GEOLOGI DAN ANALISIS KESTABILAN LERENG DINDING BARAT DAERAH BATU HIJAU, KECAMATAN SEKONGKANG, KABUPATEN SUMBAWA BARAT, PROVINSI NUSA TENGGARA BARAT

Lua Nafsiah Hafizah A. Abdan, Basuki Rahmad, Puji Pratiknyo
Program Studi Teknik Geologi Fakultas Teknologi Mineral UPN "Veteran" Yogyakarta
JL. SWK 104 (Lingkar Utara) Condongcatur, Yogyakarta 55283
Telp. (0274) 486403, 486733 ; Fax. (0274) 487816 ; Email: geoupn@indosat.net.id
Coresponding author : nafsiahlua@yahoo.com@yahoo.com

Sari - Sistem penambangan dengan metode tambang terbuka meliputi kegiatan pembongkaran lapisan penutup menjadi lereng-lereng bertingkat. Hal ini menyebabkan terjadinya perubahan gaya pada lereng dan perubahan kekuatan massa batuan. Perubahan gaya yang terjadi menyebabkan kesetimbangan lereng terganggu dan adanya pelepasan beban dalam bentuk longsoran. Lokasi pemetaan geologi di lakukan di pit Batu Hijau dan analisis geologi teknik dilakukan di lereng barat yang terbagi menjadi 10 segmen. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui geologi daerah penelitian, potensi longsor dan nilai faktor keamanan pada dinding lereng barat daerah penelitian. Metode yang digunakan yaitu pemetaan geologi, line mapping, analisis petrografi, analisis struktur geologi, analisis kinematik berdasarkan data orientasi kekar dan sesar, dan metode kesetimbangan batas. Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan, satuan batuan daerah penelitian dibagi menjadi Satuan Andesit Batu Hijau, Satuan Diorit Batu Hijau, dan Satuan Tonalit Batu Hijau. Dari hasil himpunan mineral yang ditemui, daerah penelitian terbagi menjadi 4 zona alterasi yaitu alterasi Magnetit ± Biotit, Kuarsa + Serisit ± Pirit, Klorit + Epidot, dan Kaolinit ± Klorit. Berdasarkan analisis kinematik, di identifikasi kemungkinan longsoran berupa longsoran bidang dan longsoran baji di segmen seluruh segmen. Hasil Perhitungan kesetimbangan batas dan permodelan *slide* memperlihatkan nilai faktor keamanan rata-rata yang didapat sebesar 1.39 atau memiliki faktor keamanan yang stabil (Bowles, 1991).

Kata kunci : Geologi, Kestabilan Lereng, Analisis Kinematik, Faktor Keamanan

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Pulau Sumbawa merupakan kelanjutan dari Zona Solo yang berada pada gugus Kepulauan Nusa Tenggara. Kondisi tersebut merupakan hasil tumbukan antara Lempeng Eurasia dengan Lempeng Pasifik dan tepi benua dari Lempeng Indo-Australia (Van Bemmelen, 1949). Menurut Garwin (2002), Pulau Sumbawa memiliki zona kompresi yang dibatasi oleh dua sistem patahan utama berarah baratlaut-tenggara dan timurlaut-baratdaya. Zona kompresi patahan tersebut, mempengaruhi morfologi yang berakibat pada kondisi lereng hasil penambangan yang terjadi di Batu Hijau.

Lereng merupakan permukaan tanah yang membentuk sudut kemiringan tertentu dengan bidang horisontal. Lereng dapat terbentuk secara alamiah dan buatan. Lereng buatan diakibatkan oleh manusia, seperti galian dan timbunan jalan, tanggul sungai, bendungan dan tambang terbuka (Arief, 2007). Kegiatan penambangan terbuka dengan membuat lereng berjenjang menyebabkan terjadinya perubahan gaya pada lereng. Perubahan gaya tersebut mengakibatkan terjadinya perubahan kekuatan massa batuan. Kondisi ini menyebabkan kesetimbangan lereng tidak stabil dan mengakibatkan terjadinya longsoran.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan untuk mencapai tujuan dari penelitian ini ialah menggunakan metode pendekatan. Metode pendekatan didasarkan pada data yang diperoleh di lapangan berupa data primer (litologi, alterasi struktur, dan sampel batuan) maupun data sekunder (data pemboran geotek) dianalisis dan diolah serta disajikan dalam bentuk peta dan laporan. Hasil penelitian dari peneliti terdahulu menjadi dasar acuan dalam penyajian data (Gambar 1.)

Alterasi Hidrotermal

Alterasi hidrotermal merupakan suatu proses yang kompleks yang melibatkan perubahan mineralogi, tekstur, dan komposisi kimia batuan. Proses tersebut merupakan hasil interaksi antara larutan hidrotermal dengan batuan yang dilewatinya pada kondisi fisika dan kimia tertentu (Pirajno, 1992).

Klasifikasi Alterasi Hidrotermal Pada Batu Hijau

Endapan porfiri adalah endapan dengan tonase besar dan kadar rendah hingga sedang dengan mineral bijih utamanya secara dominan dikontrol oleh struktur dan dan pembentukannya berhubungan dengan intrusi porfiri

felsik hingga intermediet (Sinclair, 2007). Endapan Porfiri adalah endapan penghasil tembaga (Cu) terbesar, lebih dari 50%. Endapan porfiri umumnya terbentuk pada jalur orogenik, contohnya pada lingkar Pasifik. Contoh endapan ini di Indonesia, terdapat di Batu Hijau.

Ukurannya yang besar serta pengaruh kontrol struktural (contoh: urat, set urat, stockwork, rekahan, dan breksi) membedakan endapan porfiri dengan endapan lain yang mungkin berdekatan. Kandungan metal dari endapan porfiri sangat beragam. Logam logam seperti Cu, Au, Mo, Ag, Re, Sn, W, Bi, Zn, In, Pb, serta logam-logam lainnya bisa hadir dalam sebuah endapan porfiri (**Gambar 2**).

Tipe mineralisasi Batu Hijau dicirikan dengan adanya endapan porfiri Cu–Au yang alterasi batuan samping yang berkembang secara zonasi akibat pengaruh keluar dari intrusi tonalit profiri. Alterasi hidrotermal yang berhubungan erat dengan mineralisasi pada sistem porfiri Batu Hijau terbagi menjadi beberapa tahap berdasarkan waktu pembentukannya (Garwin, 2002), yaitu :

a. Alterasi Tingkat Awal *(Early Alteration*)
Alterasi tingkat awal terdiri dari proses biotisasi fenokris dan masa dasar mineral mafik serta pembentukan shreddy biotit, magnetit, kuarsa dan anhidrit berasosiasi dengan biotit-kuarsa ± magnetit stringer, urat biotit terisi dan memotong dengan tipe A dan AB. Alterasi awal terjadi pada bagian dalam dan proksimal intrusi tonalit dimana di tingkat ini terdapat kalsit, digenit dan digenit-bornit.

b. Alterasi Tingkat Transisi (*Transisional Alterasion*)
Alterasi tingkat transisi ditandai dengan terubahnya biotit menjadi klorit, oligoklas menjadi albit di sepanjang urat dan hadir serisit ± kalsit. Berasosiasi dengan urat AB dan B. Magnetit telah berubah menjadi hematit. Mineralisasi berupa bornit dan kalkopirit.

c. Alterasi Tingkat Akhir (*Late Alteration*)
Alterasi tingkat akhir dicirikan oleh kehancuran feldspar (feldspar destruction), alterasi serisit dan pembentukan urat sulfida tipe D. Urat terisi oleh pirit dan kuarsa ± kalkopirit. Urat pada tahap alterasi ini umumnya dikelilingi oleh urat-urat kecil pirit-biotit dan feldspar yang terubahkan menjadi serisit. Pada perbatasan suatu tipe endapan alterasi, tahapan alterasi ini sulit dibedakan dengan bagian luar tahap alterasi transisi. Hal ini umumnya disebut "zona propilitik" (Clode dkk., 1999).

d. Alterasi Tingkat Sangat Akhir (*Very Late Alteration*)
Alterasi tingkat sangat akhir dicirikan oleh kehancuran feldspar, tetapi berbeda dengan late alteration, feldspar digantikan oleh smektit berasosiasi dengan serisit dan klorit. Mineral sulfida berupa sfalerit, galena, tennantit, pirit, kalkopirit dan sedikit bornit.

e. Alterasi Zeolit (*Zeolit Alterarion*)
Alterasi zeolit dicirikan oleh kehadiran mineral zeolit (stilbit dan laumonit) yang terbentuk pada suhu rendah. Kehadiran mineral penciri ini bersamaan dengan munculnya kalsit, kuarsa dan kristobalit yang mengisi rekahan/rongga.

Menurut Mitchell dkk (1998) dalam Clode, dkk (1999), membagi Alterasi Batu Hijau menjadi beberapa jenis, penjelasan masing-masing zona antara lain:

1. Zona alterasi *partial biotit*
   Zona ini merupakan alterasi awal yang terbentuk pada batuan tonalit. Alterasi ini dicirikan oleh mineral mafik berupa hornblend dan piroksen yang sebagian terubah menjadi biotit, selain masih ditemukannya mineral hornblend primer yang utuh. Penyebaran zona alterasi *partial biotit* mengikuti pola penyebaran intrusi tonalit muda.
2. Zona alterasi biotit sekunder
   Zona ini merupakan alterasi tingkat awal yang dicirikan oleh hadirnya biotit sekunder dan magnetit serta umumnya berasosiasi dengan urat kuarsa, hornblenda teralterasi sepenuhnya menjadi biotit. Alterasi ini ditandai dengan asosiasi mineral porfiri tingkat tinggi seperti bornit, digenit, magnetit serta secara bergradasi keluar menjadi kalkopirit dan pirit.
3. Zona alterasi *pale green mica* (PGM)
   Zona ini merupakan zona alterasi tingkat transisi yang dicirikan oleh adanya mineral mika hijau yang menandakan peralihan klorit dengan serisit dan berasosiasi dengan mineral sulfida kalkopirit dan pirit.
4. Zona alterasi klorit-epidot-serisit
   Zona ini merupakan alterasi tingkat akhir yang dicirikan oleh hadirnya klorit, epidot, serisit, pirit, magnetit dan kalsit. Plagioklas teralterasi menjadi epidot sementara mineral mafik teralterasi menjadi klorit.
5. Zona alterasi *feldspar destructive*
   Zona ini merupakan alterasi yang terbentuk paling akhir, dicirikan oleh mineral lempung, serisit, andalusit, piropilit dan berasosiasi dengan urat yang terisi mineral pirit.

Lereng

Lereng merupakan permukaan tanah yang membentuk sudut kemiringan tertentu dengan bidang horisontal. Lereng dapat terbentuk secara alamiah karena proses geologi, contohnya adalah bukit dan lembah atau tebing

sungai. Lereng juga dapat dibentuk secara buatan oleh manusia, contohnya yaitu galian dan timbunan jalan, tanggul sungai, bendungan dan tambang terbuka (Arief, 2007).

Struktur Geologi

Struktur geologi merupakan gambaran arsitektur permukaan bumi akibat deformasi batuan oleh gaya tektonik (Thompson dan Turk, 1997). Struktur yang banyak berkembang adalah kekar. Kekar adalah struktur retakan/rekahan terbentuk pada batuan akibat suatu gaya yang bekerja pada batuan tersebut dan belum mengalami pergeseran. Secara umum dicirikan oleh pemotongan bidang perlapisan batuan. Dari hasil pemotongan bidang tersebut biasanya terisi mineral lain (mineralisasi) seperti kalsit, kuarsa dsb. Struktur kekar dapat dikelompokkan berdasarkan sifat dan karakter retakan/rekahan serta arah gaya yang bekerja pada batuan tersebut.

Analisis Kestabilan Lereng

Sebuah lereng dikatakan stabil apabila lereng tersebut tidak mengalami kelongsoran. Dalam suatu analisis kestabilan lereng tambang terbuka, diperlukan klasifikasi jenis batuan, karena batuan di daerah tersebut memiliki rentang kekuatan yang lebar dan kondisi geologi yang komplek. Maka dari itu diperlukan klasifikasi tipe batuan berdasarkan parameter geoteknik atau disebut domain geoteknik untuk keperluan analisis kestabilan lereng.

Analisis Kinematik

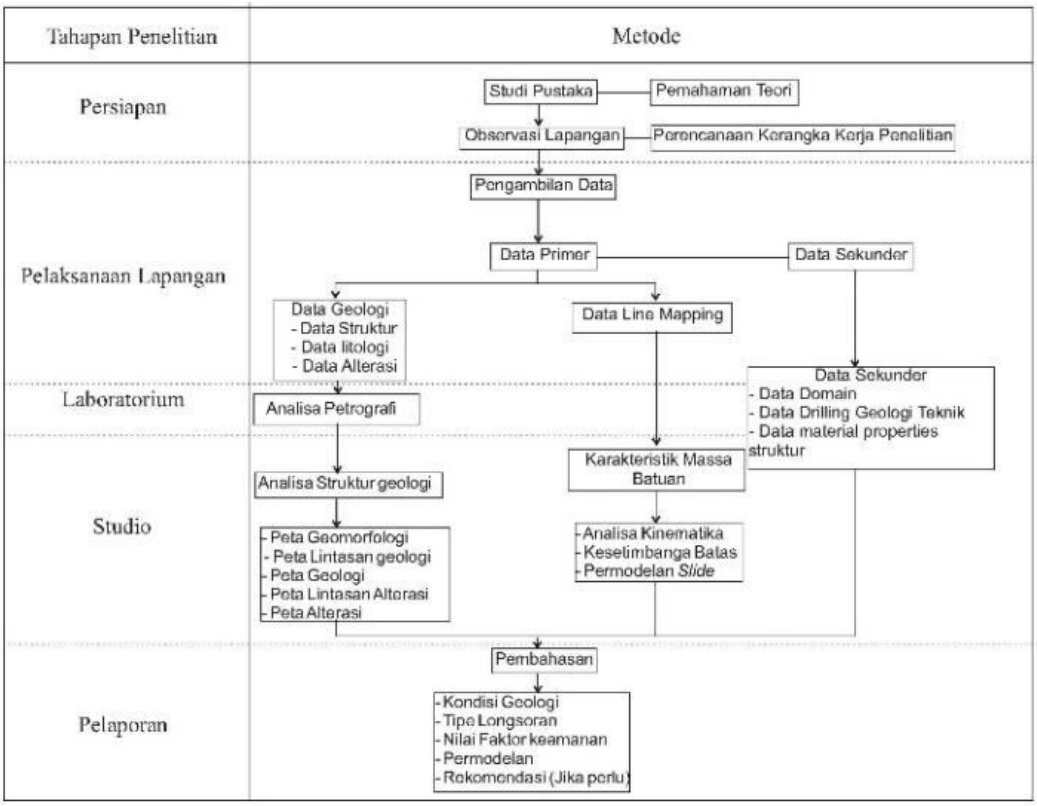
Analisis kinematik merupakan metode yang digunakan pada tahap awal dalam melakukan analisis kestabilan lereng sebelum melangkah ketahap perhitungan faktor keamanan. Dengan melakukan analisis ini dapat diketahui orientasi bidang, jenis dan arah longsoran yang mungkin terjadi (Sugiyanto, 2000). Metode analisis stereografis (stereonet) hanya dipakai untuk batuan yang mempunyai bidang lemah atau bidang diskontinuitas seperti perlapisan, kekar, sesar, foliasi dan sebagainya. Hasil yang diperoleh berupa dugaan jenis longsoran atau dengan kata lain mengetahui arah gaya–gaya yang bekerja serta arah luncuran, sedangkan besarnya gaya tidak dapat diketahui.

Lereng yang stabil apabila gaya penahan lebih besar dari gaya penggerak. Tipe longsoran dapat dibedakan menjadi empat (Hoek dan Bray, 1981), yaitu longsoran bidang (planar failure), longsoran baji (wedge failure) , longsoran busur (circular failure), dan longsoran guling (toppling failure). Longsoran bidang merupakan longsoran yang terjadi jika massa batuan bergerak menuruni lereng sepanjang bidang gelincir. Longsoran baji merupakan longsoran yang terjadi apabila dua bidang diskontinuitas berpotongan dan longsoran terjadi di sepanjang bidang diskontinuitas tersebut. Longsoran guling adalah longsoran yang terjadi jika bidang-bidang diskontinuitas yang terdapat pada lereng mempunyai kemiringan yang berlawanan dengan kemirirngan lereng (Irwandy, 2016). Longsoran busur merupakan jenis longsoran yang terjadi pada batuan yang berbutir halus atau terlapukkan secara intensif maupun pada batuan dengan bidang diskontinuitas yag rapat dengan orientasi tidak teratur.

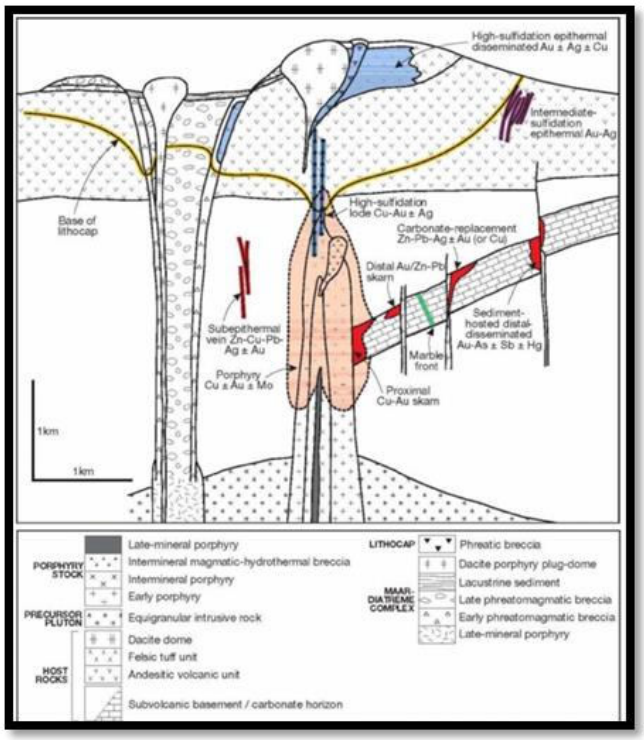
Analisis Metode Kesetimbangan Batas

Analisis kesetimbangan batas merupakan metode analisis kesetimbangan dari massa yang berpotensi bergerak menuruni lereng dengan membandingkan gaya penggerak dan gaya penahan sepanjang bidang gelincir longsoran. Tujuan dari analisis ini adalah untuk menentukan faktor keamanan dari bidang longsor yang berpotensial. Nilai faktor keamanan akan mengekspresikan tingkat kestabilan suatu lereng. Untuk klasifikasi nilai faktor keamanan menggunakan klasifikasi menurut Bowles (1984) dimana faktor kemanan ditinjau dari intensitas kelongsorannya. Dimana FK < 1,07 termasuk kelas labil, FK 1,07 – 1,25 termasuk kelas kritis dan FK > 1,25 termasuk kelas stabil.

Analisis kesetimbangan batas pada penelitian ini dilakukan pada 10 segmen. Analisis kesetimbangan batas dilakukan dengan metode General Limit Equilibrium (GLE) menggunakan Mohr- Coulomb Criterion untuk memodelkan sifat-sifat kekuatan material pengisi struktur yang relative homogen dan anisotropic strength function untuk memodelkan sifat-sifat kekuatan massa batuan. Metode GLE berdasarkan pada dua persamaan faktor keamanan lereng yaitu faktor keamanan terhadap kesetimbangan gaya dan faktor keamanan terhadap kesetimbangan momen. Dalam analisis menggunakan anisotropic strength function diperlukan data orientasi utama bidang diskontinuitas pada masing-masing sayatan. Data parameter kekuatan batuan yang digunakan adalah data hasil uji laboratorium berupa sudut geser dalam 30°, kohesi 0 kPa, dan berat jenis dari andesit berupa 26 kN/m3 (Departemen Geoteknik, PT AMNT, 2018).



Gambar 1 ***Diagram Alir Penelitian***



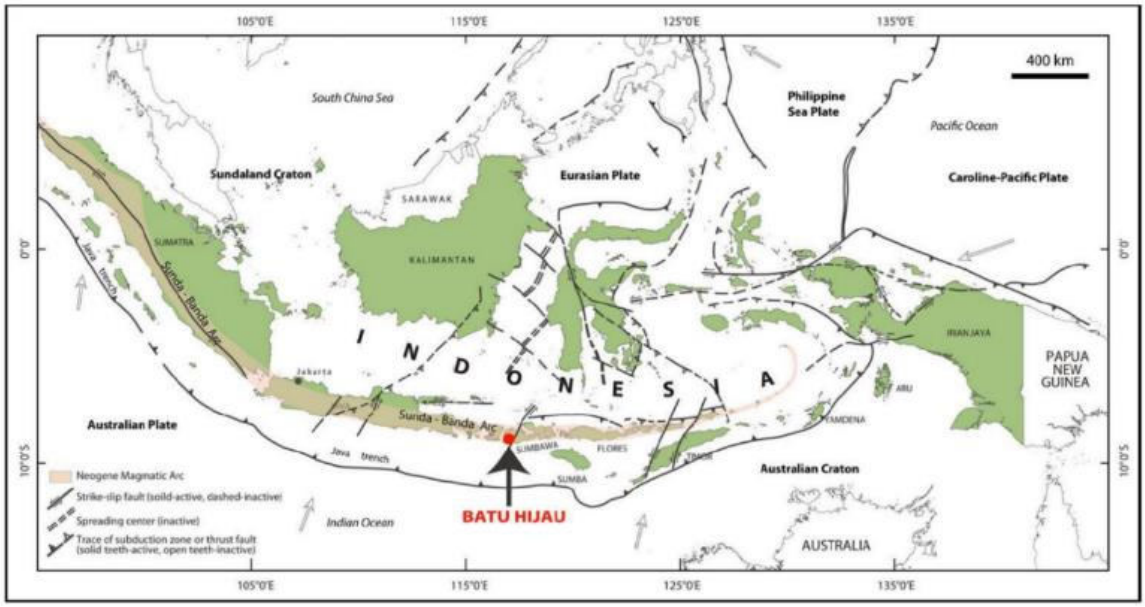
Gambar 2 ***Model genetik dan asosiasi tipe endapan porfiri (Silitoe, 2010)***

Geologi Regional Daerah Penelitian

Fisiografi Regional Pulau Sumbawa

Pulau Sumbawa merupakan kelanjutan dari zona solo yang berada pada gugus Kepulauan Nusa Tenggara (Van Bemmelen, 1949 dalam Garwin, 2002). Pulau Sumbawa merupakan bagian dari sebelah timur Paparan sunda di dalam sistem Busur Kepulauan Sunda-Banda (Sjoekri, 1997 dalam Garwin, 2002). Kepulauan Sunda-Banda merupakan gabungan dari beberapa sistem jalur subduksi atau busur magmatik, yaitu Busur Sunda dengan arah

pergerakan ke barat dan Busur Banda ke timur. Pulau Sumbawa berada di Kepulauan Nusa Tenggara terletak di zona transisi antara kedua busur tersebut (Sjoekri, 1997 dalam Garwin, 2002). Bagian selatan dari kepulauan Sumbawa bagian baratdaya dibatasi oleh kerak samudera yang berumur Tersier Awal (Hamilton, 1980 dalam Clode, dkk., 1999).



Gambar 3 ***Tektonik lempeng Indonesia (Garwin, 2002)***

Stratigrafi Regional Pulau Sumbawa

Menurut Sudrajat, Manga dan Suwarna (1998), secara umum urutan stratigrafi formasi batuan yang ada di Sumbawa bagian Barat tersusun oleh batuan sedimen, batuan vulkanik dan batuan intrusive. Persebaran batuan ini tergambar dari bentukan morfologi yang beragam di Sumbawa bagian Barat.

1. Batuan sedimen

Variasi batuan sedimen di Sumbawa terdiri atas batuan sedimen klastik lingkungan transisi hingga laut dengan pengaruh proses vulkanisme yang ditunjukkan oleh komposisinya (**Tabel 1**).

Tabel 1 ***Formasi batuan sedimen di Pulau Sumbawa (Sudrajat, Manga dan Suwarna, 1998)***

	Formasi Batuan	Keterangan
a.	Batugamping (Tml)	Satuan batugamping ini terdiri dari batupasir dan batupasir gampingan serta rombakan gunungapi gampingan. Satuan ini berumur Miosen Awal.
b.	Batupasir Tuffan (Tms)	Terdiri dari batupasir tuffan, batulempung, tuff dan breksi dengan lensa batugamping. Satuan ini berumur Miosen Awal.
c.	Batugamping Koral (Tmcl)	Terdiri dari batugamping koral dengan bagian bawah terdapat rijang. Satuan ini berumur Miosen Tengah.
d.	Terumbu Koral (Ql)	Terdiri dari batugamping berjenis terumbu karang dan pecahan batugamping koral. Beberapa tempat mengandung kepingan batuan hasil gunungapi berupa andesit, andesit piroksen dan andesit berongga. Bagian bawah satuan ini mengandung konglomerat, batupasir dan lapisan tipis
e.	Batulempung Tuffan (Tpe)	Terdiri dari batulempung tuffan dengan sisipan lapisan batupasir dan kerikil hasil rombakan batuan gunungapi. Satuan ini berumur Tersier Akhir.

2. Batuan vulkanik

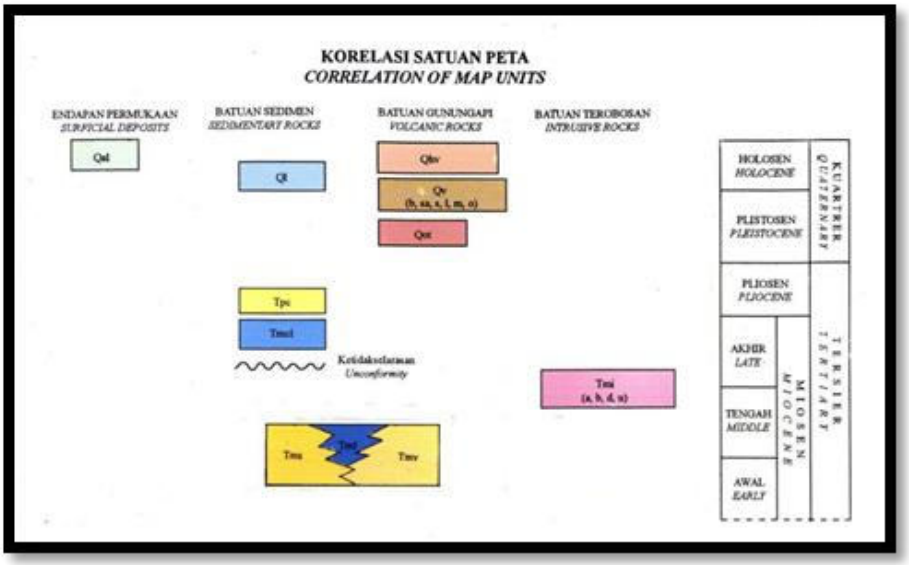
Batuan vulkanik terdiri atas batuan piroklastik dan lava dengan variasi komposisi magma intermediet hingga basa (**Tabel 2**).

Tabel 2. Formasi batuan vulkanik di Pulau Sumbawa (Sudrajat, Manga dan Suwarna, 1998)

	Formasi	Keterangan
a.	Lava Breksi (Qhv)	Terdiri dari lava, lahar, tuff dan abu gunungapi berkomposisi andesit. Batuan vulkanik dengan afinitas magma kalk alkali. Terdiri dari andesit hornblenda dan augit-hornblenda yang keduanya berupa batuapung dan vesikular andesit serta
b.	Breksi Andesit Basalt	Terdiri dari breksi gunungapi, lahar, tuff, abu dan lava yang berkomposisi andesit dan basalt.
c.	Breksi Tuff (Tmv)	Terdiri dari breksi dengan komponen andesit, bersisipan tuff, terkadang mengandung lahar, lava andesit dan basalt. Umumnya berstruktur bantal dengan sisipan rijang. Satuan batuan mengalami alterasi profilitik dengan keterdapatan
d.	Breksi Tanahn Merah (Qot)	Terdiri dari breksi gunungapi yang berkomposisi andesit, hasil letusan Gunung Tanah Merah berumur Kuarter.

3. Batuan terobosan/Intrusi

Satuan Batuan Terobosan (Tmi) tersusun atas andesit, basal, dasit, dan batuan yang tak teruraikan yang sebagian merupakan batuan beku lelehan. Satuan ini menerobos batuan berumur Miosen Awal (Tmv dan Tms). Dasit dan andesit pada umumnya mengandung pirit.

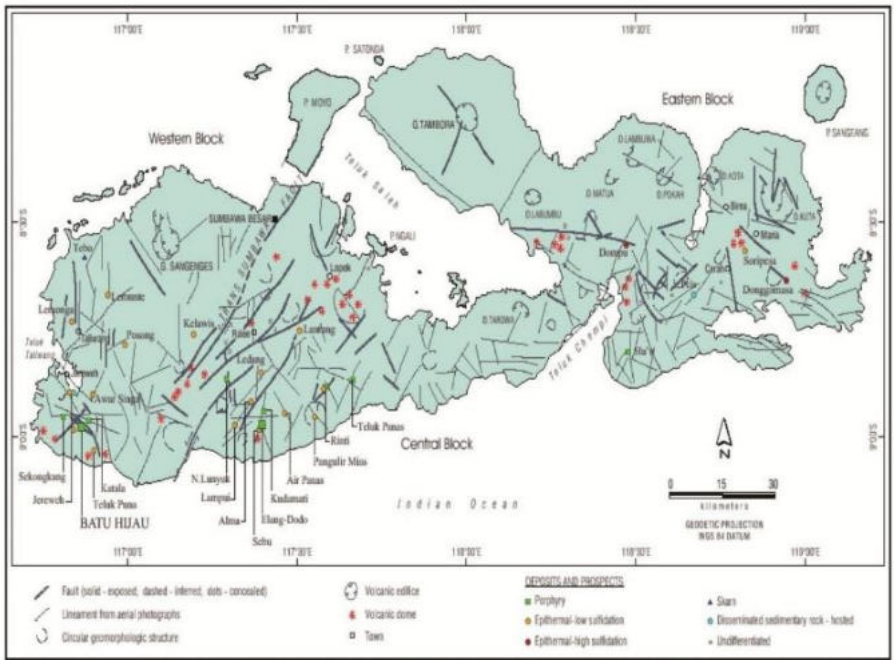


Gambar 4 ***Stratigrafi Pulau Sumbawa (Sudrajat, Manga dan Suwarna, 1998)***

Tektonisme Pulau Sumbawa

Busur Kepulauan Sumbawa dihasilkan dari tumbukan antara tiga Lempeng Hndia-Australia, Eurasia dan Lempeng Pasifik yang berinteraksi dan saling berbenturan satu dengan yang lain (Hamilton, 1980 dalam Clode, dkk., 1999). Batas tumbukan lempeng ini merupakan daerah yang sangat labil ditandai dengan munculnya tiga gunungapi aktif tipe A (Gunung Rinjani, Gunung Tambora dan Gunung Sangeangapi). Pulau Sumbawa terletak di pusat Busur Sunda yang memisahkan dua sektor yaitu Busur Sunda di bagian Barat dan Busur Banda di bagian Timur. Menurut Sudrajat, Manga dan Suwarna (1998), Pulau Sumbawa terdiri dari sistem retakan berarah Baratlaut-Tenggara dan Timurlaut-Baratdaya.

Berdasarkan tatanan tektonik, terbentuknya Pulau Sumbawa berhubungan dengan penunjaman Lempeng Hindia berarah utara-timurlaut di selatan Daratan Sunda menerus dari Pulau Sumatera hingga Jawa. Semakin ke arah Timur membentuk Busur Kepulauan Banda yang terbentuk pada masa Kenozoikum, dengan persebaran litologi berupa batuan gunungapi.



Gambar 5 ***Struktur Pulau Sumbawa dan potensi endapan mineral, struktur vulkanisme Plio-Plistosen dan pelurusan berdasarkan foto udara (Garwin, 2000)***

Bagian pusat Pulau Sumbawa memiliki zona depresi yang dibatasi oleh dua sistem patahan utama berarah Baratlaut-Tenggara dan Timurlaut- Baratdaya. Sesar yang masih aktif ditemukan di sekitar Gunung Tambora. Kelurusan Barat-Timur diisi oleh jajaran gunungapi utama dan terbentuk pada Plistosen di sepanjang Pantai Utara. Pulau Moyo dan Medang terangkat pada Zaman Kuarter, kedudukan Medang akibat pergerakan struktur relatif naik serta adanya lava bantal di Pulau Moyo menunjukan bahwa Pulau Moyo merupakan sisa kaldera di lereng Tenggara gunung bawah laut Neogen. (**Gambar 5**)

HASIL DAN PEMBAHASAN

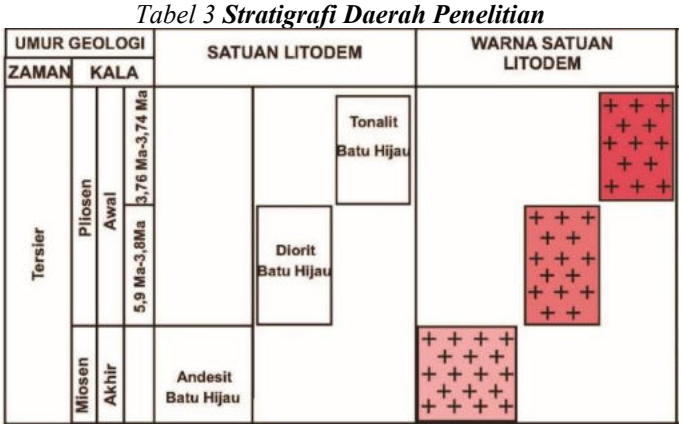
Stratigrafi Daerah Penelitian

Pembagian stratigrafi daerah penelitian mengacu pada sistem penamaan litodem (SSI 1996), yaitu penamaan satuan litodem berdasarkan ciri - ciri fisik batuan yang teramati di lapangan, melihat jenis litologi, serta posisi stratigrafi terhadap satuan-satuan yang ada di bawah maupun di atasnya. (**Tabel 3**)

Berdasarkan dengan melihat bukti kenampakan batuan di lapangan, maka stratigrafi daerah penelitian dapat disusun dari tua ke muda adalah sebagai berikut:

1. Satuan Andesit Batu Hijau
2. Satuan Diorit Batu Hijau
3. Satuan Tonalit Batu Hijau

Tabel 3 ***Stratigrafi Daerah Penelitian***

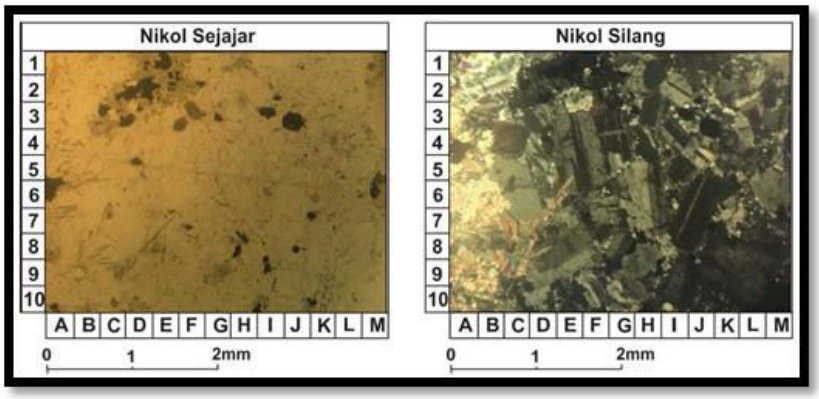


Satuan Andesit Batu Hijau

Ciri litologi dari Satuan Andesit Batu Hijau memiliki warna abu-abu kehijauan. Telah mengalami ubahan klorit+epidot serta ubahan kuarsa+serisit dengan persebaran 60% dari luasan penelitian (**Gambar 6**). Umur dari satuan andesit Batu Hijau berdasarkan peneliti terdahulu Garwin, (2000) adalah pada Kala Miosen Akhir.

Gambar 6 (A) Foto kenampakan singkapan batuan andesit pada lokasi pengamatan (LP) 8. (B) Kenampakan litologi dari batuan andesit yang mengalami ubahan filik dengan intensitas sedang. (C) Kenampakan litologi batuan andesit yang mengalami ubahan propilitik dengan ubahan sedang.

Berdasarkan pengamatan mikroskopis pada sayatan batuan terubah dengan batuan asalnya merupakan litologi andesit dapat dilihat pada keadaan nikol sejajar maupun silang (**Gambar 7**) mineral-mineral primer masih dapat terlihat yang terdiri dari plagioklas (andesin) 60%, piroksen, 2 %, kuarsa 8%, pirofilit 8%, dan mineral opaq (10%).



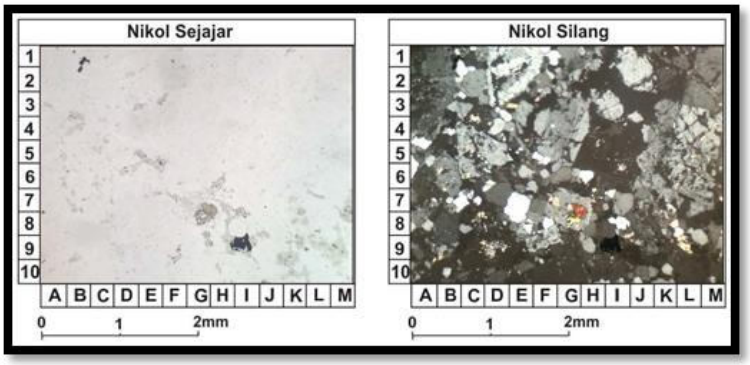
Gambar 7 Foto kenampakan petrografi Satuan Andesit Batu Hijau yang mengalami ubahan propilitik pada lokasi pengamatan 2

Satuan Diorit Batu Hijau

Ciri litologi dari Satuan Diorit Batu Hijau memiliki warna abu-abu gelap. Telah mengalami ubahan klorit+epidot serta ubahan kuarsa+serisit dengan persebaran 30% dari luasan penelitian (Gambar 8). Umur dari Satuan Diorit Batu Hijau berdasarkan peneliti terdahulu Garwin, (2000) adalah pada Kala Pliosen Awal (5,9 Ma – 3,6 Ma). Hubungan antar Satuan Diorit Batu Hijau dengan Satuan Andesit Batu Hijau adalah *cross cutting relationship*.

Gambar 8 (A) Foto kenampakan singkapan batuan diorit pada lokasi pengamatan 14. (B) Kenampakan litologi dari diorit yang mengalami ubahan filik dengan intensitas sedang pada lokasi pengamatan 14. (C) Kenampakan litologi batuan diorit yang mengalami ubahan propilitik dengan ubahan sedang pada lokasi pengamatan 25.

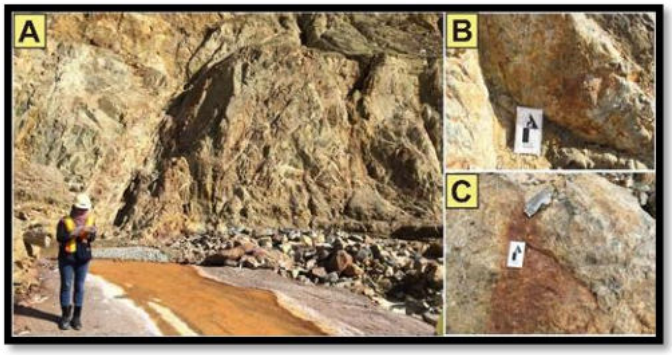
Berdasarkan pengamatan mikroskopis pada sayatan batuan terubah dengan batuan asalnya merupakan litologi diorite dapat dilihat pada keadaan nikol sejajar maupun silang (**Gambar 9**) mineral-mineral primer masih dapat terlihat yang terdiri dari plagioklas (andesin) 60%, piroksen 10 %, kuarsa 5%, mineral lempung 15%, dan mineral opaq (5%).



Gambar 9 Foto kenampakan petrografi Satuan Diorit Batu Hijau pada lokasi pengamatan 18

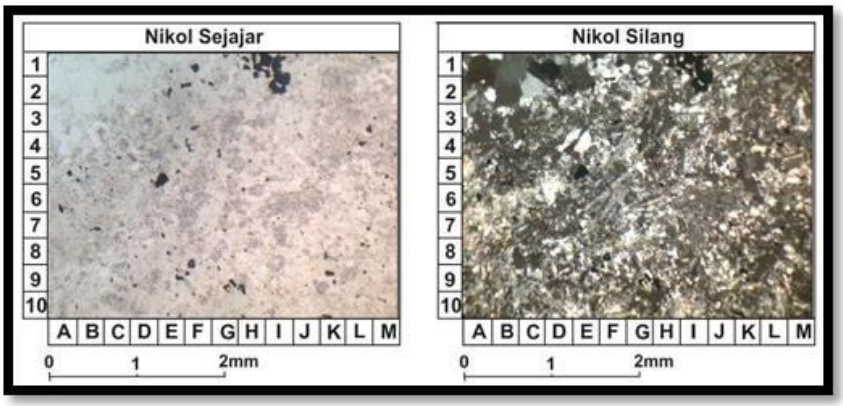
Satuan Tonalit Batu Hijau

Ciri litologi dari Satuan Tonalit Batu Hijau memiliki warna putih. Telah mengalami ubahan klorit+epidot serta ubahan kuarsa+serisit dengan persebaran 10% dari luasan penelitian (Gambar 10). Umur dari Satuan Tonalit Batu Hijau berdasarkan peneliti terdahulu Garwin, (2000) adalah pada Kala Pliosen Awal (3,76 Ma – 3,74 Ma). Hubungan antar Satuan Diorit Batu Hijau dengan Satuan Tonalit Batu Hijau adalah *cross cutting relationship*.



Gambar 10 (A) Foto kenampakan singkapan batuan tonalit pada lokasi pengamatan 16. (B) Kenampakan litologi dari tonalit yang mengalami ubahan potasik dengan intensitas sedang pada lokasi pengamatan 16. (C) Kenampakan litologi batuan tonalit pada lokasi pengamatan 38.

Berdasarkan pengamatan mikroskopis pada sayatan batuan terubah dengan batuan asalnya merupakan litologi tonalit dapat dilihat pada keadaan nikol sejajar maupun silang (Gambar 11) mineral-mineral primer masih dapat terlihat yang terdiri dari plagioklas (andesin) 30%, kuarsa 40%, mineral lempung 20%, dan mineral opaq (10%).



Gambar 11 Kenampakan petrografi Satuan Tonalit Batu Hijau pada lokasi pengamatan 38.

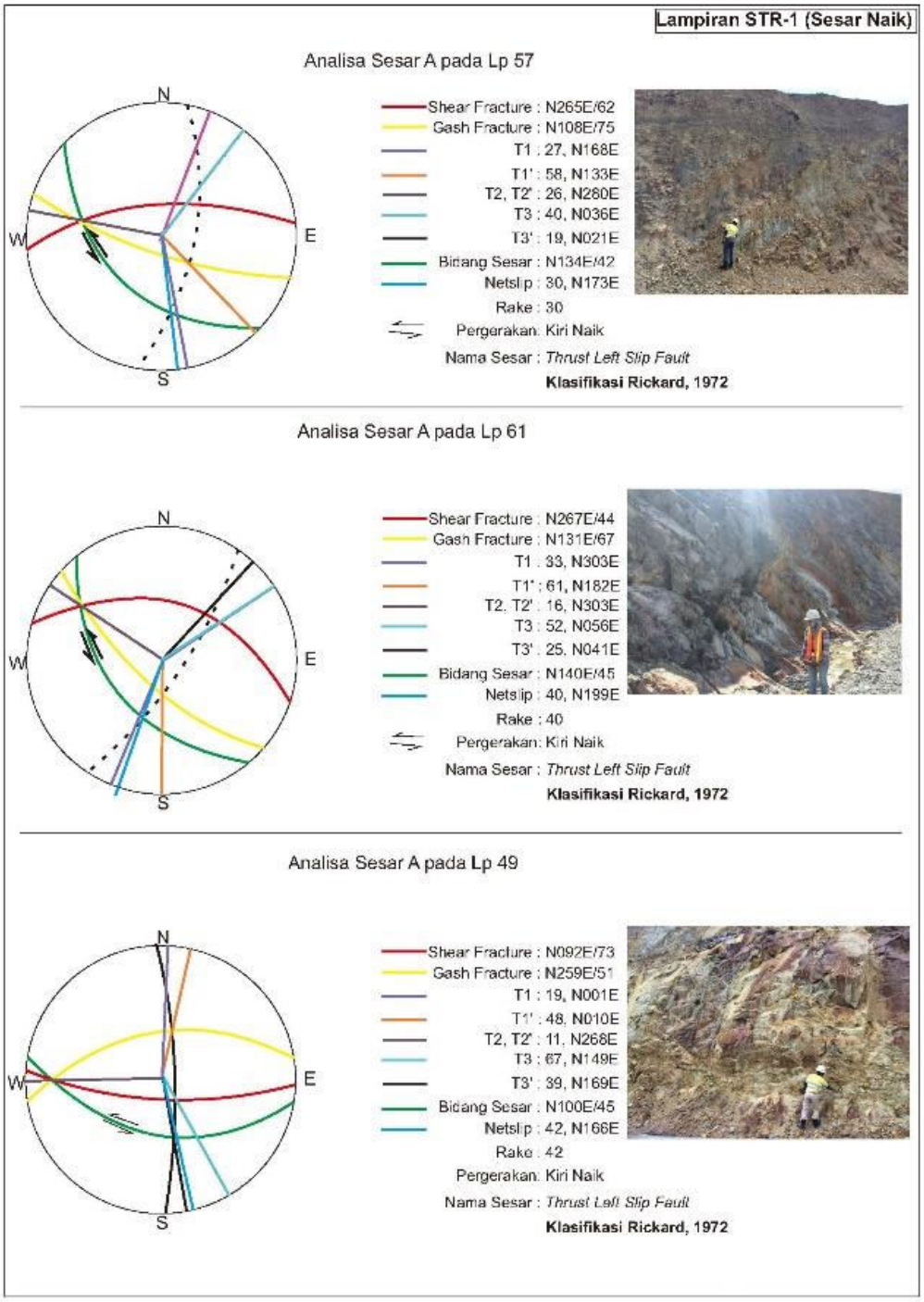
Struktur Geologi Daerah Penelitian

Sesar

Struktur geologi merupakan salah satu faktor dominan pengontrol kestabilan lereng di daerah penelitian. Struktur geologi terekam dalam batuan dan menyebabkan deformasi terhadap batuan di daerah penelitian. Adapun struktur geologi yang terdapat di lapangan antara lain berupa kekar gerus dan sesar mendatar. Pengukuran data struktur geologi di lapangan meliputi kekar gerus dan breksiasi.

Sesar A

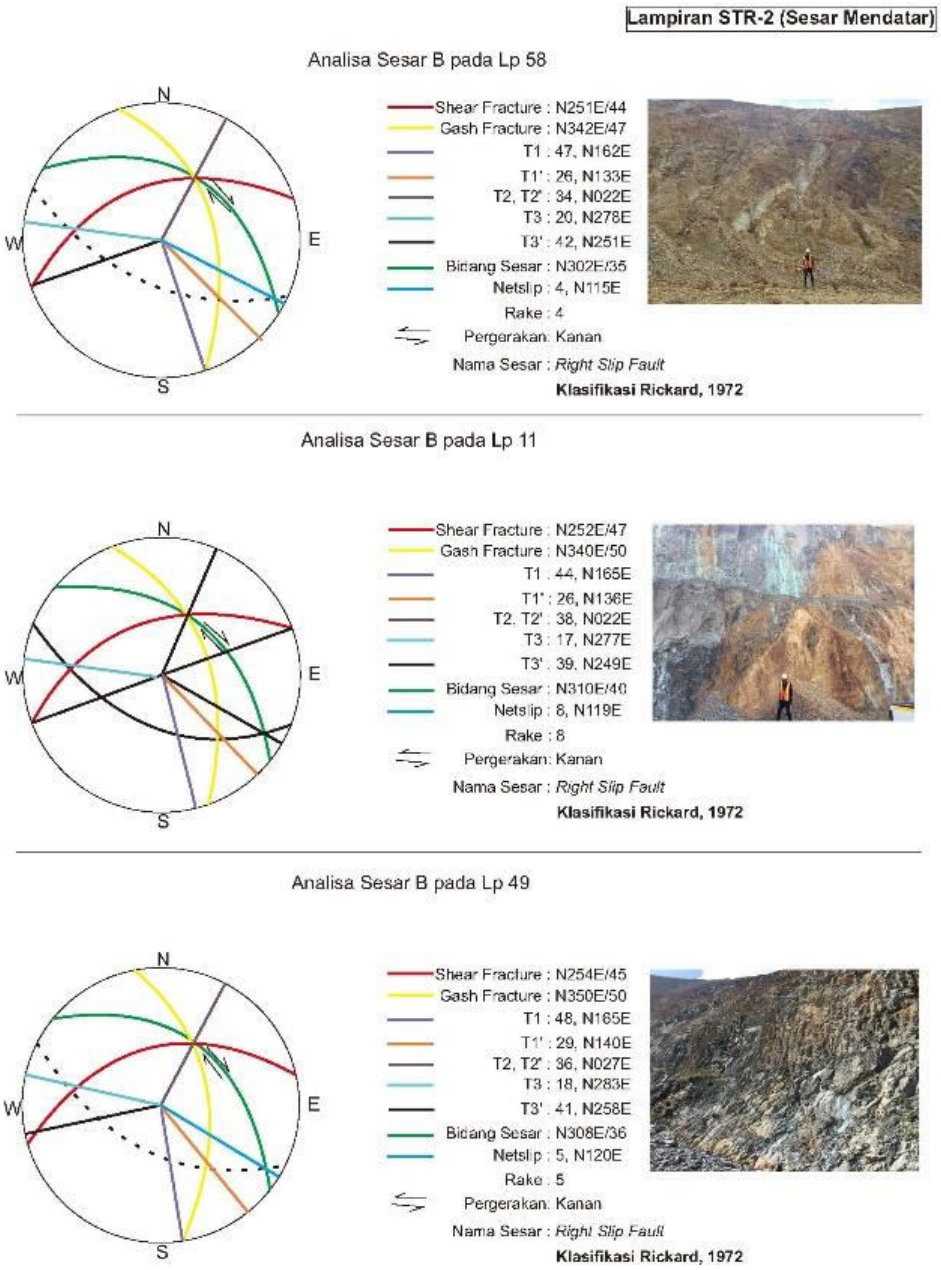
Sesar A didapatkan melalui 3 lokasi pengamatan yang dijumpai di bagian barat hingga selatan daerah penelitian yaitu di LP 49, LP 57 dan LP 61. Sesar ini berada di satuan batuan vulkanik yang telah teralterasi klorit-epidot dan menempati satuan morfologi pit. Sesar ini berorientasi baratlaut – tenggara dimana berdasarkan analisis menggunakan klasifikasi sesar oleh Rickard (1972) merupakan Thrust Left Slip Fault (**Gambar 12**).



Gambar 12 ***Analisis sesar A pada lokasi pengamatan 49, 57 dan 61***

Sesar B

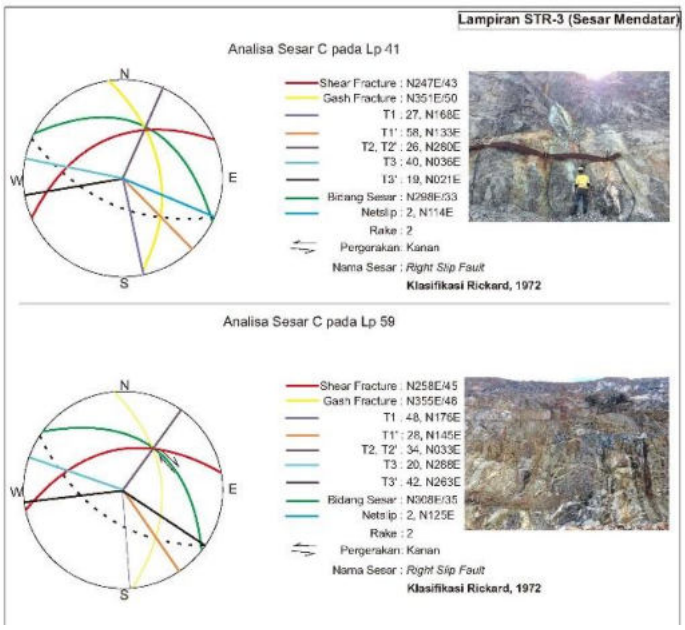
Sesar B didapatkan melalui 3 lokasi pengamatan yang dijumpai di bagian barat hingga selatan daerah penelitian yaitu di LP 11, LP 41 dan LP 58. Sesar ini berada di satuan batuan vulkanik yang telah teralterasi klorit-epidot dan menempati satuan morfologi pit. Sesar ini berorientasi baratlaut – tenggara dimana berdasarkan analisis menggunakan klasifikasi sesar oleh Rickard (1972) merupakan Right Slip Fault (**Gambar 13**).



Gambar 13 ***Analisis sesar B pada lokasi pengamatan 11, 41, dan 58***

Sesar C

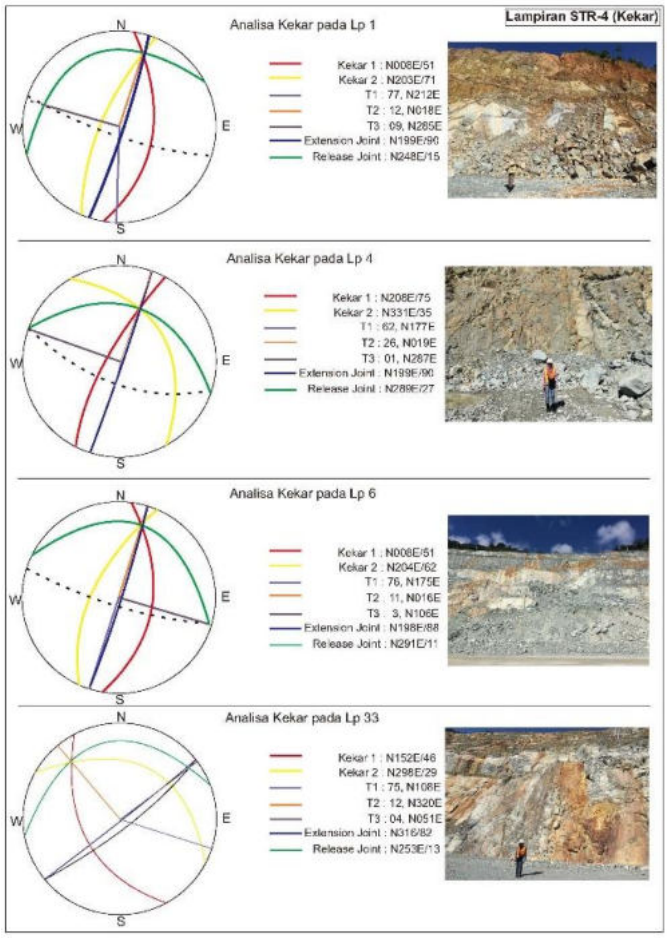
Sesar C didapatkan melalui 2 lokasi pengamatan yang dijumpai di bagian barat hingga selatan daerah penelitian yaitu di LP 41 dan LP 59. Sesar ini berada di satuan batuan vulkanik yang telah teralterasi klorit-epidot dan menempati satuan morfologi pit. Sesar ini berorientasi baratlaut – tenggara dimana berdasarkan analisis menggunakan klasifikasi sesar oleh Rickard (1972) merupakan Right Slip Fault (**Gambar 14**).



Gambar 14 ***Analisis sesar C pada lokasi pengamatan 41 dan 59***

Kekar

Struktur kekar merupakan hasil dari intrusi dan aktivitas tektonik yang berkembang di daerah penelitian. Kekar yang terbentuk hampir dijumpai diseluruh dinding tambang daerah penelitian. Kekar – kekar ini berpengaruh terhadap kestabilan lereng sehingga keberadaannya selalu dipantau oleh sistem radar yang digunakan oleh PT. AMNT. Arah umum dari tegasan utama baratlaut-tenggara (**Gambar 15**).



Gambar 15 ***Analisis kekar***

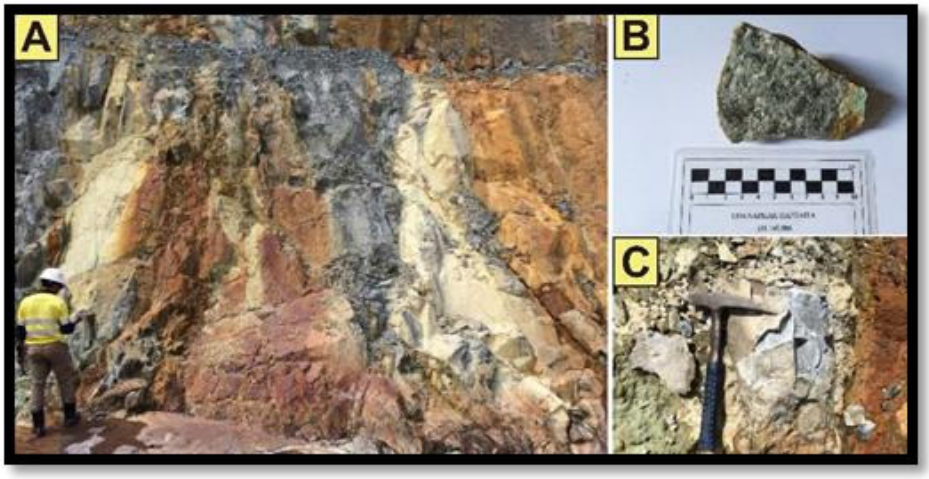
Alterasi Daerah Penelitian

Berdasarkan hasil penelitian, daerah penelitian didapatkan 4 zona tipe alterasi mineral. Empat zona tipe mineral tersebut didapatkan dari dominasi keterdapatan mineral tersebut pada batuan dari hasil pemetaan lapangan, yaitu:

1. Tipe Magnetit + Biotit (ditandai dengan mineral magnetit, biotit, k-feldspar dengan dijumpai mineralisasi bornit-kovelit-kalkopirit).
2. Tipe Kuarsa + Serisit (ditandai dengan mineral kuarsa, serisit, ±pirit)
3. Tipe Klorit + Epidot (ditandai dengan mineral klorit, epidot, ±pirit)
4. Tipe Kaolinit + Klorit (ditandai dengan mineral kaolinit, klorit)

Zona Ubahan Magnetit + Biotit (Potasik)

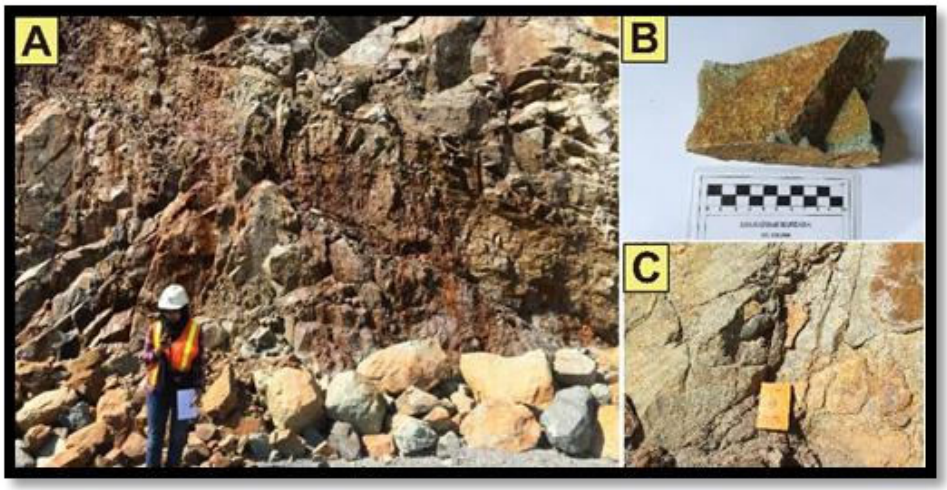
Pada zona alterasi ini ditandai dengan munculnya himpunan mineral magnetit, biotit, k-feldspar. Sebaran alterasi ini menempati 15% dari luasan daerah penelitian dan umum dijumpai pada sistem porfiri (**Gambar 16**)



Gambar 16 (A) Kenampakan singkapan alterasi potasik pada lokasi pengamatan 38. (B) handspecimen alterasi potasik dengan kehadiran mineral magnetit, biotit, k-feldspar. (C) kenampakan litologi tonalit lokasi pengematan 38.

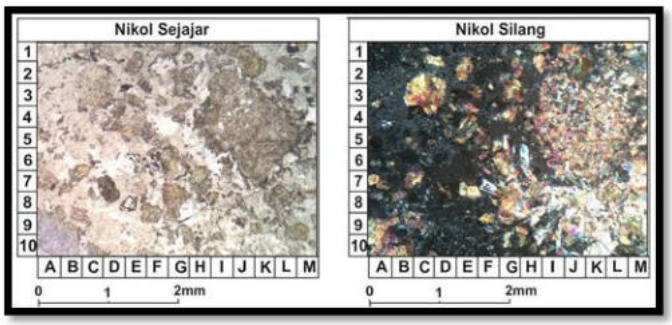
Zona Ubahan Kuarsa + Serisit (FIlik)

Tipe filik ditandai dengan munculnya himpunan mineral serisit, kuarsa, pirit. Sebaran menempati 25% dari luasan daerah penelitian dan umum dijumpai pada sistem porfiri.



Gambar 17 (A) Kenampakan singkapan alterasi filik pada lokasi pengamatan 61. (B) handspecimen alterasi filik dengan kehadiran mineral serisit, kuarsa, pirit. (C) kenampakan litologi andesit lokasi pengematan 61.

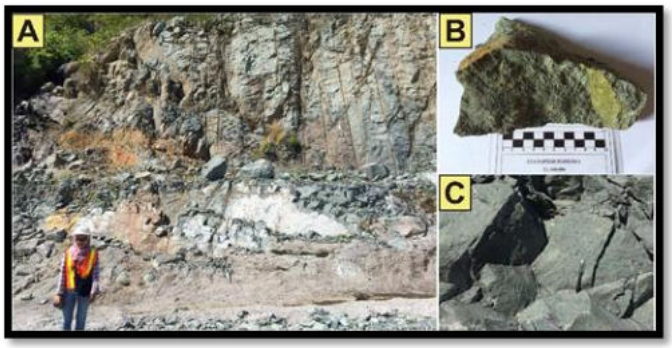
Berdasarkan pengamatan mikroskopis pada sayatan alterasi filik dijumpai mineral serisit, mineral lempung, kuarsa yang mengoverprint mineral plagioklas sebanyak 90% dari sayatan tipis (**Gambar 18**).



Gambar 18 ***Pengamatan petrografi pada alterasi filik***

Zona Ubahan Klorit + Epidot (Propilitik)

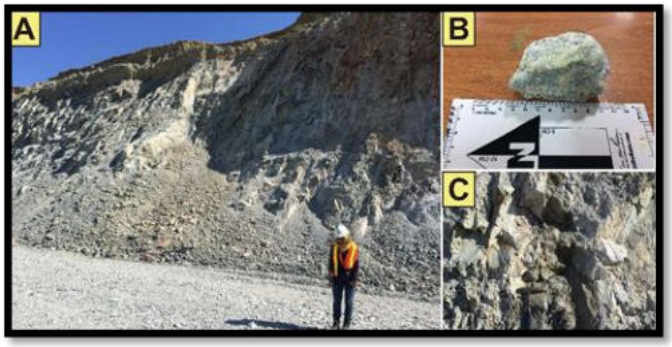
Tipe propilitik ditandai dengan munculnya himpunan mineral berwarna hijau seperti klorit, epidot, serta pirit. Sebaran menempati 50% dari luasan daerah penelitian dan umum dijumpai pada sistem porfiri (**Gambar 19**).



Gambar 19 (A) Kenampakan singkapan alterasi propilitik pada lokasi pengamatan 8. (B) handspecimen alterasi propilitik dengan kehadiran mineral klorit, epidot. (C) kenampakan litologi andesit lokasi pengematan 8.

Zona Ubahan Kaolinit + Klorit (Argilik)

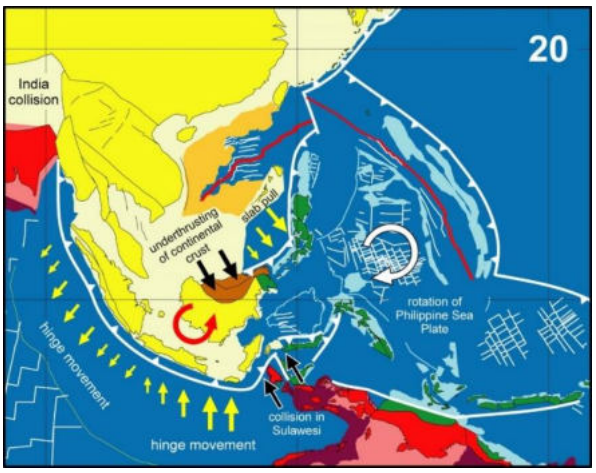
Tipe ubahan argilik ditandai dengan munculnya himpunan mineral kaolinit, klorit. Sebaran menempati 10% dari luasan daerah penelitian (**Gambar 20**).



Gambar 20 (A) Kenampakan singkapan alterasi argilik pada lokasi pengamatan 21. (B) handspecimen alterasi argilik dengan kehadiran mineral klorit, kaolinit. (C) kenampakan litologi andesit lokasi pengematan 21.

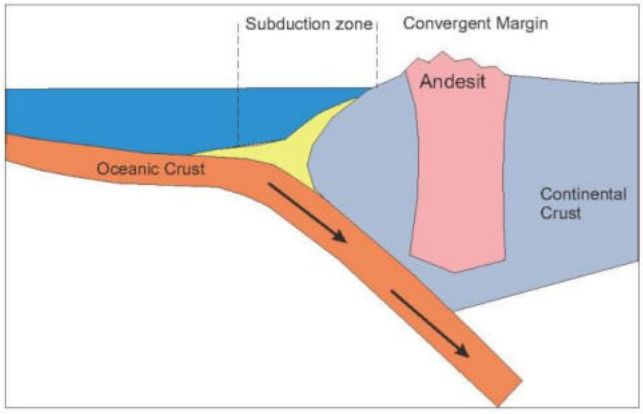
Sejarah Geologi

- Pergerakan lempeng Australia ke utara menyebabkan terbentuknya subduksi dibawah lempeng Eurasia (**Gambar 21**). Pulau sumbawa yang berada diperbatasan lempeng Eurasia mengalami kejadian tektonik berupa adanya aktivitas vulkanik di selatan pulau Sumbawa. Daerah penelitian yang berada di barat daya Pulau Sumbawa merupakan hasil dari kejadian tersebut..



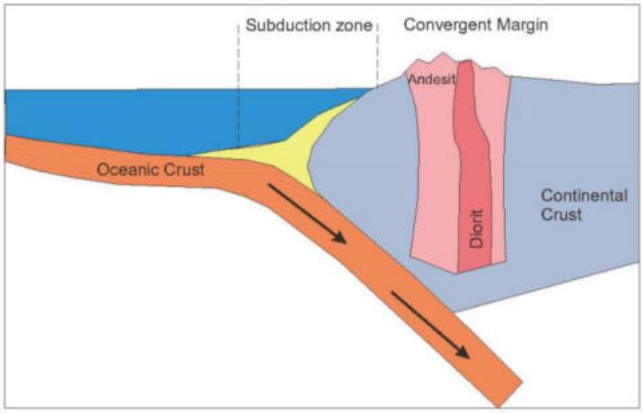
Gambar 21. Pergerakan lempeng pada Kala Miosen (Garwin, 2005)

- Pada Kala Miosen tersebut, seiring dengan pergerakan lempeng yang terus terjadi, mengakibatkan terjadinya aktivitas vulkanik pada daerah penelitian. Aktivitas vulkanik pada saat itu menghasilkan intrusi andesit pada Miosen Akhir (**Gambar 22**)



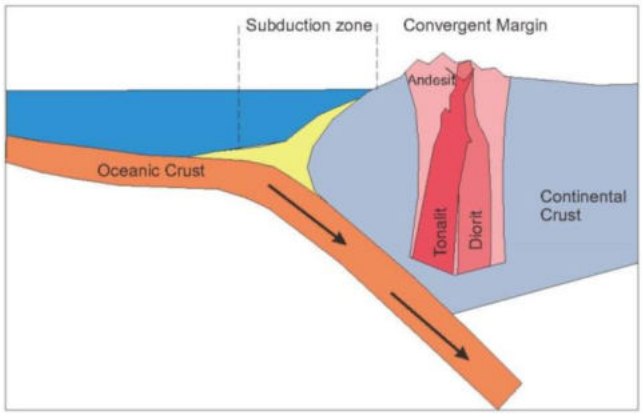
Gambar 22. Kerangka tektonik berupa subduksi Lempeng Indo-Australia terhadap lempeng Eurasia menghasilkan intrusi andesit pada Miosen Akhir (Modifikasi Sinclair (2007) dan Garwin (2000))

- Aktivitas vulkanik masih sering terjadi di daerah Batu Hijau, seiring dengan pergerakan lempeng, menyebabkan terbentuknya intrusi diorit yang terjadi pada Pliosen Awal yang berumur 5,9 Ma – 3,8 Ma yang menerobos batuan andesit (**Gambar 23**).



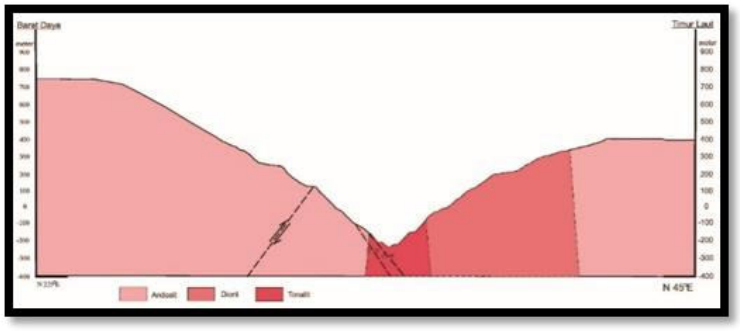
Gambar 23. Ilustrasi intrusi diorit yang menerobos batuan andesit pada Pliosen Awal (Modifikasi Sinclair (2007) dan Garwin (2000))

- Pergerakan lempeng yang terus berlansgung pada Pliosen Awal menyebabkan terjadinya intrusi batuan tonalit yang menerobos batuan diorit dan andesit. Intrusi tonalit inilah yang memebawa mineralisasi di Batu Hijau (Garwin, 2002). (**Gambar 24**).



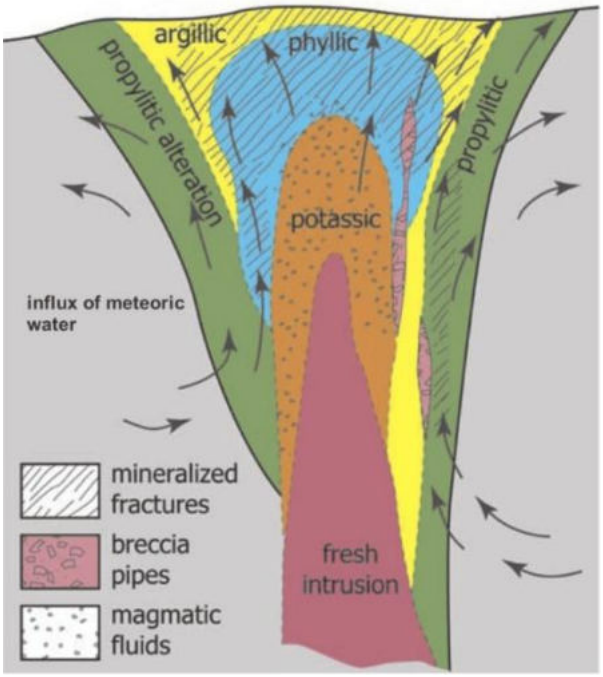
Gambar 24. Ilustasi intrusi tonalit pada Pliosen Awal yang menerbos batuan diorit dan batuan andesit (Modifikasi Sinclair (2007) dan Garwin (2000))

- Pada kala Miosen satuan andesit dan diorit Batu Hijau terpotong oleh sesar mendatar kanan dengan arah Barat Laut – Tenggara (orde 1). Lalu di susul dengan terjadinya sesar kiri naik dengan arah relatif Barat laut – tenggara pada satu kejadian tektonik yang sama (**Gambar 25**).



Gambar 25. Ilustrasi adanya sesar yang memotong stratigrafi di daerah penelitian.

- Perkembangan selanjutnya adalah dimulainya proses hidrotermal (Gambar 26).



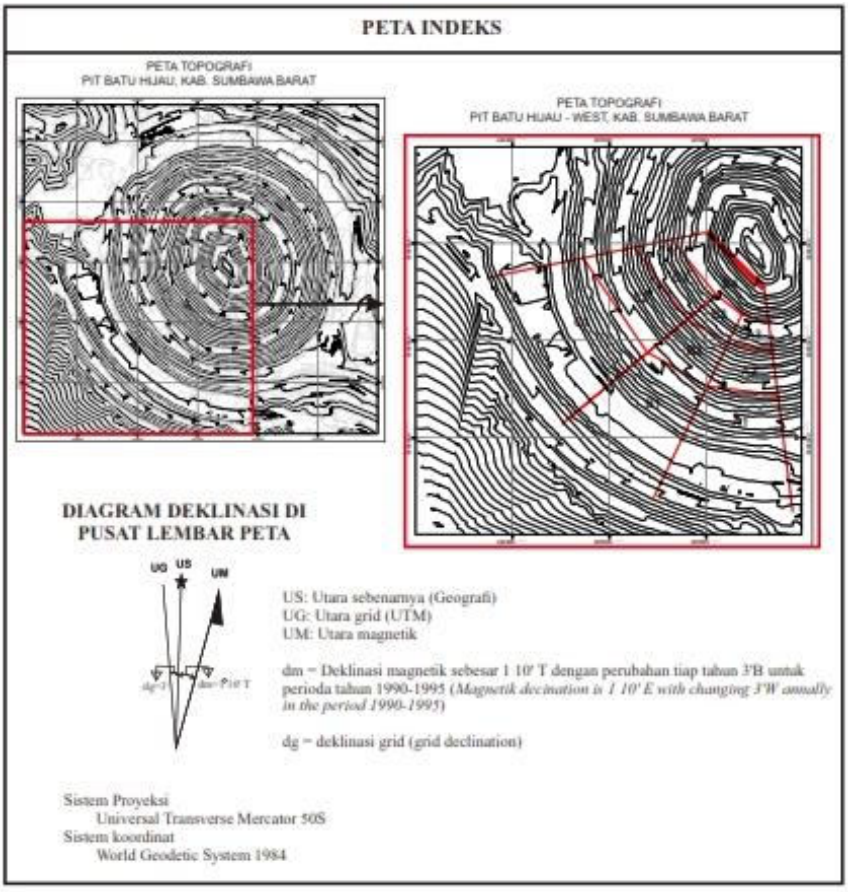
Gambar 26. Pembentukan tipe alterasi pada endapan porfiri

- Fase awal alterasi hidrotermal berasosiasi dengan intrusi Tonalit Pertama. Fase tersebut ditandai oleh proses pembentukan biotit sekunder dari mineral-mineral mafik (Alterasi Potasik) yang diikuti oleh proses kloritisasi mineral-mineral mafik termasuk biotit sekunder yang sebelumnya terbentuk. Fase ini menghasilkan zona alterasi biotit±magnetit yang dilingkupi oleh zona luas klorit-epidot (Alterasi Propilitik) di sekelilingnya.
- Aliran fluida magmatik yang keluar dari tubuh pluton mengakibatkan tubuh pluton mengalami pendinginan dan mendukung pembentukan rekahan- rekahan dalam tubuh tonalit maupun batuan yang diterobos, yakni batuan andesit. Proses tersebut diikuti oleh proses pergantian mineral-mineral silikat dalam batuan oleh serisit dan kuarsa yang terjadi karena fluida magmatik dari tubuh pluton mengalami penurunan suhu (akibat bercampur dengan fluida meteorik dan alterasi batuan samping/wall rock alteration). Pada fase ini zona alterasi klorit±magnetit terekspansi oleh zona alterasi serisit+kuarsa (Alterasi Filik).
- Aliran fluida meteorik yang menjadi semakin intens mempercepat proses pendinginan fluida magmatik, menyebabkan aliran fluida meteorik dari sekeliling sistem hidrotermal pun menjadi semakin dominan dan mengakibatkan proses penghancuran feldspar dalam batuan menjadi mineral-mineral lempung pun menjadi semakin intens. Proses tersebut mengakibatkan pembentukan zona alterasi mineral lempung (kaolinit-ilit dan pirofilit- alunit) di sekelilingnya (Alterasi Argilik).

ANALISIS KESTABILAN LERENG DINDING BARAT PIT BATU HIJAU

Analisis kestabilan lereng di Pit tambang terbuka, dilakukan dengan pemetaan line mapping. Metode line mapping adalah metode pemetaan struktur geologi dan pengambilan data karakteristik massa bataun yang dilakukan di sepanjang lereng dinding barat.

Analisis kinematik dilakukan untuk menentukan potensi tipe longsoran berdasarjan kedudukan bidang dan arah lereng. Selain mengetahui potensi longsoran, analisis kestabilan lereng dapat mengetahui nilai faktor keamanan. Dalam menentukan nilai faktor keamanan diperlukan analisis metode kesetimbangan batas. Dalam metode kesetimbangan batas dibutuhkan material propertis seperti sudut geser dalam, kohesi, unit weight yang didapat dari perusahaan. Setelah didapat nilai material propertis tersebut, data-data tersebut diolah kedalam software Slide 6.0 untuk mendapatkan nilai nilai faktor keamanan.



Gambar 27. Daerah analisis kestabilan lereng

Analisis Kinematik

Analisis kinematik atau Analisis stereografis merupakan salah satu metode analisis kestabilan lereng yang menggunakan parameter orientasi struktur geologi, orientasi lereng dan sudut geser dalam batuan yang diproyeksikan pada stereonet (Hoek dan Bray, 1981).

Dari hasil pengolahan data pada lereng dinding barat tambang Batu Hijau ditemukan beberapa potensial longsoran yang terjadi, yaitu longsoran tipe bidang dan tipe baji. Lereng dinding barat ini memiliki arah kemiringan menghadap utara-timurlaut dengan sudut geser dalam rata-rata sebesar 30° yang di dapatkan dari UCS (*Unconfined Compressive Strength Test*) rata-rata sebesar 90 Mpa, mi sebesar 25 dan GSI 65.

Daerah analisis dibagi menjadi 3 sektor yaitu sector A, sector B dan Sektor C. dari ketiga sektor tersebut dibagi lagi kedalam beberapa segmen berdasarkan sudut kemiringan lereng dan besaran slope aspect dari lereng tersebut, sehingga terdapat 10 segmen penelitian yang diamati. Berikut hasil dari analisis kinematik yang telah dilakukan:

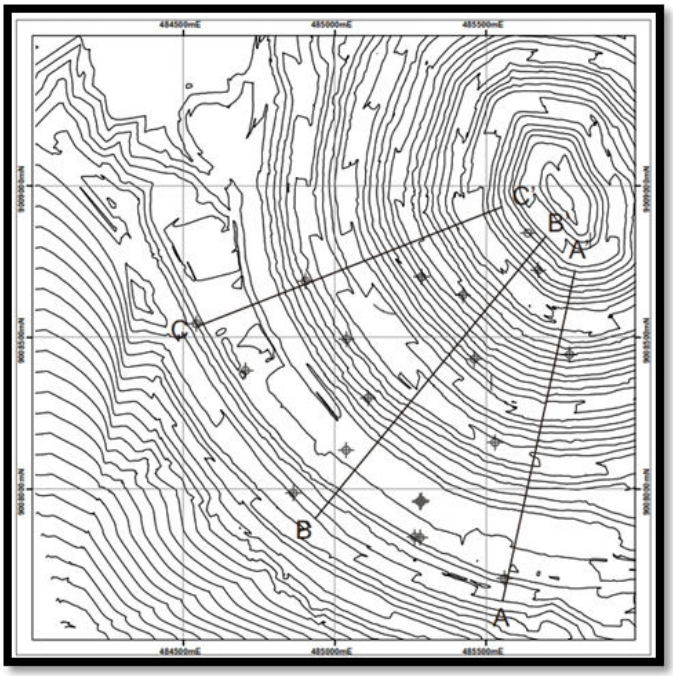
Tabel 4 Hasil analisis kinematik dari 10 segmen lereng dinding barat Pit Batu Hijau

SEGMEN	SUDUT KEMIRINGAN LERENG	SUDUT KEMIRINGAN STRUKTUR	ARAH KEMIRINGAN LERENG	ARAH KEMIRINGAN KEKAR	SUDUT GESER DALAM	ANALISIS KINEMATIK (PoF (%))			TIPE LONGSORAN
						TIDAK TERJADI LONGSORAN	BIDANG	BAJI	
							Drilling & Line Mapping	*Drilling & Line Mapping*	
A1	40°	19°	N014°E	N017°E	30°	86.03	9.09	4.88	Longsoran Bidang
A2	43°	81°	N014°E	N251°E	30°	90.52	5.56	3.92	Longsoran Bidang
A3	43°	77°	N017°E	N272°E	30°	67.45	14.29	18.26	Longsoran Baji
B1	40°	31°	N040°E	N358°E	30°	79	9.62	11.38	Longsoran Baji
B2	41°	20°	N040°E	N026°E	30°	90.85	5	4.15	Longsoran Bidang
B3	43°	57°	N040°E	N057°E	30°	84.81	6.67	8.51	Longsoran Baji
B4	47°	24°	N040°E	N096°E	30°	80.78	11.11	8.11	Longsoran Bidang
C1	41°	54°	N054°E	N060°E	30°	79.12	9.62	11.26	Longsoran Baji
C2	43°	26°	N054°E	N095°E	30°	78.16	8	13.84	Longsoran Baji
C3	43°	21°	N054°E	N064°E	30°	81.78	11.54	6.68	Longsoran Bidang

Analisis Metode Kesetimbangan Batas

Metode kesetimbangan batas dilakukan untuk dapat mengetahui bagaimana pengaruh struktur dalam kestabilan lereng dinding tambang. Tujuan dari metode kesetimbangan batas adalah untuk menentukan faktor keamanan dari lereng. Nilai faktor keamanan akan mengekspresikan tingkat kestabilan suatu lereng**.**

Analisis kesetimbangan batas dilakukan dengan metode General Limit Equilibrium (GLE) menggunakan Mohr-Coulomb Criterion untuk memodelkan sifat-sifat kekuatan material pengisi struktur yang relative homogen dan anisotropic strength function untuk memodelkan sifat-sifat kekuatan massa batuan. Metode GLE berdasarkan pada dua persamaan faktor keamanan lereng yaitu faktor keamanan terhadap kesetimbangan gaya dan faktor keamanan terhadap kesetimbangan momen. Dalam analisis menggunakan anisotropic strength function diperlukan data orientasi utama bidang diskontinuitas pada masing-masing sayatan.



Gambar 28. Daerah analisis dan sayatan analisis metode kesetimbangan batas

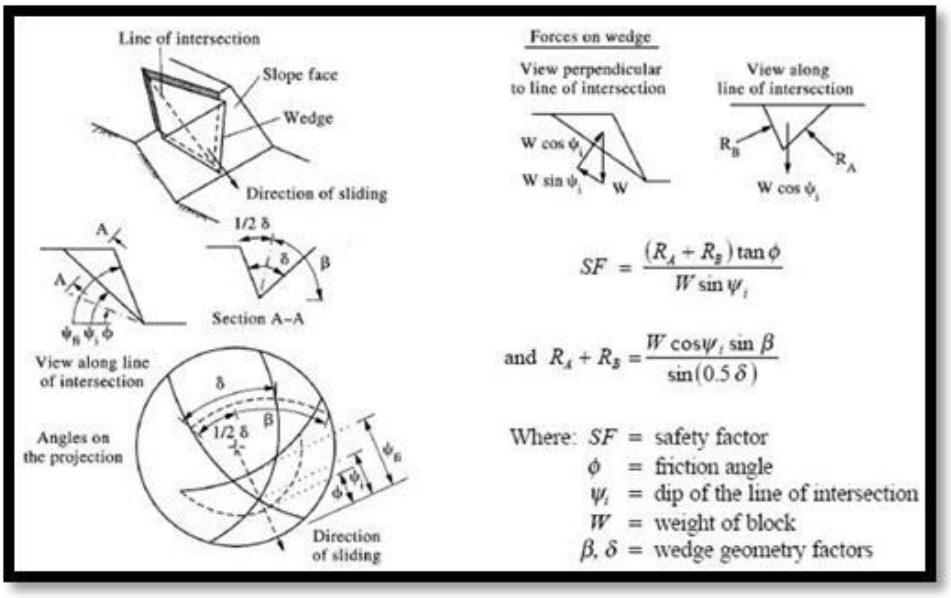
Dari hasil analisis metode kesetimbangan batas pada 10 lereng dinding barat pit Batu Hijau, didapatkan hasil sebagai beikut:

SEGMEN		ANALISIS KESETIMBANGAN BATAS (FK)		ANALISIS KESETIMBANGAN BATAS (FK RATA-RATA)	KRITERIA RESIKO BOWLES, 1991
A	A1	1.81	1.53	1.38	STABIL
	A2	1.29			STABIL
	A3	1.51			STABIL
B	B1	1.13	1.07		KRITIS
	B2	1.24			KRITIS
	B3	1.41			STABIL
	B4	1.02			LABIL
C	C1	1.49	1.28		STABIL
	C2	1.50			STABIL
	C3	1.40			STABIL

Berdasarkan hasil analisis kestabilan lereng dinding barat didapatkan lereng yang memiliki kemungkinan terjadi longsoran terbesar dari 10 lereng yang telah di analisis, didapatkan lereng segmen A3 dengan hasil analisis kinematik terkecil untuk probabilitas tidak terjadi longsoran sebesar 67,45%. Namun, memiliki FK hasil metode kesetimbangan batas sebesar 1,51 dengan kriteria stabil (Bowles, 1991).

Berdasarkan hasil analisis kestabilan lereng menggunakan *software slide 6.0*, penulis membandingkan nilai faktor keamanan antara *software slide 6.0* dengan perhitungan manual berdasarkan tipe longosran bidang dan tipe longsoran baji yang dilakukan pada empat lereng yang memiliki potensi kelongsoran tipe bidang dan tipe baji.

Berikut adalah perhitungan faktor keamanan pada lereng batuan di pit Batu Hijau berdasarkan tipe longsoran baji:

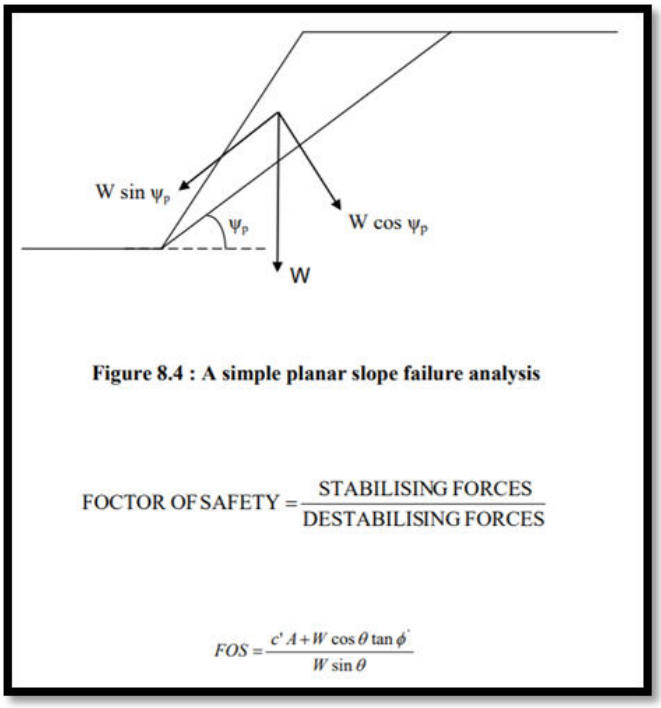


Gambar 29. Konsep Perhitungan Faktor Keamanan Pada Tipe Longsoran Baji

Tabel 5. Perhitungan Faktor Keamanan Pada Tipe Longsoran Baji

Lereng	Berat (W)	jarakantar kekar(...°) (δ)	jarak arah lereng dg arah longsoran (β)	sudut geser dalam (θ)	perpotongan kekar (a)	RA + RB (W.cos a.sinβ) (sin 1/2 δ)	FS (RA+RB).tan θ W.sin a
A3	26	103	115	30	38	23.73	0.86
C1	26	112	90	30	30	27.16	1.21

Untuk perhitungan faktor kemanan pada lereng batuan di pit Batu Hijau berdasarkan tipe longsoran bidang sebagai berikut:



Gambar 30. Konsep Perhitungan Faktor Keamanan Pada Tipe Longsoran Bidang

Tabel 6. Perhitungan Faktor Keamanan Pada Tipe Longsoran Bidang

Lereng	Berat (W)	Slope (ψ)	Dip Kekar (b)	Sudut geser dalam (θ)	W.sin b	W.cos b.tan θ	FS (W.cos b.tan θ) / W.sin b
B4	26	47	23	30	10.16	13.82	1.36
C3	26	54	21	30	9.31	15	1.50

Dari hasil perhitungan tersebut dan membandingkan dengan menggunakan *software slide 6.0* dan memiliki kesimpulan bahwa nilai faktor keamanan yang lebih relevan terhadap keadaaan lereng batuan di pit Batu Hijau adalah perhitungan dengan berdasarkan tipe longsoran bidang dan berdasarkan tipe longsoran baji.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian "Geologi dan Analisis Kestabilan Lereng Dinding Barat Daerah Batu Hijau, Kec. Sekongkang, Kab. Sumbawa Barat, Prov. Nusa Tenggara Barat" didapatkan kesimpulan:

1. Kondisi geologi daerah penelitian terdiri atas
   - Geomorfologi: memiliki 2 bentukasal yaitu bentuk asal vulkanik dan bentuk asal antropogenik dengan bentuklahan berupa Perbukitan intrusi, pit, stockpile, area reklamasi.
   - Stratigrafi: memiliki 3 satuan batuan dari tua ke muda diantaranya satuan Andesit Batu Hijau, satuan Diorit Batu Hijau dan satuan Tonalit Batu Hijau.
   - Alterasi: memiliki 4 tipe alterasi berupa Zona Kaolinit + Klorit (argilik), Zona Klorit + Epidot (propilitik), Zona Kuarsa + Serisit (filik), Zona Magnetit + Biotit (potasik).
2. Berdasarkan hasil line mapping di daerah focus penelitian kestabilan lereng dibagi menjadi dua kelas RMR, yaitu sangat baik dan baik. Kemudian, analisis kinematik dengan membagi daerah analisis menjadi 3 sektor (A, B, C) dan membagi sector tersebut kedalam 10 segmen berdasarkan sudut kemiringan lereng didapatkan segmen dengan potensi terjadinya longsoran bidang dan baji terbesar pada segmen A3 sebesar 32.55%
3. Dari hasil perhitungan faktor keamanan dengan metode kesetimbangan batas, penulis telah membandingkan antara hasil analisis menggunakan *software slide 6.0* dan berdasarkan tipe longsoran, disimpulkan bahwa nilai faktor keamanan yang lebih relevan terhadap keadaaan lereng batuan di pit Batu Hijau adalah perhitungan dengan berdasarkan tipe longsoran baji dan tipe longsoran bidang.

DAFTAR PUSTAKA

Anonim. 1996. *Sandi Stratigrafi Indonesia. Jakarta*: Ikatan Ahli Geologi Indonesia (IAGI), 26 h.

Aprilia, Faridha dkk. 2014. Analisis Tipe Longsor Kestabilan Lereng Berdasarkan Orientasi Struktur Geologi di Dinding Utara Tambang Batu Hijau, Sumbawa Barat. Yogyakarta. *Seminar Nasional Kebumian Ke-7 dan Simposium Pendidikan Geologi Nasional. Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada*.

Arief, S. 2007. *Dasar-Dasar Analisis Kestabilan Lereng*. PT INCO. Sorowako.

Arif, Irwandy. 2016. *Geoteknik Tambang*. Bandung; Institut teknologi Bandung.

Bateman, A. M,. 1981. *Deposit Mineral 3rdedition*. John Wiley and Sons, New York.

Bemmelen, R. W. Van. 1949. *The Geology of Indonesia. General Geology of Indonesia and Adjacent Archipelagoes*. Government Printing Office, The Hague.

Bieniawski Z.T. 1976. *Rock mass classification in rock engineering*. In Exploration for Rock Engineering, *Proc. of the Symp., (ed. Z.T. Bieniawski) 1, 97-106*. Cape Town, Balkema.

Bowles J.E. 1991, *Sifat – Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)*, Edisi Kedua, Erlangga, Jakarta

Clode, Projectt, Mitchell, dkk. 1999. Relationship of Intrusion, Wall Rock Alterastion and Mineralisation In the Batu Hijau Copper – Gold Porphyry Deposit. *Jurnal PACRIM'99 Bali Indonesia*

Corbett, G. J. Dan Leach, T. M., 1997. *Southwest Pacific Rim Gold/ Copper System: Structure, Alteration, and Mineralization*, A workshop presented for the Society of Economic Geologist, Townsville.

Garwin, 2005. The geologica Setting of Intrusion-Related Hydrotermal System near the Batu Hijau Porphyry Zopper Gold Deposit, Sumbawa, Indonesia. *Society of economic Geologist Special Publication 9, 2002, p. 333-366.*

Garwin, S., 2000. Distric-scale Expression of Intrusion-related Hydrothermal Systems Near the Batu Hijau Porphyry Copper-Gold Deposit, Sumbawa, Indonesia. *Proceedings of Banda and Eastern Sunda Arcs 2012 MGEI Annual Convention, Malang, Jawa Timur*.

Guilbert, G. M., dan Park, C. F., 1986. *The Geology of Ore Deposits*. New York: W.H. Freeman and Company.

Hoek, E. 1968. *Brittle failure of rock. In Rock Mechanics in Engineering Practice* . (eds K.G. Stagg and O.C. Zienkiewicz), 99-124. London: Wiley.

Hoek, E. dan Bray, J.W.1981. *Rock Slope Engineering 3rd Ed*. The Institution Of Mining and Metallurgy. London.

Hoek, Evert. 2006. *Practical Rock Engineering*. Canada; Evert Hoek Consulting Engineer Inc.

Le Bas, M.J. dan Streckeisen, A.L. 1991. *The IUGS Systematics of Igneous Rocks*. Journal of The Geological Society. London. Vol. 148, pp. 825-833.

Lowell, Guilbert. 1970. Lateral and vertical alteration mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Bulletin of society of economic geologist Vol. 65 No. 4 pp 373-408.*

Pirajno, F., 1992. *Hydrotermal Mineral Deposits, Principles and Fundamental Concepts for the Exploration Geologist*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris.

Read dan Stacey. 2009. Guidelines for Open Pit Slope Design. Australia; CRC Press/Balkerna

Rickard, M. J., 1972. *Fault Classification Discussion:* Geological Society of America Bulletin. Vol. 83, hal 2545-2546.

Romana, M,. Tomas, R., Seron, J.B. (2015). Slope Mass Rating (SMR) geomachanics classification: thirty years review. ISRM Congress 2015. *Proceedings – International Symposium on Rock Mechanics, Quebec, Canada, May 10 to 13 2015. ISBN: 978-1-926872-25-4, hal 10* .

Sillitoe, R.H., & Hedenquist, J.W., 2003, *Linkages between Volcanotectonic Setting, Ore-fluid Compositions and Epithermal Precious Metal Deposits*. Soc. Econ.Geol. Spec Publ.10 hal 315-343.

Sinclair, W.D., 2007. *Porphyry deposits. In: Goodfellow, W.D. (Ed.),* Mineral deposits of Canada, 5. Geological Association of Canada Special Publication, hal 223– 243.

Sudradjat, A., Mangga, S.A. dan Suwarna, N., 1980. Peta Geologi Lembar Sumbawa, Nusa Tenggara Barat, skala 1 : 250.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.

Sutarto. 2001."*Buku Petunjuk Praktikum Endapan Mineral*" Edisi 2, Laboratorium Endapan Mineral, Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta.

Verstappen, H., 1985. *Applied Geomorphology: Geomorphological Surveys for Environmental. Amsterdam*: Elsevier. Xi + 473 pp.

Zuidam, Van R. A., 1983. *Applied Geomorphological Surveys and Natural Hazard Zoning*. International for Aerospace Surface and Earth Science (ITC), Enschede, the Netherlands..