



Pengaruh Ukuran Butir Batupasir terhadap Kekuatan dan Ketahanan Batuan pada Formasi Balikpapan dan Pulau Balang

Eghi^{1*}, Albertus Juvensius Pontus², Agus Winarno³, Tommy Trides⁴, Rety Winonazada⁵

¹ Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Mulawarman, Samarinda, Indonesia

²⁻⁵ Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman, Samarinda, Indonesia

*Penulis korespondensi : eghidcahya@gmail.com

Abstract. Rock stability and service life in geotechnical and mining engineering are highly dependent on the rock's mechanical and physical parameters, where the variation in sandstone grain size is a crucial intrinsic factor. This study aims to comprehensively analyze the correlation between sandstone grain size with uniaxial compressive strength (UCS) and resistance to weathering (Slake Durability Index) in samples taken from the Balikpapan and Pulau Balang Formations in the Samarinda area, East Kalimantan. The research methodology involved a series of standard laboratory tests, including rock physical properties analysis, grain size distribution analysis, UCS testing, and slake durability testing through three cycles. The test results show a significant correlation: sandstone with finer grain sizes and higher density consistently demonstrates greater UCS values and a higher Durability Index, indicating superior mechanical and physical resistance. Specifically, the Pulau Balang Formation exhibits a more compact structure and finer grain size, resulting in better durability values compared to the Balikpapan Formation. These findings are important as a geomechanical data basis for slope design planning, rock mass stability analysis, and material selection in infrastructure projects or mining operations involving both formations.

Keywords: geomechanics; grain size; sandstone; slake durability index; uniaxial compressive strength

Abstrak. Stabilitas dan umur layanan batuan dalam rekayasa geoteknik dan pertambangan sangat bergantung pada parameter mekanik dan fisik batuan, di mana variasi ukuran butir batupasir merupakan faktor intrinsik yang krusial. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komprehensif korelasi antara ukuran butir batupasir dengan kekuatan uniaksial (*Uniaxial Compressive Strength*) dan ketahanan terhadap pelapukan (*Slake Durability Index*) pada sampel yang diambil dari Formasi Balikpapan dan Formasi Pulau Balang di wilayah Samarinda, Kalimantan Timur. Metode penelitian melibatkan serangkaian pengujian laboratorium standar, termasuk analisis sifat fisik batuan, analisis distribusi ukuran butir, pengujian UCS, dan pengujian *slake durability* melalui tiga siklus. Hasil pengujian menunjukkan korelasi yang signifikan: batupasir yang memiliki ukuran butir yang lebih halus dan densitas yang lebih tinggi secara konsisten memperlihatkan nilai UCS yang lebih besar dan Indeks Durabilitas yang lebih tinggi, mendangkan ketahanan mekanik dan fisik yang lebih unggul. Secara spesifik, Formasi Pulau Balang menunjukkan struktur yang lebih kompak dan ukuran butir yang lebih halus, menghasilkan nilai yang lebih baik dibandingkan dengan Formasi Balikpapan. Temuan ini penting sebagai landasan data geomekanik dalam perencanaan desain lereng, analisis stabilitas massa batuan, dan pemilihan material dalam proyek infrastruktur atau operasi penambangan yang melibatkan kedua formasi ini.

Kata kunci: batupasir; geomekanik; indeks durabilitas; kekuatan uniaksial; ukuran butir

1. LATAR BELAKANG

Stabilitas dan umur layanan batuan sangat penting dalam rekayasa geoteknik dan pertambangan, di mana sifat mekanik dan fisik batuan dipengaruhi oleh ukuran butir batupasir. Wilayah Samarinda, Kalimantan Timur, terdiri dari Formasi Balikpapan yang berisi batupasir kuarsa, lempung, dan batubara, serta Formasi Pulau Balang yang didominasi *greywacke* dan batupasir kuarsa (Supriatna, dkk., 1995). Pengujian kekuatan batuan menggunakan metode *Uniaxial Compressive Strength* (UCS) (Rai, dkk., 2014) dan ketahanan terhadap pelapukan

dengan metode *slake durability* (Franklin, dkk., 1972) diperlukan untuk menilai kinerja batuan. Penelitian sebelumnya menunjukkan ukuran butir kecil berkorelasi dengan kekuatan batuan lebih tinggi (Malik, 2022), namun belum ada analisis ketahanan pelapukan. Penelitian ini bertujuan menguji dan membandingkan kekuatan dan ketahanan batupasir dari kedua formasi tersebut, sebagai dasar analisis geologi teknik untuk penambangan dan infrastruktur.

2. KAJIAN TEORITIS

Geologi Regional dan Formasi Batuan

Wilayah penelitian ini secara geologis terletak di Kota Samarinda, Kalimantan Timur, di mana susunan stratigrafi regionalnya telah dipetakan oleh Supriatna dkk. (1995). Stratigrafi batuan di wilayah tersebut, dari yang termuda hingga tertua, mencakup Aluvium (Qa), Formasi Kampungbaru (Tpkb), Formasi Balikpapan (Tmbp), Formasi Pulau Balang (Tmpb), Formasi Bebuluh (Tmb), dan Formasi Pamaluan (Tomp). Penelitian ini berfokus pada batuan dari Formasi Balikpapan dan Formasi Pulau Balang, yang keduanya memiliki sebaran litologi batupasir sebagai objek studi utama. Formasi Balikpapan dikarakterisasi oleh perselingan antara batupasir dan lempung, dengan sisipan lanau, serpih, batugamping, dan batubara. Batupasir kuarsa di formasi ini umumnya berwarna putih kekuningan dengan ketebalan 1-3 m dan disisipi lapisan batubara setebal 5-10 cm. Selain itu, terdapat batupasir gampingan berwarna coklat yang mengandung foraminifera kecil. Lingkungan pengendapan Formasi Balikpapan diinterpretasikan sebagai perengan *paras delta* hingga *dataran delta*.

Sementara itu, Formasi Pulau Balang terdiri dari perselingan antara *greywacke* dan batupasir kuarsa, dengan sisipan batugamping, batulempung, batubara, dan tuf dasit. Batupasir *greywacke* umumnya berwarna kelabu kehijauan, padat, dengan tebal lapisan 50-100 cm, sedangkan batupasir kuarsa berwarna kelabu kemerah. Formasi ini menunjukkan umur Miosen Tengah dengan lingkungan pengendapan laut dangkal. Variasi litologi, khususnya batupasir yang mendominasi kedua formasi ini, menjadi dasar penting untuk perbandingan sifat geomekaniknya.

Batuan Sedimen dan Batupasir

Batuan diklasifikasikan berdasarkan proses pembentukannya menjadi tiga jenis utama: Batuan Beku, Batuan Sedimen, dan Batuan Metamorfik. Batuan sedimen adalah batuan yang terbentuk dari sedimen rombakan batuan yang telah ada, akumulasi material organik, atau hasil penguapan larutan. Batuan sedimen merupakan jenis batuan paling banyak tersingkap di permukaan bumi, kurang lebih 75% dari luas permukaan bumi.

Batuan sedimen dibagi menjadi dua jenis: Batuan Sedimen Klastik dan Batuan Sedimen Non-Klastik. Batuan sedimen klastik terbentuk oleh mekanisme pengendapan fisik dari detritus atau pecahan batuan asal melalui proses pelapukan, transportasi, pengendapan, dan litifikasi. Batupasir termasuk kelompok batuan sedimen klastik.

Batupasir adalah batuan sedimen bertekstur klastik yang partikel penyusunnya berupa butiran berukuran pasir ($1/16\text{ mm} - 2\text{ mm}$). Sebagian besar batupasir tersusun oleh kuarsa atau *feldspar*. Jenis-jenis batupasir meliputi *Quartz Sandstone*, *Greywacke* (memiliki matriks berukuran lempung), *Arkose* ($>25\%$ *feldspar*), dan *Lithic Arenite*. Komposisi batupasir (termasuk ukuran butirnya) penting karena memberikan informasi mengenai sejarah bumi, *provenansi*, dan lingkungan pengendapan suatu daerah.

Ukuran Butir Batuan

Ukuran butir sangat penting dalam studi batuan sedimen karena mencerminkan energi yang mengendalikan pelapukan, erosi, transportasi, dan sedimentasi. Skala Wenworth (1922) digunakan untuk mengukur ukuran butir, dengan batupasir berada antara $1/16\text{ mm}$ hingga 2 mm (pasir sangat halus hingga sangat kasar). Analisis ayakan untuk butiran $>0.075\text{ mm}$ menghasilkan kurva yang menentukan parameter seperti Ukuran Efektif (D_{10}), Koefisien Keseragaman (C_u), dan Koefisien Gradasii (C_c) untuk mengklasifikasikan gradasi sampel sebagai baik atau buruk.

Sifat Fisik Batuan

Sifat fisik batuan merupakan karakteristik yang diamati secara langsung pada kondisi alami batuan. Pengujian sifat fisik dilakukan untuk mengetahui kondisi awal batuan yang akan diuji, karena ketidakseragaman hasil uji dapat mengindikasikan tingkat heterogenitas atau variasi kekuatan batuan tersebut (Arif, 2016). Parameter sifat fisik penting yang umum diuji meliputi bobot isi, kadar air, porositas, dan derajat kejenuhan. Parameter ini berperan penting menggambarkan kondisi fisik batuan, yang berpengaruh terhadap kekuatan dan ketahanan batuan terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Sifat Mekanik Batuan

Sifat mekanik batuan berkaitan dengan kemampuan batuan dalam menahan gaya atau beban eksternal hingga mencapai kondisi rusak (Rai dkk., 2014). Uji mekanik dilakukan untuk mengetahui kekuatan (*strength*) dan ketahanan (*durability*) batuan terhadap berbagai kondisi pembebanan dan pelapukan. Dua jenis pengujian utama yang digunakan adalah Uji Kuat Tekan Uniaksial (*Uniaxial Compressive Strength Test*) dan Uji Tahan Lekang (*Slake Durability Test*).

Uji UCS bertujuan untuk menentukan kekuatan tekan maksimum batuan terhadap beban aksial tanpa adanya gaya lateral. Nilai kuat tekan dihitung pada saat sampel mengalami keruntuhan (*failure*), dan perhitungannya mengikuti persamaan SNI 2825 (2008):

$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$

Keterangan:

P = Beban sumbu (kN)

A = Luas penampang (cm²).

Menurut klasifikasi ISRM (1981) dalam Rai dkk. (2014), batuan dapat dikategorikan berdasarkan nilai UCS sebagai berikut: sangat lemah (<1 MPa) hingga sangat-sangat kuat (>250 MPa). Nilai UCS yang tinggi menunjukkan bahwa batuan memiliki kekuatan dan tingkat kerapatan yang baik, sedangkan nilai rendah menunjukkan batuan rapuh dan mudah hancur.

Uji tahan lekang digunakan untuk menilai ketahanan batuan terhadap proses pelapukan fisik akibat siklus pembasahan dan pengeringan (Franklin dkk., 1972). Nilai ketahanan batuan dinyatakan dengan *Slake Durability Index* (Id₂) yang dihitung menggunakan rumus:

$$I_{d2} = \frac{W_f - C}{B - C} \times 100$$

Keterangan:

B = Berat silinder uji + butiran setelah pengeringan sebelum siklus pertama (gr)

C = Berat silinder kosong (gr)

W_f = Berat silinder uji + butiran setelah pengeringan pada siklus kedua (gr)

Menurut klasifikasi Franklin dkk. (1972), nilai Id₂ menunjukkan tingkat ketahanan batuan, mulai dari sangat rendah (0–25%) hingga ekstrim tinggi (95–100%). Batuan dengan nilai Id₂ >90% tergolong memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap pelapukan mekanis.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan gabungan antara teori dan data lapangan untuk memperoleh hasil yang representatif terhadap kondisi batuan di lokasi penelitian. Proses penelitian terdiri atas tiga tahapan utama, yaitu tahap pra lapangan, tahap lapangan, dan tahap pasca lapangan.

Tahap pra lapangan meliputi studi literatur serta persiapan alat dan bahan penelitian. Studi literatur dilakukan untuk memperoleh referensi yang relevan dari buku, jurnal ilmiah, dan penelitian terdahulu, sedangkan persiapan alat mencakup penggunaan alat pelindung diri (APD), palu geologi, GPS, komparator, neraca analitik, oven, ayakan, alat *slake durability*, alat

uniaxial compressive strength, serta perangkat lunak Microsoft Excel dan Word untuk pengolahan dan penyusunan data penelitian.

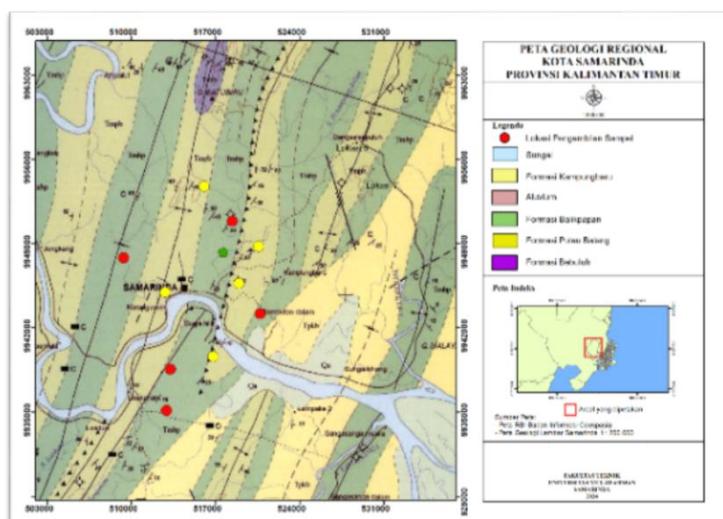
Tahap lapangan meliputi observasi dan pengambilan data. Observasi dilakukan untuk menentukan lokasi penelitian dan kondisi geologi daerah, sedangkan pengambilan data terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer berupa sampel batuan dan titik koordinat lokasi pengambilan menggunakan GPS, sedangkan data sekunder meliputi peta kesampaian daerah dan peta geologi regional yang diolah menggunakan perangkat lunak ArcGIS untuk menentukan posisi serta formasi batuan.

Tahap pasca lapangan mencakup preparasi sampel, pengujian laboratorium, dan analisis data. Seluruh preparasi sampel dan pengujian dilakukan sesuai standar. Pengujian laboratorium meliputi pengujian sifat fisik batuan, kuat tekan uniaksial, ketahanan *slake durability*, serta analisis ukuran butir dengan metode pengayakan. Data hasil pengujian diolah menggunakan Microsoft Excel untuk memperoleh hubungan ukuran butir, kekuatan, dan ketahanan batuan. Kesimpulan disusun berdasarkan hasil analisis untuk memberikan gambaran mengenai pengaruh ukuran butir terhadap kekuatan dan ketahanan batuan pada Formasi Balikpapan dan Formasi Pulau Balang.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Lokasi Pengambilan Sampel

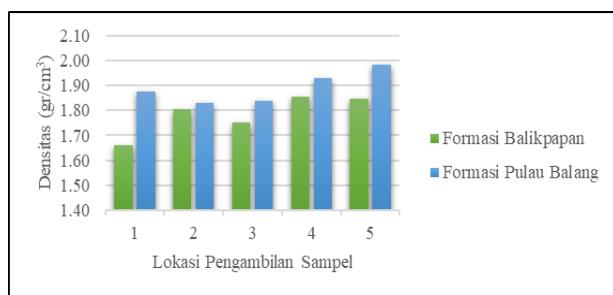
Penelitian ini dilaksanakan di Kota Samarinda, Provinsi Kalimantan Timur, dengan sampel batupasir yang berasal dari Formasi Balikpapan dan Pulau Balang. Setiap formasi memiliki lima titik lokasi pengambilan sampel, sehingga secara keseluruhan terdapat sepuluh lokasi.



Gambar 1 Peta Lokasi Pengambilan Sampel.

Hasil Uji Sifat Fisik

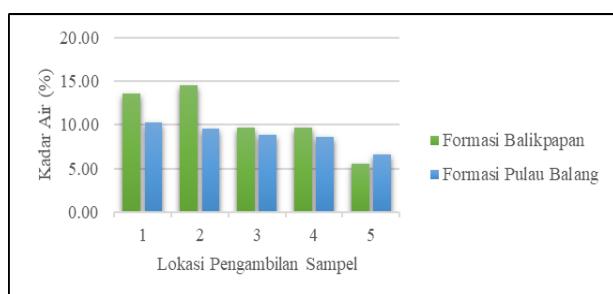
Densitas



Gambar 2 Perbandingan Densitas Formasi Balikpapan dan Pulau Balang.

Densitas batupasir pada Formasi Balikpapan di lokasi 1 hingga 5 memiliki nilai rata-rata masing-masing sebesar $1,66 \text{ gr}/\text{cm}^3$, $1,80 \text{ gr}/\text{cm}^3$, $1,75 \text{ gr}/\text{cm}^3$, $1,85 \text{ gr}/\text{cm}^3$, dan $1,85 \text{ gr}/\text{cm}^3$. Sementara itu, pada Formasi Pulau Balang di lokasi 1 hingga 5, nilai densitas rata-rata masing-masing $1,87 \text{ gr}/\text{cm}^3$, $1,83 \text{ gr}/\text{cm}^3$, $1,84 \text{ gr}/\text{cm}^3$, $1,93 \text{ gr}/\text{cm}^3$, dan $1,98 \text{ gr}/\text{cm}^3$.

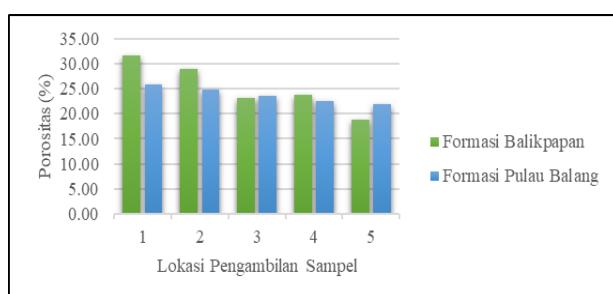
Kadar Air



Gambar 3 Perbandingan Kadar Air Formasi Balikpapan dan Pulau Balang.

Kadar air batupasir Formasi Balikpapan lokasi 1–5: 13,65%, 14,55%, 9,67%, 9,65%, dan 5,51%. Formasi Pulau Balang lokasi 1–5: 10,31%, 9,59%, 8,91%, 8,65%, dan 6,58%

Porositas



Gambar 4 Perbandingan Porositas Formasi Balikpapan dan Pulau Balang.

Porositas batupasir pada Formasi Balikpapan di lokasi 1 hingga 5 memiliki nilai rata-rata masing-masing sebesar 31,57%, 29,05%, 23,17%, 23,72%, dan 18,85%. Sementara itu, pada Formasi Pulau Balang di lokasi 1 hingga 5, porositas rata-rata masing-masing sebesar 25,96%, 24,76%, 23,68%, 22,62%, dan 21,84%.

Perbandingan Hasil Uji Sifat Fisik Antar Formasi

Hasil pengujian menunjukkan perbedaan karakteristik fisik antara batupasir Formasi Balikpapan dan Pulau Balang. Formasi Pulau Balang memiliki densitas lebih tinggi, menandakan batuan lebih padat dan terkompaksi, sedangkan Formasi Balikpapan memiliki kadar air serta porositas lebih besar, menunjukkan batuan lebih berpori dan mampu menyimpan air lebih banyak. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa batupasir Formasi Pulau Balang cenderung lebih kuat dan tahan terhadap pelapukan dibandingkan batupasir Formasi Balikpapan.

Hasil Uji Ayakan

Presentase Tertahan Formasi Balikpapan

Tabel 1 Persentase Tertahan Formasi Balikpapan

Lokasi	Kerikil	Sangat Kasar	Kasar	Pasir	Sedang	Halus	Sangat Halus	Lanau	Total
1	1.68%	58.14%	19.77%	9.54%	7.38%	3.48%	0.00%	100.00%	
2	5.54%	21.47%	39.32%	15.67%	17.53%	0.48%	0.00%	100.00%	
3	0.38%	3.36%	13.97%	45.70%	17.33%	18.77%	0.00%	100.00%	
4	0.00%	6.44%	5.68%	22.51%	55.48%	9.67%	0.12%	100.00%	
5	0.00%	3.48%	1.34%	29.47%	16.66%	47.53%	1.52%	100.00%	

Persentase ukuran butir tertinggi ditemukan pada: Lokasi 1 (sangat kasar, 58,14%), Lokasi 2 (kasar, 39,32%), Lokasi 3 (sedang, 45,70%), Lokasi 4 (halus, 55,48%), dan Lokasi 5 (sangat halus, 47,53%).

Presentase Tertahan Formasi Pulau Balang

Tabel 2 Persentase Tertahan Formasi Pulau Balang.

Lokasi	Kerikil	Sangat Kasar	Kasar	Pasir	Sedang	Halus	Sangat Halus	Lanau	Total
1	2.54%	71.66%	3.72%	14.84%	7.24%	0.00%	100.00%		
2	0.66%	11.67%	59.73%	10.93%	16.14%	0.96%	0.00%	100.00%	
3	0.70%	14.44%	14.10%	39.59%	23.26%	6.66%	0.94%	100.00%	
4	0.00%	11.98%	3.24%	13.51%	56.92%	11.98%	2.36%	100.00%	
5	0.00%	0.46%	3.06%	16.90%	15.78%	61.93%	1.86%	100.00%	

Lokasi sampel batupasir Formasi Pulau Balang terdiri dari lima titik. Lokasi 1 memiliki 71,66% ukuran butir sangat kasar. Lokasi 2 didominasi ukuran butir kasar dengan 59,73%,

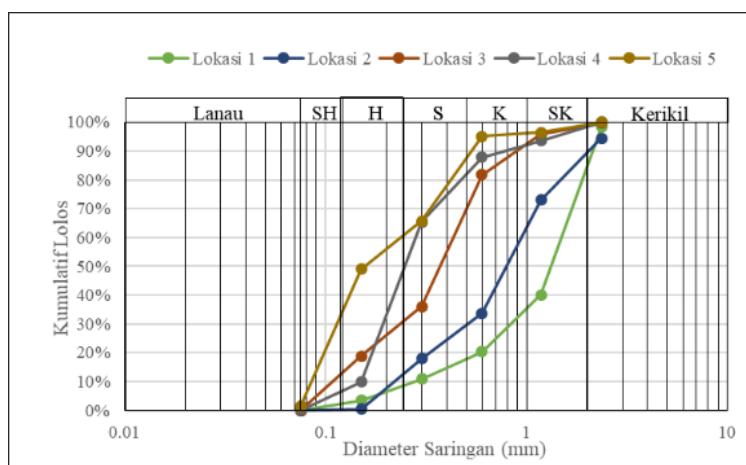
sedangkan lokasi 3 memiliki 39,59% ukuran butir sedang. Lokasi 4 didominasi ukuran butir halus sebesar 56,92%, dan lokasi 5 didominasi ukuran butir sangat halus dengan 61,93%.

Distribusi Ukuran Butir Formasi Balikpapan

Tabel 3 Kumulatif Lolos Formasi Balikpapan.

No. Ayakan	Diameter	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3	Lokasi 4	Lokasi 5
8	2.36	98.32%	94.46%	99.62%	100.00%	100.00%
16	1.18	40.18%	72.99%	95.76%	93.56%	96.52%
30	0.6	20.41%	33.67%	81.79%	87.88%	95.18%
50	0.3	10.86%	11.01%	36.09%	65.37%	65.71%
100	0.15	3.45%	0.48%	18.77%	9.88%	49.05%
200	0.075	0.00%	0.00%	0.00%	0.12%	1.52%
Pan	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Tabel 4.3 menunjukkan bahwa seluruh sampel Formasi Balikpapan didominasi ukuran butir pasir dengan nilai lolos di atas 94% pada saringan No. 8. Variasi ukuran butir mulai tampak pada saringan No. 30 ke bawah, dengan perbedaan signifikan pada saringan No. 100, di mana nilai kumulatif berkisar antara 0,48% hingga 49,05%. Ukuran butir sangat halus hanya muncul sedikit di lokasi 4 dan 5.



Gambar 5 Distribusi Ukuran Butir Formasi Balikpapan.

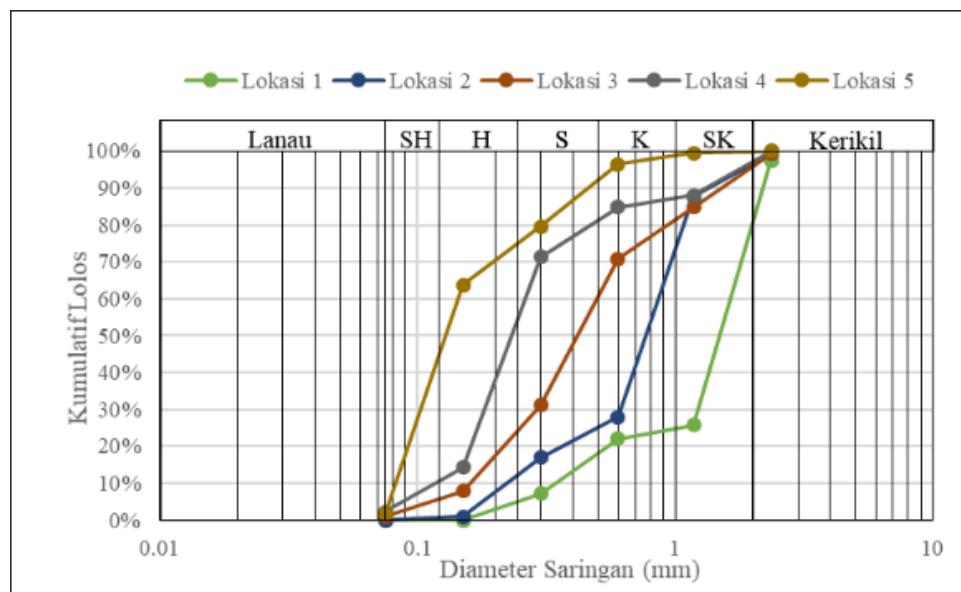
Dari grafik di atas dapat diamati bahwa ukuran butir batupasir tersebar mulai dari lanau hingga kerikil, dengan dominasi berada pada ukuran butir Sangat Halus (SH) hingga sangat kasar (SK). Kurva dari masing-masing sampel memperlihatkan bentuk gradasi yang bervariasi, menandakan bahwa batupasir dalam formasi ini memiliki karakteristik penyebaran ukuran butir yang tidak seragam (*poorly graded* hingga *well graded*).

Distribusi Ukuran Butir Formasi Pulau Balang

Tabel 4 Kumulatif Lolos Formasi Balikpapan.

No. Ayakan	Diameter	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3	Lokasi 4	Lokasi 5
8	2.36	97.46%	99.34%	99.30%	100.00%	100.00%
16	1.18	25.80%	87.67%	84.86%	88.02%	99.54%
30	0.6	22.08%	27.93%	70.75%	84.77%	96.48%
50	0.3	7.24%	10.01%	31.71%	71.27%	79.58%
100	0.15	0.86%	0.86%	7.90%	14.35%	63.79%
200	0.075	0.00%	0.00%	0.94%	2.36%	1.86%
Pan	0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Tabel menunjukkan bahwa seluruh sampel Formasi Pulau Balang didominasi ukuran butir pasir dengan nilai lolos di atas 97% pada saringan 2,36 mm. Variasi mulai tampak pada saringan 0,6–0,15 mm, dengan lokasi 5 memiliki ukuran butir halus tertinggi (63,79%), sedangkan lokasi 1 tidak mengandung ukuran butir halus. Ukuran butir .ukuran butir sangat halus hanya muncul di lokasi 3, 4, dan 5. Secara umum, ukuran butir bervariasi namun tetap menunjukkan dominasi ukuran butir tertentu di tiap lokasi.



Gambar 6 Distribusi Ukuran Butir Formasi Pulau Balang.

Grafik menunjukkan sebaran ukuran butir dari lanau hingga kerikil, dengan dominasi pada ukuran butir sangat halus hingga sangat kasar. Bentuk kurva bervariasi menandakan karakteristik gradasi yang tidak seragam, dari *poorly graded* hingga *well graded*.

Koefisien Keseragaman (Cu) dan Gradasi (Cc) Formasi Balikpapan

Tabel 5 Nilai Cu dan Cc Formasi Balikpapan.

Lokasi	D10	D30	D60	Cu	Cc	Klasifikasi
1	0.27	0.83	1.7	6.30	1.50	Gradasi Baik
2	0.22	0.5	0.97	4.41	1.17	Gradasi Buruk
3	0.12	0.23	0.44	3.67	1.00	Gradasi Buruk
4	0.15	0.18	0.28	1.87	0.77	Gradasi Buruk
5	0.083	0.13	0.24	2.89	0.85	Gradasi Buruk

Nilai Cu pada sampel Formasi Balikpapan berkisar antara 1,87 hingga 6,30, dengan hanya Lokasi 1 yang memenuhi syarat gradasi baik ($Cu \geq 6$ dan $Cc = 1,50$). Lokasi 2–5 memiliki nilai Cu < 6 dan Cc di bawah atau mendekati 1, sehingga diklasifikasikan sebagai *poorly graded* atau bergradasi buruk.

Koefisien Keseragaman (Cu) dan Gradasi (Cc) Formasi Pulau Balang

Tabel 6 Nilai Cu dan Cc Formasi Pulau Balang.

Lokasi	D10	D30	D60	Cu	Cc	Klasifikasi
1	0.33	1.4	1.7	5.15	3.49	Gradasi Buruk
2	0.22	0.62	0.88	4.00	1.99	Gradasi Buruk
3	0.16	0.28	0.49	3.06	1.00	Gradasi Buruk
4	0.12	0.18	0.28	2.17	1.04	Gradasi Buruk
5	0.082	0.12	0.15	1.83	1.17	Gradasi Buruk

Berdasarkan data, seluruh lokasi menunjukkan klasifikasi gradasi buruk. Nilai Cu berkisar antara 1,83–5,15, tidak ada lokasi yang memenuhi syarat $Cu \geq 6$. Meskipun beberapa lokasi memiliki nilai Cc dalam rentang yang disyaratkan (1–3), hal ini tidak cukup untuk menyatakan gradasi baik tanpa didukung oleh nilai Cu yang memadai.

Perbandingan Hasil Uji Ayakan Antar Formasi

Formasi Balikpapan menunjukkan variasi ukuran butir yang cukup signifikan antar lokasi, yang tercermin dari nilai Koefisien Uniformitas (Cu) yang berfluktuasi dan hanya satu lokasi yang memenuhi kriteria gradasi baik. Variasi Cu ini mengindikasikan adanya distribusi ukuran partikel yang tidak merata, sehingga menunjukkan kondisi pengendapan yang dinamis dengan perubahan energi arus yang cukup besar selama proses pembentukan batuan. Akibat dari variasi tersebut, struktur butir batuan pada formasi ini cenderung kurang teratur dan tidak seragam, yang dapat memengaruhi sifat fisik dan mekanik batuan secara lokal, seperti kekuatan tekan dan ketahanan terhadap pelapukan.

Sebaliknya, Formasi Pulau Balang memperlihatkan ukuran butir yang relatif seragam dan konsisten antar lokasi, dengan nilai Cu yang stabil meskipun secara keseluruhan masih tergolong gradasi buruk. Konsistensi nilai Koefisien Gradasi (Cc) yang berada dalam rentang yang lebih ideal menunjukkan distribusi ukuran butir yang lebih seimbang, mencerminkan kondisi pengendapan yang relatif stabil dan energi arus yang tetap selama pembentukan batuan. Struktur gradasi yang lebih teratur ini berpotensi meningkatkan kontak antar butir dan densitas batuan, sehingga dapat berkontribusi pada kestabilan, kekuatan, dan ketahanan batuan yang lebih unggul dibandingkan Formasi Balikpapan.

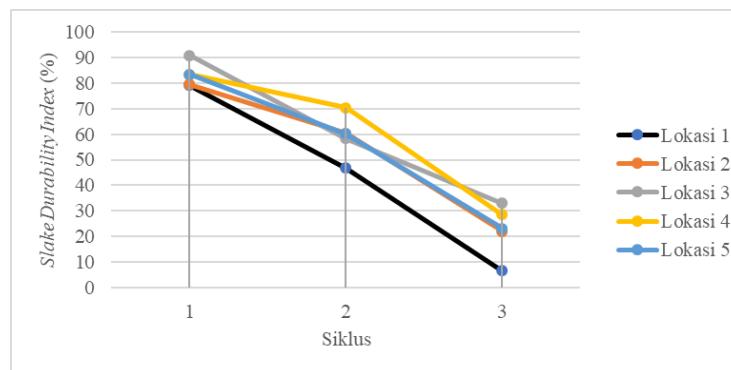
Hasil Uji Slake Durability

Formasi Balikpapan

Tabel 7 Nilai Slake Durability Formasi Balikpapan.

Lokasi	Sample	Id1	Id2	Id3	Klasifikasi
1	BP_A1	81.33	43.65	6.96	Rendah
	BP_A2	76.08	41.71	6.54	Rendah
	BP_A3	79.91	60.53	8.85	Rendah
2	BP_B1	79.10	46.82	67.74	Rendah
	BP_B2	78.80	60.02	25.46	Menengah
3	BP_C1	92.59	58.88	34.75	Menengah
	BP_C2	95.52	59.97	43.44	Menengah
	BP_C3	88.74	54.34	37.44	Menengah
4	BP_D1	91.52	61.02	60.61	Menengah
	BP_D2	82.56	50.81	25.90	Menengah
	BP_D3	86.40	51.29	28.50	Menengah
4	BP_E1	85.45	56.68	30.25	Menengah
	BP_E2	84.81	60.03	27.57	Menengah
	BP_E3	83.28	60.05	23.65	Menengah

Berdasarkan hasil rata-rata uji slake durability, batupasir Formasi Balikpapan menunjukkan klasifikasi ketahanan yang berbeda, dengan lokasi 1 termasuk dalam kategori rendah, serta lokasi 2, 3, 4, dan 5 termasuk dalam kategori menengah berdasarkan nilai indeks ketahanan yang diperoleh dari hasil pengujian berulang selama dua siklus pengujian laboratorium yang telah dilakukan sebelumnya, menunjukkan variasi ketahanan pelapukan yang signifikan antar lokasi.



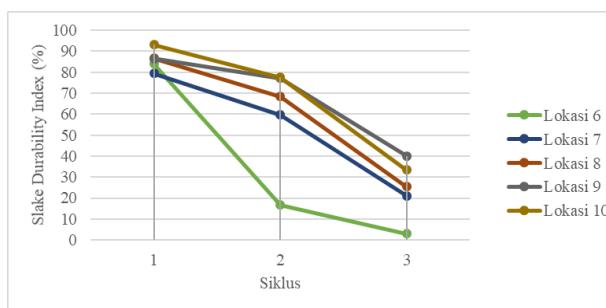
Gambar 7 Hasil Uji *Slake Durability* Formasi Balikpapan.

Formasi Pulau Balang

Tabel 8 Nilai *Slake Durability* Batupasir Formasi Pulau Balang.

Lokasi	Sample	Silius (%)	Id	Klasifikasi
PB_A1	79,96	15,52	3,21	Sangat Rendah
PB_A2	87,34	15,97	2,38	Sangat Rendah
PB_A3	84,34	15,87	3,03	Sangat Rendah
PB_B1	83,8	16,76	1,98	Sangat Rendah
PB_B2	79,7	15,21	21,53	Menengah
PB_C1	93,20	16,58	5,81	Menengah
PB_C2	83,70	15,89	25,99	Menengah
PB_C3	85,64	24,42	24,45	Menengah
PB_D1	66,64	24,02	24,47	Tinggi
PB_D2	85,30	16,39	40,00	Tinggi
PB_D3	86,43	16,31	40,04	Tinggi
PB_E1	84,37	15,63	35,52	Tinggi
PB_E2	88,21	15,81	35,32	Tinggi
PB_E3	92,53	16,32	34,67	Tinggi

Berdasarkan rata-rata uji *slake durability* batupasir Formasi Pulau Balang, lokasi 1 sangat rendah, lokasi 2 dan 3 menengah, lokasi 4 dan 5 tinggi.



Gambar 8 Hasil Uji *Slake Durability* Formasi Pulau Balang.

Perbandingan Hasil Uji *Slake Durability* Antar Formasi

Hasil uji *slake durability* menunjukkan bahwa Formasi Balikpapan umumnya memiliki ketahanan pelapukan sedang (Id_3 6,74–33,05%) dan relatif konsisten antar lokasi. Sebaliknya, Formasi Pulau Balang menunjukkan rentang ketahanan lebih luas, dari sangat rendah hingga tinggi (Id_3 2,98–40,04%), dengan peningkatan ketahanan dari lokasi 1 ke lokasi 5. Secara keseluruhan, Formasi Pulau Balang memiliki potensi ketahanan lebih tinggi di beberapa lokasi, sedangkan Formasi Balikpapan lebih stabil namun tanpa ketahanan maksimum. Penilaian ketahanan batuan didasarkan pada nilai Id_2 , yang dianggap paling mewakili kondisi sebenarnya setelah bagian lemah batuan terlepas pada siklus pertama.

Hasil Uji *Uniaxial Compressive Strength*

Formasi Balikpapan

Tabel 9 Nilai UCS Formasi Balikpapan.

Lokasi	Sampel	Diameter (cm)	Tinggi (cm)	F Puncak (kN)	UCS Puncak (MPa)
1	BP_A1	4	8.2	18	1.433
	BP_A2	4	8.2	20	1.592
	BP_A3	4	8.0	21	1.554
2	BP_B1	4	8.0	41	3.264
	BP_B2	4	8.1	38	3.025
	BP_B3	4	8.1	40	3.158
3	BP_C1	4	8.2	44	3.505
	BP_C2	4	8.2	42	3.264
	BP_C3	4	8.2	43	3.503
4	BP_D1	4	8.0	42	3.344
	BP_D2	4	8.0	41	3.544

5	BP_D3	4	8.0	46	3.668
	BP_E1	4	8.2	85	6.608
	BP_E2	4	8.2	83	6.649
	BP_E3	4	8.1	81	6.649

Hasil pengujian Formasi Balikpapan menunjukkan variasi nilai rata-rata kuat tekan (UCS) yang tinggi antar lokasi. Lokasi 1 mencatat nilai terendah (1,460 MPa), sementara Lokasi 5 mencatatkan nilai tertinggi (6,608 MPa). Lokasi 2, 3, dan 4 menunjukkan peningkatan kekuatan yang relatif stabil (antara 3,158 Mpa hingga 3,397 Mpa).

Formasi Pulau Balang

Tabel 10 Nilai UCS Formasi Pulau Balang.

Lokasi	Sampel	Diameter (cm)	Tinggi (cm)	F Puncak (lbf)	UCS Puncak (MPa)
1	PB_A1	8.3	24	1.911	1.725
	PB_A2	8.3	22	1.752	1.713
	PB_A3	8.1	19	1.513	1.401
2	PB_B1	8.1	41	3.264	3.344
	PB_B2	8.1	41	3.264	3.144
	PB_B3	8.1	44	3.504	3.249
3	PB_C1	8.1	44	3.822	3.689
	PB_C2	8.1	44	3.822	3.689
	PB_C3	8.1	43	3.643	3.533
4	PB_D1	8.2	40	6.639	6.582
	PB_D2	8.2	45	6.639	6.582
	PB_D3	8.2	45	6.639	6.532
5	PB_E1	8.1	43	7.005	6.693
	PB_E2	8.1	41	7.006	6.594
	PB_E3	8.1	44	7.086	6.934

Pada Formasi Pulau Balang, variasi kuat tekan juga tampak jelas. Lokasi 1 mencatat nilai UCS rata-rata terendah, yaitu 1,725 MPa, sedikit lebih tinggi dibandingkan lokasi terendah di Formasi Balikpapan. Nilai meningkat secara bertahap di lokasi 2 (3,344 MPa) dan lokasi 3 (3,689 MPa), lalu secara signifikan lebih tinggi di lokasi 4 (6,582 MPa) dan lokasi 5 (6,953 MPa). Ini menunjukkan bahwa batuan di bagian akhir lokasi pengambilan sampel memiliki tingkat kekuatan tekan yang sangat baik.

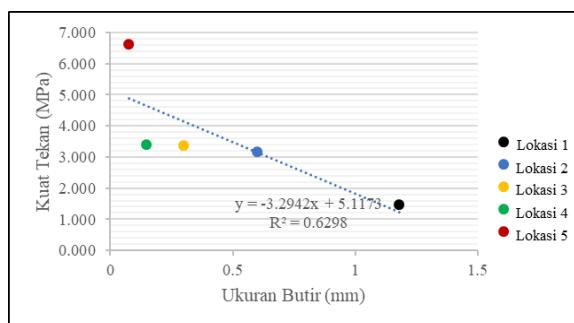
Perbandingan Antar Formasi

Kedua formasi menunjukkan pola peningkatan nilai UCS dari lokasi 1 hingga lokasi 5. Formasi Balikpapan memiliki nilai rata-rata UCS terendah di lokasi 1 sebesar 1,460 MPa, dan tertinggi di lokasi 5 sebesar 6,608 MPa. Sementara itu, Formasi Pulau Balang juga menunjukkan peningkatan serupa, dengan nilai rata-rata terendah sebesar 1,725 MPa di lokasi 1 dan tertinggi sebesar 6,953 MPa di lokasi 5.

Dibandingkan dengan Formasi Balikpapan, Formasi Pulau Balang memiliki nilai UCS yang lebih tinggi dan lebih stabil pada dua lokasi terakhir. Hal ini menunjukkan bahwa batuan pada Formasi Pulau Balang memiliki kekuatan tekan satu arah yang lebih baik secara umum. Kekuatan ini mencerminkan struktur batuan yang lebih padat, lebih terkompaksi, serta memiliki ikatan butiran yang lebih kuat dibandingkan Formasi Balikpapan.

Analisis Hubungan Ukuran Butir Terhadap Kekuatan

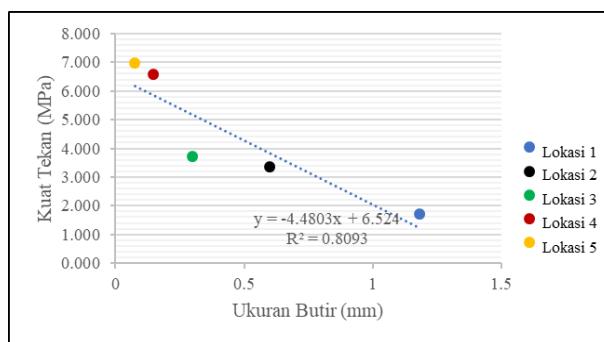
Hubungan Ukuran Butir dan Kekuatan Batuan Formasi Balikpapan



Gambar 9 Hubungan Ukuran Butir dan Kuat Tekan Formasi Balikpapan.

Gambar 4.8, yang memperlihatkan hubungan antara ukuran butir pasir dan kuat tekan batupasir, dapat disimpulkan bahwa batupasir yang berasal dari Formasi Balikpapan memiliki karakteristik yang termasuk ke dalam klasifikasi sedang. Hal ini dapat dilihat dari nilai R^2 yang sebesar 0,6298, yang menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang sedang antara ukuran butir dan kuat tekan dari batupasir pada Formasi Balikpapan.

Hubungan Ukuran Butir dan Kekuatan Batuan Formasi Pulau Balang



Gambar 10 Hubungan Ukuran Butir dan Kuat Tekan Formasi Pulau Balang

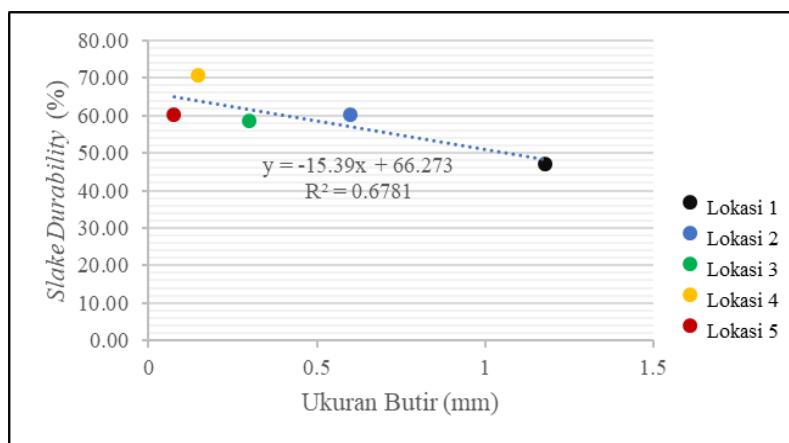
Hasil analisis menunjukkan batupasir Formasi Pulau Balang tergolong kuat, dengan hubungan kuat antara ukuran butir dan kuat tekan ($R^2 = 0,8093$). Semakin halus ukuran butir, semakin tinggi kuat tekannya, sesuai dengan hasil uji laboratorium di tiap lokasi.

Perbandingan Antar Formasi

Berdasarkan hasil regresi, Formasi Pulau Balang memiliki hubungan yang lebih kuat antara ukuran butir dan kuat tekan dibandingkan Formasi Balikpapan. Nilai R^2 sebesar 0,8093 menunjukkan bahwa 80,93% variasi kuat tekan pada Formasi Pulau Balang dijelaskan oleh ukuran butir, sedangkan pada Formasi Balikpapan hanya sebesar 62,98%. Selain itu, arah hubungan pada kedua formasi menunjukkan tren yang sama, yaitu semakin kecil ukuran butir maka semakin besar kekuatan tekan batuan. Namun, Formasi Pulau Balang memiliki karakteristik butiran yang lebih seragam dan kuat, sehingga memberikan pengaruh yang lebih signifikan terhadap nilai UCS. Dengan demikian, batupasir dari Formasi Pulau Balang tidak hanya memiliki kekuatan tekan yang lebih tinggi, tetapi juga hubungan yang lebih kuat dan konsisten antara ukuran butir dan kekuatan tersebut.

Analisis Hubungan Ukuran Butir Terhadap Ketahanan

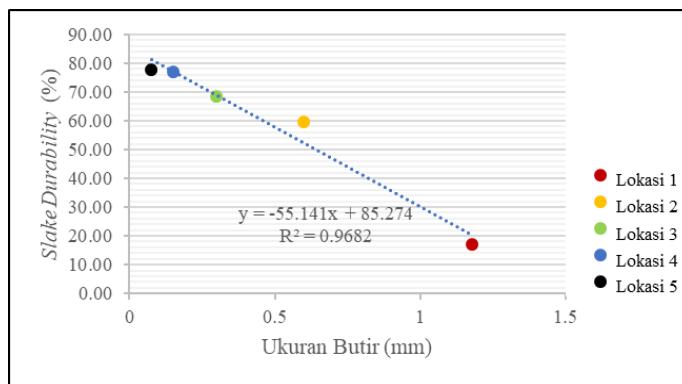
Hubungan Ukuran Butir dan Ketahanan Batuan Formasi Balikpapan



Gambar 11 Hubungan Ukuran Butir dan Ketahanan Formasi Balikpapan

Berdasarkan analisis pada Gambar 4.10, batupasir Formasi Balikpapan termasuk klasifikasi kuat dengan nilai $R^2 = 0,6781$, yang menunjukkan hubungan cukup kuat antara ukuran butir dan *slake durability*. Arah hubungan negatif menandakan bahwa semakin kecil ukuran butir, semakin tinggi ketahanan batuan terhadap pelapukan. Batupasir berbutir halus pada Formasi Balikpapan cenderung lebih padat dan tahan terhadap pelapukan mekanis berulang.

Hubungan Ukuran Butir dan Ketahanan Batuan Formasi Pulau Balang



Gambar 12 Hubungan Ukuran Butir dan Ketahanan Formasi Pulau Balang

Berdasarkan analisis yang ditunjukkan pada Gambar 4.11, yang memperlihatkan hubungan antara ukuran butir batupasir dan *slake durability* batupasir, dapat disimpulkan bahwa batupasir yang berasal dari Formasi Pulau Balang memiliki karakteristik yang termasuk ke dalam klasifikasi sangat kuat. Hal ini dapat dilihat dari nilai R^2 yang sebesar 0,9682, yang menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang kuat antara ukuran butir dan *slake durability* dari batupasir pada Formasi Pulau Balang. Nilai R^2 sebesar 0,9682 ukuran butir menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara ukuran butir dan nilai ketahanan pelapukan. Dengan arah korelasi negatif yang jelas, dapat dipastikan bahwa semakin kecil ukuran butir, semakin tinggi nilai *Slake Durability*. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi ukuran butir sangat berpengaruh terhadap ketahanan batuan dari Formasi Pulau Balang, terutama dalam menghadapi siklus pelapukan kering-basah.

Perbandingan Antar Formasi

Berdasarkan nilai koefisien determinasi, hubungan antara ukuran butir dan nilai *Slake Durability* pada Formasi Pulau Balang ($R^2 = 0,9682$) lebih kuat dibandingkan dengan Formasi Balikpapan ($R^2 = 0,6781$). Arah hubungan pada kedua formasi sama, yaitu semakin kecil ukuran butir, maka nilai ketahanan pelapukan meningkat. Namun, sebaran data yang lebih konsisten dan pola distribusi ukuran yang lebih seragam pada Formasi Pulau Balang menghasilkan hubungan yang lebih jelas dan stabil. Hal ini menegaskan bahwa pengaruh ukuran butir terhadap ketahanan pelapukan lebih signifikan pada Formasi Pulau Balang dibandingkan Formasi Balikpapan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa ukuran butir batupasir berpengaruh nyata terhadap kekuatan dan ketahanan batuan pada Formasi Balikpapan dan Formasi Pulau

Balang. Semakin halus ukuran butir, semakin tinggi nilai kuat tekan dan ketahanan terhadap pelapukan. Formasi Pulau Balang menunjukkan nilai densitas yang lebih tinggi, porositas yang lebih rendah, serta hubungan yang lebih kuat dan stabil antara ukuran butir dengan nilai UCS ($R^2 = 0,8093$) dan *Slake Durability* ($R^2 = 0,9682$) dibandingkan Formasi Balikpapan yang memiliki nilai R^2 masing-masing 0,6298 dan 0,6781. Hal ini menunjukkan bahwa batupasir Formasi Pulau Balang secara umum lebih padat, kompak, dan tahan terhadap pelapukan mekanis berulang.

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada jumlah sampel dan cakupan lokasi yang terbatas, sehingga generalisasi hasil perlu dilakukan dengan hati-hati. Penelitian lanjutan disarankan untuk memperluas area pengambilan sampel serta mempertimbangkan faktor lain.

DAFTAR REFERENSI

- Arif, I. (2016). *Geoteknik Tambang*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). *SNI 2825:2008 Cara Uji Kuat Tekan Batu Uniaksial*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *SNI 3406:2011 Cara Uji Sifat Tahan Lekang Batu*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). *SNI ASTM C136:2012 Metode Uji untuk Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2018). *SNI 2437:1991 Pengujian Laboratorium untuk Menentukan Parameter Sifat Fisikan pada Contoh Batu*. Jakarta: BSN.
- Balfas, M. D. (2015). *Geologi untuk Pertambangan Umum*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Efendi, M., Oktaviani, R., & Nugroho, W. (2024). Analisis hubungan kuat tekan uniaksial dan kuat tarik tidak langsung dengan metode regresi pada batupasir Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur. *Venus: Jurnal Publikasi Rumpun Ilmu Teknik*, 2(4), 143-163. <https://doi.org/10.61132/venus.v2i4.407>
- Fakultas Teknik Universitas Mulawarman. (2014). *Panduan Tugas Akhir, Skripsi dan Praktik Kerja Lapangan*. Samarinda: Universitas Mulawarman.
- Fitri, A., Rahim, R., Nurhayati, Pagiling, A. S. L., Natsir, I., Munfarikhatin, A., Simanjuntak, D. N., Hutagaol, K., & Anugrah, N. E. (2023). *Dasar-dasar Statistika untuk Penelitian*. Medan: Yayasan Kita Menulis.
- Franklin, J. A., & Chandra, R. (1972). The slake durability test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 9(3), 325-328. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(72\)90001-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(72)90001-0)

- Herastuti, K. A. (2016). Studi analisis pengaruh variasi ukuran butir batuan terhadap sifat fisik dan nilai kuat tekan. *ReTII*.
- Malik, A., Trides, T., Magdalena, H., Oktaviani, R., & Pontus, A. J. (2023). Pengaruh ukuran butir batupasir terhadap nilai point load index test pada Formasi Balikpapan dan Pulau Balang. *Jurnal Sosial Teknologi*, 3(7), 559-566. <https://doi.org/10.59188/jurnalsostech.v3i7.848>
- Masdari, F., Devy, S. D., Winarno, A., Nugroho, W., & Magdalena, H. (2022). Studi pengaruh ukuran butir terhadap porositas dan konduktivitas hidrolik batupasir dan batulempung. *Jurnal Teknologi Mineral FT UNMUL*, 10(2), 18-25. <https://doi.org/10.30872/jtm.v10i2.9021>
- Musodiq, M., Trides, T., Devy, S. D., Oktaviani, R., & Pontus, A. J. (2023). Analisis uji kuat tekan uniaksial batupasir pada Formasi Pamaluan, Kecamatan Longikis, Kabupaten Paser, Provinsi Kalimantan Timur. *MINERAL*, 8(1), 1-7. <https://doi.org/10.33019/mineral.v8i1.3921>
- Noor, D. (2012). *Pengantar Geologi*. Bogor: Universitas Pakuan.
- Octaviani, E., Sartika, D., Gunarsih, D., Rifqan, R., Akbar, M. A., & Adrian, F. (2023). Petrografi batupasir daerah Siron Blang dan sekitarnya, Kecamatan Kuta Cot Glie, Kabupaten Aceh Besar. *Acta Geoscience, Energy, and Mining*, 2(1), 13-18.
- Rai, M. A., Kramadibrata, S., & Wattimena, R. K. (2014). *Mekanika Batuan*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Supriyatna, S., Sukardi, & Rustandi, E. (1995). *Peta Geologi Lembar Samarinda, Kalimantan*. Bandung: Pusat Survei Geologi.
- Winarno, A., Amijaya, D. H., & Harijoko, A. (2016). Studi pendahuluan pengaruh karakteristik batubara peringkat rendah Cekungan Kutai terhadap gasifikasi batubara. *PROMINE*, 4(2).
- Winarno, T., & Marin, J. (2020). *Mineralogi*. Semarang: Undip Press.
- Zuhdi, M. (2019). *Pengantar Geologi*. Mataram: Duta Pustaka Ilmu.