



ANALISIS BAHAYA, LINTASAN, DAN SISTEM PROTEKSI TERHADAP POTENSI LONGSORAN TIPE JATUHAN BATU PADA LERENG BANGUNAN PELIMPAH BENDUNGAN TUGU, JAWA TIMUR

ANALYSIS OF HAZARD, TRAJECTORY, AND PROTECTION SYSTEM TO LANDSLIDE POTENTIAL WITH ROCK FALL TYPE ON SPILLWAY OF TUGU DAM IN EAST JAVA

Muhammad Iqbal Hamidi ¹⁾* Imam Achmad Sadisun²⁾

^{1, 2)}Institut Teknologi Bandung
Jln. Ganesha 10, Bandung, Indonesia

*Correspondence email: iqbalhamidi@students.itb.ac.id

Diterima: 17 Agustus 2021; Direvisi: 06 September 2021; Disetujui: 04 Oktober 2021

ABSTRACT

The construction of the Tugu Dam spillway does not escape the problem of slope instability, especially the rock fall type landslide as a result of the rock slope cutting work at STA+80. The purpose of this study was to determine the characteristics of the rock discontinuity area and the solutions needed to address the potential hazards of rock fall on the slopes of spillway structure. In this study, a semi-quantitative method conducted based on the Rockfall Hazard Rating System (RHRS) which is carried out by identifying outcrops on rock slopes. Determination of the rock fall trajectory, was conducted by statistical methods on rock mass based on changes in velocity when rocks roll, slide, and bounce. Geologically, the research area belongs to the Mandalika Formation. Based on the RHRS weighting, the total score on the STA+80 slope is 399, which means that the slope needs to be repaired or given safely with a moderate level of urgency. The rock fall trajectory modeling at the measurement location $X = 121,875$ has a kinetic energy of 973.14 kJ andesite and 72.59 kJ of volcanic breccia, for high results of 0.43 meters of andesite reflection and 2.04 meters of volcanic breccia, and velocity results translational velocity obtained at 33.8 m/s andesite and 8.67 m/s volcanic breccia. The potential for rock fall requires a safety system with a type of retained flexible barriers with a height of 5 meters that can be applied to the toe of the slope.

Keywords: rock fall, discontinuity, trajectory, protection system, Tugu Dam

ABSTRAK

Pembangunan bangunan pelimpah Bendungan Tugu tidak luput dari masalah ketidakstabilan lereng, khususnya longsoran tipe jatuhnya batu sebagai akibat dari adanya pekerjaan pemotongan lereng batuan pada STA+80. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik bidang diskontinuitas batuan dan solusi yang diperlukan untuk menyikapi potensi bahaya jatuhnya batu pada lereng bangunan pelimpah. Dalam penelitian ini, metode semi kuantitatif berdasarkan Rockfall Hazard Rating System (RHRS) dilakukan dengan mengidentifikasi singkapan pada lereng batuan. Penentuan lintasan jatuhnya batuan dilakukan dengan metode statistik pada massa batuan terhadap perubahan kecepatan saat batu menggulung, meluncur, dan memantul. Secara geologi daerah penelitian termasuk ke dalam Formasi Mandalika. Berdasarkan pembobotan RHRS total skor pada lereng STA+80 adalah 399 yang artinya lereng perlu diperbaiki atau diberikan pengamanan dengan tingkat urgensi yang sedang. Pemodelan lintasan jatuhnya batu dilakukan pada lokasi pengukuran $X = 121,875$. Energi kinetik yang dihasilkan pada andesit sebesar 973,14 kJ dan breksi vulkanik sebesar 72,59 kJ. Hasil tinggi pantulan pada andesit setinggi 0,43 meter dan breksi vulkanik 2,04 meter. Hasil kecepatan translasi pada andesit 33,8 m/s dan breksi vulkanik 8,67 m/s. Berdasarkan hasil tersebut, dibutuhkan sistem pengamanan dengan jenis retained flexible barriers dengan tinggi 5 meter yang dapat diterapkan pada kaki lereng.

Kata Kunci: jatuhnya batu, diskontinuitas, lintasan jatuhnya batu, sistem pengamanan, Bendungan Tugu

PENDAHULUAN

Longsoran merupakan salah satu permasalahan yang sering dihadapi dalam pekerjaan rekayasa konstruksi. Gangguan terhadap ketidakstabilan lereng dipicu oleh pemotongan lereng alami untuk memenuhi lahan desain konstruksi yang telah direncanakan.

Terminologi longsoran diadaptasi dari kata landslide yang merupakan pergerakan massa batuan, debris atau earth/massa tanah yang bergerak kebawah dari suatu lereng (Cruden, 1991). Dalam klasifikasi Cruden dan Varnes (1996) terkait pergerakan longsoran dibagi menjadi tipe *falls*/jatuhan, *topples*/jungkiran, *slides*/luncuran, *spreads*/sebaran, dan *flows*/aliran.

Menurut Cruden dan Varnes (1996), longsoran tipe jatuhan didefinisikan sebagai material tanah atau batu yang jatuh dari lereng yang terjal sepanjang permukaan lereng dengan sedikit perubahan (*no shear displacement*). Material tanah atau batu tersebut jatuh melalui udara dengan mekanisme memantul (*bouncing*) dan menggelinding (*rolling*). Pergerakan yang terjadi pada tipe longsoran ini sangat cepat hingga cepat yang ekstrim.

Pembangunan bangunan pelimpah Bendungan Tugu tidak luput dari masalah stabilitas lereng, khususnya longsoran tipe jatuhan batu sebagai akibat dari adanya pekerjaan pemotongan lereng batuan alami pada STA+80 dari bangunan pelimpah. Dengan adanya pekerjaan pemotongan lereng batuan, menyebabkan tersingkapnya batuan dengan jenis andesit dan breksi vulkanik, yang memiliki bidang diskontinuitas yang berpotensi untuk terjadinya longsoran tipe jatuhan batuan. Jatuhan batuan ini bisa terjadi setiap saat secara tiba – tiba.

Longsoran dengan tipe jatuhan batu sangat dipengaruhi oleh sifat diskontinuitas dari batuan itu sendiri. Menurut Hudson dan Harrison (2000), terminologi diskontinuitas adalah pemisahan yang terjadi pada batuan yang memiliki nilai kuat tarik nol dan digunakan tanpa melihat genetik dari suatu diskontinuitas. Adapun bentuk – bentuk dari diskontinuitas pada batuan dapat berupa kekar (*joint*), sesar (*fault*), bidang perlapisan (*bedding*), zona geser (*shear zone*), belahan (*cleavage*), dan foliasi (*foliation*) yang terdapat pada suatu massa batuan. Geometri dari diskontinuitas dapat dilihat pada **Gambar 1**. Khusus untuk lokasi lereng batuan STA+80 dipengaruhi oleh bidang diskontinuitas berupa *joint* dan *bedding*.

Peningkatan pengetahuan terkait longsoran tipe jatuhan batu sangat dibutuhkan untuk dapat memahami karakteristik dan sifat dari longsoran tipe ini. Maksud dari penelitian ini adalah untuk menganalisis bahaya dari longsoran tipe jatuhan batuan dan resiko yang ditimbulkan, sedangkan tujuan dari penelitian ini mengetahui karakteristik dan solusi yang dibutuhkan dari jatuhan batu yang ada pada lereng STA+80 dari bangunan pelimpah.

METODOLOGI

Pada penelitian ini penilaian terhadap suatu lereng batuan dengan tipe longsoran jatuhan batuan menggunakan klasifikasi RHRS (*Rock Fall Hazard Rating System*) yang diteliti oleh Pierson dan Vickle (1993) dan diperkenalkan oleh Oregon State Highway Division. Klasifikasi RHRS ini dilakukan dengan mengidentifikasi singkapan pada lereng batuan dan dimasukkan ke dalam penilaian secara semi kuantitatif.



Gambar 1 Kenampakan panorama lereng STA+80 dengan potensi jatuhan batu (2019)

Pembobotan RHRS, sebagaimana disajikan pada **Tabel 1**, dapat menilai bahaya jatuhnya batu yang diperlukan dalam menentukan mitigasi pada lereng yang diamati. Dalam klasifikasi RHRS dibagi menjadi 2 faktor penilaian, yaitu bahaya dan risiko. Faktor bahaya dari longsoran dengan tipe jatuhnya batu, dikategorikan sebagai berikut:

- 1 Ketinggian lereng;
- 2 Struktur geologi pada batuan;
- 3 Ukuran blok batuan;
- 4 Cuaca dan keberadaan air; dan
- 5 Riwayat jatuhnya batuan.

Sedangkan untuk faktor risiko, dalam klasifikasi RHRS dikategorikan sebagai berikut:

- 1 Risiko pengguna jalan di bawah lereng;
- 2 Jarak pandang untuk pengambilan keputusan;
- 3 Lebar Jalan; dan
- 4 Efektifitas puritan

Hasil klasifikasi RHRS menggambarkan semakin kecil poin yang didapatkan, maka semakin kecil potensi lereng tersebut menimbulkan bahaya bagi pemakai jalan jika terjadi longsoran dengan tipe jatuhnya batu. Di dalam metode RHRS lereng dengan skor yang lebih rendah dari 300 diklasifikasikan untuk dilakukan pekerjaan perbaikan dengan urgensi yang rendah, sedangkan untuk nilai lebih dari 500 dibutuhkan stabilisasi secepatnya.

Tabel 1 Sistem RHRS dalam penilaian bahaya jatuhnya batu

| No | Parameter | | | Skor dan Kriteria Penilaian | | | |
|----|--|-----------|-------------------------------|---|---|--|--|
| | | | | Poin 3 | Poin 9 | Poin 27 | Poin 81 |
| 1 | Tinggi Lereng | | | 7,5 m | 15 m | 22,5 m | 30 m |
| 2 | Efektivitas Parit | | | Tangkapan bagus | Tangkapan sedang | Tangkapan terbatas | Tidak ada tangkapan |
| 3 | Risiko Kendaraan Rata-rata | | | 25% | 50% | 75% | 100% |
| 4 | Persentase Jarak Pandang Penglihatan untuk Pengambilan Keputusan | | | Cukup (100%) | Sedang (80%) | Terbatas (60%) | Sangat terbatas (40%) |
| 5 | Lebar Jalan termasuk Bahu Jalan | | | 13 m | 11 m | 8,5 m | 6 m |
| 6 | Karakteristik Geologi | Kondisi 1 | Kondisi struktural | Kekar diskontinuitas, orientasi sejajar | Kekar diskontinuitas, orientasi acak | Kekar diskontinuitas, orientasi berlawanan | Kekar menerus, orientasi berlawanan |
| | | | Gesek Batuan | Kasar, tidak beraturan | Bergelombang | Datar | Terisi lempung atau terdapat <i>slickensided</i> |
| | | Kondisi 2 | Kondisi struktural | Sangat sedikit perbedaan kenampakan erosi | Sedikit perbedaan kenampakan erosi | Banyak kenampakan erosi | Sangat banyak kenampakan erosi |
| | | | Perbedaan dalam Tingkat Erosi | Kecil | Sedang | Besar | Ekstrim |
| 7 | Ukuran blok | | | 0,3 m | 0,6 m | 0,9 m | 1,2 m |
| 8 | Kuantitas Jatuhnya Batu Setiap Kejadian | | | 2,3 m ³ | 4,6 m ³ | 6,9 m ³ | 9,2 m ³ |
| 9 | Cuaca dan Kehadiran Air pada Lereng | | | Penyerapan rendah hingga sedang, tidak musim salju, tidak ada air pada lereng | Penyerapan sedang, musim salju yang pendek atau terkadang ada air pada lereng | Penyerapan tinggi atau musim salju yang panjang atau air pada lereng berkelanjutan | Penyerapan tinggi dan musim salju yang panjang dan menerus |
| 10 | Riwayat Jatuhnya Batu | | | Sedikit | Jarang | Banyak | Terus menerus |

Pierson, L. A., & Vickie, R. V. (1993)

Pemodelan Lintasan Jatuhan Batuan

Pemodelan lintasan jatuhan batu pada lereng STA+80 dengan menggunakan metode statistik terhadap karakteristik dari massa batuan penyusun lereng, perubahan kecepatan saat batu menggulung, meluncur, dan memantul terhadap berbagai material penyusun lereng. Perhitungan dalam menentukan lintasan jatuhan batu ini membutuhkan dua koefisien restitusi yang bergantung pada bentuk fragmen, kekasaran permukaan lereng, momentum, dan sifat deformasi serta dampak akibat jatuhan batu yang timbul.

Dengan mendapatkan statistik lintasan jatuhan batu maka dilanjutkan dengan mendesain sistem pengaman yang efisien dalam menghilangkan resiko ancaman jatuhan batu. Menurut Wyllie (2015) dalam melakukan investigasi, analisis, dan melakukan desain terkait struktur pengamanan yang tepat pada lereng batuan, maka langkah-langkah yang perlu dilakukan, sebagai berikut:

- 1 Memetakan topografi dan kondisi geologi yang menjadi potensi adanya jatuhan batuan dengan mengidentifikasi sumber batuan yang berpotensi. Studi kondisi geologi akan memberikan informasi ukuran dan bentuk jatuhan batu berdasarkan kekuatan batuan dan sifat diskontinuitas. Jika memungkinkan pengambilan data dilakukan dengan melakukan deskripsi langsung terhadap material jatuhan batu, geometri lereng, dan pengambilan sampel untuk mendapatkan sifat fisik diskontinuitas dari massa batuan yang menjadi penyusun lereng tersebut.
- 2 Kalibrasi terhadap model jatuhan dikarenakan kompleksitas sifat dari jatuhan batuan, sehingga diperlukan pemodelan matematik dari jatuhan batu pada material penyusun lereng yang beragam, seperti batu, talus, koluvium, aspal, dan beton.
- 3 Analisis lintasan yang bergantung kepada tumbukan dari jalur parabolik, percepatan gravitasi, dan hasil energi translasi yang bertambah selama fase jatuhan. Lintasan dari jatuhan batuan dibutuhkan untuk menentukan ketinggian struktur.
- 4 Tumbukan mekanis terjadi antara jatuhan batu dan lereng yang ditentukan oleh teori dari tumbukan mekanik. Aplikasi teori ini pada jatuhan batu dapat menentukan perhitungan tangensial, normal, kecepatan rotasional yang terjadi selama tumbukan, dan perubahan sesuai dengan energi kinetik dan rotasional.
- 5 Koefisien restitusi merupakan parameter dasar dalam menentukan perubahan kecepatan

tangensial dan normal selama tumbukan batu yang dihitung berdasarkan koefisien restitusi. Parameter ini berhubungan terhadap gesekan pada kontak permukaan dan sudut dari tumbukan pada lereng.

- 6 Kehilangan energi setelah terjadi tumbukan, hasil perubahan kecepatan selama tumbukan disesuaikan dengan perubahan energi translasi dan rotasional dari massa batuan. Perubahan energi adalah hasil dari ketahanan gesek saat batuan menggelinding pada arah tangensial dan terjadinya deformasi plastis pada massa batuan dengan lereng dalam arah normal.
- 7 Memodelkan jatuhan batu dengan program yang telah dikembangkan dalam menyediakan karakteristik dan sifat jatuhan batu, nilai energi, dan lintasan yang digunakan dalam desain.
- 8 Menyeleksi struktur pengaman dengan memilih struktur pengaman yang cocok agar lebih rasional, mempertimbangkan nilai massa batuan termasuk metode perhitungan statistik yang tergantung dari frekuensi kejadian, dan desain massa batuan yang lebih besar daripada yang diobservasi di lapangan.
- 9 Desain dasar dalam struktur pengaman dengan optimalisasi absorpsi dari energi tumbukan dari jatuhan batu.
- 10 Menentukan struktur pengaman dan juga metode pengaman untuk melawan jatuhan batu, seperti paritan, *barrier*, pagar, kawat *net* dan *rock sheds*. Setiap struktur memiliki spesifikasi terhadap kemampuan dalam menahan energi tumbukan dan menyesuaikan dengan topografi di lokasi penelitian.

Dalam pemodelan dibutuhkan beberapa parameter mekanis batuan untuk dapat menganalisis secara statistik, seperti energi, kecepatan, tinggi pantulan, dan lokasi titik jatuhan batu yang terjadi pada lereng tersebut. Beberapa parameter mekanis dari longsoran dengan tipe jatuhan batuan sebagai berikut:

- 1 Pemodelan *Lumped Mass* dan *Rigid Body*. *Lumped Mass* merupakan model dengan bentuk dan ukuran dapat ditentukan serta orientasi dapat diketahui selama terjadinya jatuhan batu dengan asumsi massa batuan adalah sama ketika jatuh. Metode *rigid body* adalah metode yang digunakan dalam CRSP (*Colorado Rockfall Simulation Program*) dengan pengaruh tumbukan/*impact* dan kinetik yang lebih kompleksitas menyesuaikan bentuk dan ukuran yang lebih bervariasi. Untuk perbandingan antara *lumped mass* dan *rigid body* dapat dilihat pada **Tabel 2**.

- 2 Kecepatan jatuhnya batuan (*rock fall velocities*) kecepatan yang dialami batuan pada saat jatuh dari suatu ketinggian ke permukaan tanah atau batuan. Kecepatan batuan dapat meningkat jika energi yang hilang akibat perubahan bentuk pada saat terjadi tumbukan lebih kecil dari energi yang dihasilkan oleh percepatan gravitasi. Massa batuan (m) meluncur dengan kemiringan (ψ) dengan sudut gesek (μ). Pergerakan massa batuan ini dapat dipelajari dengan menggunakan metode keseimbangan batas (*Limit Equilibrium Method*) yang membandingkan besaran relatif dari gaya yang mendorong dan gaya yang menahan (Wyllie, 2015).
- 3 Koefisien gesekan efektif yang menggambarkan material penyusun lereng serta kekerasannya sebagai hasil dari pengujian lapangan dengan jatuhnya batu di Jepang. Nilai untuk koefisien gesek efektif μ' (*Japan Road Association, 2000*) telah ditentukan seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 3**.
- 4 Kekasaran permukaan dari material lereng memiliki dampak yang cukup besar terhadap jatuhnya batu. Semakin tinggi nilai kekasaran permukaan maka lompatan lintasan jatuhnya batu semakin tinggi. Kekasaran permukaan (ϵ) dapat diukur dengan persamaan sebagai berikut (Wyllie, 2015):

$$\epsilon = \tan^{-2} \left(\frac{s}{r} \right) \dots\dots\dots(1)$$

di mana:
 s : jarak tegak lurus permukaan lereng dengan rata-rata kemiringan lereng (m)
 r : jari-jari batuan (m)

Tabel 2 Perbandingan antara metode *lumped mass* dan *rigid body*

| | Model | |
|-------------------------------------|---|---|
| | <i>Lumped Mass</i> | <i>Rigid Body</i> |
| Batu | Dimodelkan sebagai partikel | Dimodelkan dalam bentuk batu sebenarnya |
| Koefisien restitusi normal | Berdasarkan kecepatan | Berdasarkan energi |
| Koefisien restitusi tangensial (Rt) | Digunakan | Tidak digunakan kecuali dalam "Penggunaan Tangensial redaman CRSP " sebagai opsi yang dipilih |
| Gesekan dinamis | Dimasukan sebagai sudut yang diaplikasikan ketika batu mengalami gelincir | Dimasukan sebagai koefisien yang diaplikasikan selama tubrukan dan ketika batu mengalami gelincir |
| Gesekan bergulir | Tidak digunakan | Digunakan ketika batuan bergulir |
| Opsi tambahan | Mempertimbangkan kecepatan rotasional | - Menggunakan tangensial redaman CRSP - Parameter gesek lanjutan - Nilai viskoplastis tanah terseret - Peredam hutan |

Sumber: Rocscience (2021)

Tabel 3 Nilai koefisien gesekan efektif μ' untuk karakteristik material lereng

| Kategori lereng | Karakteristik material permukaan lereng | Desain nilai μ' | Rentang nilai μ' dari uji lapangan |
|-----------------|---|---------------------|--|
| A | Halus, permukaan batu keras dan profil lereng seragam; tidak ada tutupan pohon | 0,05 | 0,0 – 0,1 |
| B | Halus hingga kasar, permukaan batuan lemah dengan kekasaran profil lereng medium hingga kasar; tidak ada tutupan pohon | 0,15 | 0,11 – 0,2 |
| C | Halus hingga kasar, batuan lemah, tanah, pasir, atau talus dengan kekasaran profil lereng rendah hingga sedang; tidak ada tutupan pohon | 0,25 | 0,21 – 0,3 |
| D | Talus dengan boulder yang bersudut terekspos pada permukaan, kekasaran profil lereng medium hingga tinggi; tidak ada tutupan pohon atau sedikit pohon | 0,35 | ~0,31 |

*Nilai μ' tergantung dari nilai kecepatan batas atas.

Sumber: Japan Road Association (2000)

- 5 Koefisien normal restitusi (R_n) merupakan hubungan antara kecepatan jatuh batuan terhadap tumbukan akhir. Persamaan yang digunakan dalam mendapatkan koefisien normal restitusi ini sebagai berikut (Wyllie, 2015):

$$R_n = -\frac{V_{fN}}{V_{iN}} \dots\dots\dots(2)$$

dimana:

V_{fN} : komponen normal kecepatan pada tumbukan selesai ($t=f$) ($m.s^{-1}$).

V_{iN} : komponen normal kecepatan pada saat terjadinya tumbukan ($t=i$) ($m.s^{-1}$).

- 6 Koefisien tangensial restitusi (R_t) ditentukan dari rasio akhir dan kecepatan awal tangensial selama tumbukan, persamaannya sebagai berikut (Wyllie, 2015):

$$R_t = -\frac{V_{fT}}{V_{iT}} \dots\dots\dots(3)$$

dimana:

V_{fT} : kecepatan ketika batuan telah longsor ($m.s^{-1}$).

V_{iT} : kecepatan tangensial pada saat awal terjadi longsor ($m.s^{-1}$).

Nilai koefisien restitusi pada pemodelan dapat dilihat pada **Tabel 4** untuk metode *lump mass* dan **Tabel 5** untuk metode *rigid body*.

Sistem Pengaman

Klasifikasi pengaman jatuhnya batu diukur sesuai kemampuan dalam meredam energi kinetik. Menurut Vogel et al., (2009) ada enam jenis pengaman jatuhnya batu seperti:

1. *Rigid barriers*
2. *Diagonal dan ring wire nets*
3. *Retained flexible barriers*
4. *Galleries*
5. *Embankments*
6. *Reinforced dams*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Geologi STA+80

Berdasarkan peta geologi lembar Tulungagung (Samodra et al., 1992) daerah penelitian termasuk ke dalam Formasi Mandalika. Formasi Mandalika tersusun dari perselingan breksi gunung api, lava, tufa bersisipan batupasir tufan, batulanau, dan batulempung seperti pada **Gambar 2**. Kemudian ditinjau dari aspek geomorfologi dan berdasarkan hasil *morfoarrangement*, perhitungan beda tinggi dan kelerengan (morfometri) pada peta topografi, menganalisis morfogenesis, dan kenampakan secara langsung di daerah penelitian, maka lereng STA+80 dari bangunan pelimpah termasuk ke dalam satuan geomorfologi vulkanik bergelombang kuat - tersayat kuat. Satuan geomorfologi ini merupakan lereng dari Gunung Temon dengan ketinggian elevasi puncak ± 600 mdpl yang terlihat pada **Gambar 3**.

Tabel 4 Nilai koefisien restitusi untuk metode *lumped mass*

| Deskripsi permukaan lereng | Koefisien restitusi normal - R_n (rata-rata \pm standar deviasi) | Koefisien restitusi tangensial - R_t (rata-rata \pm standar deviasi) | Sudut gesek ($^\circ$) (berdasarkan nilai lapangan sebelumnya) |
|----------------------------|--|--|--|
| Lantai lereng (semua data) | 0,300 \pm 0,058 | 0,622 \pm 0,119 | 25 |
| Lantai lereng (batu lapuk) | 0,240 \pm 0,055 | 0,570 \pm 0,110 | 25 |
| Lantai lereng (batu segar) | 0,314 \pm 0,050 | 0,634 \pm 0,120 | 25 |
| Muka lereng (semua data) | 0,404 \pm 0,061 | 0,837 \pm 0,073 | 25 |
| Batupasir di muka lereng | 0,379 \pm 0,061 | 0,825 \pm 0,083 | 25 |
| Batulanau di muka lereng | 0,440 \pm 0,055 | 0,810 \pm 0,055 | 26 |

Sumber: Rocscience (2021)

Tabel 5 Nilai koefisien restitusi untuk metode *rigid body*

| Deskripsi permukaan | Koefisien restitusi normal - R_n (rata-rata \pm standar deviasi) | Sudut gesek statis ($^\circ$) | Sudut gesek dinamis ($^\circ$) |
|----------------------------|--|---------------------------------|----------------------------------|
| Lantai lereng (semua data) | 0,049 \pm 0,028 | 65 | 60 |
| Lantai tangkapan | 0,037 \pm 0,021 | | |
| Jalan akses | 0,074 \pm 0,021 | | |
| Muka lereng (semua data) | 0,155 \pm 0,060 | 50 | 40 |
| Muka lereng lapuk | 0,125 \pm 0,028 | | |
| Muka lereng segar | 0,164 \pm 0,065 | | |

Sumber: Rocscience (2021)

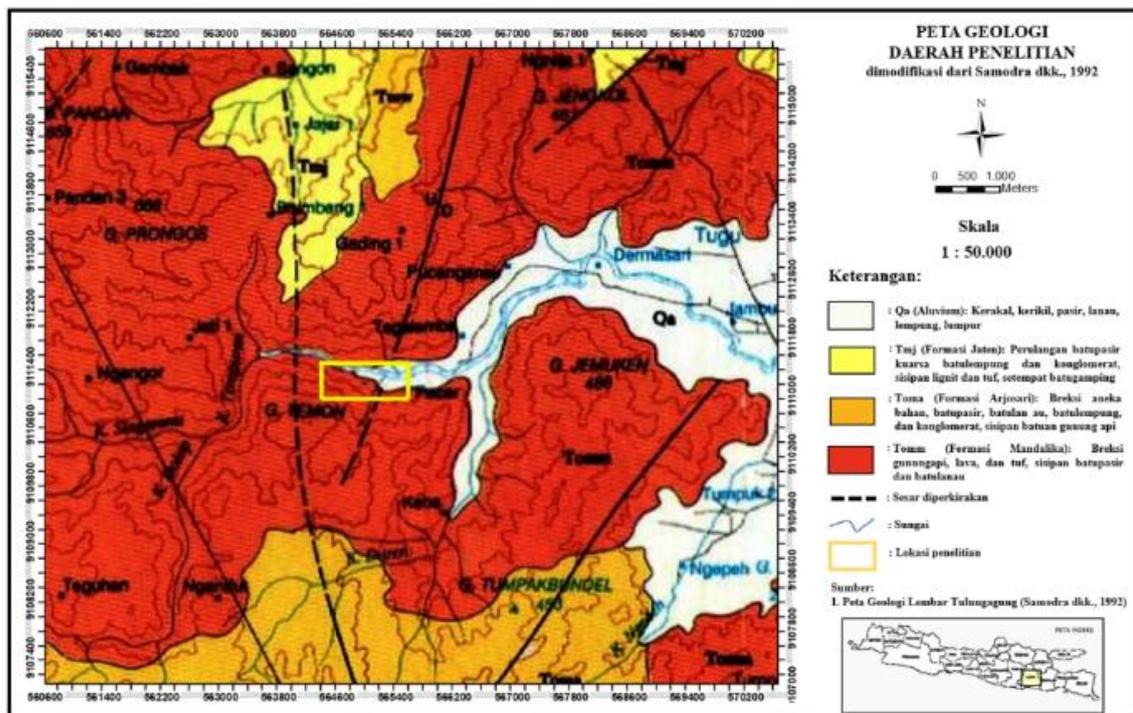
Dari beberapa lokasi pengamatan, didapatkan stratigrafi di daerah penelitian, khususnya pada lereng STA+80 terdiri atas dua satuan batuan yang dibedakan berdasarkan pada ciri fisik litologi yang dapat diamati di lapangan, hasil pengujian laboratorium, dan mengacu pada peta geologi Lembar Tulungagung (Samodra et al., 1992). Ciri-ciri fisik meliputi jenis batuan, keseragaman gejala geologi, kombinasi jenis batuan, dan gejala lainnya pada tubuh batuan, maka daerah penelitian berdasarkan litostratigrafinya dari tua ke muda yaitu satuan breksi vulkanik Mandalika yang diterobos oleh satuan intrusi andesit (**Tabel 6**).

Satuan Breksi vulkanik sebagai penyusun lereng batuan pada STA+80 dari bangunan pelimpah ini berumur Oligo - Miosen Awal (Samodra et al., 1992). Pada satuan ini tersusun oleh batupasir halus dan kasar, dan breksi yang memiliki kekar intensif. Ciri fisik di lapangan dari satuan breksi vulkanik ini adalah berwarna abu-abu kecoklatan, tekstur klastik, semen silika namun di beberapa lokasi terdapat semen karbonat, pemilahan buruk - sedang (*poorly - moderately sorted*), kemas terbuka dan tertutup. Komposisi butiran tersusun oleh lithic (pecahan batuan) feldspar, kuarsa, piroksen, dan mineral opak. Butiran berukuran 0,5 mm - 2,5cm (*coarse sand - very fine pebbles*), bentuk membulat tanggung. Secara fasies gunungapi, satuan ini berada pada fasies proksimal - distal dari suatu lingkungan gunungapi. Kenampakan breksi vulkanik di lapangan dapat dilihat pada **Gambar 4**.

Satuan intrusi andesit yang terbentuk akibat adanya proses endogen sehingga dapat menerobos batuan breksi vulkanik yang lebih tua dan membentuk tinggian morfologi dari Gunung Temon. Satuan ini memiliki ciri-ciri fisik seperti berwarna abu-abu gelap, struktur masif, dan di beberapa lokasi membentuk *columnar joint*. Seperti disajikan pada **Gambar 5** singkapan intrusi andesit yang masih segar hingga sedikit lapuk yang menunjukkan bentuk *corestone*.

Berdasarkan data permukaan yang meliputi pengamatan dan pemerian singkapan batuan, pengukuran kedudukan batuan, pengambilan sampel batuan, dan analisis laboratorium sifat fisik dan mekanis batuan, maka persebaran satuan batuan tersebut ditunjukkan oleh peta geologi teknik daerah penelitian yang ditunjukkan pada **Gambar 6**.

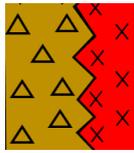
Lereng batuan STA+80 bangunan pelimpah tersusun oleh breksi vulkanik dengan geometri lereng dihitung dari as bangunan pelimpah yaitu tinggi sekitar 177 m dengan lebar sekitar 200 m (terlihat pada **Gambar 7**), orientasi muka lereng berarah N260°E, dan kemiringan lereng bervariasi dari yang paling terjal memiliki sudut 61° dan yang paling landai memiliki sudut 41°. Diskontinuitas yang diamati pada lereng ini terdiri dari kekar, kekar gerus, dan kekar tarik.



Sumber: Samodra et al., (1992)

Gambar 2 Peta geologi daerah penelitian

Tabel 6 Kolom stratigrafi daerah penelitian

| Umur | | Formasi | Litologi | | Simbol |
|---------|--------|-----------|-----------------|-----------------|---|
| Zaman | Kala | | | | |
| Tersier | Oligo | Mandalika | Breksi Vulkanik | Intrusi Andesit |  |
| | - | | | | |
| | Miosen | | | | |



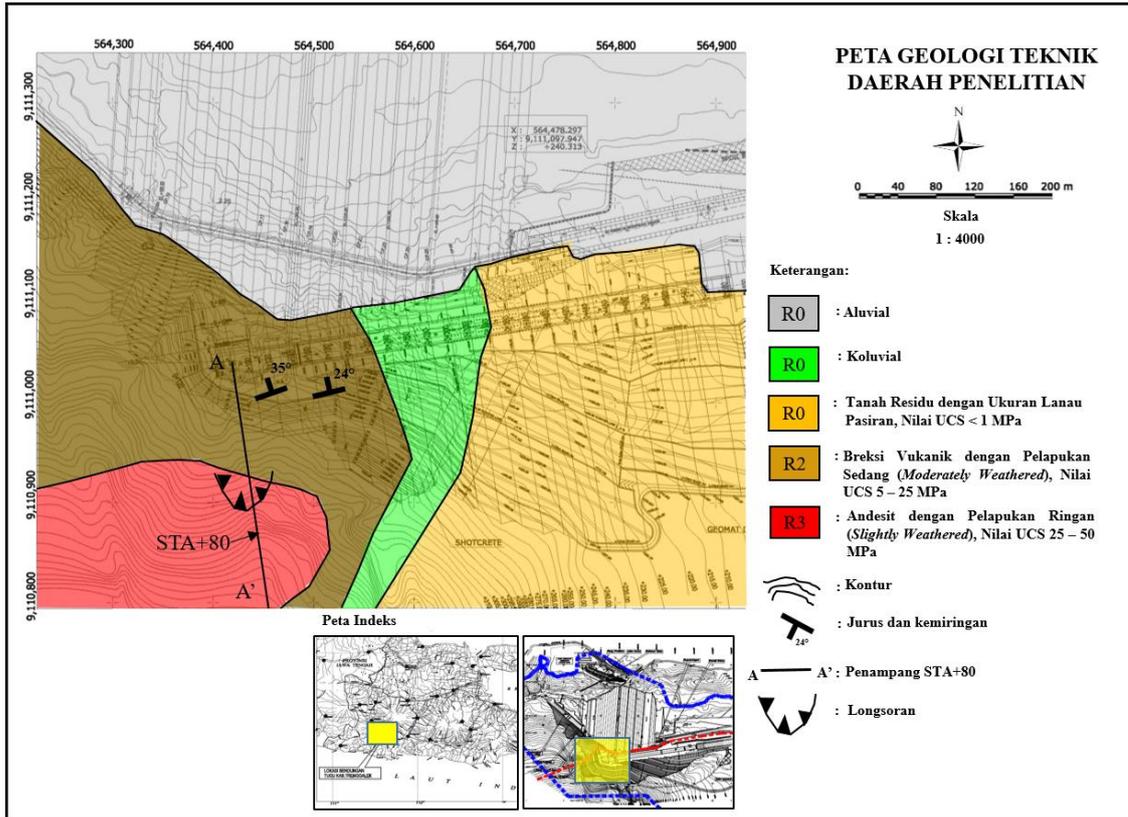
Gambar 3 Satuan geomorfologi pada lokasi penelitian, lensa menghadap ke selatan (foto diambil dari area sandaran kiri bendungan).



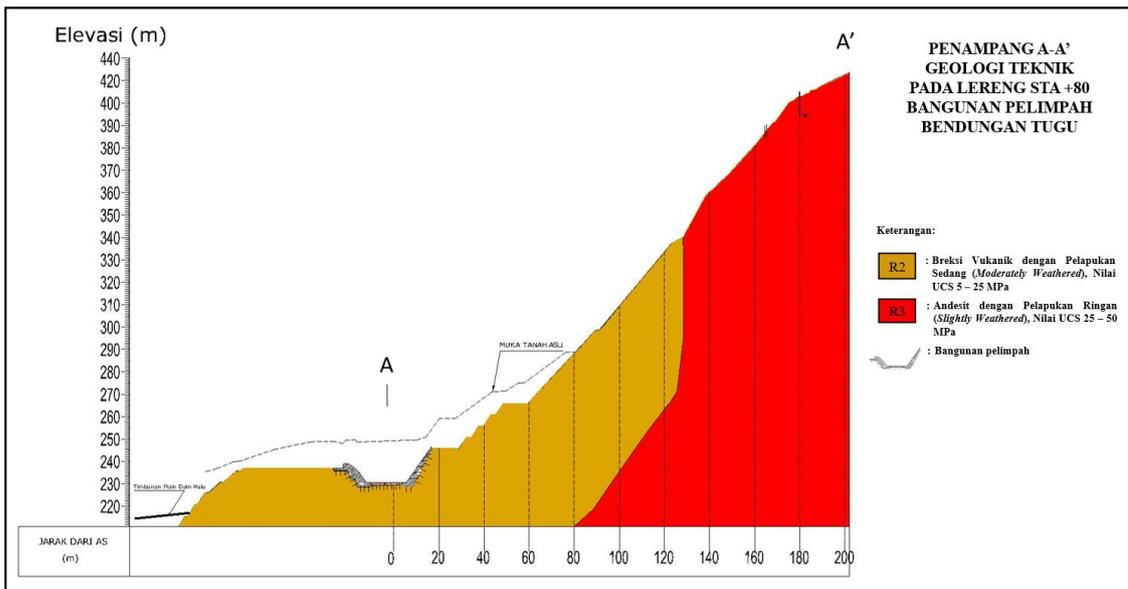
Gambar 4 Beberapa lokasi pengamatan dari satuan breksi vulkanik (a) breksi dengan fragmen batupasir kasar di LP-6 (b) batupasir halus di LP-8 (c) breksi vulkanik dengan fragmen dan matrik yang *interlocking* di LP-9 (d) batupasir dengan kekar yang intensif di lokasi pengukuran *scanline*



Gambar 5 Kenampakan intrusi andesit di LP-7



Gambar 6 Peta geologi teknik daerah penelitian (modifikasi PT. INAKKO, 2021)



Gambar 7 Penampang geologi teknik lereng STA+80 (modifikasi PT. INAKKO, 2021)

Rockfall Hazard Rating System

Deskripsi dari parameter – parameter dalam RHRS adalah sebagai berikut:

- 1 Ketinggian lereng pada STA+80 adalah 177m, sehingga dengan ketinggian tersebut nilai yang didapatkan ada 81 point (ketinggian >30,5m).
- 2 Tingkat efektifitas parit pada lereng STA+80 memiliki point 27, artinya sebagian besar jatuhnya batu tertampung di ditch dengan lebar >2,6 – 4 m.
- 3 Tingkat resiko rata-rata kendaraan saat melintasi lereng STA+80 di masukan kedalam point terendah yaitu 3,

- dikarenakan fungsi jalan dibawah lereng tidak padat dan hanya digunakan untuk operasional bendungan.
- 4 Jarak pandang untuk pengambilan keputusan pada jalan di lereng STA+80 masuk dalam point terendah yaitu 3, artinya pengguna jalan yang melintasi lereng dapat menghindari jika terjadinya jatuhnya batu.
 - 5 Lebar jalan termasuk pavement dibahu jalan memiliki lebar 9.76 meter sehingga mendapatkan poin 27 pada RHRS.
 - 6 Karakteristik geologi menyumbang point terbanyak pada lereng STA+80, dalam kondisi 1 memiliki kondisi struktur batuan berupa diskontinuitas yang menerus dan memiliki arah orientasi yang berlawanan dengan panjang lebih dari 3 meter dan *rock friction* berbentuk planar.
 - 7 Ukuran batuan yang jatuh pada lereng STA+80 adalah 0,9 meter sehingga mendapatkan point 27 pada RHRS.
 - 8 Kuantitas jatuhnya batu pada saat terjadinya longsoran sebanyak 2.3m² dan memiliki point 3 dalam RHRS.
 - 9 Iklim dan ketersediaan air pada lereng memiliki point 27 dengan adanya proses presipitasi yang tinggi.
 - 10 Riwayat jatuhnya batu pada lereng STA+80 memiliki jumlah yang sedikit sehingga mendapatkan point 3 dalam RHRS.

Untuk kondisi 2, digunakan untuk lereng yang memiliki perbedaan proses erosi. Dalam kondisi struktur pada lereng STA+80 dijumpai erosi yang menyebabkan material lepas dan menggantung pada bidang yang terjal. Untuk nilai erosional pada lereng memiliki perbedaan yang sedang dan erosi berkembang dalam hitungan tahun.

Berdasarkan gambaran beberapa parameter RHRS, maka total point pada lereng STA+80 adalah 399, artinya dibutuhkan pekerjaan pencegahan yang memiliki tingkat urgensi yang sedang. Tingkat urgensi ini akan bertambah jika pada area kaki lereng difungsikan sebagai jalur operasional yang padat. Rincian dari nilai pada RHRS dapat dilihat pada **Tabel 7**.

Pemodelan Jatuhnya Batu

Sumber Batuan dan Topografi

Mengidentifikasi sumber jatuhnya batuan difokuskan pada STA+80 dari bangunan pelimpah, dikarenakan topografi lereng yang terjal dan tersusun oleh satuan batuan andesit dan breksi vulkanik. Pada lereng STA+80 dapat dibagi menjadi tiga zona, yaitu:

Tabel 7 Rangkuman nilai yang didapatkan lereng lereng STA+80

| No | Parameter | | Skor lereng STA+80 bangunan pelimpah | Deskripsi | |
|----|--|-----------|--------------------------------------|--|-------------------------------------|
| 1 | Tinggi Lereng | | 81 | 30 m | |
| 2 | Efektifitas Parit | | 27 | Tangkapan terbatas | |
| 3 | Risiko Kendaraan Rata-rata | | 3 | 25% | |
| 4 | Persentase Jarak Pandang Penglihatan untuk Pengambilan Keputusan | | 3 | Cukup (100%) | |
| 5 | Lebar Jalan termasuk Bahu Jalan | | 27 | 8,5 m | |
| 6 | Karakteristik Geologi | Kondisi 1 | Kondisi struktural | 81 | Kekar menerus, orientasi berlawanan |
| | | | Gesek Batuan | 27 | |
| | | Kondisi 2 | Kondisi struktural | 81 | Sangat banyak kenampakan erosi |
| | | | Perbedaan dalam Tingkat Erosi | 9 | Sedang |
| 7 | Ukuran blok | | 27 | 0,9 m | |
| 8 | Kuantitas Jatuhnya Batu Setiap Kejadian | | 3 | 6,9 m ³ | |
| 9 | Cuaca dan Kehadiran Air pada Lereng | | 27 | Penyerapan tinggi atau musim salju yang panjang atau air pada lereng berkelanjutan | |
| 10 | Riwayat Jatuhnya Batu | | 3 | Sedikit | |
| | Total skor | | 399 | | |

- 1 Zona A, merupakan zona jatuhan dari material batu andesit, sangat terjal dengan sudut lereng 55°, 47°, dan 61°, jatuhan batuan akan membentuk area tumbukan yang luas, kecepatan translasi dan rotasional yang tinggi, dan juga memiliki sudut lintasan yang tinggi.
- 2 Zona B, merupakan zona yang disusun oleh material breksi vulkanik yang memiliki bentuk dari jatuhan yang tidak beraturan. Umumnya memiliki ukuran blok 0,3-0,5 meter.
- 3 Zona C, merupakan zona *run-out* yang memiliki pengertian bahwa objek yang terkena resiko jatuhan batu berada pada zona ini, termasuk didalamnya infrastruktur yang dibangun. Pada zona ini diletakkan pengukuran pengaman dan pemasangan struktur pengaman.

Rincian dari pembagian zona pada lereng STA+80 dapat dilihat pada **Gambar 8**.

Tumbukan Pada Lereng

Kalibrasi terhadap tumbukan akibat dari jatuhan batu dan pemodelan dari lintasan jatuhan batu didapatkan dari beberapa penelitian yang dirangkum oleh Rocscience (2021), dari rangkuman tersebut didapatkan data koefisien restitusi pada penelitian ini yang terlihat pada **Tabel 8**.

Tabel 8 Data koefisien restitusi yang digunakan dalam pemodelan

| Lokasi | Material lereng | Koefisien restitusi normal, eN | Koefisien restitusi tangensial, eT | Sudut gesek (°) | Kekasaran Permukaan lereng (°) |
|---------------------------------|-----------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------|--------------------------------|
| Lereng STA+80 Bangunan Pelimpah | Andesit | 0,53 | 0,99 | 0,578 | 0 |
| | Breksi Vulkanik | 0,38 | 0,82 | 25 | 0 |
| | Shotcrete | 0,48 | 0,53 | 41,56 | 0 |

Pemodelan Lumped Mass

Dalam pemodelan ini diasumsikan massa batuan adalah kecil yang tidak terbatas, perhitungan pada pemodelan *lumped mass* ini menggunakan berat dari massa batuan untuk menentukan energi perhitungan kecepatan, diasumsikan berat batuan konstan selama jatuh. Untuk nilai densitas batuan didapatkan dari uji laboratorium dari lokasi pengamatan dengan kode LP-7 dan LP-9. Untuk berat material diasumsikan andesit memiliki ukuran blok batuan berdiameter 0,9 m dan breksi vulkanik memiliki ukuran blok batuan berdiameter 0,3 m. Rincian material jatuhan dapat dilihat pada **Tabel 9**.

Tabel 9 Data fisik material jatuhan batu/*seeder*

| Lokasi | Material jatuhan batu/ <i>seeder</i> | Berat (kg) | Densitas (kg/m ³) |
|-------------------|--------------------------------------|------------|-------------------------------|
| Lereng STA+80 | Andesit | 1084,8 | 2842 |
| Bangunan Pelimpah | Breksi Vulkanik | 29,4 | 2080 |

Pemodelan Mekanis Seeder/Jatuhan batu

Seeder didefinisikan kondisi jatuhnya batuan dari tempat asalnya, parameter yang digunakan adalah kecepatan horizontal, vertikal, dan rotasional. Rincian *seeder* dapat dilihat pada **Tabel 10**.

Hasil Running

Pemodelan dilakukan dengan model jatuhan 1 dengan material andesit dan breksi vulkanik. Setiap satuan batuan memiliki perbedaan ketinggian jatuh, andesit dari ketinggian jatuh 173 m (elevasi 418 mdpl) sedangkan breksi vulkanik dijatuhkan dari ketinggian 118 m (elevasi 343 mdpl).

Pada pemodelan jatuhan batu akan didapatkan lintasan batuan yang terlihat pada **Gambar 9**. Pengukuran sifat mekanis lintasan jatuhan batu dilakukan pada lokasi 121,875 dari puncak lereng. Pada lokasi tersebut energi kinetik pada andesit sebesar 973,14 kJ sedangkan untuk breksi vulkanik sebesar 72,59 kJ (terlihat pada **Gambar 10**). Kecepatan translasi pada lokasi pengukuran didapatkan nilai kecepatan pada andesit 33,8 m/s dan pada breksi vulkanik 8,67 m/s (terlihat pada **Gambar 11**). Untuk tinggi pantulan pada lokasi yang telah ditentukan pada andesit setinggi 0,43 meter dan breksi vulkanik 2,04 meter (terlihat pada **Gambar 12**).

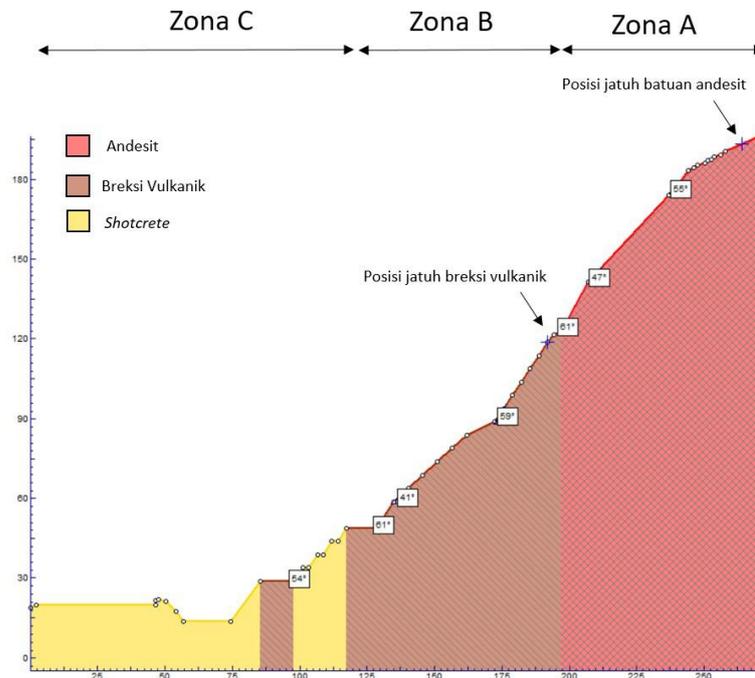
Pemodelan dengan menggunakan *barriers* menggunakan jenis *retained flexible barriers* yang menyesuaikan kondisi lapangan dan kemampuan meredam energi kinetik sebesar 973,14 kJ dan dapat ditinggikan sesuai tinggi pantulan (terlihat pada **Gambar 13**).

Rekomendasi

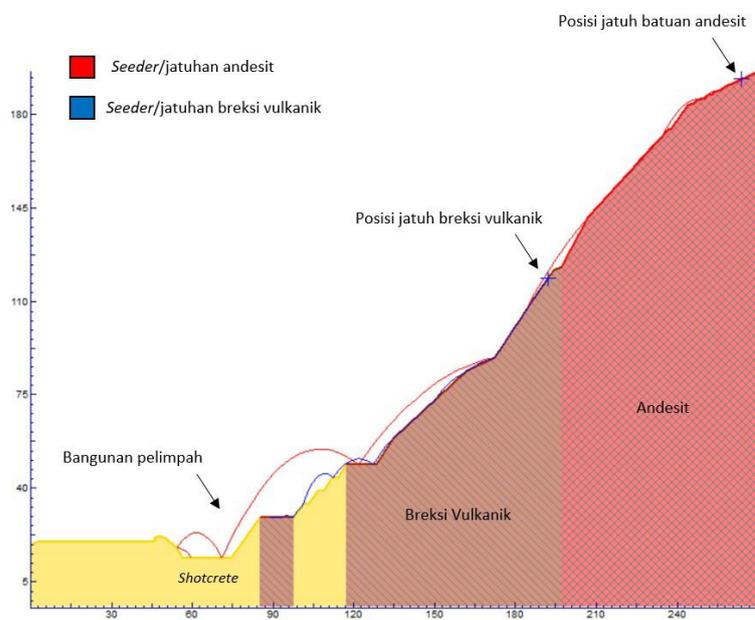
Hasil dari RHRS sebesar 399 dapat bertambah tingkat urgensinya seiring waktu dikarenakan proses erosional dan pelapukan dari massa batuan penyusun lereng. Dengan bertambahnya nilai RHRS maka potensi jatuhan batu dapat diproteksi dengan sistem pengaman yang dapat meredam nilai energi kinetik sebesar 973,14 kJ. Dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Vogel et al., (2009) dengan nilai energi kinetik sebesar itu dibutuhkan sistem pengaman dengan jenis *retained flexible barriers* dengan tinggi 5 m yang proporsional dan mudah diterapkan pada kaki lereng.

Tabel 10 Data mekanis *seeder* pada pemodelan

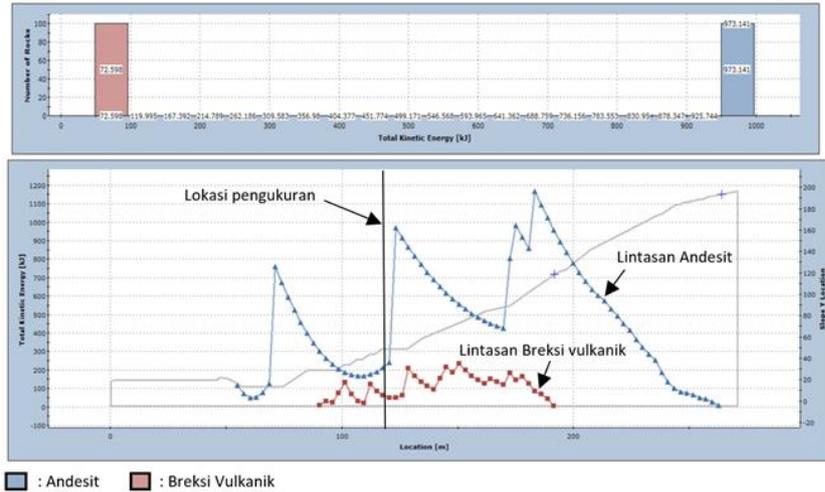
| Lokasi | Model Jatuhan Batu | Material Jatuhan | Jumlah jatuhan | Kecepatan horizontal (m/s) | Kecepatan vertikal (m/s) | Kecepatan rotasional (rads/s) | Rotasi awal (°) |
|------------------------------------|--------------------|------------------|----------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------------|---|
| Lereng STA+80 Bangunan Pelimpah | <i>Seeder 1</i> | Andesit | 100 | 0 | 0 | 0 | Uniform Mean: 0. rel. min: 0, rel. max: 360 |
| | <i>Seeder 2</i> | Breksi Vulkanik | 100 | 0 | 0 | 0 | Uniform Mean: 0. rel. min: 0, rel. max: 361 |



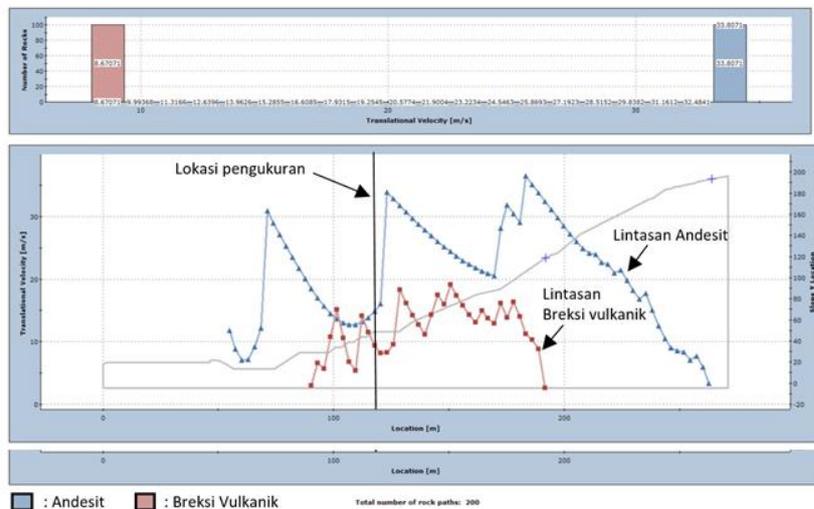
Gambar 8 Pembagian zona pada lereng STA+80 bangunan pelimpah



Gambar 9 Lintasan jatuhan batu pada lereng STA+80



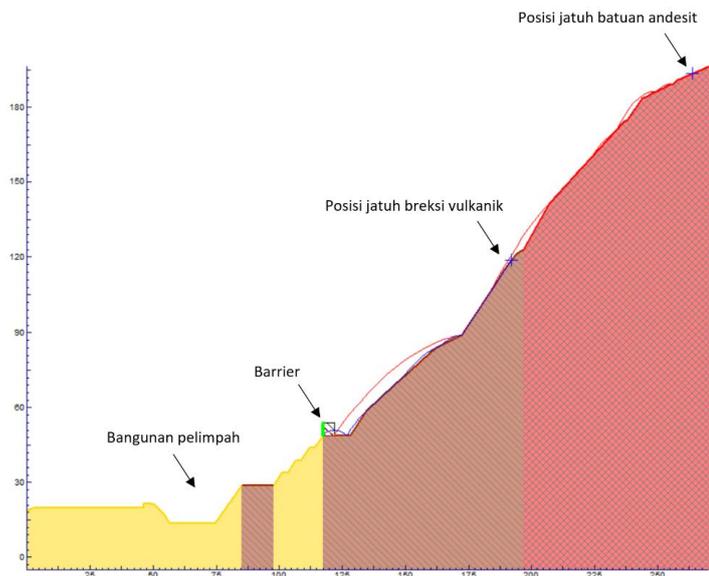
Gambar 10 Nilai statistik dari energi kinetik jatuhan batu pada lokasi pengukuran 121,875 lereng STA+80



Gambar 11 Nilai statistik dari kecepatan translasi jatuhan batu pada lokasi pengukuran 121,875 lereng STA+80



Gambar 12 Nilai statistik dari tinggi pantulan jatuhan batu pada lokasi pengukuran 121,875 lereng STA+80



Gambar 13 Pemodelan dengan menggunakan barrier

KESIMPULAN

Dari aspek geomorfologi daerah penelitian masuk ke dalam satuan geomorfologi vulkanik bergelombang kuat - tersayat kuat, sedangkan litologi yang menyusun lereng STA+80 adalah satuan breksi vulkanik Mandalika yang diterobos oleh satuan intrusi andesit.

Hasil RHRS pada lereng STA+80 diperoleh nilai total sebesar 399, artinya lereng perlu diperbaiki atau diberikan pengamanan dengan tingkat urgensi yang sedang.

Hasil pemodelan jatuhnya batuan jenis andesit dengan dimensi ukuran blok 0,9 meter dijatuhkan dari elevasi 418 mdpl dan breksi vulkanik dijatuhkan dari elevasi 343 mdpl dengan ukuran blok sebesar 0,3 meter. Lokasi pengukuran sifat mekanis berada pada titik X=121,875. Hasil yang didapatkan adalah energi kinetik sebesar 973,14 kJ, tinggi pantulan sebesar 2,04 meter, dan kecepatan translasi sebesar 33,8 m/s. Dari kecepatan translasi sebesar 33,8 m/s pada andesit dan 8,67 m/s pada breksi vulkanik, maka kecepatan longsor memiliki kelas kecepatan 7 dengan deskripsi kecepatan ekstrim.

Dengan nilai energi kinetik sebesar 973,14 kJ dibutuhkan sistem pengamanan dengan jenis *retained flexible barriers* dengan tinggi 5 m yang proporsional dan mudah diterapkan pada kaki lereng.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terimakasih banyak kepada BBWS Brantas dan konsultan PT. INAKKO atas bantuan selama ini, serta teman - teman yang telah membantu penulis dalam mengambil data di

lapangan dan juga bantuan lainnya yang telah diberikan kepada penulis hingga terciptanya artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43(1), 27-29.
- Cruden, D. and Varnes, D. (1996). Landslide types and process. Dalam *Landslide Investigation and Mitigation (Transportation Research Board Special Report 247)*.
- Hudson, J. A., and Harrison, J. P. (2000). *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*. Oxford: Elsevier.
- Japan Road Association. (2000). *Manual for anti-impact structures against falling rocks*. Tokyo: Japanese Society of Civil Engineers.
- Pierson, L. A. and Vickle, R. V. (1993). *Rockfall Hazard Rating System - Participant's Manual (No. FHWA-SA-93-057)*. Oregon Department of Transportation.
- Rocscience (2021). *Statistical analysis of Rockfalls*. Rocscience Inc.
- Samodra, H., Suharsono, Gafoer, S., dan Suwarti, T. (1992): *Peta geologi lembar Tulungagung*, Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi (P3G).
- Vogel, T., Labiouse, V., and Masuya, H. (2009). Rockfall protection as an integral task. *Structural engineering international*, 19(3), 304-312.
- Wyllie, D. C. (2015). *Rock Fall Engineering*. New York: CRC Press