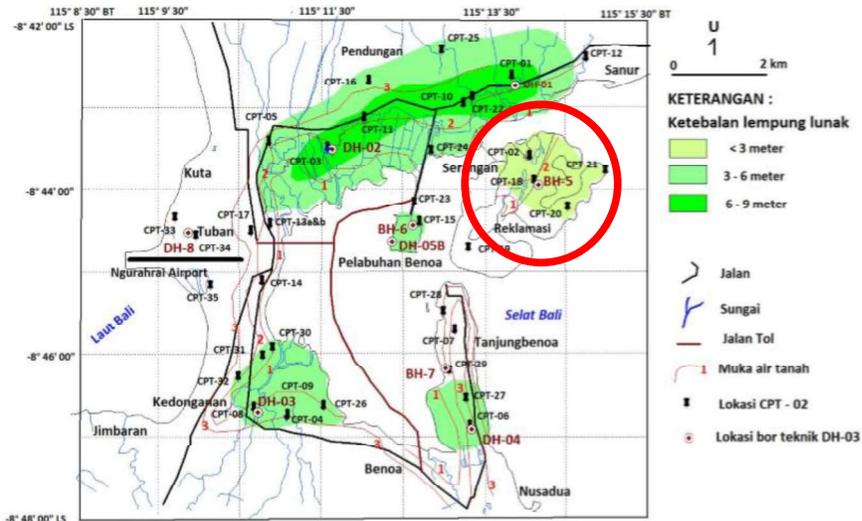
5. Kepadatan Awal

Telah disampaikan sebelumnya, bahwa perilaku tanah pasir yang mengalami beban dinamik/getaran akan dipengaruhi oleh kepadatan relatif pasir yang bersangkutan. Dengan demikian kepadatan relatif dipakai sebagai kontrol terjadinya likuifaksi.

Tegangan air pori selama terjadinya getaran akan berkurang pada tanah pasir yang relatif lebih padat. Pada hasil uji laboratorium menunjukkan bahwa tanah pasir yang relatif padat mempunyai modulus geser yang lebih besar dibandingkan dengan tanah/pasir lepas. Dengan hasil tersebut menunjukkan bahwa akibat adanya beban dinamik, tanah pasir lepas akan mengalami regangan geser *settlement* yang lebih besar dibandingkan tanah/pasir yang padat. Hal tersebut yang mengakibatkan pasir lepas dengan kepadatan relatif yang kecil akan lebih mudah terjadinya likuifaksi.

2.3.4 Potensi Likuifaksi di Daerah Reklamasi

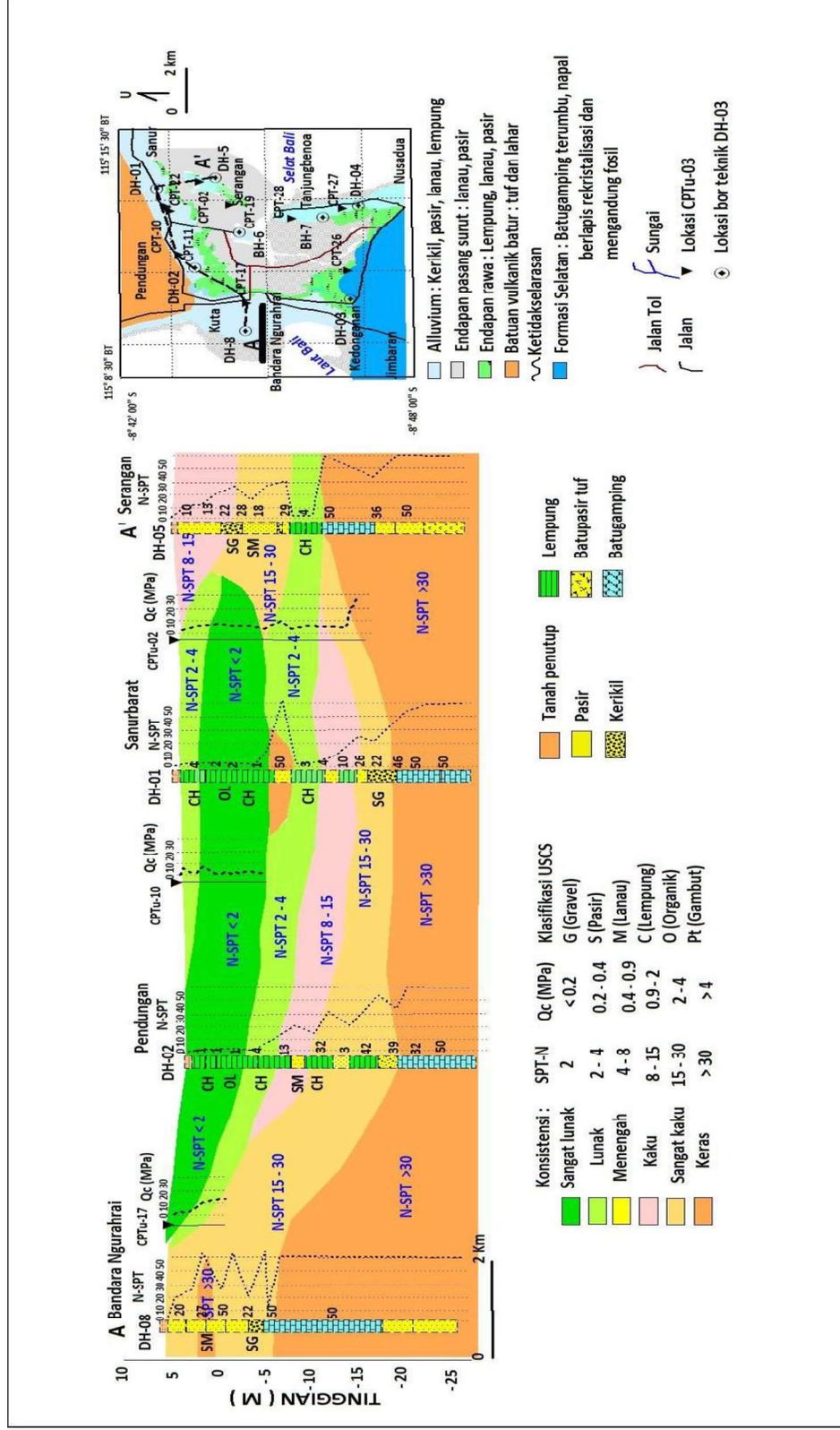
Perubahan tata ruang yang terjadi di Pulau Serangan akibat reklamasi tahun 1995-1998 terbagi menjadi dua fase waktu yaitu pra-reklamasi sebelum tahun 1995 dan pasca reklamasi setelah tahun 1998[30]. Reklamasi Serangan dianggap berpotensi besar dalam merusak ekosistem sebagai kawasan konservasi. Wilayah Pulau Serangan sebagai kawasan pengembangan tata ruang dan infrastruktur perlu mendapatkan perhatian terkait dengan kondisi geologi teknik bawah permukaan dan ancaman bahaya geologinya[31]. Penelitian Soebowo (2016) telah mengidentifikasi karakteristik geologi teknik sedimen bawah permukaan yang berkaitan dengan ancaman bahaya amblesan dan likuifaksi. Hasil penelitian menunjukkan ketebalan sedimen kuartar mencapai kurang lebih 200 meter, terdiri dari lempung, lanau-lempung, lanau-pasir lempungan, sisipan kerikil, pasir kasar dan batugamping sebagai batuan dasar (Gambar 2.6)[32].



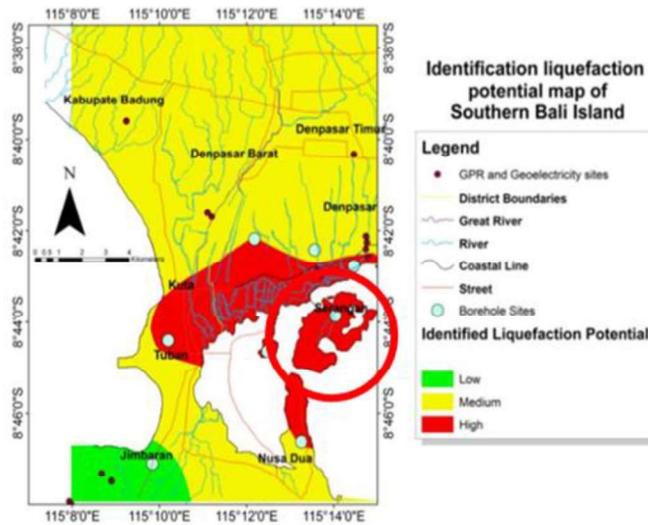
Gambar 2. 6 Peta sebaran ketebalan lempung lunak yang berkaitan dengan amblesan dan likuifaksi[32]

Pada penelitian nya, Soebowo (2016) menyajikan penampang geologi teknik dan konsistensi material lempung lunak – sangat lunak dan sebaran ketebalan lempung lunak (Gambar 2.7)[32].

Siregar dkk (2016) juga melakukan penelitian tentang identifikasi daerah yang berpotensi likuifaksi di Bali Selatan. Hasil penelitian berupa peta sebaran daerah yang berpotensi untuk terjadinya likuifaksi (Gambar 2.8). Berdasarkan hasil tersebut, daerah Serangan yakni daerah reklamasi merupakan daerah yang berpotensi tinggi untuk terjadinya likuifaksi dikarenakan terdapat material berupa pasir dan lempung dan memiliki kedalaman muka air tanah (2-5) meter[15].

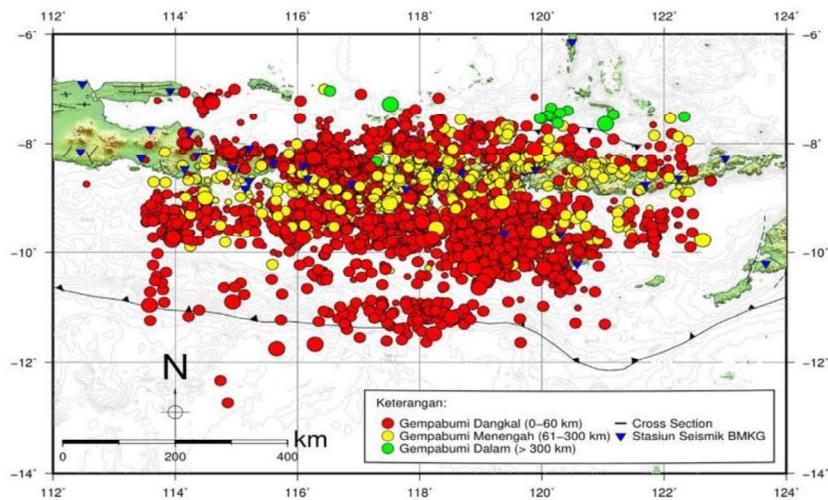


Gambar 2. 7 Perampang geologi teknik dan sifat konsistensi bawah permukaan di Bali Selatan[32]



Gambar 2. 8 Peta sebaran daerah potensi likuifaksi[15]

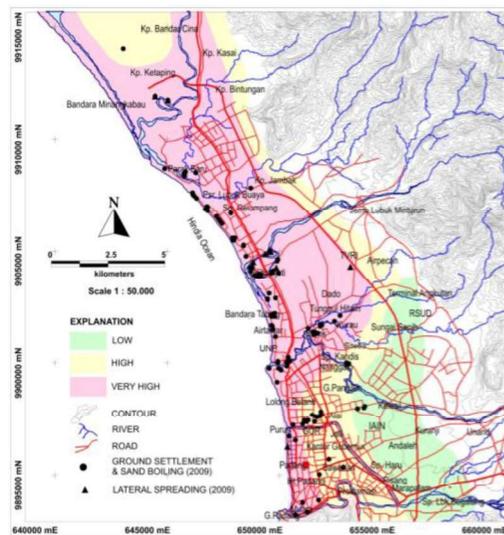
Selain Soebowo (2016), LIPI (2010) juga melakukan penelitian tentang likuifaksi Bali Selatan yang menunjukkan bahwa wilayah Bali Selatan merupakan wilayah pantai yang berupa endapan dataran holosen yang terdiri dari material lepas berupa kerikil, pasir, lanau, dan tanah liat. Endapan dataran pantai tersebut merupakan jalur zona seismik dengan seismisitas yang cukup tinggi dan aktif (Gambar 2.9). Wilayah ini kemudian memiliki kerentanan bahaya gempabumi yang tinggi karena wilayah ini berada ± 150 km sebelah selatan zona subduksi yang aktif, sehingga sangat berbahaya jika dilakukan reklamasi[33].



Gambar 2. 9 Peta seismisitas Pulau Bali dan sekitarnya[34]

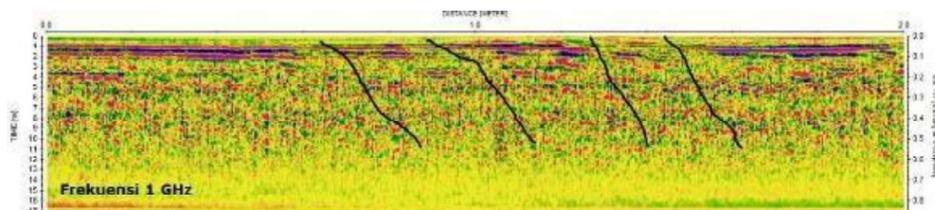
2.4 Hasil-Hasil Penelitian Terkait

Tohari dkk (2011) telah melakukan penelitian tentang potensi likuifaksi dan pengamatan likuifaksi yang terjadi di Kota Padang. Hasil dari penelitian ini yaitu dengan dibuatnya peta mikrozonasi (Gambar 2.10) menggunakan data dari analisis potensi likuifaksi dan indeks potensi likuifaksi. Likuifaksi yang terjadi di Kota Padang diakibatkan oleh endapan alluvial kuarter pada kedalaman yang dangkal, terutama di sepanjang garis pantai yang terdapat pasir alluvial[35].



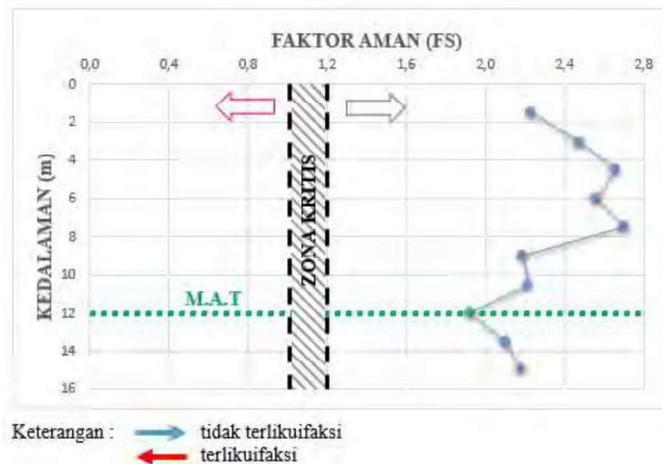
Gambar 2. 10 Peta kerentanan likuifaksi Kota Padang[35]

Aji dkk (2016) dalam penelitiannya telah mengidentifikasi pola retakan (Gambar 2.11) yang muncul pada urugan bendungan Batu Tegi Lampung dengan menggunakan metode *Ground Penetrating Radar* (GPR). Pengolahan serta interpretasi data pada penelitian ini menggunakan *software* ReflexW 7.0 yang nanti hasil dari penelitian ini dapat dipergunakan untuk membantu perencanaan evaluasi desain, konstruksi pada urugan bendungan, dan perencanaan mitigasi[36].



Gambar 2. 11 Pola retakan lintasan pertama pada frekuensi 1 GHz[36]

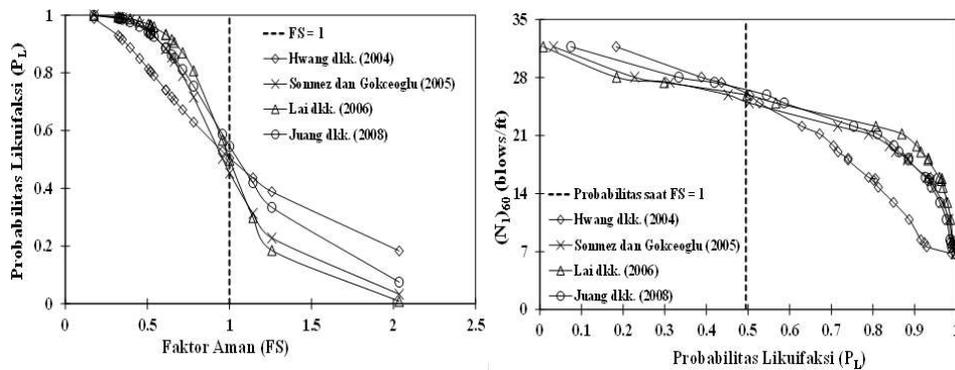
Kuningsih dkk (2017) telah melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui bagaimana kondisi tanah dasar fondasi Candi Prambanan aman terhadap ancaman likuifkasi. Penelitian ini menggunakan *simplified procedure* untuk mengestimasi potensi likuifaksi dengan perbandingan dua variable antara gaya seismik pada lapisan tanah yang disebut *cyclic stress ratio* dan kapasitas tanah dalam menahan likuifaksi yaitu *cyclic resistance ratio*. Data yang digunakan adalah N-SPT yaitu di pelataran Candi Prambanan dan hasil dari penelitian ini menunjukkan kondisi ketahanan tanah dasar fondasi Candi Prambanan aman terhadap potensi likuifaksi berdasarkan nilai *Factor of Safety* (FS) > 1.2 dengan kondisi muka air tanah pada kedalaman 12 m (Gambar 2.12)[37].



Gambar 2. 12 Hubungan faktor aman (FS) dan kedalaman[37]

Mandasari dkk (2017) telah mengidentifikasi penentuan potensi likuifaksi berdasarkan *Poisson's ratio* dan jenis lapisan tanahnya di Kecamatan Meurah Dua Kabupaten Pidie Jaya. Nilai *Poisson's ratio* dapat dihitung berdasarkan nilai kecepatan gelombang kompresi (V_p) dan nilai kecepatan gelombang geser (V_s) yang didapatkan berdasarkan metode seismik refraksi dan *Multichannel Analysis of Surface Wave* (MASW). Hasil penelitian ini yaitu potensi likuifaksi terbesar di desa Pante Beureune dan potensi likuifaksi terkecil di desa Meunasah Raya yang ditunjukkan oleh nilai *Poisson's ratio* yaitu adanya lapisan pasir dan lempung jenuh. Lapisan pasir memiliki porositas yang lebih besar daripada lapisan lempung jenuh dan porositas yang besar dapat menyebabkan potensi likuifaksi[38].

Mase (2018) dalam penelitiannya melakukan analisis potensi likuifaksi di kawasan pesisir Kota Bengkulu berdasarkan data SPT menggunakan metode empiris, yaitu metode yang memiliki nilai faktor bobot kesalahan terendah. Metode tersebut selanjutnya digunakan untuk menentukan faktor keamanan likuifaksi nilai probabilitas likuifaksi (P_L). Hasil penelitian berdasarkan analisis menggunakan metode *Idriss-Boulanger* menunjukkan likuifaksi sangat berpotensi pada daerah penelitian dengan nilai probabilitas sebesar 0.495 (Gambar 2.13) khususnya pada tanah pasir sedang sampai dengan padat[39].



Gambar 2. 13 Analisis potensi likuifaksi berdasarkan probabilitas likuifaksi[39]

Dan Farichah dkk (2019) juga telah melakukan penelitian analisis potensi likuifaksi di Surabaya Pusat. Analisis awal pada penelitian untuk mengetahui potensi likuifaksi dilakukan berdasarkan aspek gradasi tanah, *relative density* (DR), *fine content* (FC), derajat kejenuhan (SR), dan jumlah pukulan SPT dan analisis lanjutan yaitu menghitung *cyclic shear ratio* (CSR), *cyclic resistance ratio* (CRR), dan *factor of safety* (FS) dengan menggunakan metode Youd dan Idriss 2001 dan metode Idriss 2008. Hasil penelitian berdasarkan analisis awal, pada kedalaman 1-7 m masih terdapat potensi likuifaksi dan pada kedalaman lebih dari 22 m sudah tidak terdapat potensi likuifaksi dan hasil penelitian berdasarkan analisis lanjutan yaitu hampir semua kedalaman memiliki potensi likuifaksi hingga kedalaman 17 m[40].

2.5 Metode Ground Penetrating Radar (GPR)

Ground Penetrating Radar (GPR) pada bidang geofisika sering dikenal sebagai Ground Radar atau Georadar, metoda geofisika ini menggunakan sinyal gelombang elektromagnetik[41]. *Ground Penetrating Radar* (GPR) sering digunakan sebagai alat bantu penelitian geologi bawah permukaan dan memberikan resolusi tinggi dari permukaan dangkal (0-10 m)[42], [43]. Metode georadar didasarkan atas persamaan Maxwell yang merupakan perumusan matematis yang berkaitan dengan semua fenomena elektromagnetik. Persamaan Maxwell menjelaskan bagaimana medan listrik dan medan magnet dapat terjadi yang dirumuskan untuk medium *isotropic heterogen* sebagai berikut[44]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.4)$$

dimana:

H = Kuat medan magnet (A/m)

E = Kuat medan listrik (V/m)

D = Perpindahan elektrik (As/m²)

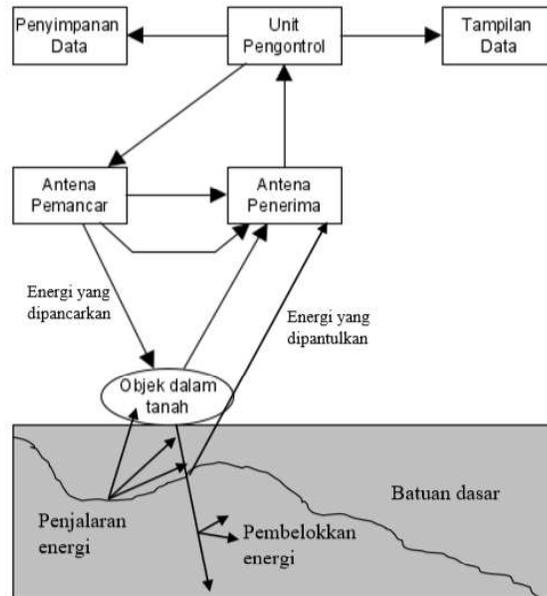
B = Induksi magnet (Vs/m²)

J = Rapat arus (A/m²)

ρ = Rapat muatan (As/m²)

Perambatan gelombang radar (1-1000 MHz) didasarkan pada prinsip refleksi gelombang elektromagnetik[43]. Prinsip penggunaan metode GPR tidak jauh berbeda dengan metode seismik pantul, seperti identifikasi fasies dan sekuen lapisan bawah permukaan. Teknik penggunaan metode GPR (Gambar 2.14) adalah sistem *Electromagnetic Subsurface Profiling* (ESP), dengan cara memanfaatkan pengembalian gelombang elektromagnet yang dipancarkan melalui permukaan

tanah dengan perantara antenna. Pemancaran dan pengembalian gelombang elektromagnet berlangsung cepat sekali yaitu dalam satuan waktu *nanosecond*[42].



Gambar 2. 14 Diagram cara kerja GPR (.digambar ulang oleh penulis)[43]

Gelombang elektromagnetik akan dipancarkan ke dalam bumi dan direkam oleh antenna pada saat gelombang telah mencapai ke permukaan. Gelombang elektromagnetik diteruskan, dipantulkan dan dihamburkan oleh struktur permukaan dan anomali jika terdapat di bawah permukaan. Gelombang elektromagnetik yang dipantulkan dan dihamburkan akan direkam oleh antenna di permukaan[41].

Untuk mendeteksi suatu objek diperlukan perbedaan parameter kelistrikan dari medium yang dilewati gelombang radar. Perbedaan parameter kelistrikan yaitu permitivitas listrik, konduktivitas, dan permeabilitas magnetik. Sifat elektromagnetik suatu material bergantung pada komposisi dan kandungan air di dalamnya, dimana keduanya merupakan pengaruh utama pada perambatan kecepatan gelombang radar dan atenuasi gelombang elektromagnetik dalam material[46]. Dalam penjalarannya di dalam batuan, gelombang elektromagnetik pada persamaan Maxwell dihubungkan dengan medan bumi menggunakan persamaan-persamaan material sebagai berikut[44]:

$$J = \sigma E \tag{2.5}$$

$$D = \varepsilon \cdot E = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r E \quad (2.6)$$

$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot \mu_m \cdot H \quad (2.7)$$

dimana:

σ = Konduktivitas (Siemens/m)

ε = Permittivitas medium (Farad/m); $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$

ε_r = Permittivitas relatif medium

ε_0 = Permittivitas ruang vakum = 8.85×10^{-12} (Farrad/m)

μ = Permeabilitas magnet medium (Henry/m)

μ_m = Permeabilitas magnet relatif medium (Henry/m)

μ_0 = Permeabilitas magnet dalam ruang vakum = $4 \pi \times 10^{-7}$ (Henry/m)

Keberhasilan metode GPR bergantung pada variasi bawah permukaan yang dapat menyebabkan gelombang radar tertransmisikan dan ter-refleksikan. Refleksi yang ditimbulkan oleh radiasi gelombang elektromagnetik timbul akibat adanya perbedaan antara konstanta dielektrik relatif antara lapisan yang berbatasan. Perbandingan energi yang direfleksikan disebut koefisien refleksi yang ditentukan oleh perbedaan cepat rambat gelombang elektromagnetik dan perbedaan dari konstanta dielektrik relatif dari medium yang berdekatan. Dalam perambatannya, amplitudo sinyal akan mengalami pelemahan karena adanya energi yang hilang akibat terjadinya refleksi dan transmisi pada tiap batas medium dan terjadi setiap gelombang radar melewati batas antar medium. Faktor kehilangan energi disebabkan oleh perubahan energi elektromagnetik menjadi panas. Sifat dielektrik dan sifat listrik medium yang dilewati oleh sinyal radar menjadi penyebab dasar terjadinya atenuasi. Faktor atenuasi bergantung pada konduktivitas, permittivitas, dan permeabilitas magnetik medium[45].

2.6 Metode Probabilistik

2.5.1 Probabilitas Kegagalan (*Probability of Failure*)

Probability of failure P_f merupakan kemungkinan terjadinya kerusakan massa tanah sehingga terjadi likuifaksi. Dua hal pokok yang akan dibandingkan adalah *external load* (S) dan *internal capacity/resistance* (R). Mc Gregor (1976) dan Wang & Yang (2001) memberikan penjelasan hubungan antara keduanya dengan ketentuan:

1. $Z = (R-S) < 0$, maka akan terjadi *failure* atau terjadi likuifaksi
2. $Z = (R-S) = 0$, maka akan terjadi kondisi *unstable* yaitu kondisi batas likuifaksi
3. $Z = (R-S) > 0$, maka tidak akan terjadi likuifaksi

Menurut prinsip statistik, apabila R dan S bersifat variabel acak (*random variable*) maka potensi likuifaksi Z akan terdistribusi normal. Probabilitas terjadinya likuifaksi dapat dinyatakan dalam persamaan berikut,

$$P_f = P(Z < 0) = \int_0^{\infty} f_z(z) \cdot dz = F_z(0) \quad (2.8)$$

dimana:

P_f = Probabilitas terjadinya likuifaksi

$f_z(z)$ = Fungsi probabilitas kerapatan (PDF)

$F_z(z)$ = Fungsi probabilitas kumulatif (CDF)

Apabila *mean values* untuk R dan S masing-masing adalah μ_R dan μ_S (Gambar 2.15) dan standar deviasi R dan S masing-masing adalah σ_R dan σ_S , maka menurut *first-order* dan *second moment method* dalam ilmu statistik, nilai-nilai mean value Z μ_z , deviasi standar σ_z dan koefisien variasi δ_z dinyatakan dalam persamaan berikut[27],

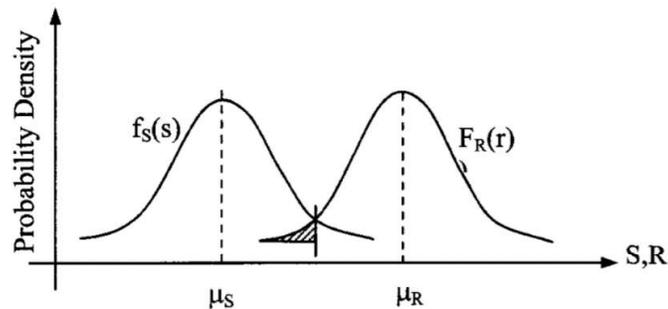
$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S \quad (2.9)$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma^2_R + \sigma^2_S} \quad (2.10)$$

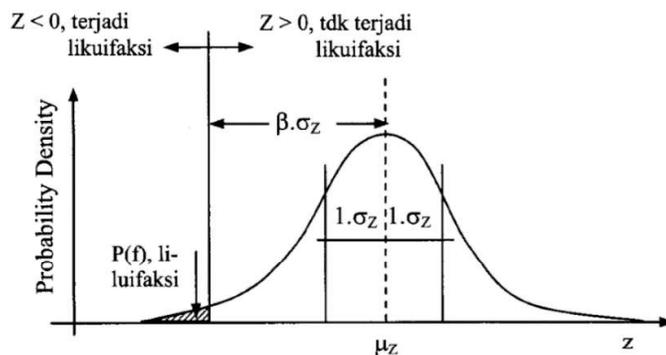
$$\delta_Z = \frac{\sigma_Z}{\mu_Z} = \frac{\sqrt{\sigma^2_R + \sigma^2_S}}{\mu_R - \mu_S} \quad (2.11)$$

2.5.2 Indeks Keandalan (*Reliability Index*)

Probabilitas untuk terjadinya likuifaksi ditunjukkan oleh seberapa besar luasan terasir (Gambar 2.15) dan (Gambar 2.16), yang mana daerah tersebut adalah kondisi $R < S$. Agar probabilitas potensi likuifaksi kecil, maka luasan terasir harus semakin kecil atau batas terasir digeser ke arah kiri pada posisi $\beta \cdot \sigma_Z$ dari *mean value* μ_Z (Gambar 2.16).



Gambar 2. 15 Distribusi probabilitas kerapatan untuk potensi likuifaksi[27]



Gambar 2. 16 Batas terjadinya likuifaksi dan indeks realibilitas β [27]

β merupakan indeks keandalan (*reliability index*), semakin besar nilai β maka probabilitas potensi likuifaksi akan semakin kecil. Indeks keandalan dapat ditentukan dengan (Hwang dan Yang, 2001),

$$\beta = \frac{1}{\delta_z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma^2 R + \sigma^2 S}} \quad (2.12)$$

Dan *mean value* μ_z dapat diketahui melalui,

$$\mu_z = \beta \cdot \sigma_z \quad (2.13)$$

Wang dan Yang (2001) memberikan nilai indeks keandalan β menjadi [27],

$$\beta = -0,013 + \frac{\ln(FS)}{0,7758} \quad (2.14)$$

dimana:

$$FS = \text{factor of safety}; FS = \frac{\mu_R}{\mu_S}$$

2.5.3 Magnitude Scaling Factor (MSF)

Magnitude Scaling Factor (MSF) digunakan untuk menentukan CSR atau CRR yang menggunakan nilai $M = 7.5$ [46]. Pada dasarnya persamaan CSR berlaku untuk gempa dengan magnitudo tidak sama dengan 7.5, sedangkan untuk gempa dengan magnitudo tidak sama dengan 7.5 menggunakan faktor koreksi MSF terhadap persamaan CSR yakni sebagai berikut,

$$CSR = 0.65 \frac{\sigma}{\sigma'} \frac{a_{\max}}{g} \frac{r_d}{MSF} \quad (2.15)$$

Untuk gempa dengan magnitudo lebih besar dari 7.5 menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \quad (2.16)$$

Dan untuk gempa dengan magnitudo lebih kecil dari 7.5 menggunakan persamaan sebagai berikut[47],

$$MSF = \left(\frac{M_w}{7.5} \right)^{-3.3} \quad (2.17)$$

2.5.4 Nilai *Cyclic Stress Ratio* μ_{CSR} dan Nilai *Cyclic Resistance Ratio*

Cyclic Stress Ratio (CSR) yaitu nilai perbandingan antara tegangan geser rata-rata yang diakibatkan oleh gempa dengan tegangan vertikal efektif pada setiap lapisan tanah[48].

Mean value untuk *cyclic stress ratio* μ_{CSR} dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut[27],

$$\mu_{CSR,M} = 0,65 \cdot \frac{\ddot{y}_b}{g} \cdot \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \cdot \gamma_d \cdot \left(\frac{1}{MSF} \right) \quad (2.18)$$

Sedangkan nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) yaitu nilai tahanan suatu lapisan tanah terhadap tegangan siklik. Nilai CRR diperoleh berdasarkan hasil pengujian lapangan yaitu hasil pengujian *Standard Penetration Test* (SPT)[48].

Mean value untuk *cyclic resistance ratio* μ_{CRR} dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut[27],

$$\mu_{CRR} = \exp(-2,63 + 0,06006(N_1)_{60} + 0,000507(N_1)_{60}^2) \quad (2.19)$$

2.7 Percepatan Tanah

Percepatan merupakan parameter yang menyatakan perubahan kecepatan mulai dari keadaan diam sampai pada kecepatan tertentu. Percepatan getaran tanah berupa gangguan perlu dikaji pada setiap terjadinya gempabumi, kemudian digunakan

percepatan getaran tanah maksimum agar dapat memberikan gambaran akibat paling parah pada daerah yang terjadi gempa bumi. Percepatan getaran tanah terbesar yang terjadi pada suatu daerah akibat gempa bumi disebut dengan percepatan getaran tanah maksimum. Semakin besar nilai percepatan getaran tanah maksimum pada suatu daerah, maka semakin besar bahaya dan risiko gempa bumi yang akan terjadi[49].

Pada umumnya percepatan gerakan tanah maksimum merupakan fungsi dari suatu magnitudo dan kondisi tanah untuk jarak[49]. Fungsi atenuasi digunakan untuk memperkirakan besarnya percepatan getaran tanah maksimum (y_{\max}) dalam menganalisis resiko gempa bumi apabila daerah yang ditinjau tidak mempunyai data rekaman gempa. Fungsi atenuasi merupakan suatu fungsi yang menggambarkan hubungan antara intensitas gerakan tanah setempat (i), magnitudo (M), dan jarak dari titik sumber gempa bumi yang dapat mengimplementasikan resiko kegempaan dalam perencanaan bangunan yang tahan akan gempa bumi[50]. Fungsi atenuasi dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu sebagai berikut[51]:

1. Kekuatan ukuran gempa bumi (M_L, M_S, M_b, M_w)
2. Jarak episenter
3. Kondisi tanah daerah penelitian

Perumusan fungsi atenuasi gelombang seismik (gelombang gempa) telah banyak digunakan sebelumnya. Pada penelitian ini menggunakan fungsi atenuasi yang dirumuskan oleh Campbell (1989). Persamaan Campbell (1989) menggunakan parameter magnitudo lokal (M_L) gempa bumi yang dinyatakan dalam persamaan berikut[49],

$$(y_{\max}) = \exp[(-2.501) + (0.623 \cdot M_L) - \ln(R + 7.28)] \quad (2.20)$$

dimana:

(y_{\max}) = Percepatan tanah maksimum (gal)

M_L = Magnitudo lokal gempa bumi

R = Jarak episenter (km)

