SKRIPSI

TINGKAT KERUSAKAN MINERAL PADA LOKASI LIKUEFAKSI DAERAH SIBALAYA KABUPATEN SIGI PROVINSI SULAWESI TENGAH

Disusun dan diajukan oleh :

MUH. ZAHRIL

D611 16 308

DEPARTEMEN TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR

2021

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

TINGKAT KERUSAKAN MINERAL PADA LOKASI LIKUEFAKSI DAERAH SIBALAYA KABUPATEN SIGI PROVINSI SULAWESI TENGAH

Disusun dan diajukan oleh :

MUH. ZAHRIL

D611 16 308

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
pada tanggal 28 Desember 2020
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,	Pembimbing Pendamping
Dr. Ir. H. Hamid Umar, MS.	Ir. Agustinus Tupenalay, M.Si
NIP : 19601202 198811 1 001	NIP : 19771214 200501 1 002

Ketua Program Studi,

Dr. Eng. Asri Jaya HS, ST., M.T.
NIP : 19690924 199802 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini;

Nama	: Muh. Zahril
NIM	: D611 16 308
Program Studi	: Teknik Geologi
Jenjang	: S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

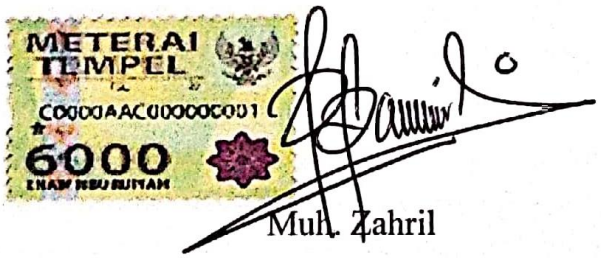
Tingkat Kerusakan Mineral Pada Lokasi Likuefaksi Daerah Sibalaya Kabupaten Sigi Provinsi Sulawesi Tengah

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 28 Desember 2020

Yang Menyatakan



Muh. Zahril

ABSTRAK

Lokasi penelitian secara administratif termasuk ke dalam wilayah Kecamatan Tanambulava Kabupaten Sigi Provinsi Sulawesi Tengah. Secara geografis daerah penelitian ini terletak pada koordinat 119° 55' 00" - 119° 55’ 40" Bujur Timur dan 01° 08' 30" – 01° 09' 00" Lintang Selatan.

Maksud dari penelitian ini adalah untuk menganalisa aspek komposisi mineral penyusun, struktur, tingkat kerusakan dan daya dukung mineral penyusun daerah penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi gambaran kondisi mineral penyusun daerah rawan likuefaksi dan sebagai acuan dasar pertimbangan perencanaan pembangunan dan tata ruang pada daerah penelitian dengan tujuan untuk mengetahui komposisi dan tekstur mineral pada lokasi likuefaksi di daerah Sibalaya, serta untuk mengetahui perbedaan tingkat kerusakan dan daya dukung mineral penyusun pada daerah Sibalaya antara daerah pusat likuefaksi dan daerah di sekitarnya yang tidak terkena dampak likuefaksi.

Metode yang digunakan berupa *smear slide* untuk menyiapkan sampel yang akan dilakukan analisa mineral secara mikroskopis. Penyortiran dan preaparasi sampel pasir dengan menyortir *Mesh* 30 untuk mendapatkan pasir berukuran 0.5 mm. Selanjutnya, digunakan *software* NIS-Element F 4.10 untuk mengidentifikasi komposisi, ukuran luasan dan tingkat kerusakan mineral dengan analisis menggunakan mikroskop polarisasi.

Hasil pengamatan terhadap komposisi mineral pada daerah pusat likuefaksi daerah Sibalaya yang dapat diidentifikasi antara lain, mineral kuarsa, biotit, ortoklas, piroksin, plagioklas, hornblende dan mineral opak dengan luasan mineral daerah zona likuefaksi lebih kecil dibanding zona non likuefaksi, menunjukkan adanya pengaruh luar yang menyebabkan perubahan luasan mineral menjadi lebih kecil. Pada daerah zona likuefaksi dijumpai kondisi kerusakan pada mineral yaitu tekstur mineral yang mengalami retak, getas hingga remuk yang persentase kerusakan pada zona likuefaksi didominasi mineral yang hancur, juga retak dan getas, sedangkan mineral pada daerah yang tidak terdampak likuefaksi didominasi oleh mineral yang retak dan beberapa mengalami getas. Berdasarkan tingkat kerusakan mineral pada daerah penelitian, dengan prinsip segitiga *trinery*, maka daerah zona likuefaksi termasuk dalam daerah dengan Daya Dukung Mineral Rendah (DDMR), sedangkan pada zona non likuefaksi termasuk dalam daerah dengan Daya Dukung Mineral Tinggi (DDMT).

Kata kunci : Sibalaya, Likuefaksi, Mineral, Retak, Getas, Remuk, *Trinery*.

.

ABSTRACT

The research location is administratively included in the Tanambulava District, Sigi District, Central Sulawesi Province. Geographically, this research area is located at coordinates 119 ° 55 '00 "- 119 ° 55' 40" East Longitude and 01 ° 08 '30 "- 01 ° 09' 00" South Latitude.

The purpose of this research is to analyze the aspects of the composition of the mineral composition, structure, level of damage and the carrying capacity of minerals that make up the area of this study can be used as a reference for an overview of the mineral conditions making up the areas prone to liquefaction and as a basic reference for consideration of development planning and spatial planning in the research area with the aim of to determine the composition and texture of minerals at the liquefaction location in the Sibalaya area, as well as to determine the difference in the level of damage and the carrying capacity of the constituent minerals in the Sibalaya area between the central area of liquefaction and the surrounding areas that are not affected by liquefaction.

The method used is a smear slide to prepare samples for microscopic mineral analysis. Sorting and pre-preparation of sand samples by sorting Mesh 30 to obtain 0.5 mm sand. Furthermore, the NIS-Element F 4.10 software was used to identify the composition, area size and degree of mineral damage by analysis using a polarization microscope.

The results of observations on the mineral composition of the liquefaction center of the Sibalaya area that can be identified include quartz, biotite, orthoclast, pyroxine, plagioclase, hornblende and opaque minerals with the mineral area of the liquefaction zone smaller than the non-liquefaction zone, indicating that there are external influences. causing changes in mineral area to be smaller. In the area of the liquefaction zone, there are conditions of damage to minerals, namely mineral textures that experience cracks, split to shattered, where the percentage of damage in the liquefaction zone is dominated by shattered, also split and cracked minerals, while minerals in areas that are not affected by liquefaction are dominated by fractured minerals and some experience brittle. Based on the level of mineral damage in the research area, with the principle of the trinery triangle, the liquefaction zone is included in the area with Low Mineral Carrying Capacity (LMCC), while the non-liquefaction zone is included in the area with High Mineral Carrying Capacity (HMCC).

Key words: Sibalaya, Liquefaction, Mineral, Cracked, Split, Shattered, Trinery

KATA PENGANTAR

بِسْمِ ٱللَّهِ ٱلرَّحْمَٰنِ ٱلرَّحِيمِ

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadirat Allah SWT berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **"**Tingkat Kerusakan Mineral Pada Lokasi Likuefaksi Daerah Sibalaya Kabupaten Sigi Provinsi Sulawesi Tengah**".**

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang telah membimbing, mengarahkan dan membantu penulis dalam penyusunan laporan ini, antara lain :

1. Bapak Dr. Ir. H. Hamid Umar, M.T. sebagai dosen pembimbing I yang telah memberikan arahan, pengalaman lapangan dan wawasan kepada penulis dengan ikhlas selama penyusunan laporan.
2. Bapak Ir.Agustinus Tupenalay, M.Si sebagai dosen pembimbing II yang telah memberikan arahan dan wawasan kepada penulis dengan ikhlas selama penyusunan laporan.
3. Bapak Dr. Eng. Asri jaya HS, ST., M.T, sebagai Ketua Departemen Teknik Geologi sekaligus sebagai penguji dalam seminar tugas akhir yang telah mengarahkan dan memberikan saran kepada penulis.
4. Bapak Dr. Sultan, S.T., M.T. sebagai penasehat akademik yang telah memberikan arahan selama masa studi.
5. Kedua orang tua dan kakak tercinta atas dukungan moril, spritual dan materil yang tiada henti menjadi motivator penulis .

6. Seluruh Dosen dan Staf Departemen Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
7. Rekan-rekan seangkatan Teknik Geologi Universitas Hasanuddin angkatan 2016 (JURAZZIC), terima kasih atas segala suka, duka, semangat dan kekeluargaannya selama studi. Juga Badang and Friends, tempat melepas penat dan stress selama penulisan skripsi.
8. Seluruh pihak yang telah membantu, terima kasih atas dukungan dan bantuannya.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan lengkap ini jauh dari sempurna, baik dari segi penyusunan, bahasan, ataupun penulisannya. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang sifatnya membangun, khususnya dari dosen pembimbing guna menjadi acuan dalam bekal pengalaman bagi penulis untuk lebih baik di masa yang akan datang.

Semoga laporan lengkap ini dapat memberikan manfaat bagi yang membacanya, Amin Ya Rabbal Alamin.

Wassalam

Gowa, Desember 2020

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL i

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI ii

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN iii

ABSTRAK iv

KATA PENGANTAR vi

DAFTAR ISI viii

DAFTAR GAMBAR x

DAFTAR FOTO xii

DAFTAR TABEL xiii

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1
1.2 Maksud dan Tujuan 2
1.3 Batasan Masalah 2
1.4 Letak, Luas, dan Kesampaian Daerah 3
1.5 Alat dan Bahan 4
1.6 Peneliti Terdahulu 5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 7

2.1 Likuefaksi 7
2.1.2 Defenisi Likuefaksi 7
2.1.2 Faktor yang Mempengaruhi Likuefaksi 8
2.1.3 Dampak Likuefaksi Palu 11
2.2 Likuefaksi Kota Palu dan Daerah Sibalaya 15
2.3 Karakteristik Geologi daerah Penelitian 18
2.3.1 Karakteristik Geomorfologi Sibalaya 18

2.3.2 Karakteristik Stratigrafi Sibalaya 19
2.3.3 Karakteristik Struktur Geologi Sibalaya 20
2.4 Potensi Likuefaksi Terhadap Kerentanan Lahan Daerah Sibalaya 21
2.5 Tingkat Resistensi dan Daya Dukung Mineral 23

BAB III METODE DAN TAHAPAN PENELITIAN..... 27

3.1 Metode Penelitian 27
3.2 Tahapan Penelitian..... 28
3.2.1 Tahapan Persiapan..... 28
3.2.2 Tahapan Penelitian Lapangan..... 29
3.2.3 Tahapan Analisis dan Interpretasi Data..... 30
3.2.4 Tahapan Penyusunan Laporan 32

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN..... 35

4.1 Analisis Komposisi Mineral 35
4.2 Analisis Luasan Mineral 42
4.3 Analisis Tingkat Kerusakan Mineral 47
4.3.1 Analisis Kerusakan Mineral Penyusun Pada Zona Likuefaksi 49
4.3.2 Analisis Kerusakan Mineral Penyusun Pada Zona non Likuefaksi 52
4.4 Analisis Daya Dukung Mineral 56

BAB V PENUTUP..... 59

5.1 Kesimpulan 59
5.2 Saran 60

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar		Halaman
1.1	Peta Tunjuk Lokasi Penelitian	4
2.1	Ilustrasi Kejadian Likuefaksi (Sumber : Encyclopedia Britanicca, 2012)	8
2.2	Proses peningkatan air pori karena guncangan yang mengakibatkan terjadinya likuefaksi	9
2.3	Grafik potensi terjadinya likuefaksi berdasarkan ukuran butirnya (OCDI Japan, 2009)	11
2.4	Tipe penurunan akibat likuefaksi Zhang drr, 1998 (Seed, 2001)	12
2.5	Tipe perpindahan lateral akibat likuefaksi (Seed, 2001)	12
2.6	Mekanisme *Sand Boil* (Munirwansyah dkk, 2017).....	14
2.7	Ilustrasi *Sand Boil* (B. A. Robbins *et all*, 2020))	14
2.8	Peta Potensi Likuefaksi Palu dan Sigi	16
2.9	Topografi pra-slide dan perkembangan slide yang diinterpretasikan menunjukkan awal (panah merah) dan gerakan sekunder (panah kuning) serta perpindahan *runout* (panah biru) (US-NSF GEER, 2019)	17
2.10	Peta Geologi Daerah Penelitian (Watkinson, 2011)	18
2.11	Struktur geologi Palu (Irsyam M, dkk, 2010)	20
2.12	Peta Zona Kerentanan Likuefaksi Provinsi Sulawesi Tengah (Badan Geologi, 2018).....	21
2.13	Peta Kemampuan Lahan Kota Palu (Wirawan,2019)	22
2.14	Peta Zonasi Rawan Likuefaksi Pada Kemampuan Lahan Kota Palu (KESDM, 2012 dalam Wirawan, 2019)	23
2.15	Seri Reaksi Bowen	24
2.16	Goldich series menunjukkan derajat ketahan mineral terhadap pelapukan (Goldich, 1938)	26

2.17 Klasifikasi menggunakan segitiga *trinery* untuk menentukan daya dukung mineral berdasarkan persebaran tingkat kerusakannya (Umar,2018) 27
3.1 Diagram Tahapan Penelitian 34
4.1 Grafik selisih luasan mineral zona likuefaksi daerah Sibalaya 43
4.2 Grafik selisih luasan mineral zona ikuefaksi daerah Sibalaya 44
4.3 Grafik perbandingan ukuran mineral yang menunjukkan luasan mineral pada zona likuefaksi lebih kecil dibanding zona non likuefaksi 45
4.4 Grafik tingkat kerusakan mineral pada zona likuefaksi daerah Sibalaya 53
4.5 Grafik tingkat kerusakan mineral pada zona non likuefaksi daerah Sibalaya 54
4.6 Analisis daya dukung mineral pada pada zona likuefaksi (A) dan zona non-likuefaksi (B) daerah Sibalaya menggunakan prinsip segitiga *trinery* 57

DAFTAR FOTO

Foto		Halaman
3.1	Observasi lokasi terdampak Likuefaksi Sibalaya.....	31
3.2	Proses Pengambilan Sampel Pasir Likuefaksi.....	31
3.3	Proses Persiapan Penyortiran Sampel	32
4.1	Foto mikrograf Kuarsa zona likuefaksi (A) dan kenampakan di zona non likuefaksi (B) difoto dengan perbesaran total 100X	37
4.2	Foto mikrograf Biotit zona likuefaksi (A) dan kenampakan di zona non likuefaksi (B) difoto dengan perbesaran total 100X	38
4.3	Foto mikrograf Ortoklas zona likuefaksi (A) dan kenampakan di zona non likuefaksi (B) difoto dengan perbesaran total 100X.....	39
4.4	Foto mikrograf Piroksin zona likuefaksi (A) dan kenampakan di zona non likuefaksi (B) difoto dengan perbesaran total 100X.....	40
4.5	Foto mikrograf Plagioklas zona likuefaksi (A) dan kenampakan di zona non likuefaksi (B) difoto dengan perbesaran total 100X.....	40
4.6	Foto mikrograf Hornblende zona likuefaksi (A) dan kenampakan di zona non likuefaksi (B) difoto dengan perbesaran total 100X.....	41
4.7	Foto mikrograf mineral Opak zona likuefaksi (A) dan kenampakan di zona non likuefaksi (B) difoto dengan perbesaran total 100X.....	42
4.8	Kerusakan mineral pada kondisi (A) retak pada kuarsa, (B) getas pada kuarsa, dan (C) remuk pada hornblende	47

DAFTAR TABEL

Tabel		Halaman
2.1	Representatif Mineral Pada Tingkat Pelapukan	25
4.1	Tabel Hasil Analisis Komposisi dan Persentase Mineral Pada Daerah Penelitian.....	35
4.2	Tabel Hasil Analisis Ukuran Luasan Mineral Pada Daerah Penelitian di Zona Likuefaksi.....	43
4.3	Tabel Hasil Analisis Ukuran Luasan Mineral Pada Daerah Penelitian di Zona Non Likuefaksi.....	44
4.4	Tabel Perbandingan *Range* Ukuran Luasan Mineral Pada Daerah Penelitian.....	45
4.5	Tabel Hasil Analisis Kerusakan Mineral Pada Zona Likuefaksi	49
4.6	Tabel Hasil Analisis Kerusakan Mineral Pada Zona Non Likuefaksi..	52

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sulawesi merupakan wilayah pertemuan tiga lempeng, yaitu Indo-Australia, Eurasia, dan Filipina. Kondisi tersebut menyebabkan sangat rawan terhadap bencana alam khususnya gempa bumi. Salah satu bencana alam yang terjadi yaitu di Kota Palu, Kabupaten Donggala dan Sigi pada 28 September 2018 berupa gempa bumi diiringi tsunami dan likuefaksi menjadi salah satu fenomena yang dianggap cukup menarik karena belum pernah terjadi di daerah manapun di Indonesia (Sassa and Tagawa, 2019; Valkaniotis *et al*, 2019).

Gempa Palu, Sigi dan Donggala termasuk fenomena yang lengkap baik akibat pergeseran sesar, tsunami, longsoran maupun fenomena likuefaksi yang dahsyat yang mungkin pernah terjadi di dunia (Pusgen, 2018). Likuefaksi sendiri adalah suatu fenomena dimana endapan granular kehilangan kekuatan dan kekakuan dan berubah dari padat kecair akibat peningkatan tekanan pori yang disebabkan oleh goncangan siklik (Jefferies & Been, 2015). Fenomena likuefaksi akibat dari dampa gempa bumi yang tersusun oleh lapisan pasir lepas dengan muka air tanah dangkal (<9,0 m) dan dipengaruhi intensitas, dan durasi goncangan gempa bumi serta jarak dari episenter. Likuefaksi umumnya terjadi pada endapan kipas alluvial, dataran alluvial, pantai, bekas danau dan estuaria.

Secara Geologi, sebagian wilayah Palu dan Sigi terususun oleh endapan pantai berumur muda atau Holosen (Qap), terdiri dari kerikil, pasir, lumpur yang rentan untuk terjadinya likuefaksi. Untuk mengetahui potensi bahaya likuefaksi di

daerah tersebut lebih detail, maka diperlukan analisis kondisi mineral penyusun tanah pada daerah tersebut. Analisis kondisi mineral tersebut dilakukan untuk membandingkan kandungan mineral dan kerusakan mineral pada daerah pusat likuefaksi dan daerah sekitarnya sehingga dapat menjadi referensi dan bahan untuk pertimbangan perencanaan pembangunan dan tata ruang.

1.2 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dari penelitian ini adalah untuk menganalisa aspek komposisi mineral penyusun, struktur, tingkat kerusakan dan daya dukung mineral penyusun daerah penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi gambaran kondisi mineral penyusun daerah rawan likuefaksi dan sebagai acuan dasar pertimbangan perencanaan pembangunan dan tata ruang pada daerah penelitian. Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Bagaimana komposisi dan tekstur mineral pada lokasi zona likuefaksi dan zona non likuefaksi di daerah penelitian?
2. Bagaimana perbedaan tingkat kerusakan mineral penyusun pada daerah Sibalaya antara zona likuefaksi dan daerah zona luar likuefaksi?
3. Bagaimana daya dukung mineral pada zona likuefaksi dan zona non-likuefaksi daerah penelitian?

1.3 Batasan Masalah

Gempa tektonik di Kota Palu, Provinsi Sulawesi Tengah tahun 2018 yang diikuti likuefaksi di daerah Sibalaya yang mengakibatkan penurunan kemampuan lahan pemukiman untuk kembali menerima pembebanan dari bangunan dan

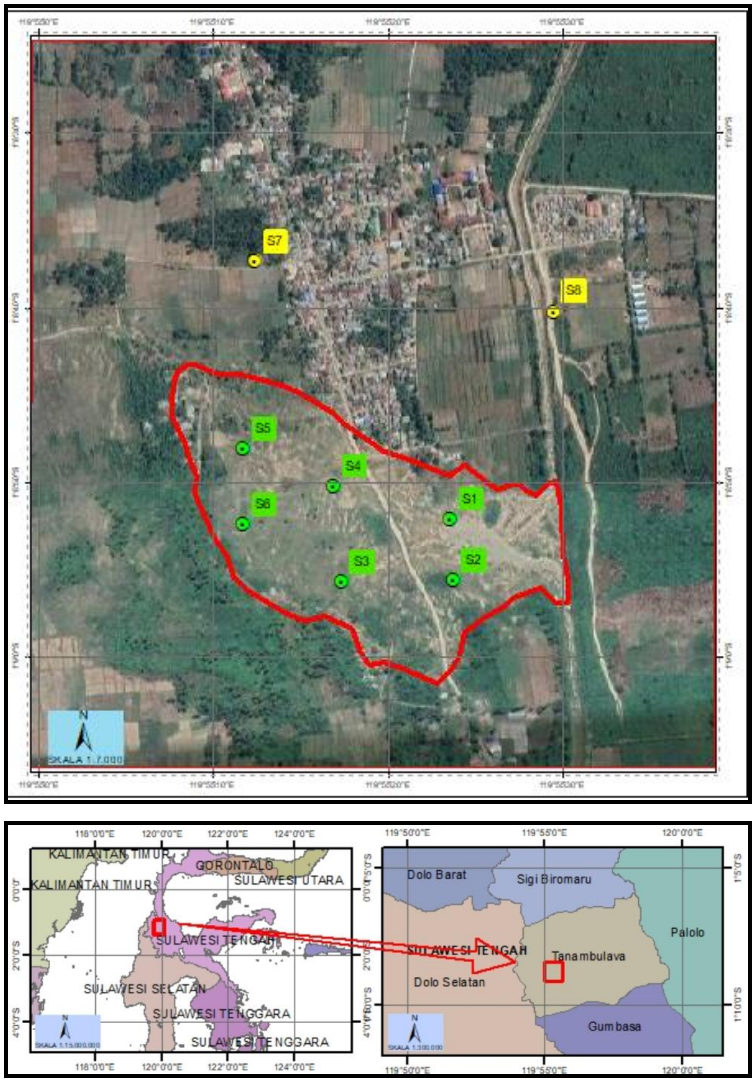
infrastruktur yang baru. Salah satu factor yang mengakibatkan menurunnya kemampuan lahan dikarenakan terjadinya kerusakan mineral dan perubahan luasan mineral yang lebih kecil sehingga mempengaruhi porositas dan permeabilitas pasir. Untuk memastikan apakah likuefaksi mengakibatkan terjadinya kerusakan mineral dan perubahan luasan mineral yang lebih kecil pada daerah yang terdampak likuefaksi (Zona Likuefaksi) dan diluar dari daerah terdampak (Zona Non Likuefaksi) di Sibalaya, maka ditentukan batasan – batasan dalam penelitian ini.

Batasan masalah bertujuan agar hasil yang didapat lebih bersifat sistematis dan terfokus. Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah penentuan kandungan mineral berdasarkan analisis petrografi dengan menggunakan sayatan tipis (*thin section*). Adapun aspek dibatasi hanya pada analisis aspek komposisi mineral penyusun, struktur, tingkat kerusakan dan daya dukung mineral mineral penyusun daerah penelitian.

1.4 Letak, Luas dan Kesampaian Daerah Penelitian

Secara administratif, daerah penelitian termasuk dalam daerah Kecamatan Tanambulava Kabupaten Sigi Provinsi Sulawesi Tengah (Gambar 1.1). Secara astronomis daerah penelitian terletak pada *119° 55′ 00″ - 119° 55’ 40″* Bujur Timur dan *01° 08′ 30″ – 01° 09′ 00″* Lintang Selatan. Daerah ini terpetakan dalam Peta Rupa Bumi Indonesia Sekala 1 : 50.000 Lembar Maranata, nomor 2014-64, terbitan Badan Informasi Geospasial tahun 2013 (Cibinong, Bogor) yang kemudian diperbesar sebagai peta dasar dengan sekala 1:7.000 dengan luas daerah penelitian adalah 21 hektar.

Daerah penelitian dapat dicapai selama ± 2 jam dengan menggunakan transportasi darat dari Kota Palu menuju ke Kabupaten Sigi, di daerah Sibalaya. Penelitian ini dilaksanakan selama hampir 1 tahun lamanya, yaitu mulai Bulan Desember 2019 sampai November 2020.



Gambar 1.1 Peta Tunjuk Lokasi Penelitian (Sumber : *Google Earth*, 2020)

1.5 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan selama penelitian berlangsung terdiri dari :

1. Peta topografi sekala 1 : 25.000

2. Kompas geologi
3. Palu geologi
4. *Global Positioning System* (GPS)
5. Alat *Hand Boring*
6. Loupe dengan pembesaran 10x
7. Komparator klasifikasi batuan sedimen
8. Pita meter
9. Buku catatan lapangan
10. Kantong sampel
11. Kamera digital
12. Alat tulis menulis
13. Tas lapangan.

Sedangkan alat dan bahan yang akan digunakan selama analisis laboratorium yaitu mikroskop polarisasi, sayatan tipis sampel sedimen, lem epoxy resin, lem epoxy *hardener*, lap kasar dan halus, lampu alat tulis menulis.

1.6 Peneliti Terdahulu

Beberapa ahli geologi yang pernah mengadakan penelitian di daerah ini yang sifatnya regional diantaranya adalah sebagai berikut :

1 Rab Sukamto (1973), meneliti tentang geologi Daerah Palu, Donggala daan Sigi.

2 Risna Widyaningrum (2012), melakukan penyelidikan geologi teknik potensi liquifaksi daerah Palu, Provinsi Sulawesi Tengah.

3 Karlina Muhsin Tondi (2019), meneliti tentang dampak gempa bumi dan likuefaksi kabupaten Sigi, propinsi Tulawesi Tengah.

4 Sriyati Ramadhani (2019), meneliti kondisi seismisitas dan dampaknya untuk kota Palu.

5 David Manoel Mangunpraja (2019), meneliti tentang mitigasi bencana likuefaksi di Kota Palu.

6 Suliyanti Pakpahan, dkk (2019), melakukan analisis kegempaan di zona sesar palu koro, Sulawesi Tengah.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

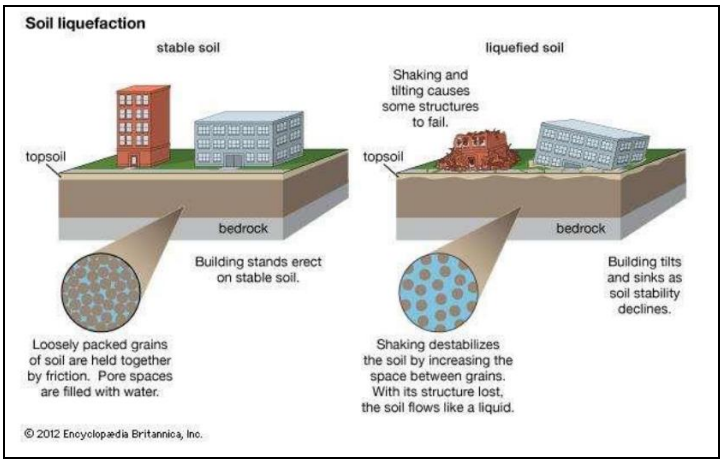
2.1 Likuefaksi

2.1.1 Defenisi Likuefaksi

Likuefaksi adalah proses hilangnya kekuatan lapisan pasir jenuh yang diawali dengan terjadinya getaran gempa. Menurut Towhata (2008) seperti yang dikutip dari Muntohar (2010), pasir lepas (tidak padat) dan jenuh air memiliki potensi terjadinya likuefaksi.

Menurut Tohari (2007), likuefaksi merupakan fenomena hilangnya kekuatan lapisan tanah akibat kenaikan tegangan air pori yang disebabkan oleh beban dinamik berupa gempa. Likuefaksi dapat terjadi bila percepatan maksimum permukaan tanah bernilai >0,1 g dengan kekuatan gempa >5 SR.

Peristiwa likuefaksi dapat menimbulkan amblesan, keruntuhan, tilting pada bangunan, ground cracking, kelongsoran, dan merusakkan sarana publik. Sebagai contoh saat gempa bumi Nigata 1964, Kobe 1995, Turki 2002, Taiwan 12 1999, India 2001, Maumere 1 Desember 1992, Aceh dan Nias 26 Desember 2004, Bengkulu, 2000, Jogjakarta 27 Mei 2006 yang diikuti dengan fenomena peristiwa likuefaksi. Pengetahuan potensi dan kerawanan likuefaksi sangat penting untuk melakukan usaha mitigasi yang disesuaikan dengan derajat kerentanan suatu wilayah terhadap bahaya likuefaksi (Soebowo dkk, 2007).



Gambar 2.1 Ilustrasi Kejadian Likuefaksi (Sumber : Encyclopedia Britanicca, 2012)

2.1.2 Faktor yang Mempengaruhi Likuefaksi

Menurut Monge dkk (1998) ada beberapa faktor yang menyebabkan likuefaksi :

a. Faktor Permanen

Faktor permanen dari peristiwa likuefaksi ini adalah karaktersitik serta parameter tanah itu sendiri. Misalnya seperti pada pulvarent *(quicksand)* apabila tanah tersebut terkena tekanan, dimana tekanan tersebut disebabkan oleh peningkatan 15 tekanan pori tanah akibat bertambahnya atau berkurangnya kandungan air di tanah tersebut.

b. Faktor Pemicu

Faktor pemicu utama terjadinya peristiwa likuefaksi adalah terjadiya gempa bumi dan beban siklis yang disebabkan oleh gelombang air laut pada suatu daerah tertentu. Di mana energi yang ditimbulkan tersebut dapat menyebabkan tanah kehilangan kohesivitas dan akan membuat tanah mengalami likuifakasi.

Proses likuefaksi merupakan hilangnya kekuatan lapisan pasir jenuh yang diawali dengan terjadinya getaran gempa. Lapisan pasir mencair sehingga kuat geser tanah dan daya dukung tanah tidak mampu mendukung beban yang disalurkan beban bangunan di atasnya (*upper structure*), akibat beban siklik yang bekerja pada waktu gempa sehingga tekanan air pori meningkat mendekati atau bahkan melampaui tegangan vertikal. Karena tekanan air porinya meningkat, jarak antar partikel pasir menjadi semakin renggang, sehingga bearing capacity berkurang drastis. Kerugian terbanyak terjadi akibat dari besarnya getaran yang menyebabkan runtuhnya bangunan (Mario and Simon, 2019).

Tekanan air meningkat akibat getaran gempa seperti diperlihatkan dalam Gambar 2.2, maka pada kondisi seperti itu tegangan efektif (σ') tanah berkurang. Hal ini dapat dirumuskan seperti pada Persamaan 1.

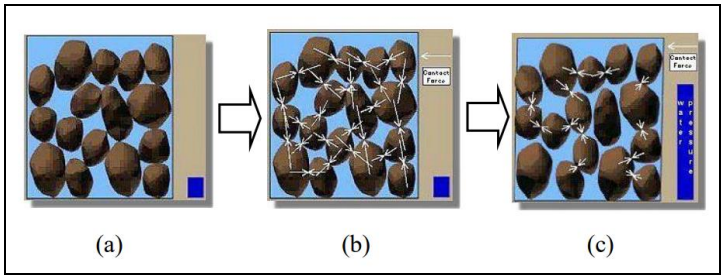
$$\sigma' = \sigma - u \qquad (1)$$

dimana:

σ' = tegangan efektif (kN/m2);

σ = tegangan total tanah (kN/m2);

U = tekanan air pori (kN/m2).



Gambar 2.2 Proses peningkatan air pori karena guncangan yang mengakibatkan terjadinya likuefaksi; (a) kondisi awal, (b) tegangan kontak partikel pada saat menerima beban, (c) tegangan air pori meningkat dan tegangan efektif negatif (likuefaksi) (Mario and Simon, 2019).

Nilai modulus geser maksimum pasir akan menurun bersamaan dengan turunnya nilai tegangan efektif. Sehungga tanah pasir jenuh akan mengalami pencairan (likuefaksi). Nilai tegangan efektif dapat pula menjadi nol bahkan nilainya dapat menjadi negatif. Kondisi tegangan efektif terjadi ketika gaya kontak antar butiran pasir dikurangi dengan tegangan air pori. Sehingga partikel pasir mengalami *floating* bebas dalam air, sehingga massa pasir mencair. Kondisi ini menyebabkab tanah tidak mampu mendukung beban dan konstruksi akan amblas, miring ataupun *collapse*.

Beberapa faktor yang berpengaruh terhadap potensial likuefaksi tanah menurut Munirwansyah dkk, adalah sebagai berikut:

1. Jenis tanah

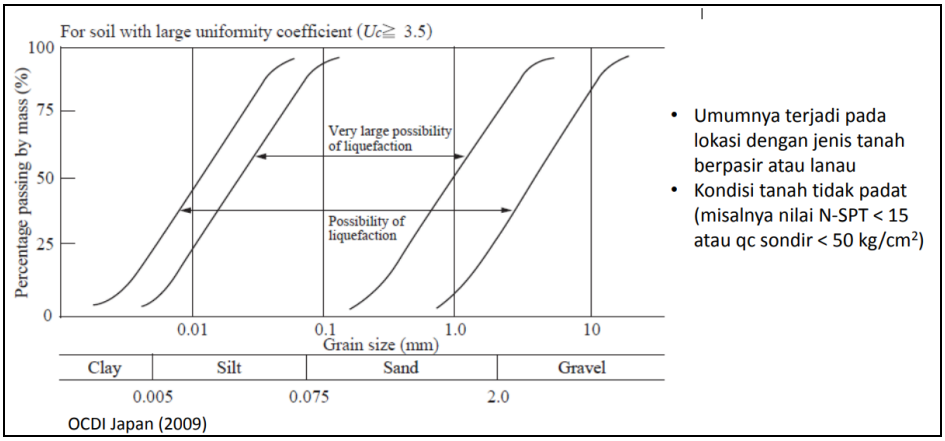
   Khusus untuk tanah tidak kohesif seperti pasir lepas, jika bergradasi seragam maka kerentanan likuefaksinya besar dibandingkan dengan yang bergradasi baik. Klasifikasi gradasi tanah ditentukan dengan mengetahui distribusi ukuran butirannya dari sieve analysis.

2. Kerapatan relatif atau angka pori

   Untuk jenis tanah dengan angka pori atau kerapatan relatif kecil maka rentan terhadap likuefaksi. Pada gempa bumi di kota Nigata, Jepang, 1964, likuefaksi banyak terjadi pada areal tanah berpasir dengan kerapatan relatif 50% dan tidak terjadi pada areal dengan kerapatan relatif di atas 70%. Untuk berbagai uji laboratorium faktor tersebut selalu digunakan sebagai parameter uji likuefaksi.

3. Tekanan batas

Potensial likuefaksi tanah menurun dengan meningkatnya tekanan batas. Sejumlah uji laboratorium menunjukkan bahwa dibutuhkan tegangan yang besar dengan meningkatnya tekannan batas untuk menyebabkan terjadinya likuefaksi pada kondisi pembebanan bolak balik di laboratorium (Munirwansyah dkk, 2016)

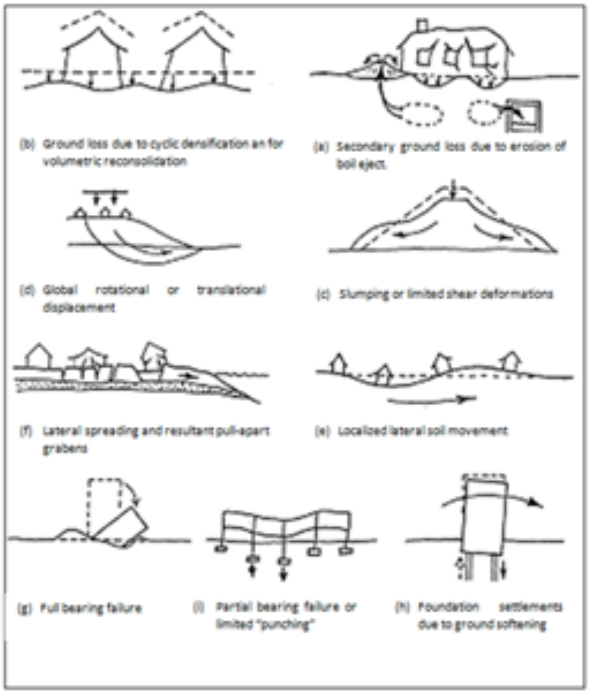


Gambar 2.3 Grafik potensi terjadinya likuefaksi berdasarkan ukuran butirnya (OCDI Japan, 2009)

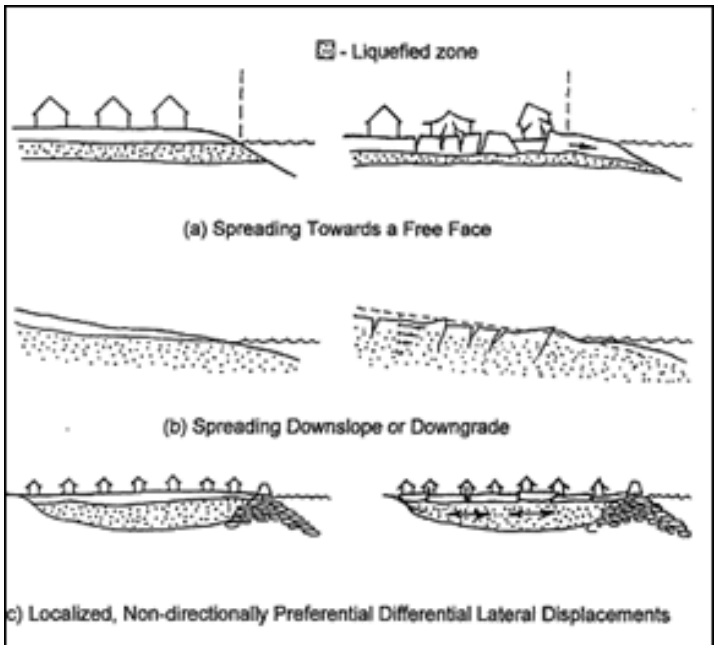
2.1.3 Dampak Likuefaksi Palu

Fenomena likuefaksi terjadi seiring terjadinya gempa bumi. Secara visual peristiwa likuefaksi ini ditandai munculnya lumpur pasir di permukaan tanah berupa semburan pasir (sand boil), rembesan air melalui rekahan tanah, atau bisa juga dalam bentuk tenggelamnya struktur bangunan di atas permukaan, penurunan muka tanah dan perpindahan lateral.

Salah satu efek likuefaksi pada bangunan konstruksi adalah penurunan dan perpindahan lateral tanah. Proses penurunan terdapat sembilan tipe sebagaimana digambarkan oleh Zhang drr, 1998 dalam Seed drr, 2001 sedangkan perpindahan lateral memiliki tiga tipe (Seed, 2001).



Gambar 2.4 Tipe penurunan akibat likuefaksi Zhang drr, 1998 (Seed, 2001)



Gambar 2.5 Tipe perpindahan lateral akibat likuefaksi (Seed, 2001)

Youd (1978) meninjau dari beberapa kerusakan berat atau kerusakan total pada bangunan karena peretakan tanah akibat proses likuefaksi bahwa kerusakan ringan terjadi pada pergeseran tanah sejauh 50-100 mm, kerusakan yang

memerlukan perbaikan ringan atau kerusakan sedang terjadi akibat pergeseran tanah sejauh 120-600 mm, dan kerusakan berat dengan pergeseran tanah sejauh lebih dari 760 mm.

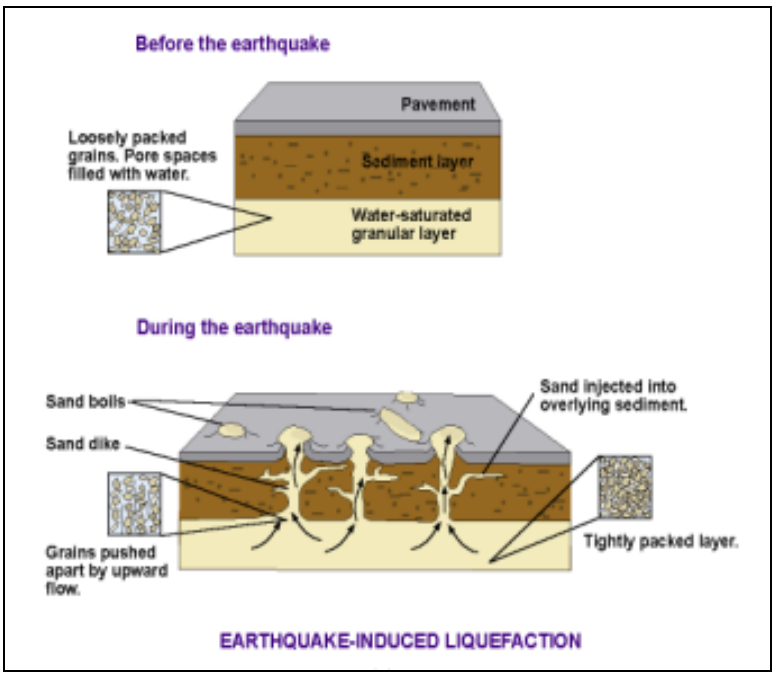
Likuefaksi umumnya terjadi saat gempa, dan telah menyebabkan keruntuhan tanah dan bangunan diatasnya. Tanah berubah dari fase solid, menjadi berperilaku cair sementara kehilangan kekuatan nya. Likuefaksi terjadi pada tanah pasir lepas dan medium yang jenuh air yang mengalami peningkatan tekanan air pori ekses akibat perambatan gelombang gempa ke permukaan tanah. Pasir dan pasir kelanauan adalah jenis tanah yang dapat mengalami likuefaksi. Kejadian likuefaksi di Palu merupakan penyebab utama kerusakan rumah dan infrastruktur diatasnya.

Adapun dampak dari benncana likuefaksi utamanya yang terjadi di daerah Palu berupa fenomena *sand boil*, likuefaksi alir dan *lateral spreading*. *Sand Boil* merujuk kepada situasi dimana pasir bersama air menerobos lapisan diatasnya membentuk erupsi pasir dipermukaan tanah. Likuefaksi Alir dan *Lateral Spreading*, kedua istilah tersebut mengacu kepada dua hal yang hampir mirip fenomenanya hanya saja pada likuefaksi alir perpindahan tanah sangat besar dan deformasinya "*unlimited*" karena praktis mengalir hingga keseimbangan dicapai (Pusgen,2018).

- *Sand Boil*

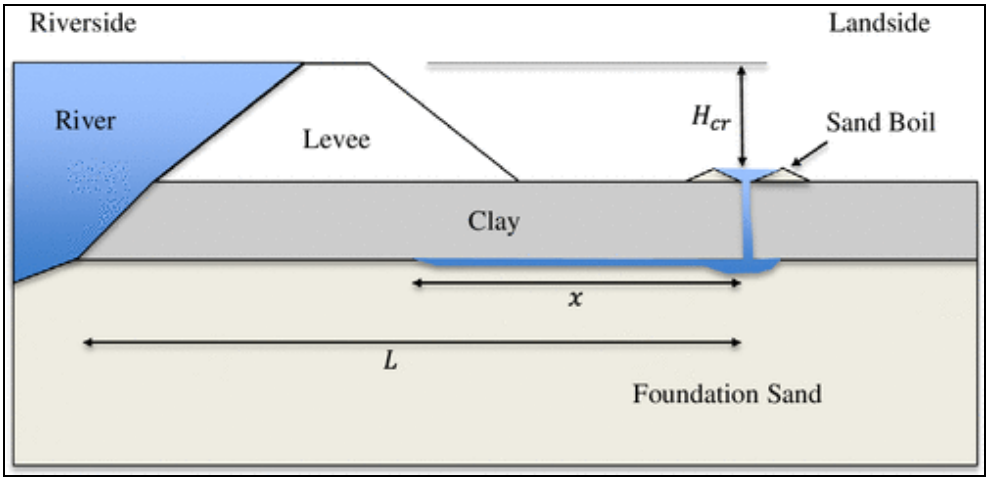
Sand boil atau keluarnya pasir dari bawah permukaan tanah tidak selalu menyebabkan keruntuhan tanah. Sand boil merupakan indikasi bahwa likuefaksi telah terjadi dibawah permukaan. Pada saat gempa, sand boil terbentuk oleh air

yang naik ke permukaan sambil membawa material pasir dari bawah. Air bertekanan tinggi menerobos lapisan atas yang tidak terlikuefaksi dan membawa tanah sedimen untuk kemudian di depositkan seperti kerucut berkawah dan umum nya terbentuk dalam jumlah yang besar (Pusgen,2018).



Gambar 2.6 Mekanisme *Sand Boil* (Munirwansyah dkk, 2017)

Dampak dari *sand boil* tersebut bila diatasnya terdapat struktur masif, bisa berupa *uplift* yang mampu mendorong ke atas bangunan tersebut.



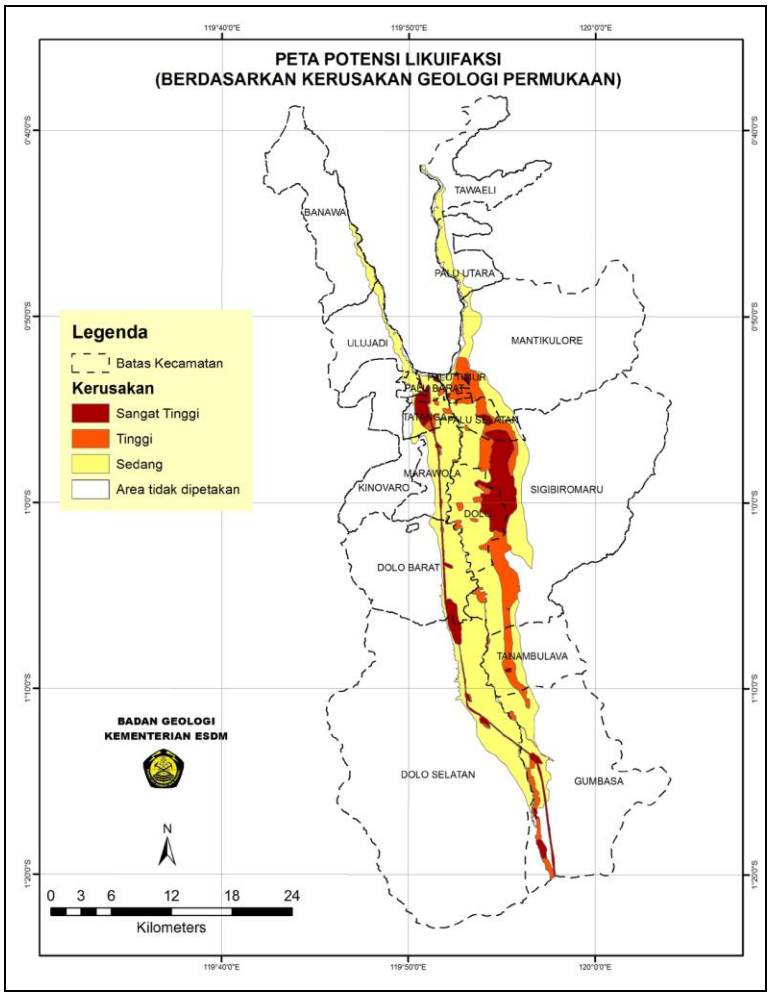
Gambar 2.7 Ilustrasi *Sand Boil* (B. A. Robbins *et all*, 2020)

- *Lateral spreading*

Lateral spreading adalah pergerakan dalam arah lateral dari blok blok tanah sebagai dampak dari likuefaksi dan kehilangan kekuatan gesernya di lapis bawah tanah. Peralihan tanah terjadi sebagai kombinasi dari gaya gravitasi dan gaya gaya inersia yang ditimbulkan oleh gempa pada lereng yang relatif landai (dapat mencapai serendah 3^o). Tingkat Kerusakan yang terjadi sangat tergantung kepada berapa jauh peralihan yang dihasilkan oleh aliran tanah. Peralihan bisa sebesar beberapa centimeter hingga beberapa meter seperti yang banyak terjadi di masa masa sebelumnya. Jalan, bangunan dan struktur teknik sipil yang lain dapat mengalami kerusakan fatal akibat likuefaksi. Struktur yang terletak didekat atau di perbatasan tergeser dengan sangat hebat dan mengalami *offsett* sampai beberapa meter bahkan puluh meter, sedangkan dikaki lereng akan terkompresi atau tertekuk/ terlipat (Pusgen,2018).

2.2 Likuefaksi Kota Palu dan Daerah Sibalaya

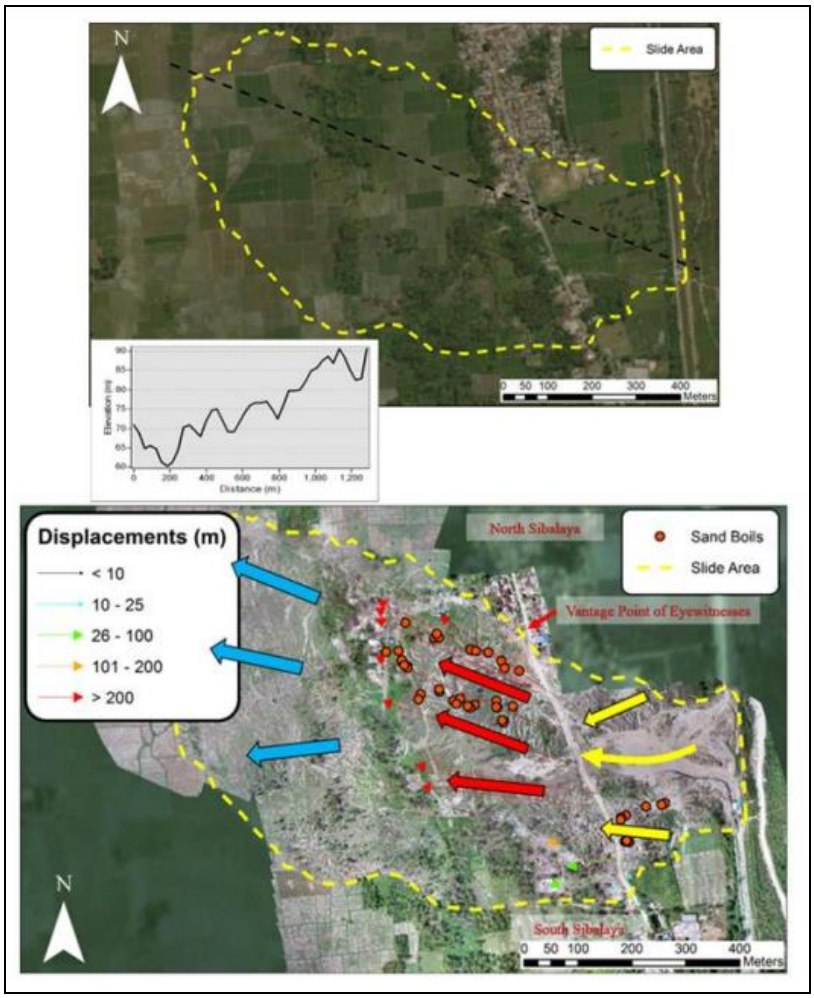
Peristiwa gempa 7,4 SR yang terjadi di wilayah Sulawesi Tengah pada tanggal 28 September 2018 menyebabkan likueafkasi menyebabkan likuefaksi di pinggir pantai dan dataran Kota Palu dan Kabupaten Sigi.



Gambar 2.8 Peta Potensi Likuefaksi Palu dan Sigi (Badan Geologi, 2018)

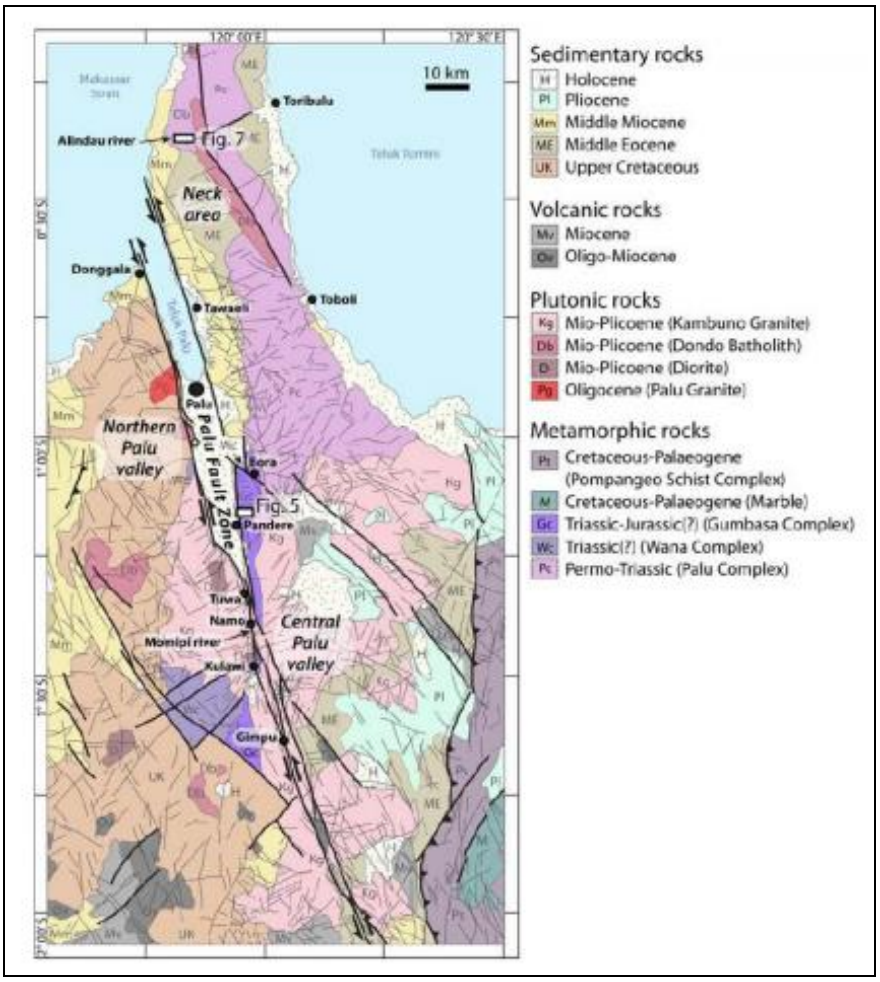
Area Sibalaya berada di selatan Kota Palu dimana area yang mengalami pergerakan masif juga dilintasi oleh saluran irigasi. Saluran yang melewati lokasi terdampak mempunyai lebar saluran yang lebih besar dari area Petobo dan Jono Oge. Gambar 2.9 menunjukan foto satelit dan foto kamera *drone* yang diambil sebelum dan sesudah kejadian gempa. Area yang bergerak (dikelilingi garis putih) kurang lebih seluas 53 Ha yang merupakan daerah pertanian dan bukan daerah yang banyak penduduk. Terdapat banyak perumahan penduduk di sisi utara area ini yang juga terdampak namun tidak mengalami pergerakan yang masif. Kondisi topografi di area ini memiliki kemiringan rata-rata sebesar 2.6% menurut model

elevasi *Google Earth* dari foto satelit yang diambil pada 19 Februari 2018. Elevasi di bagian hulu dan hilir kelongsoran adalah 96.6 dan 63.3 m dengan bentang jarak sejauh 1270 m. Tingkat kemiringan ini mirip dengan area Jono Oge namun sedikit lebih terjal dari Petobo. Bencana ini juga menyebabkan runtuhnya saluran irigasi yang membentuk aliran baru dan menyebabkan banjir. Pergerakan ini juga turut merusak jalan Poros Palu-Palopo. Mekanisme yang terjadi di area Sibalaya mirip dengan yang terjadi di area lain.



Gambar 2.9 Topografi pra-slide dan perkembangan slide yang diinterpretasikan menunjukkan awal (panah merah) dan gerakan sekunder (panah kuning) serta perpindahan *runout* (panah biru) (US-NSF GEER, 2019)

2.3 Karakteristik Geologi daerah Penelitian



Gambar 2.10 Peta Geologi Daerah Penelitian (Watkinson, 2011)

2.3.1 Karakteristik Geomorfologi Sibalaya

Morfologi Sibalaya dapat dibagi menjadi 2 (dua) satuan, yaitu :

a. Morfologi Dataran Kenampakan morfologi berupa topografi tidak teratur, lemah, merupakan wilayah dengan banjir musiman, dasar sungai umumnya meninggi akibat sedimentasi fluvial. Morfologi ini disusun oleh material utama berupa aluvial sungai dan pantai dengan bentukan morfologi berupa dataran dan kemiringan lereng 0-5 %.

b. Morfologi Perbukitan Kenampakan berupa morfologi bergelombang lemah sampai bergelombang kuat. Wilayah kipas aluvial (aluvial fan) termasuk dalam satuan morfologi ini. Bentuk morfologinya berupa perbukitan berelief halus dengan kemiringan lereng 5-15 %.

2.3.2 Karakteristik Stratigrafi Sibalaya

Berdasarkan pengamatan pada Peta Geologi Tinjau Lembar Palu, Sulawesi Skala 1:250.000 (Rab Sukamto, dkk, 1973) daerah penelitian umumnya terdiri dari 2 (dua) Formasi batuan, yaitu Aluvium dan endapan pantai (Qap) dan Molasa Celebes Serasin dan Serasin (QTms).

a. Aluvium dan endapan pantai (Qap)

Terdiri dari kerikil, pasir, lumpur, dan batugamping koral. Terbentuk dalam lingkungan sungai, delta, dan laut dangkal merupakan sedimen termuda di daerah ini. Endapan itu boleh jadi seluruhnya berumur Holosen. Kondisi batuan pada Formasi ini umumnya berupa material yang belum mengalami kompaksi. Struktur batuan umumnya terdiri dari pasir bagian atas, lanau dan tanah lempung dibagian bawah. Kedalam air tanah berkisar 0,5-1,6 m dibawah permukaan tanah

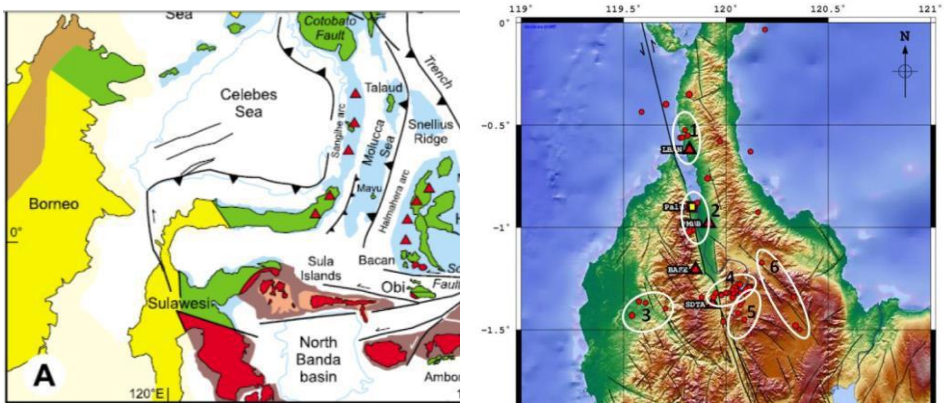
b. Molasa Celebes dan Serasin (QTms)

Batuan ini tersebar di dataran tinggi di sisi gunung sebelah Timur dan sebelah barat Kota Palu. Formasi batuan ini terdiri dari jenis batuan yang lebih tua, berupa Konglomerat, batupasir, batulempung, batugamping koral, dan napal yang semuanya terkompaksi. Ukuran batuan semakin ke laut berubah menjadi batuan klastik berbutir halus.

2.3.3 Karakteristik Struktur Geologi Sibalaya

Berdasarkan hasil studi dari tim revisi peta gempa Indonesia (dalam Irsyam, M, dkk, 2010) struktur geologi aktif yang melewati Kota Palu adalah berupa PKF (*Palu Koro Fault*) dan MF *(Matano Fault*) keduanya merupakan sesar aktif yang banyak dijumpai disekitar lembah Palu. Sesar Palu-Koro (PKF) berarah Utara – Selatan sedang beberapa diantaranya ada yang berarah Baratdaya – Timurlaut.

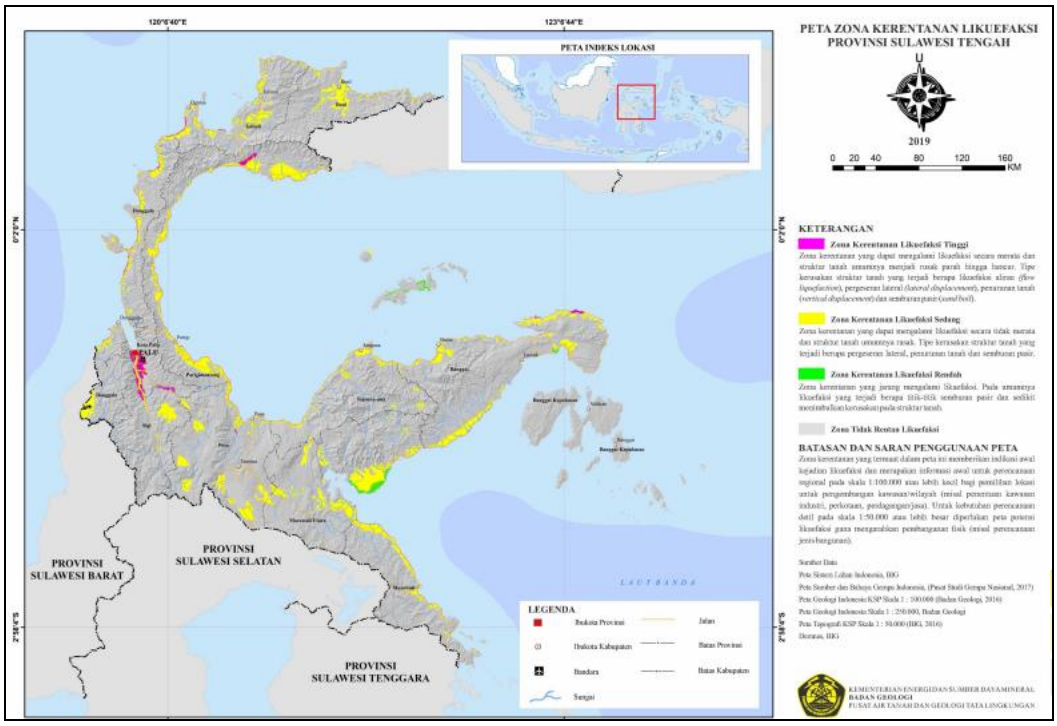
Sesar – sesar aktif tersebut yang berarah Utara – Selatan adalah merupakan sesar-sesar aktif akibat peremajaan dari struktur tua yang dapat teraktifkan kembali, sedangkan sesar-sesar yang berarah Baratdaya – Timurlaut adalah merupakan struktur yang sangat aktif pada masa kini.



Gambar 2.11 Struktur geologi Palu (Irsyam M, dkk, 2010)

Secara geologi, fisiografi Kota Palu berhubungan dengan proses struktur yang terjadi serta jenis batuan yang menyusun Kota Palu, dimana sisi kiri kanan Kota Palu merupakan jalur patahan utama, yaitu patahan Palu-Koro serta wilayahnya disusun oleh batuan yang lebih keras dibanding material penyusun bagian lembah.

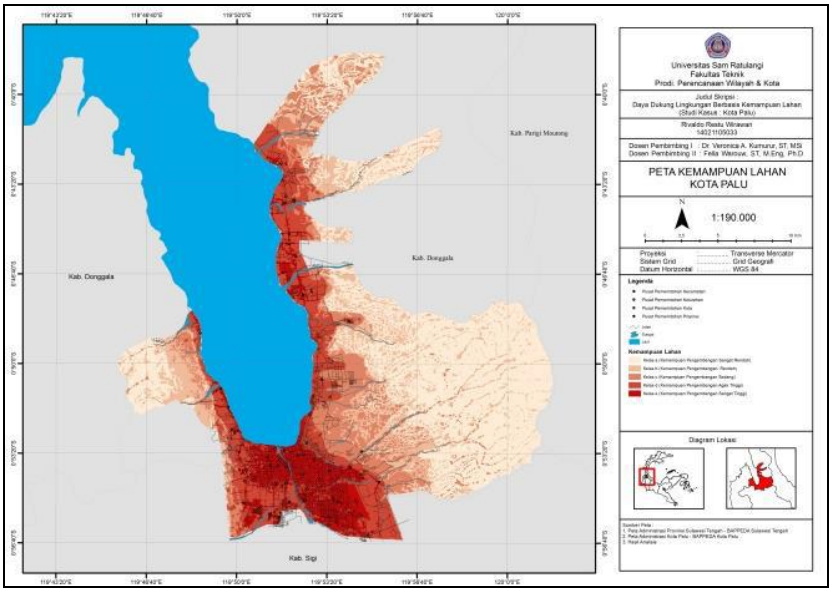
2.4 Potensi Likuefaksi Terhadap Kerentanan Lahan Daerah Sibalaya



Gambar 2.12 Peta Zona Kerentanan Likuefaksi Provinsi Sulawesi Tengah (Badan Geologi, 2018)

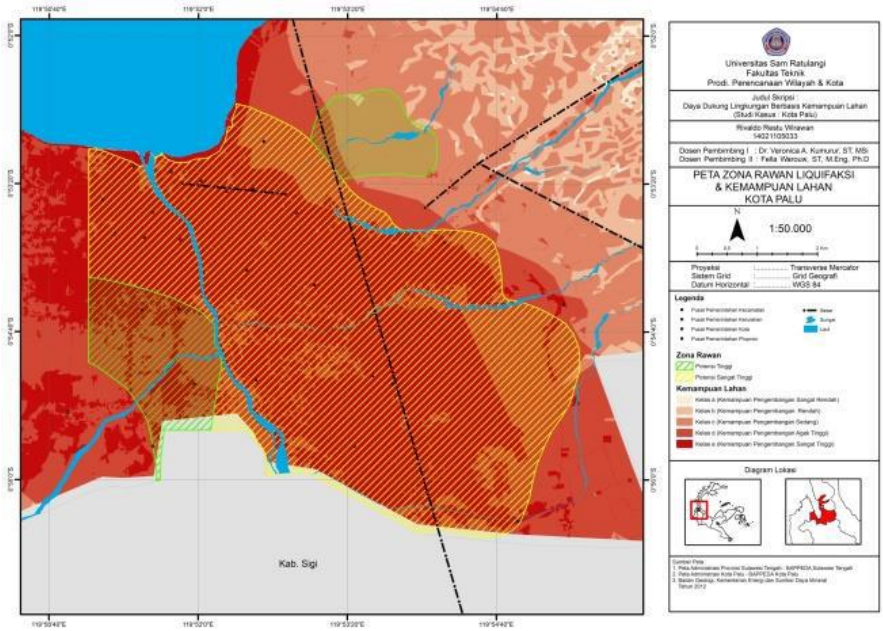
Kemampuan lahan menurut Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No 17 tahun 2009 tentang Pedoman Penentuan Daya Dukung Lingkungan Hidup Dalam Penataan Ruang Wilayah adalah karakteristik lahan yang mencakup sifat-sifat tanah, topografi, drainase, dan kondisi lingkungan hidup lain untuk mendukung kehidupan atau kegiatan pada suatu hamparan lahan. Klasifikasi kemampuan lahan (*Land Capability Classification*) adalah penilaian lahan (komponen-komponen lahan) secara sistematik dan pengelompokannya ke dalam beberapa kategori berdasarkan atas sifat-sifat yang merupakan potensi dan penghambat dalam penggunaannya secara lestari. Kemampuan lahan dipandang

sebagai kapasitas lahan itu sendiri untuk suatu macam atau tingkat penggunaan umum (Wirawan dkk,2019).



Gambar 2.13 Peta Kemampuan Lahan Kota Palu (Wirawan,2019)

Berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral tahun 2012 tentang potensi likuefaksi Kota Palu dan sekitarnya diketahui bahwa Kota Palu memiliki potensi sangat tinggi, potensi tinggi, dan potensi sangat rendah - rendah terhadap likuefaksi. Potensi likuefaksi ini tersebar pada beberapa kecamatan yaitu Kecamatan Palu Barat, Palu Timur, Palu Selatan, Tatanga, dan Mantikulore. Kemudian berdasarkan analisis kemampuan lahan yang sudah dijelaskan dipenjelasan sebelumnya diketahui bahwa Kota Palu memiliki klasifikasi kemampuan lahan yang cukup kompleks. Untuk mengetahui potensi likuefaksi berdasarkan kemampuan lahan di Kota Palu dilakukan dengan cara tumpang tindih peta zona rawan potensi likuefaksi dengan peta kemampuan lahan sehingga diketahui bahwa potensi likuefaksi masuk dalam kelas d dan e dimana merupakan kemampuan lahan sangat tinggi dan kemampuan lahan agak tinggi.



Gambar 2.14 Peta Zonasi Rawan Likuefaksi Pada Kemampuan Lahan Kota Palu (KESDM, 2012 dalam Wirawan, 2019)

2.5 Tingkat Resistensi dan Daya Dukung Mineral

Mineral adalah bahan atau elemen yang terjadi secara alamiah yang mempunyai komposisi kimia tertentu kombinasi dari senyawa an organik dan struktur kristal yang khas (Jessey & Tarman, 2014; Mitchel & Soga, 2005). Secara umum, batuan mengandung mineral tertentu maupun kumpulan mineral. Mineral mempunyai komposisi kimia tertentu dan menjadi penyusun komponen (pola kristal). Namun beberapa mineral tidak mempunyai struktur kristal (*amorf*). Hirarki atau tingkat kemudahan mineral untuk melapuk disajikan dalam Gambar yang dikenal dengan Reaksi Bowen. Pada umumnya mineral yang mengkristal lebih cepat pada suhu yang sangat tinggi akan lebih mudah terlapukkan daripada yang mengkristalnya lebih akhir pada suhu yang lebih rendah (Goldschmidt, 1958).

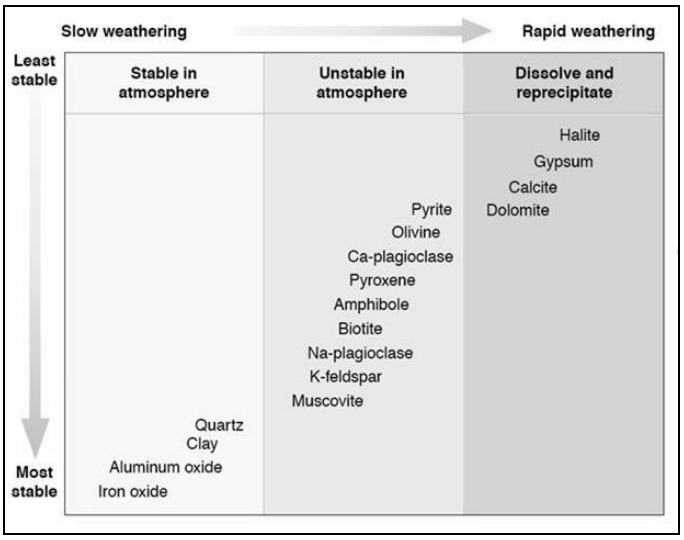
Gambar 2.15 Seri Reaksi Bowen

Proses pelapukan yang terjadi dalam mineral, sangat terkait dengan stabilitas dan unsur penyusun mineral. Reaksi Bowen menggambarkan bahwa semakin rendah temperatur pembentukan mineral, maka proses kristalisasi mineral akan semakin stabil. Pada mineral dengan kristal yang semakin stabil, maka proses pelapukan yang terjadi juga akan semakin sulit. Pada tanah-tanah yang banyak mengandung mineral yang sangat mudah lapuk (*early weathering stages*) menunjukkan bahwa tanah tersebut masih muda atau belum mengalami pelapukan lanjut. Semakin lanjut proses pelapukan yang terjadi, maka tanah yang ada juga akan semakin tidak subur yang ditandai dengan adanya mineral sulit terlapukkan (*advanced weathering mineral*) (Lis Noer Aini et all, 2016).

Tabel 2.1 Representatif Mineral Pada Tingkat Pelapukan

Tingkat Pelapukan	Representatif Mineral
Early Weathering Stage	Gypsum (also halite, sodium nitrat)
	Calcite (also dolomite apatite)
	Olivine-hornblende (also pyroxenes)
	Biotite (also glauconite, nontronite)
	Albite (also anorthite, microcline, orthoclase)
Intermediate Weathering Stage	Quartz
	Muscovite (also illite)
	2:1 layer silicate (including vermiculite, expanded hydrous mica)
	Montmorillonite
Advanced Weathering Stage	Kaolinite
	Gibbsite
	Hematite (also goethite, limonite)
	Anatase (also rutile, zircon)

Stabilitas mineral pembentuk utama batuan (ketahanan terhadap pelapukan) dinyatakan oleh seri Goldich. Dalam seri ini, kuarsa adalah yang paling stabil, diikuti oleh feldspar, mika, dan mineral kurang stabil lainnya yang hanya hadir ketika telah terjadi sedikit pelapukan. Jumlah pelapukan terutama bergantung pada jarak ke daerah sumber, iklim lokal dan waktu yang dibutuhkan untuk sedimen yang akan diangkut sana. Di sebagian besar batuan sedimen, mika, mineral feldspar dan mineral kurang stabil lainnya telah bereaksi dengan mineral lempung seperti kaolinit, illite atau smektit (Lab Mineral Optik UGM).



Gambar 2.16 Goldich series menunjukkan derajat ketahan mineral terhadap pelapukan (Goldich, 1938)

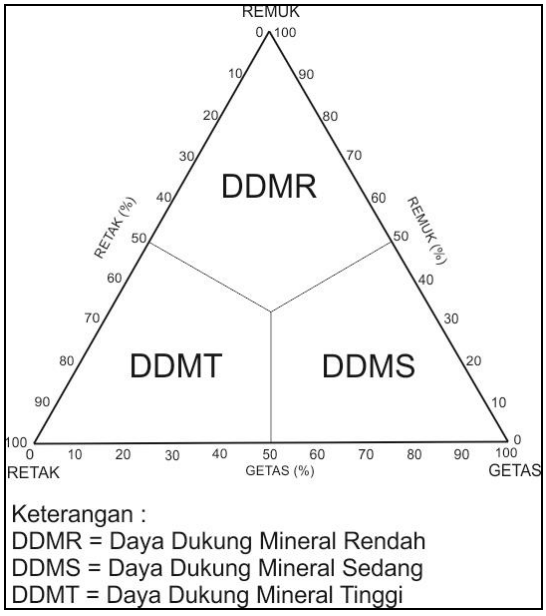
Partikel individu merupakan mineral yang memiliki sifat mikrostruktur, seperti mineral komposisi, ukuran butir, dan kerusakan mineral, telah dianggap oleh beberapa penulis sebagai penyebabnya parameter mikrostruktur untuk menentukan karakteristik proses mekanis di bahan sedimen dan batuan (Duarte, 2005).

Struktur mikro mengacu pada ciri-ciri pada permukaan itu diamati pada bagian tipis menggunakan mikroskop dalam skala milimeter. Beberapa penulis menggunakan tekstur dan mikrostruktur sebagai sinonim. Tekstur pada kerusakan mineral yang diklasifikasikan berupa kondisi mineral yang retak, getas atau terbelah hingga remuk atau hancur, di mana letak perbedaannya sebagai berikut :

- Retak : tekstur mineral yang dijumpai adanya kesan retakan serta pecahan yang dimana retakan dan pecahan ini memotong bidang belah dari mineral, baik dipusat maupun tepi mineral.

- Getas : tekstur mineral yang dijumpai adanya kesan belahan yang membagi mineral menjadi beberapa bagian dengan tidak melewati bidang belahnya.
- Remuk : tekstur mineral yang dijumpai adanya kesan remukan pada bagian mineral baik di tepi maupun pusat mineral.

Penggunaan prinsip segitiga *trinery* dalam analisis daya dukung mineral dengan klasifikasi tingkat kerusakan yaitu retak (*crack*), getas (*dike*), dan remuk(*shatter*) pada material sedimen berukuran pasir (Umar, 2017). Tingkat kerusakan mineral dalam penelitian dibagi atas 3 klasifikasi yaitu berupa retak, getas, dan hancur pada skala μm dan perubahan fisik mineral sebagai kawasan mineral (Umar, 2016). Persentase dari ketiga kondisi mineral tersebut diklasifikasikan dengan menggunakan prinsip segitiga *trinery* dalam analisis daya dukung mineral dengan klasifikasi tingkat kerusakan yaitu retak (*crack*), getas (*split*), dan remuk (*shatter*) pada material sedimen berukuran pasir (Umar, 2017).



Gambar 2.17 Klasifikasi menggunakan segitiga *trinery* untuk menentukan daya dukung mineral berdasarkan persebaran tingkat kerusakannya (Umar,2018)