

STUDI KARAKTERISTIK RELASI PARAMETER SIFAT FISIK DAN KUAT TEKAN UNIAKSIAL PADA CONTOH BATULEMPUNG, ANDESIT, DAN BETON

Sari Melati

Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat
e-mail : sari@ulm.ac.id.

ABSTRAK

Kuat tekan uniaksial atau uniaxial compressive strength (UCS) dan sifat fisik menjadi parameter penentu yang sangat penting dalam berbagai keperluan rekayasa mekanika batuan. Kuat tekan uniaksial berbagai jenis batuan sangat bervariasi. Kuat tekan uniaksial batuan utuh dipengaruhi oleh sifat fisiknya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antarparameter sifat fisik dan antara parameter sifat fisik dengan kuat tekan uniaksial contoh batulempung, beton, dan andesit serta mengukur sumbangan pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat.

Pengujian sifat fisik dan kuat tekan uniaksial dilakukan terhadap masing-masing 5 contoh batubara, batulempung, gipsum, andesit, dan beton sebagai perwakilan material homogen. Selanjutnya dianalisis korelasi antarparameter sifat fisik yang terdiri atas bobot isi asli, bobot isi kering, bobot isi jenuh, kadar air, derajat kejenuhan, porositas, dan angka pori dan kuat tekan uniaksialnya.

Analisis data hasil pengujian menunjukkan bahwa bobot isi asli, kering, dan jenuh berkorelasi negatif dengan porositas. Semakin tinggi porositas, nilai bobot isi semakin kecil. Kadar air berkorelasi linier positif dengan perbedaan bobot isi asli dan bobot isi kering, berkorelasi linier positif pula dengan perbedaan bobot isi jenuh dan bobot isi kering. Parameter sifat fisik yang paling mempengaruhi kuat tekan uniaksial adalah kadar air, terutama pada batulempung (R^2 0.78) dan beton (R^2 0.63). Tetapi pada andesit, parameter sifat fisik yang paling mempengaruhi adalah porositas (R^2 0.91).

Kata-kata kunci : andesit, batulempung, beton, kuat tekan uniaksial, sifat fisik

PENDAHULUAN

Kuat tekan uniaksial atau uniaxial compressive strength (UCS) dan sifat fisik menjadi parameter penentu yang sangat penting dalam berbagai keperluan rekayasa mekanika batuan. ^[1]Kuat tekan uniaksial digunakan untuk memilih metode pemberaian batuan pada kegiatan penambangan baik sistem tambang terbuka maupun bawah tanah apakah menggunakan metode peledakan atau menggunakan alat mekanis. Data bobot isi batuan diperlukan untuk perancangan jenis dan jumlah alat-alat mekanis dalam penggalian dan penanganan batuan. Sedangkan data porositas, kandungan air, dan derajat kejenuhan diperlukan untuk memodelkan dan mengidentifikasi permasalahan geohidrologi tambang. Kuat tekan dan sifat fisik sendiri secara bersamaan berkaitan erat dengan kestabilan geoteknik lereng tambang terbuka dan lubang galian tambang bawah tanah. ^[2]Sifat fisik batuan, diantaranya densitas dan porositas serta Modulus Young dan Rasio Poisson yang diperoleh dari uji kuat tekan uniaksial merupakan masukan dasar untuk pemodelan geomekanik dan desain teknik geologi.

Pengaruh sifat fisik terhadap kekuatan batu, tanah, beton, atau campurannya telah sering diteliti. ^[3]Kandungan air optimal yang menghasilkan UCS tertinggi pada campuran tanah dan semen diketahui bervariasi tergantung perbandingan campuran air dan semen. ^[4]Semakin lama perendaman batupasir getas dalam air, UCS dan Modulus Young semakin rendah, tetapi Ratio Poisson semakin tinggi.

^[5]Parameter rasio porositas/komposisi aktif diusulkan untuk memprediksi rasio kuat tarik/UCS zeolit yang disemen dengan pasir. ^[6]Pengaruh porositas, bobot isi kering, kandungan semen, dan rasio rongga/semen terhadap UCS campuran tanah lanauan dengan limbah genteng juga telah diteliti. Dari penelitian tersebut diusulkan persamaan-persamaan empiris eksponensial atau pangkat. ^[7]Berdasarkan validasi persamaan empiris pada batupasir,

tuff, dan batugamping, dipelajari lebih jauh analisis struktur mikro ukuran pori dan kerapatan rekahan terhadap UCS.

^[8]Melalui penyelidikan pada lempung kaku di alam, diperoleh hasil bahwa derajat kejenuhan berpengaruh signifikan pada UCS hanya ketika tingkat penyedotan tinggi. Sementara pada tingkat penyedotan rendah, UCS lempung kaku lebih dikontrol oleh densitas keringnya. ^[9]Pengurangan derajat kejenuhan dan perpanjangan waktu pengeringan conto beton campur gamping akan meningkatkan kekuatannya. ^[10]Agregat pemberat rel kereta yang diambil dari beberapa tambang kuari terdiri atas basalt, marl, dan dolomit telah dievaluasi. Hasil evaluasi menunjukkan semakin lama waktu penjenruhan, kekuatan agregat semakin menurun. ^[11]Penjenruhan batubara bituminus dengan air dan gas CO₂ secara bersama-sama mengganggu kekuatan pelapukan dan membahayakan kestabilan seluruh sistem penyimpanan gas bawah tanah. ^[12]Pengujian dan permodelan numerik terhadap pilar batubara tambang bawah tanah menunjukan hasil bahwa kekuatan pilar pada kondisi jenuh diperkirakan dengan pembobotan ketebalan komponen litologinya.

Penelitian-penelitian terdahulu tersebut telah menjelaskan dampak kehadiran air, porositas, dan derajat kejenuhan terhadap kekuatan batu, tanah, beton, atau campurannya. Namun, analisis secara terukur mengenai karakteristik hubungan antarparameter sifat fisik serta hubungan antara UCS dengan bobot isi, kandungan air, derajat kejenuhan, dan porositas pada batuan yang bersifat plastis dan getas jarang dibahas dan dilaporkan.

Penelitian ini bertujuan mengkaji hubungan antarparameter sifat fisik mencakup bobot isi asli, bobot isi kering, bobot isi jenuh, kandungan air, derajat kejenuhan, dan porositas. Kemudian dikaji pula hubungan antara semua parameter sifat fisik dengan kuat tekan uniaksialnya. Batulempung sebagai salah satu batuan sedimen dipilih untuk mewakili batu yang bersifat plastis. Sementara andesit dipilih sebagai salah satu contoh batuan beku dipilih

untuk mewakili batu yang bersifat getas. Sebagai tambahan, dianalisis pula beton yang mewakili bahan homogen agar faktor heterogenitas dapat diminimalisir.

METODOLOGI

Alur pengujian di laboratorium untuk penelitian ini meliputi pembuatan contoh beton dan pemilihan batuan, preparasi contoh, uji sifat fisik, dan uji kuat tekan uniaksial.

Contoh batu andesit diperoleh dari tambang batu andesit di daerah Banjaran, Kabupaten Bandung Selatan, Provinsi Jawa Barat. Contoh diambil dalam bentuk bongkah hasil pahatan. Kemudian dilakukan pemboran inti untuk mendapatkan contoh inti silinder dengan diameter 43 mm. Hasil uji mineralogi optik terhadap dua sayatan tipis andesit ini menunjukkan bahwa komposisinya terdiri dari 85,67% plagioklas, 11,73% piroksen, 2 % mineral opak, dan 1% rongga.

Contoh batulempung diperoleh dari tambang batubara di daerah Pengaron, Kabupaten Banjar, Provinsi Kalimantan Selatan. Contoh diambil dalam bentuk bongkah hasil pembongkaran *overburden*. Kemudian dilakukan pemboran inti untuk mendapatkan contoh inti silinder dengan diameter 54 mm. Hasil uji mineralogi optik terhadap dua sayatan tipis andesit ini menunjukkan bahwa komposisinya terdiri dari 85% material lempung, 5,67% kuarsa, dan 8,67% rongga.

Contoh beton dibuat di laboratorium dengan komposisi agregat pasir : semen = 1 : 1. Contoh kemudian dicetak dalam pipa dengan diameter dalam 43 mm. Pemilihan cetakan berdiameter kecil ini dengan harapan agar distribusi agregat dalam contoh lebih merata dibandingkan jika digunakan cetakan dengan diameter yang lebih besar. Beton didiamkan selama 28 hari untuk memperoleh kekuatan puncaknya.

Preparasi Contoh

Preparasi contoh batuan meliputi pemotongan contoh batuan dan penghalusan contoh batuan hasil potongan agar sesuai dengan prosedur yang disarankan ISRM. Kedua muka contoh uji silinder harus rata dengan ketelitian 0.02 mm dan tidak menyimpang dari ketegaklurusan sumbu utama lebih daripada 0.001 radian (sekitar 3.5 menit) atau 0.05 mm dalam 50 mm.

Contoh dipotong menggunakan gergaji potong intan untuk menyesuaikan perbandingan ukuran tinggi contoh terhadap diameternya, yaitu 2 - 2,5 kali.

Permukaan kontak contoh diratakan dan dihaluskan secara manual menggunakan ampelas. *Squareness gage* dan nivo tabung digunakan untuk memeriksa kehalusan dan kerataan permukaan kontak contoh. Toleransi ketidakrataan permukaan kontak contoh sebesar ± 0.1 mm.

Perataan permukaan contoh dilakukan agar tegangan akibat penekanan tersebar secara merata. Permukaan contoh batuan yang tidak rata dan halus menyebabkan pengurangan kekuatan batuan karena tidak semua permukaan mengalami kontak sehingga tegangan hanya terkonsentrasi pada bagian-bagian yang dikenai kontak.

Data yang diinginkan setidaknya masing-masing 5, contoh yang disiapkan masing-masing untuk uji sifat fisik 7 conto dan untuk uji kuat tekan uniaksial 6 conto.

Uji Sifat Fisik

Pengujian sifat fisik mengacu pada International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering (ISRM) Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption, and Related Properties and Swelling and Shrinkage Properties – 1977. Contoh untuk uji sifat fisik berbentuk tidak teratur karena volume diprediksi menggunakan prinsip hukum Archimedes tentang gaya apung oleh air, yang penting contoh muat di cawan yang berdiameter 5 cm. Prosedur yang dilakukan untuk memperoleh data sifat fisik batuan adalah sebagai berikut. Pertama, contoh ditimbang dengan neraca untuk mendapatkan berat asli (W_n). Selanjutnya, contoh dijemur menggunakan desikator selama 24 jam, kemudian ditimbang tergantung dalam air dan ditimbang dengan neraca untuk mendapatkan bobot berat tergantung (W_s) dan berat jenuh (W_w). Terakhir, contoh dikeringkan dalam oven selama 24 jam pada suhu 90°C, kemudian ditimbang untuk mendapatkan berat kering (W_o). Berat contoh pada tiga kondisi dalam satuan gram. Peralatan yang digunakan yaitu : cawan, untuk wadah contoh; desikator dengan pompa, untuk mengeluarkan udara dari pori-pori dan menjenuhkan contoh; oven, untuk mengeringkan kandungan air dalam contoh; neraca, untuk menimbang contoh; dan ember berisi air, untuk menimbang contoh dalam air.

Parameter sifat fisik yang diperoleh melalui penelitian ini adalah bobot isi asli (*natural density*) ρ_n , bobot isi kering (*dry density*) ρ_d , bobot isi jenuh (*saturated density*) ρ_s , ketiganya dalam satuan g/cm³; kadar air asli (*natural water content*) w , derajat kejenuhan (*degree of saturation*) S , dan porositas (*porosity*) dalam satuan %; serta angka pori (*void ratio*) e tanpa satuan, yang dihitung menggunakan persamaan (1) sampai persamaan (7).

$$\rho_n = \frac{W_n}{W_w - W_s} \dots\dots\dots (1)$$

$$\rho_d = \frac{W_o}{W_w - W_s} \dots\dots\dots (2)$$

$$\rho_s = \frac{W_w}{W_w - W_s} \dots\dots\dots (3)$$

$$w = \frac{W_n - W_o}{W_o} \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

$$S = \frac{W_n - W_o}{W_w - W_o} \times 100\% \dots\dots\dots (5)$$

$$n = \frac{W_w - W_o}{W_w - W_s} \times 100\% \dots\dots\dots (6)$$

$$e = \frac{n}{1-n} \dots\dots\dots (7)$$

Uji Kuat Tekan Uniaksial

Uji kuat tekan uniaksial mengacu pada ISRM Suggested Method for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials. Contoh untuk kuat tekan uniaksial berbentuk silinder dengan perbandingan antara panjang dan diameternya antara 2-2.5 kali diameternya. Hal ini diperlukan guna menghindari bertemunya tegangan seperti kondisi $L/D = 1$. Diameter contoh uji harus diukur hingga ketelitian mendekati 0.1 mm dengan mengambil rata-rata

pada sisi diameter bahwa, tengah dan atas tegak lurus terhadap sumbu utama silinder. Diameter rata-rata digunakan untuk menghitung luas sisi muka contoh uji. Tinggi atau panjang contoh uji diukur dengan ketelitian hingga mendekati 1.0 mm. Luas permukaan pembebanan harus rata, halus, dan paralel tegak lurus terhadap arah pembebanan contoh batuan.

Apparatus untuk kuat tekan uniaksial ini terdiri atas, yang pertama mesin tekan Cat.N^o C25 merk Controls. Mesin ini memiliki kapasitas pembebanan maksimum 1300 kN dengan piston penekan hidrolik yang dipasang pada bagian atas rangka besi. Alat pengukur gaya yang digunakan pada penelitian ini memiliki ketelitian 1 kN. Kedua, dial gauge, yaitu alat yang dipasang untuk mengukur deformasi aksial dan deformasi lateral yang dialami contoh selama penekanan. Pada penelitian ini digunakan 1 unit dial gauge dengan ketelitian 0.01 mm untuk pengukuran deformasi aksial dan 2 unit dial gauge dengan ketelitian 1 µm untuk pengukuran deformasi lateral. Alat terakhir, stopwatch yang diperlukan untuk mencatat lamanya waktu pembebanan contoh sehingga laju pembebanannya dapat menghitung. Laju pembebanan yang disarankan menurut adalah antara 0.1 – 1 MPa/detik atau pengujian satu contoh selesai dalam waktu 3-5 menit.

Prosedur uji kuat tekan uniaksial dilaksanakan dengan tahapan berikut. Contoh batuan diletakkan di tengah-tengah pelat dasar alat uji. Tiga unit dial gauge dipasang untuk mengukur deformasi selama pembebanan, 1 unit untuk mengukur deformasi aksial, dan dua unit lainnya untuk mengukur deformasi lateral sebagaimana ilustrasi pada Gambar-1. Mesin hidrolik dihidupkan untuk menggerakkan piston sehingga menekan pelat ke bawah. Ketika pelat menyentuh bidang kontak contoh, bidang kontak disesuaikan agar rata dengan pelat penekan. Dial gauge diatur pada posisi nol. Ketika jarum hitam pada alat pengukur gaya mulai bergerak meninggalkan titik nol, pembebanan aksial dimulai dan stopwatch dihidupkan. Deformasi aksial dan lateral dicatat saat jarum hitam pada alat pengukur gaya berada tepat di nilai-nilai tertentu. Pada penelitian ini digunakan skala pencatatan setiap 2 kN.

Kuat tekan uniaksial didefinisikan sebagai nilai tekanan pada saat contoh batuan hancur dengan kondisi tekanan pemampatan sama dengan nol. Kuat tekan

uniaksial dinyatakan dengan persamaan (8), dimana σ_c adalah kuat tekan uniaksial contoh batuan dalam, F merupakan gaya yang bekerja saat contoh batuan runtuh, dan A merupakan luas penampang awal contoh batuan yang tegak lurus arah gaya. Luas penampang awal dihitung menggunakan rumus luas lingkaran sebagaimana persamaan (9), dimana D adalah diameter conto, dan π merupakan konstanta 3.14...

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \dots \dots \dots (8)$$

$$A = \frac{1}{4} \pi D^2 \dots \dots \dots (9)$$

HASIL DAN DISKUSI

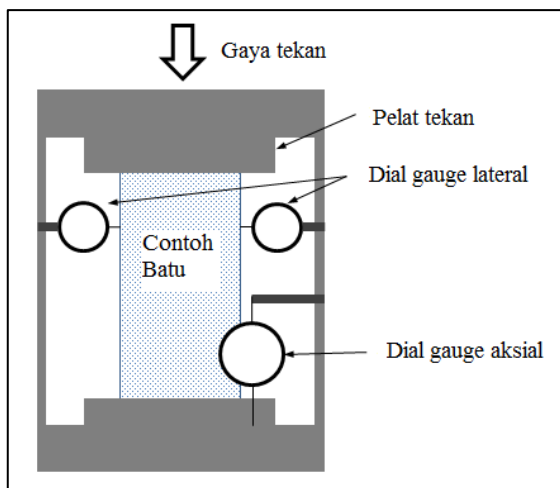
Pengujian sifat fisik dan kuat tekan uniaksial telah dilaksanakan terhadap contoh andesit, batulempung, beton. Dipilih 6 data contoh beton, 6 data contoh andesit, dan 5 data contoh batulempung untuk dianalisis. Data uji kuat tekan uniaksial pada 1 conto batulempung tidak dapat digunakan karena terdapat rekahan alami dalam conto yang menjadi bidang runtuh, sehingga conto pecah sebelum mencapai kekuatan puncaknya.

Gambar-2 menunjukkan bahwa bobot isi andesit paling tinggi dengan rata-rata 2.7 gr/cm³, disusul batulempung 2.41 gr/cm³, dan beton 1.97 gr/cm³ pada kondisi asli. Sebaliknya, porositas beton paling tinggi dengan rata-rata 24.99%, diikuti batulempung 5.63% dan andesit 1.47%. Sehingga dapat dikatakan bahwa bobot isi dipengaruhi oleh besarnya porositas atau komposisi rongga (Gambar-3). Rata-rata porositas dan rata-rata bobot isi memiliki korelasi linier terbalik sebagaimana persamaan (12), persamaan (13), dan persamaan (14), dengan R² 0.9265, 0.9472, dan 0.8993. Semakin besar persentase pori, densitas semakin rendah, terutama pada kondisi kering.

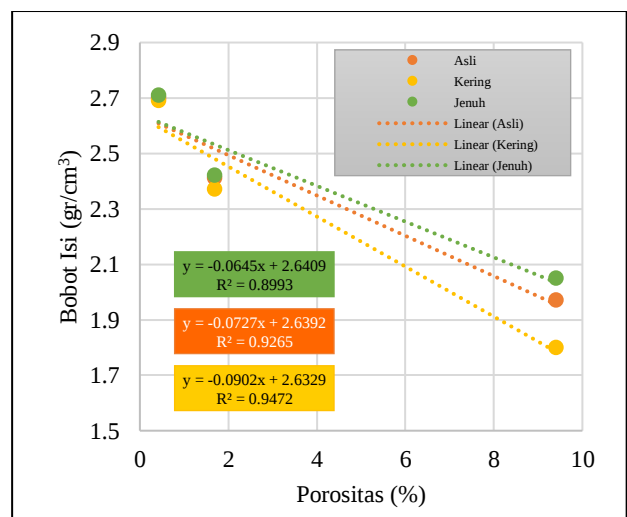
$$\text{Bobot isi asli} = -0.0727(\text{porositas}) + 2.6392 \dots \dots \dots (12)$$

$$\text{Bobot isi kering} = -0.0902(\text{porositas}) + 2.6329 \dots \dots \dots (13)$$

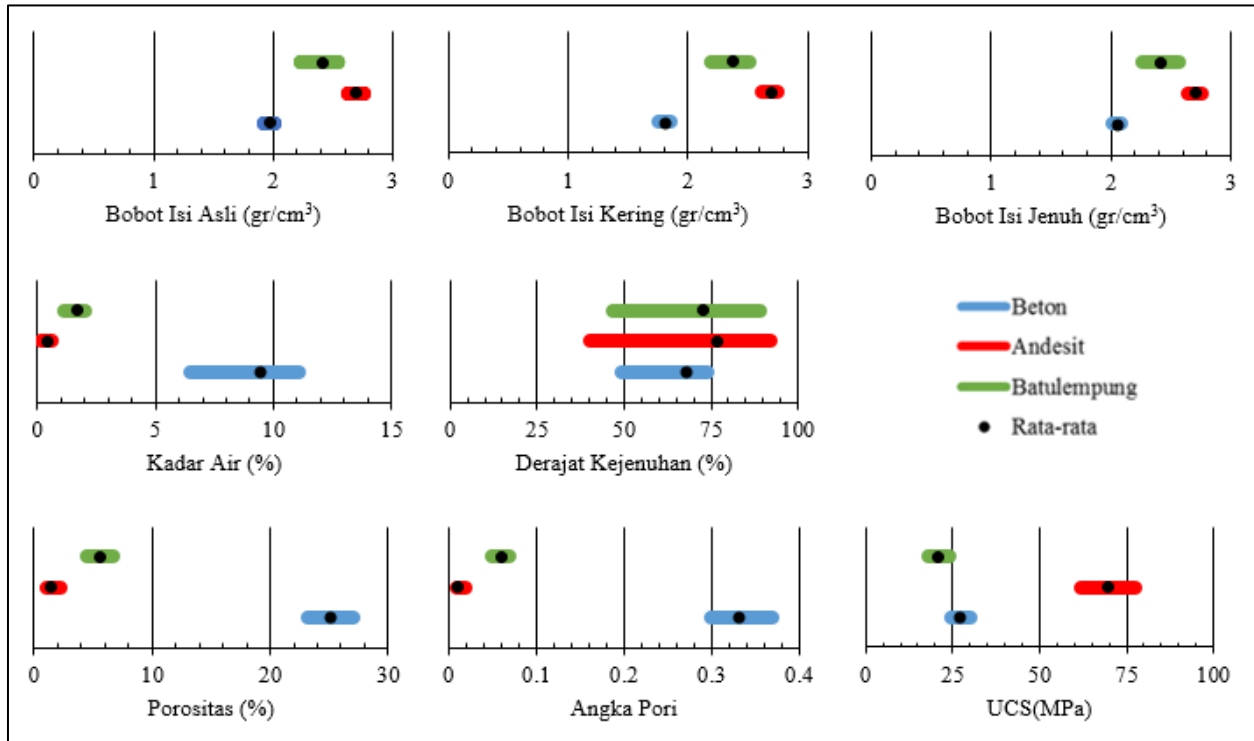
$$\text{Bobot isi jenuh} = -0.0645(\text{porositas}) + 2.6409 \dots \dots \dots (14)$$



Gambar- 1. Penempatan contoh pada uji kuat tekan uniaksial



Gambar-3. Korelasi porositas dengan bobot isi



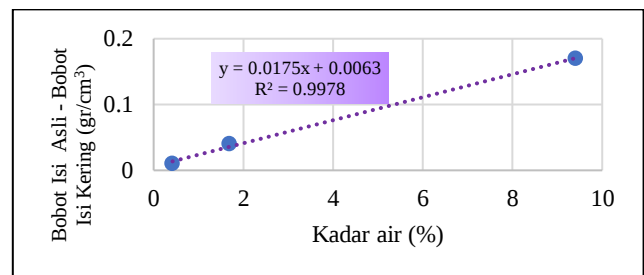
Gambar-2. Perbandingan sifat fisik dan kuat tekan uniaksial andesit, batulempung, dan beton

Porositas sendiri terbentuk dari gabungan butir dengan berbagai ukuran. Andesit memiliki porositas rendah karena antarbutir mineralnya saling mengunci walaupun ukuran tidak seragam. Batulempung memiliki porositas lebih tinggi karena, meskipun ukuran butirnya relatif seragam yaitu kurang dari 256 mm, walaupun batuan sedimen telah mengalami konsolidasi, kerapatan antar butirnya tidak akan sama dengan batuan beku yang terbentuk dari pembekuan magma.

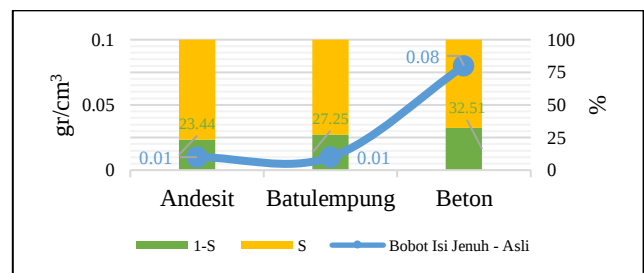
Pori-pori dalam batuan dapat terisi oleh air sebagian, sebagian lainnya yang terisi udara. Kadar air menunjukkan persentase kandungan berat air dalam pori dari berat batuan seluruhnya. Kadar air batulempung rata-rata 1.69%, andesit 0.42%, dan beton 9.41%. Pada kondisi kering, pori-pori seluruhnya berisi udara karena contoh dikeringkan agar bobot isi yang tertimbang hanya fase padatan. Pengurangan air dalam pori akan menurunkan bobot isi asli menjadi bobot isi kering. Bobot isi kering andesit rata-rata 2.69 gr/cm³, turun sangat sedikit 0.01 gr/cm³ dari kondisi asli 2.69 gr/cm³. Batulempung yang kadar airnya lebih tinggi berkisar 1.15-2.02%, bobot isi keringnya turun 0.04 gr/cm³ menjadi 2.37 gr/cm³. Sementara beton yang kadar airnya paling tinggi, berkisar 6.47-11.09%, bobot isi aslinya turun 0.17 gr/cm³ menjadi 1.80 gr/cm³. Jadi, bobot isi kering dipengaruhi oleh porositas, sedangkan penurunannya dari bobot isi asli ditentukan oleh kadar air di dalam contoh. Pada Gambar-4 terlihat bahwa semakin tinggi kadar air, bobot isi kondisi kering semakin jauh dari kondisi aslinya, berkorelasi linier, dan memenuhi persamaan (15), dengan $R^2 = 0.9978$.

Rentang nilai data derajat kejenuhan pada hasil penelitian ini paling jauh dibandingkan data parameter sifat fisik lainnya, terlebih pada andesit dimana derajat kejenuhannya 40-92.31%. Ini berarti pada kondisi asli, sebanyak 76.56% dari pori yang ada dalam contoh terisi oleh air. Pada kondisi jenuh, pori-pori diisi air seluruhnya sehingga bobot isi jenuh bertambah dari kondisi asli. Artinya semakin besar sisa pori yang belum terisi air,

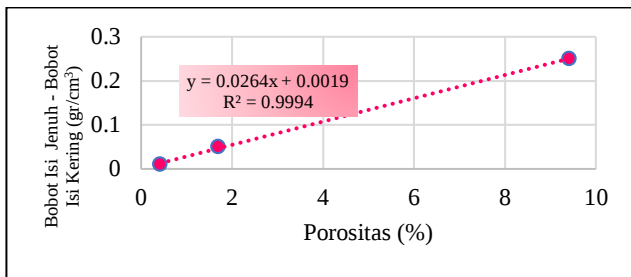
semakin tinggi penambahan bobot isi pada kondisi jenuh dari kondisi aslinya. Namun Gambar-5 tidak sepenuhnya menunjukkan demikian. Bobot isi jenuh andesit rata-rata 2.71 gr/cm³, naik 0.01 gr/cm³ dari kondisi asli 2.70 gr/cm³. Sama halnya dengan batulempung yang derajat kejenuhannya rata-rata 72.75% dengan rentang nilai 46.81-88.89%, bobot isi jenuhnya naik 0.01 gr/cm³ dari 2.41 gr/cm³ menjadi 2.42 gr/cm³. Berbeda dengan beton yang derajat kejenuhannya rata-rata 67.49% dengan rentang 49.4-74.07%, bobot isi jenuhnya naik 0.08 gr/cm³.



Gambar-4. Korelasi kadar air dengan perbedaan bobot isi asli dan bobot isi kering



Gambar-5. 100% dikurang derajat kejenuhan dengan perbedaan bobot isi jenuh dan bobot isi asli



Gambar-6. Korelasi porositas dengan perbedaan bobot isi jenuh dan bobot isi kering

Perlu diperhatikan pula bahwa andesit dan beton mudah menyerap air ketika ditetaskan air di permukaannya, sementara batulempung tidak. Air tetap tertahan di permukaan contoh. Karakteristik tingkat penyerapan air yang berbeda pada tiap contoh mempengaruhi penambahan bobot isi pada kondisi jenuh. Sehingga setelah diterapkan perlakuan penjenjutan yang sama, batulempung dan andesit sama-sama bertambah bobot isinya 0.01 gr/cm³ meskipun batulempung porositasnya rata-rata 5.63% dan andesitnya hanya 1.47%. Terlebih lagi pada beton dengan porositas 24.99%, mengalami peningkatan bobot isi jenuh tertinggi karena mudah menyerap air. Semakin besar porositas dan daya serap, semakin banyak pori yang terisi air saat dijenuhkan.

Gambar-6 menunjukkan bahwa perbedaan bobot isi antara jenuh dan kering juga sangat dipengaruhi oleh porositas dengan R² 0.9994 dan data rata-rata memenuhi persamaan (16), tetapi ada faktor lain yang diperkirakan adalah daya serap contoh terhadap air turut mempengaruhi. Andesit berbeda 0.01 gr/cm³, batulempung hanya berbeda 0.05 gr/cm³, dan beton 0.25 gr/cm³. Pada penelitian ini daya serap contoh terhadap air di permukaan tidak terukur. Kecepatan air terserap dapat diketahui dengan meneteskan volume air yang sama ke permukaan contoh dan mencatat waktu diperlukan hingga air masuk ke pori-pori contoh, sehingga diperoleh daya serap dalam satuan cm³ per satuan waktu (detik, menit, atau jam).

Bobot isi asli – kering = 0.0175(kadar air) + 0.0063.....(15)

Bobot isi jenuh – asli = 0.0264(porositas) + 0.0019.....(16)

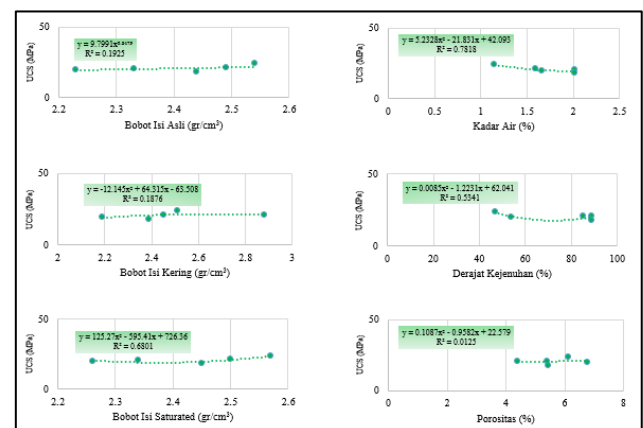
Apabila dibandingkan beton, andesit, dan batulempung, semua parameter sifat fisik tidak menunjukkan korelasi linier dengan kuat tekan uniaksial. Tetapi jika dibandingkan dua batu -andesit dan batulempung- nilai porositas akan mengurangi kekuatan batuan (lihat Gambar-3). Demikian pula ketika semua contoh dianalisis satu per satu hubungan antara parameter sifat fisik dengan kuat tekan uniaksialnya. Pada Gambar-7, Gambar-8, dan Gambar-9, telah dipilih persamaan garis yang paling mendekati data hasil pengujian. Sebagian besar mendekati persamaan polinomial orde 2, kecuali bobot isi asli batulempung dan bobot isi kering yang mendekati persamaan pangkat.

Dari Tabel-1 terlihat bahwa sumbangan pengaruh sifat fisik terhadap kuat tekan uniaksial yang ditunjukan dengan koefisien determinasi R² di atas 0.5 terdapat pada bobot isi jenuh, kadar air, dan derajat kejenuhan batulempung, porositas andesit, dan kadar air beton. Parameter bobot isi asli beton memiliki sumbangan pengaruh tertinggi (R² 0.4848), sedangkan pada batulempung hanya 0.1925 dan sangat kecil pada andesit yaitu 0.0679. Parameter bobot isi kering batulempung memiliki sumbangan pengaruh tertinggi (R² 0.1876), sedangkan pada beton hanya 0.1026 dan sangat kecil pada andesit yaitu 0.0284. Parameter bobot isi jenuh batulempung memiliki sumbangan pengaruh tertinggi (R² 0.6801), sedangkan pada beton hanya 0.2173 dan sangat kecil pada andesit yaitu 0.0318. Parameter kadar air batulempung memiliki sumbangan pengaruh tertinggi (R² 0.7818), sedangkan pada beton 0.6311 dan pada andesit yaitu 0.3956.

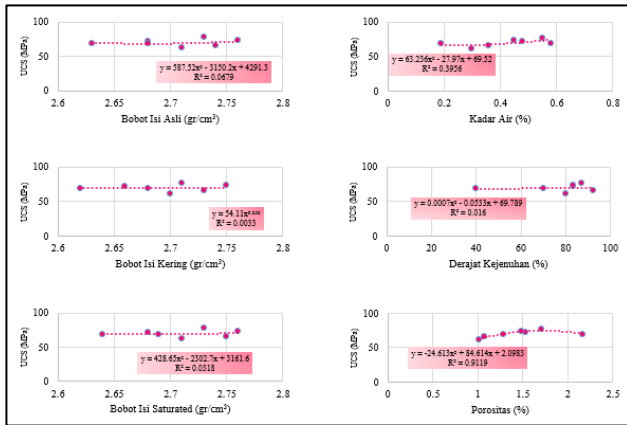
Parameter derajat kejenuhan batulempung memiliki sumbangan pengaruh tertinggi (R² 0.5341), sedangkan pada beton hanya 0.3272 dan sangat kecil pada andesit yaitu 0.016. Parameter porositas andesit memiliki sumbangan pengaruh tertinggi (R² 0.9119), sedangkan pada beton hanya 0.3386 dan sangat kecil pada batulempung yaitu 0.0125. Pada semua contoh terlihat bahwa kadar air berpengaruh terhadap kuat tekan uniaksial, namun koefisien determinasi contoh andesit kurang dari 0.5. Ini berarti kehadiran air pada contoh batulempung dan beton cukup mempengaruhi kekuatannya. Berbeda halnya dengan andesit, kuat tekan uniaksialnya lebih dipengaruhi oleh porositas dibandingkan kadar air.

Tabel-1. Koefisien Determinasi (R²) Pengaruh Sifat Fisik Terhadap Kuat Tekan Uniaksial

Parameter Sifat Fisik	Batulempung	Andesit	Beton
Bobot Isi Asli	0.1925	0.0679	0.4848
Bobot Isi Kering	0.1876	0.0284	0.1026
Bobot Isi Jenuh	0.6801	0.0318	0.2173
Kadar Air	0.7818	0.3956	0.6311
Derajat Kejenuhan	0.5341	0.016	0.3272
Porositas	0.0125	0.9119	0.3386



Gambar-7. Hubungan parameter sifat fisik dan kuat tekan uniaksial batulempung



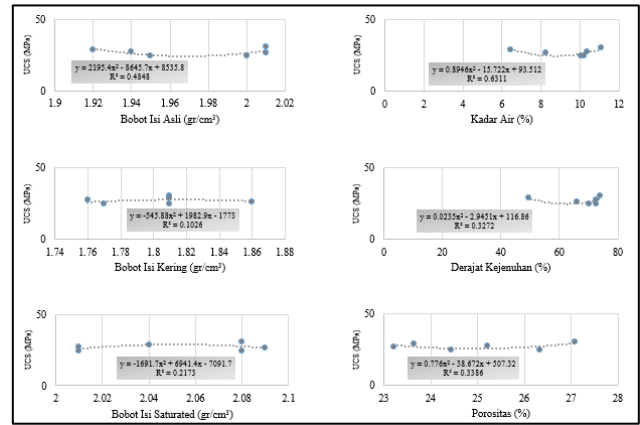
Gambar-8. Hubungan parameter sifat fisik dan kuat tekan uniaksial andesit

Dengan demikian didapatkan kesamaan hubungan antarparameter sifat fisik ketiga bahan yang diuji, kecuali penjenjuran dengan air yang bergantung pada kemampuan serap batu atau beton. Adapun pengaruh sifat fisik terhadap kuat tekan uniaksial bervariasi dan karakteristik hubungan berhasil dijelaskan melalui penelitian yang telah dilakukan. Kuat tekan uniaksial andesit sangat dikontrol oleh porositas, meskipun porositas batuan getas andesit rendah (rata-rata 1.47%). Kuat tekan uniaksial beton dikontrol oleh kadar airnya dengan nilai kadar air 6.47-11.09%. Selain kadar air (1.15-2.02%), kuat uniaksial batuan plastis batulempung juga dikontrol oleh derajat kejenuhannya (46.81-88.89%). Penelitian ini diharapkan dapat memperkaya referensi mengenai karakteristik hubungan sifat fisik dan mekanik batuan getas, batuan plastis, dan beton.

KESIMPULAN

Melalui uji sifat fisik dan kuat tekan uniaksial contoh batulempung, andesit, dan beton, diketahui bahwa :

1. Bobot isi asli, kering, dan jenuh berkorelasi negatif dengan porositas. Semakin tinggi porositas, nilai bobot isi semakin kecil.
2. Kadar air berkorelasi linier positif dengan perbedaan bobot isi asli dan bobot isi kering, berkorelasi linier positif pula dengan perbedaan bobot isi jenuh dan bobot isi kering. Namun perbedaan bobot isi jenuh dan bobot isi asli tidak hanya dipengaruhi oleh derajat kejenuhan dan porositas, melainkan juga oleh daya serap contoh terhadap air yang tidak terukur pada penelitian ini.
3. Parameter sifat fisik yang paling mempengaruhi kuat tekan uniaksial adalah kadar air, terutama pada batulempung dan beton. Tetapi pada andesit, parameter sifat fisik yang paling mempengaruhi adalah porositas.
4. Parameter sifat fisik lainnya memberikan koefisien determinasi kurang dari 0.7. Tetapi pada penelitian ini belum dapat diketahui besaran sumbangan efektif dan sumbangan relatif parameter sifat fisik terhadap kuat tekan uniaksial.



Gambar-9. Hubungan parameter sifat fisik dan kuat tekan uniaksial beton

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rai, M.A., Kramadibrata, S., dan Wattimena, R.K. 2010. *Mekanika Batuan*. Laboratorium Geomekanika dan Peralatan Tambang Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- [2] Zhang, J.J. 2019. Rock Physical and Mechanical Properties. *Applied Petroleum Geomechanics*. Elsevier. Pages 29-80.
- [3] Ribeiro, D. et al. 2016. Influence of Water Content in the UCS of Soil-Cement Mixtures for Different Cement Dosage. *Advances in Transportation Geotechnics 3*. The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics. Procedia Engineering. Vol 143. Pages 59-66.
- [4] Tang, S. 2018. The Effects of Water on the Strength of Black Sandstone in a Brittle Regime. *Engineering Geology*. Vol 239. Pages 167-178.
- [5] MolaAbasi, H. et al. 2019. Prediction of compressive and tensile strengths of zeolite-cemented sand using porosity and composition. *Construction and Building Materials*. Vol 202. Pages 784-795.
- [6] Moreira, E. et al. 2018. Effects of porosity, dry unit weight, cement content and void/cement ratio on unconfined compressive strength of roof tile waste-silty soil mixture. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences.
- [7] Baud, P. et al. 2014. Effects of Porosity and Crack Density on the Compressive Strength of Rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol 67. Pages 202-201.
- [8] Zhang, F. et al. 2018. Effect of degree of saturation on the unconfined compressive strength of natural stiff clays with consideration of air entry value. *Engineering Geology*. Vol 237. Pages 140-148.
- [9] Jahandari, S. et al. 2019. Effects of Saturation Degree, Freezing-Thawing, and Curing on Geotechnical Properties of Lime and Lime-cement

concretes. *Cold Regions Science and Technology*. Vol 160. Pages 242-251.

- [10] Koohmishi, M. 2018. Evaluation of the Effect of Water Saturation on the Strength of Individual Railway Ballast Aggregate. *Transportation Geotechnics*. Vol 18. Pages 163-172.
- [11] Zhang, X.G. et al. 2018. Variation of Mechanical Properties of Bituminous Coal Under CO₂ and H₂O Saturation. *Journal of Natural Gas and Science Engineering*. Vol 61. Pages 158-168.
- [12] Poulsen, B. A. et al. 2014. Strength Reduction on Saturation of Coal and Coal Measures Rocks with Implication for Coal Pillar Strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol 71. Pages 41-52.