

PREDIKSI NILAI KUAT TEKAN UNIAKSIAL BATUAN PENGAPIT BATUBARA MENGGUNAKAN DATA ULTRASONIK DI KABUPATEN MUSI BANYUASIN SUMATERA SELATAN

Prediction of Uniaxial Compression Strength Values of Rocks Flanking Coal Using Ultrasonic Data at Musi Banyuasin Regency - South Sumatera

ZULFAHMI¹, ILDREM SJAFRI², ABDURROKHIM² dan RIDHO K. WATTIMENA³

1. Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara
Jalan Jenderal Sudirman 623 Bandung 40211
Telp. (022) 6030483, Fax. (022) 6003373
e-mail: zulfahmi@tekmira.esdm.go.id
2. Fakultas Teknik Geologi - Universitas Padjadjaran
Jalan Raya Bandung Sumedang KM 21, Jatinangor 45363
3. Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan – Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesha No. 10 Bandung 40132

ABSTRAK

Dukungan data geomekanika sangat dibutuhkan dalam merancang *gasifier*, analisis dan pemodelan pada gasifikasi batubara bawah tanah (*underground coal gasification-UCG*), baik yang berasal dari uji langsung (*in-situ*) maupun uji laboratorium. Salah satu data pengujian laboratorium yang cukup penting untuk mengevaluasi kondisi batuan di lokasi UCG adalah uji kuat tekan uniaksial (*uniaxial compressive strength test-UCS*). Uji ini membutuhkan dimensi percontoh spesifik yang tidak digunakan untuk uji laboratorium lain seperti uji geser langsung, triaksial atau *brazzilian*. Karena itu, untuk optimalisasi pengujian percontoh harus dipilih secara selektif karena untuk mendapatkan percontoh dari pemboran inti sangat sulit, memakan waktu dan sangat mahal. Salah satu cara untuk mengoptimalkan pemanfaatan percontoh adalah dengan melakukan korelasi dengan hasil uji lain yang memiliki *output* yang sama. Pada penelitian ini telah dilakukan korelasi antara uji UCS yang bersifat merusak (*destructive*) dengan uji ultrasonik yang bersifat tidak merusak (*non-destructive*), relatif murah, cepat, mudah dan percontoh dapat digunakan lagi untuk uji yang lain. Sebanyak 89 uji UCS dan ultrasonik telah dilakukan untuk memperoleh tiga korelasi empiris nilai UCS dan ultrasonik yang berasal dari percontoh batuan pengapit batubara (batu lempung, *batu lanau* dan batu pasir). Korelasi ini dapat digunakan untuk memprediksi nilai UCS secara empiris di lokasi telitian yaitu di desa Macang Sakti, Kecamatan Sangadesa, Kabupaten Musi Banyuasin, Propinsi Sumatera Selatan. Korelasi tersebut dihasilkan dari persamaan polinomial orde 2 dan 3. Untuk batu lempung nilai σ_c dapat diperoleh dari $UCS_{cls} = (2 \times 10^{-10})V_p^3 - (5 \times 10^{-6})V_p^2 + 0,0404V_p - 20,986$ dengan nilai $R^2 = 0,9087$. Untuk batu lanau nilai σ_c dapat diperoleh $UCS_{sis} = (3 \times 10^{-6})V_p^2 + 0,0051V_p + 9,8665$ dengan nilai $R^2 = 0,8953$ dan nilai σ_c batu pasir dapat diperoleh dari $UCS_{sas} = -(7 \times 10^{-7})V_p^2 + 0,0467V_p - 41,484$ dengan nilai $R^2 = 0,8864$.

Kata kunci : UCS, ultrasonik, korelasi empiris.

ABSTRACT

Support of geomechanics parameters is needed for gasifier design, analysis, and modeling on underground coal gasification (UCG) both from in-situ and laboratory test. One important of a laboratory test to evaluate of rock condition at UCG location is uniaxial compressive strength test (UCS). This test needs the specific dimension sample and also the sample that does not use for another laboratory test after testing such as for direct shear, triaxial or Brazilian test. To optimize the test, the sample should be chosen selectively. To get the sample by core drilling is very difficult, time-consuming and costly. One way to optimize the use of samples is by using correlation with another test that has the same output. This study has been conducted by the correlation between UCS and ultrasonic tests. UCS test is the destructive test and the ultrasonic test is non-destructive, relatively inexpensive, fast, easy to conduct and the samples can be re-used for another test. A total of 89 ultrasonic and uniaxial compressive strength tests were conducted to establish three empirical correlation of UCS and a sonic velocity from the rocks flanking coal (claystone, sandstone, and siltstone). This correlation can be used to predict the value of UCS empirically on research location at Macang Sakti, District of Musi Banyuasin, South Sumatra Province. The correlations resulted from the polynomial equation of order 2 and 3. To Claystone σ_c value can be obtained from $UCS_{cls} = (2 \times 10^{-10})V_p^3 - (5 \times 10^{-6})V_p^2 + 0,0404V_p - 20,986$ with $R^2 = 0.9087$. To siltstone σ_c value can be obtained $UCS_{sis} = (3 \times 10^{-6})V_p^2 + 0,0051V_p + 9,8665$ with $R^2 = 0.8953$ and σ_c Sandstone value can be obtained from $UCS_{sas} = -(7 \times 10^{-7})V_p^2 + 0,0467V_p - 41,484$ with $R^2 = 0.8864$.

Keywords: UCS, ultrasonic, empirical correlation

PENDAHULUAN

Ketergantungan Indonesia terhadap impor energi semakin tinggi akibat meningkatnya permintaan dan menurunnya produksi minyak bumi dan gas (migas) dalam negeri. Impor minyak Indonesia diperkirakan akan terus tumbuh hingga 4 kali lipat pada kurun waktu 2011-2030 (Sugiyono *dkk.*, 2013). Demikian juga bahan bakar gas, Indonesia telah mengimpor sebagian besar LPG dan akan mulai mengimpor gas alam setelah tahun 2020 (Asian Pacific Economy Cooperation, 2013). Untuk negara-negara dengan cadangan minyak dan gas bumi yang relatif sedikit seperti Indonesia tetapi mempunyai cadangan batubara yang cukup banyak, gasifikasi batubara dapat menjadi alternatif pemecahan permasalahan energi pengganti di masa mendatang. Sekitar 161 miliar ton sumber daya batubara ada di Indonesia dan dengan cadangan sebesar 28,17 miliar ton (Pusat Sumber Daya Geologi, 2012) sangat menjanjikan. Gasifikasi batubara dapat dilakukan di dalam tanah (*Underground Coal Gasification/UCG*). Investasi yang dibutuhkan lebih murah dibandingkan gasifikasi batubara di permukaan. Menurut Bayrack (2015), teknologi UCG memiliki beberapa keunggulan dibandingkan *coalbed methane* (CBM), namun penerapan teknologinya sangat bergantung pada kondisi lingkungan permukaan dan bawah permukaan yang mendukung untuk proses gasifikasi tersebut. Dukungan data geomekanika sangat dibutuhkan dalam merancang

gasifier untuk UCG, baik yang berasal dari uji langsung (insitu) maupun uji laboratorium.

Untuk memperoleh data yang berasal dari uji laboratorium diperlukan percontoh yang berasal dari inti bor. Keterbatasan akan peralatan, waktu dan anggaran menyebabkan percontoh hasil pemboran tidak cukup untuk memperoleh data yang sesuai dengan kebutuhan, sehingga seringkali hasil yang diperoleh kurang optimal. Salah satu pengujian yang cukup penting untuk mengevaluasi kondisi batuan di lokasi UCG adalah uji kuat tekan uniaksial atau *uniaxial compressive strength* (UCS). Uji ini berdasarkan SNI 2825 : 2008, BSN (2008) yang membutuhkan dimensi percontoh yang sesuai dengan standar pengujian, yaitu panjang percontoh minimal dua kali diameter percontoh tersebut. Beberapa peneliti seperti Karaman *dkk.* (2015), Kabilan *dkk.* (2016) dan Yurdakul, *dkk.* (2011), menggunakan dimensi percontoh dengan panjang lebih dari dua kali diameter. Dengan adanya persyaratan tersebut, seringkali dalam melakukan uji UCS, pengujian penting lainnya tidak dapat diuji karena keterbatasan percontoh. Terlebih lagi uji UCS ini bersifat *destructive*, sehingga percontoh yang telah diuji tidak dapat digunakan lagi untuk pengujian yang lain. Salah satu pengujian laboratorium yang bersifat tidak merusak (*non-destructive*) namun menghasilkan parameter yang serupa dengan UCS adalah ultrasonik. Pengujian ini dilakukan dengan menilai kecepatan rambat gelombang. Uji ini lebih dikenal dengan istilah *Ultrasonic*

Pulse Velocity Test, dilakukan dengan standar nasional Indonesia (SNI 03-2485-1991), BSN (1991) menggunakan alat PUNDIT (*portable unit non-destructive digital indicated tester*).

Parameter yang dihasilkan dari pengujian ini adalah nilai modulus elastisitas, modulus bulk, konstanta *lame* dan *poisson ratio*. Dasar pengukuran dilakukan dengan menghitung waktu tempuh gelombang primer dan sekunder yang merambat melalui percontoh batuan. Kelebihan metode ini tidak merusak percontoh (*non-destructive*) sehingga percontoh yang telah diuji dapat digunakan untuk pengujian yang lain.

Beberapa peneliti sebelumnya telah melakukan korelasi terhadap dua pengujian ini antara lain oleh McNally, (1987), Horsrud (2001), Barton (2002), Chang dkk. (2006), Martinez-Martinez dkk. (2006), Ali (2008), Lai dkk. (2014), Briševac dkk. (2015), Rao, dkk. (2016) dan Lai dkk. (2016).

McNally (1987) melakukan uji korelasi terhadap batu pasir yang terkonsolidasi dan tak terkonsolidasi untuk mengetahui nilai UCS berdasarkan waktu tempuh gelombang P (t_p). Horsrud (2001) melakukan uji korelasi untuk memprediksi UCS dari kecepatan waktu tempuh gelombang ultrasonik untuk batuan serpih tersier yang mempunyai porositas tinggi yang berasal dari laut utara (*North Sea Region*). Barton (2002) menjelaskan dalam sistem Q (Q-system) yang dikembangkannya bahwa terdapat korelasi antara UCS dengan kecepatan seismik, dimana nilai $V_p \approx 3,5 + \log Q_c$. Nilai V_p adalah kecepatan rambat gelombang primer dari hasil uji ultrasonik atau uji sesimik (km/det) dan nilai Q_c adalah nilai empiris dari Q (*rock mass quality rating*) yang berasal dari nilai kuat tekan atau UCS (km/det). Martinez-Martinez dkk. (2006) melakukan penelitian terhadap tiga batuan sedimen untuk material bangunan dengan melakukan korelasi antara uji ultrasonik dan UCS menggunakan analisis *multivariate*. Ali (2008) melakukan uji terhadap kekuatan beton. (Briševac dkk. (2015) membuat model untuk mengestimasi nilai UCS dan modulus elastisitas menggunakan beberapa variasi pengujian termasuk uji ultrasonik. Sedangkan Lai dkk. (2016) melakukan penelitian untuk mengetahui hubungan empiris antara nilai UCS dengan nilai ultrasonik berupa nilai waktu tempuh gelombang primer pada batuan granit dan skis.

Uji UCS dan ultrasonik telah dilakukan terhadap tiga jenis batuan pengapit batubara (*carboniferous rock*) yang berada di lokasi telitian di desa Macang sakti, Kecamatan Sangadesa, Kabupaten Musi Banyuasin Propinsi Sumatera Selatan. Tiga jenis batuan tersebut adalah batu lempung, batu lanau dan batu pasir. Pemilihan tiga jenis batuan ini didasari oleh dominannya batuan tersebut sebagai batuan pengapit batubara di lokasi telitian.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui korelasi antara nilai kuat tekan ketiga batuan tersebut dengan nilai yang ditampilkan berdasarkan uji ultrasonik. Manfaatnya adalah untuk mengestimasi secara empiris nilai UCS berdasarkan hasil uji ultrasonik, sehingga penggunaan percontoh untuk uji laboratorium dapat lebih optimal.

LOKASI DAN KONDISI GEOLOGI

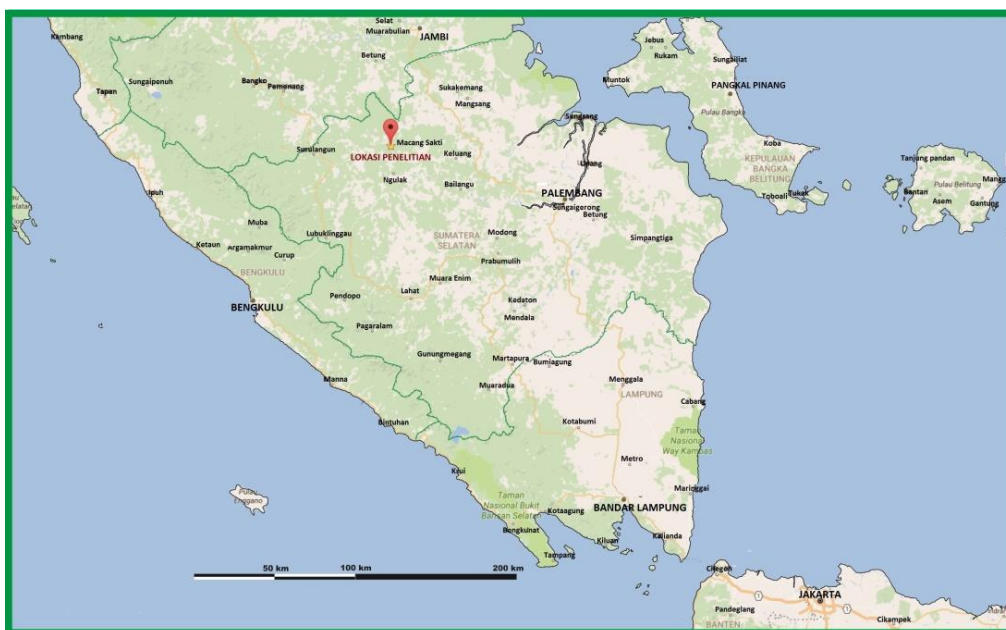
Secara geografis daerah telitian terletak di $2^{\circ} 35' 00,05'' - 2^{\circ} 33' 45,38''$ LS dan $103^{\circ} 22' 10,12'' - 103^{\circ} 22' 55,16''$ BT (Gambar 1) sekitar 200 km dari kota Palembang. Lokasi berada dalam wilayah PKP2B PT. Astaka Dodol. Kegiatan pemboran telah dilakukan sebanyak 15 titik, sebagian diambil inti bornya dan sebagian lagi dilakukan pemboran non inti. Secara litologi percontoh diambil secara acak dari berbagai kedalaman seperti diperlihatkan pada Gambar 2.

Wilayah telitian mencakup tiga Formasi yaitu Formasi Air Benakat, Formasi Muara Enim dan Formasi Kasai (Tabel 1). Formasi Air Benakat; berumur Miosen Tengah sampai awal Miosen Atas. Arah umum jurus pada Formasi ini adalah Barat Laut – Tenggara dengan kemiringan berkisar $20^{\circ} - 40^{\circ}$. Formasi ini secara litologis didominasi oleh batulempung abu-abu gelap kebiruan sampai abu-abu gelap kecoklatan, setempat tufaan, lunak dan getas di bagian bawah; di bagian tengah tersusun oleh batupasir halus-sedang, glaukonit, hijau muda-abu-abu kecoklatan mengandung kuarsa, feldspar dan fragmen batuan lain; di bagian atas tersusun oleh perselingan batu pasir, batu lempung, batu lanau dan serpih dengan sisipan tipis pasir kuarsa. Satuan batuan ini terbentuk pada fasa regresi, bersifat endapan laut dangkal. Di daerah penyelidikan pada Formasi ini tidak dijumpai batubara.

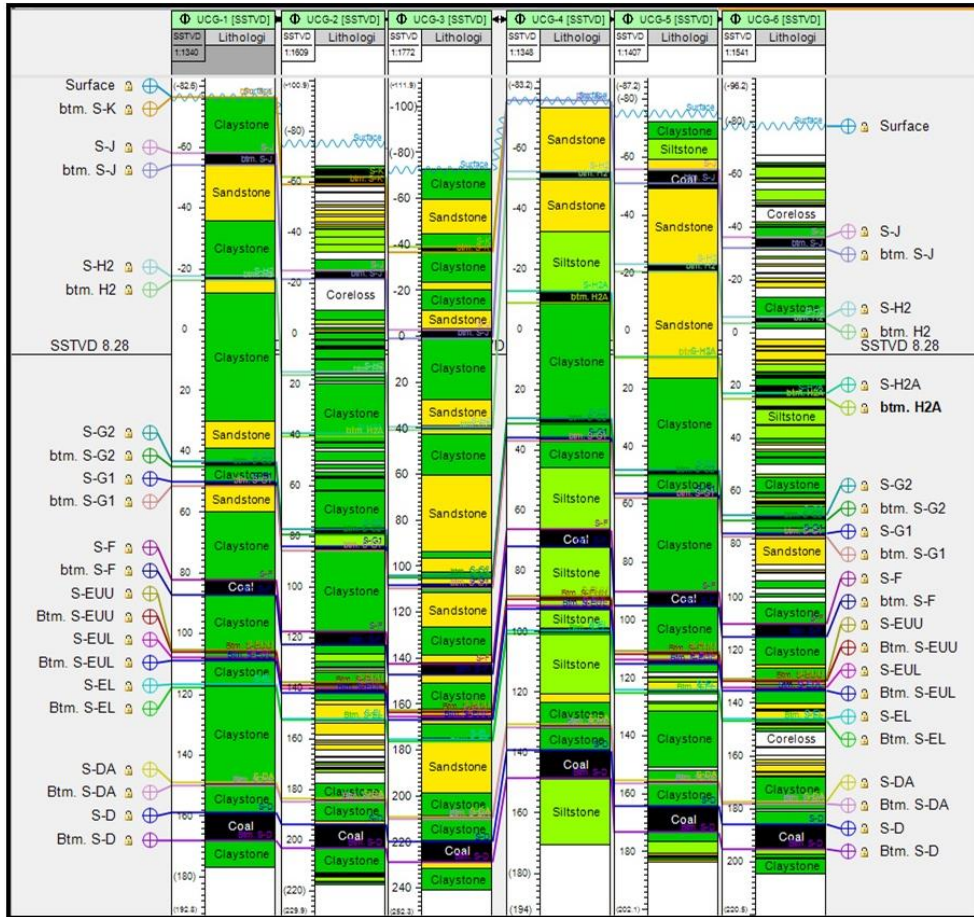
Formasi Muara Enim; Formasi ini pembawa batubara yang diendapkan selaras di atas Formasi Air Benakat dengan tebal 200 – 800 meter, berumur Miosen Atas – Pliosen Bawah. Formasi ini diendapkan sebagai kelanjutan dari fasa regresi. Berdasarkan kelompok kandungan lapisan batubara, formasi ini dapat dibagi menjadi empat anggota yaitu M1, M2, M3 dan M4 (Minjouw, 1978). Anggota M1 merupakan perulangan batu pasir, batu lanau, batu lempung dengan sisipan batu bara. Batu pasir berwarna abu-abu sampai abu-abu kecoklatan, berbutir halus hingga sedang, kompak, terpilah baik, dengan fragmen kuarsa dominan.

Perselingan batu lempung dan batu pasir, berwarna abu-abu, terdapat nodul-nodul gamping, coklat terang, keras. Sedangkan batu lanau berwarna abu-abu, kompak, umumnya berselingan dengan batu lempung. Batu bara dijumpai dua lapisan dengan ketebalan antara 0,5 sampai 1 m. Anggota M2 terdiri atas batu lempung, batu lempung karbonan, batu pasir, batu lanau dan batu bara. Batu lempung umumnya berwarna abu-abu gelap, masif, sering ditemukan struktur sedimen laminasi paralel, jejak tumbuhan serta fragmen batu bara. Batu lempung karbonan, berwarna abu-abu kecoklatan, umumnya agak lunak dan biasanya bertindak sebagai batuan pengapit batubara. Batu pasir berwarna abu-abu terang sampai abu-abu kehijauan, berbutir halus

sampai sedang, membulat sedang, terpilah buruk, mudah terurai, fragmen kuarsa dominan. Batu lanau berwarna abu-abu kehijauan hingga abu-abu kecoklatan, kompak, umumnya ditemukan struktur sedimen laminasi paralel. Batu bara yang ditemukan pada anggota M2 ini berjumlah tiga lapisan dengan tebal antara 0,3 sampai 6,6 m. Anggota M3 terdiri atas batu pasir, batu lanau, batu lempung, dan batu bara. Batu pasir berwarna abu-abu, berbutir halus, terpilah baik, mineral kuarsa dominan. Batu lanau, abu-abu terang kehijauan sampai kecoklatan, kompak, struktur sedimen laminasi paralel, mengandung jejak tumbuhan. Batu lempung berwarna abu-abu kecoklatan, kompak, masif, banyak dijumpai jejak tumbuhan. Batu bara ditemukan dua lapisan tebal 1,0 sampai 8,1 m. Anggota M4 terdiri atas batu pasir, batu lanau, batu lempung, dan batu bara. Batu pasir berwarna abu-abu terang, berbutir halus, terpilah baik, tufaan dan mineral kuarsa banyak dijumpai. Batu lanau, abu-abu terang, kompak, mengandung jejak tumbuhan, struktur tumbuhan, struktur sedimen laminasi paralel. Batu lempung berwarna abu-abu kecoklatan, lunak, kompak, struktur sedimen laminasi, paralel dan jejak tumbuhan banyak ditemukan. Batubara pada anggota M4 ditemukan dua lapisan dengan ketebalan berkisar antara 1,0 sampai 3,7 m.



Gambar 1. Lokasi penelitian



Gambar 2. Kondisi litologi di lokasi pengambilan percontoh

Formasi Kasai; terendapkan di atas Formasi Muara Enim yang berumur Pliosen, tersusun dari batulempung tufaan biru kehijauan dan biru, batupasir tufaan hijau, batupung sedangkan endapan aluvial; terdiri atas kerakal, kerikil, batupasir halus-kasar, lepas-lepas. Secara lokal, kenampakan struktur di wilayah penyelidikan merupakan hasil dari gaya tegasan utama yaitu gaya kompresif berarah Barat Laut – Timur Laut, yang menghasilkan pola struktur lipatan regional antiklinorium dan sinklinorium yang bersumbu Barat Laut – Tenggara. Di beberapa tempat akibat tegasan tersebut mengakibatkan terjadinya pensesaran baik sesar geser maupun sesar normal.

METODOLOGI

Setelah dilakukan preparasi dan mengukur dimensi percontoh, dilakukan uji yang tidak merusak (*non-destructive*) yaitu uji ultrasonik. Selanjutnya dilakukan uji UCS yang merusak

percontoh (*destructive*). Percontoh yang digunakan sebanyak 89 buah, terdiri atas batulempung, batulanau dan batupasir.

Uji kecepatan rambat gelombang ultrasonik dilakukan untuk menentukan cepat rambat gelombang ultrasonik yang merambat melalui contoh batuan. Pada uji ini, waktu tempuh gelombang primer dan sekunder diukur dengan menggunakan *Portable Unit Non-destructive Digital Indicated Tester (PUNDIT)* (Gambar 3.b). Kecepatan rambat gelombang primer menjadi parameter korelasi untuk uji ultrasonik dan diperoleh dari persamaan :

$$V_p = \frac{L_b}{t_b}$$

Keterangan:

- L_b = panjang contoh batuan yang diuji (m)
- t_p = waktu tempuh gelombang primer (detik)
- V_p = kecepatan rambat gelombang primer (meter/detik)

Tabel 1. Stratigrafi regional cekungan Sumatera Selatan

EPOCHS	GROUP	FORMATION	LITHOLOGY	ENVIRONMENT	
Pleistocene	Palembang	KASAI FORMATION (KAF)	Tuffaceous sand, claystone gravel, thin coal	CONTINENTAL	
Pliocene		MUARA ENIM FORMATION (MEF)	Sandstone, claystone, coal	Shallow marine to non marine	
Miocene		Middle	AIR BENAKAT FORMATION (ABF)	Claystone, glauconitic sandstone, limestone	Marine to brakish
		Early	GUMAI FORMATION (GUF)	Claystone, thin glauconitic limestone	Shallow to deep marine
		Oligocene	Late	BATURAJA FORMATION (BAF)	Limestone (platform bank, reefal), claystone sandstone
Early			TALANG AKAR FORMATION (TAF)	siltstone claystone, coal	Delta plain to marine
Eocene		Telisa	LAHAT FORMATION (LAF)	Claystone tuffaceous claystone, siltstone, sandstone, thin coal, Carbonate	Fresh water to brakish
				Sandstone, claystone, conglomerate, granite wash, thin coal, tuff	CONTINENTAL
Paleocene					
Pre-Tertiary		BASEMENT	Metamorphic and igneous rock		

Sumber : De Coster (1974), hasil modifikasi

Cepat rambat gelombang ini dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu: ukuran butir dan bobot isi, porositas dan kandungan air, temperatur dan bidang lemah. Batuan yang memiliki ukuran butir halus, cepat rambat gelombang akan lebih besar daripada batuan yang berukuran kasar, karena batuan berbutir kasar akan memberikan ruang kosong antar butir lebih besar dibandingkan yang berbutir halus. Ruang kosong inilah yang menyebabkan cepat rambat gelombang menurun karena tidak ada media perambatannya. Sebaliknya batuan yang berbutir halus memiliki bobot isi lebih padat dibandingkan dengan batuan yang berbutir kasar, sehingga akan memiliki cepat rambat gelombang yang tinggi.

Porositas dan kandungan air juga mempengaruhi cepat rambat gelombang pada batuan tertentu. Semakin tinggi nilai porositas semakin banyak rongga atau ruang kosong di dalam batuan. Sehingga semakin tinggi porositas maka cepat rambat gelombang akan semakin kecil. Kandungan air dalam batuan yang

cenderung berpori akan merubah kecepatan rambat gelombang di dalam batuan tersebut. Kecepatan rambat gelombang akan bertambah besar bila terjadi peningkatan derajat kejenuhan air pada porositas tertentu. Hal ini terjadi karena kecepatan rambat gelombang di dalam air jauh lebih besar dibandingkan dengan kecepatan rambat gelombang di udara.

Selain itu secara teoritis pengaruh temperatur akan merubah kondisi dan struktur percontoh sehingga kecepatan rambat gelombang ultrasonik juga dipengaruhi. Perubahan temperatur secara tak langsung juga dapat mempengaruhi cepat rambat gelombang yang merambat melalui percontoh batuan, karena dapat merubah sifat fisika dari batuan itu sendiri, terutama munculnya *fisure* atau *fracture* yang mencirikan terbentuknya bidang lemah yang berada di dalam batuan. Kehadiran bidang lemah ini akan menurunkan cepat rambat gelombang.

Uji kuat tekan uniaksial dilakukan dengan alat uji kuat tekan (Gambar 3.a) untuk menentukan

nilai kuat tekan batuan (σ_c) dan kurva tegangan-regangan. Dari kurva tegangan-regangan akan diperoleh nilai Modulus Elastisitas (E), Modulus Geser (G), Modulus Ruah (K), Nisbah Poisson (ν) dan Konstanta *Lame*. Percontohan batuan berbentuk silinder ditekan atau dibebani sampai runtuh. Perbandingan antara tinggi dan diameter (D) percontohan silinder yang umum digunakan adalah 2D - 2,5D. Nilai tegangan pada saat percontohan batuan hancur didefinisikan sebagai kuat tekan uniaksial batuan dan diberikan oleh hubungan:

$$\sigma_c = F/A$$

Keterangan:

σ_c = Kuat tekan uniaksial batuan (MPa)

F = Gaya yang bekerja pada saat contoh batuan hancur (kN)

A = Luas penampang awal contoh batuan yang tegak lurus arah gaya (cm²)

Akumulasi kondisi batuan (sifat fisik dan mekanik) juga akan sama seperti pengujian dengan ultrasonik, yaitu dapat mempengaruhi nilai uji UCS. Kesamaan parameter yang diuji ini menjadi dasar untuk melakukan korelasi empiris antara uji UCS dan Ultrasonik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ada tiga korelasi yang telah dilakukan dalam penelitian ini, yaitu korelasi antara uji UCS

dengan Ultrasonik pada batu lempung, batu lanau dan batu pasir. Pada tulisan ini korelasi yang digunakan adalah antara nilai kuat tekan (σ_c) dengan nilai cepat rambat gelombang primer. Kedua parameter ini dipilih karena langsung diukur pada saat pengujian, sedangkan nilai yang lain seperti nilai Modulus Elastisitas (E), Modulus Geser (G), Modulus Ruah (K), Nisbah Poisson (ν) dan Konstanta *Lame* dapat diperoleh dari perhitungan kurva tegangan regangan (uji UCS) dengan persamaan berikut :

$$G = \rho \cdot V_s^2$$

$$u = \frac{\left\{1 - 2 \left(\frac{v_s}{v_p}\right)^2\right\}}{2 \left\{1 - \left(\frac{v_s}{v_p}\right)^2\right\}}$$

$$E = 2(1 + u)G$$

$$K = \left(\frac{\rho}{3}\right)(3v_p^2 - 4v_s^2)$$

Keterangan :

ρ = massa persatuan volume

V_p = cepat rambat gelombang primer

V_s = cepat rambat gelombang sekunder

Hasil pengujian dan perhitungan untuk nilai UCS dan ultrasonik untuk masing-masing batuan diperlihatkan pada Tabel 2, 3 dan 4.



a. Alat uji kuat tekan (UCS)



b. Alat uji ultrasonik

Gambar 3. Peralatan uji kuat tekan (a) dan ultrasonik (b)

Tabel 2. Hasil pengujian dan perhitungan nilai UCS dan ultasonik pada batu lempung

No	Kode percontoh	Kedalaman (m)	Sifat-sifat Mekanik Batuan						
			Uji UCS			Uji Ultrasonik			
			σ_c (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	μ	Vp (m/det)	Vs (m/det)	E (kg/cm ²)	μ
1	UCG-CS1	21,26 - 21,94	18,48	11296,29	0,30	1942,86	721,56	22859,82	0,42
2	UCG-CS2	26,68 - 27,68	4,17	466,22	0,29	1021,92	490,91	9818,94	0,35
3	UCG-CS3	43,85 - 44,35	116,56	14365,25	0,27	7719,23	3800,69	854786,93	0,34
4	UCG-CS4	43,85 - 44,35	217,98	26704,90	0,12	13367,65	4030,50	1090131,28	0,45
5	UCG-CS5	85,77 - 86,77	132,49	16857,46	0,22	9007,69	5489,06	1474804,26	0,20
6	UCG-CS6	94,00 - 94,60	53,05	4816,15	0,46	1536,08	738,35	20968,80	0,35
7	UCG-CS7	138,80 - 138,90	53,12	5432,22	0,37	1773,49	854,93	40701,06	0,35
8	UCG-CS8	144,59 - 144,92	94,69	5246,60	0,31	7888,64	2916,81	305265,04	0,42
9	UCG-CS9	219,15 - 219,70	69,32	6655,38	0,42	4083,43	1860,94	203521,65	0,37
10	GT - 8J	111,00 - 111,60	52,67	5579,20	0,33	2305,17	828,72	39743,44	0,43
11	GT - 8K	115,36 - 115,98	29,24	2260,83	0,29	1487,80	701,15	27145,64	0,36
12	GT - 8L	123,28 - 123,82	26,64	2095,39	0,27	1910,94	694,89	29231,40	0,42
13	GT - 8M	138,47 - 138,94	43,06	3867,87	0,28	1980,30	848,70	44531,12	0,39
14	GT - 8N	144,00 - 144,65	51,67	4560,17	0,30	1999,48	778,92	35639,33	0,41
15	GT - 8U	243,52 - 244,00	12,59	658,89	0,27	1457,45	666,13	25381,24	0,37
16	GT - 8W	249,00 - 249,47	12,19	839,16	0,28	1386,43	431,33	12014,16	0,45
17	GT - 8Y	258,53 - 258,94	5,59	406,83	0,29	1303,06	552,02	17230,02	0,39
18	GT - 8AB	268,00 - 268,40	36,74	4204,07	0,27	1547,24	655,00	25196,66	0,39
19	GT - 8AD	277,20 - 277,60	49,86	4776,94	0,33	2223,53	883,18	50418,37	0,41
20	GT - 9A	24,15 - 24,65	6,98	1082,95	0,26	1509,02	510,69	15139,94	0,44
21	GT - 9E	62,85 - 62,90	3,39	236,03	0,24	1100,00	524,64	15095,94	0,35
22	GT - 9I	91,28 - 91,71	49,05	5237,06	0,30	1266,53	747,86	29990,32	0,23
23	GT - 9L	104,15 - 104,82	25,77	2889,73	0,30	977,36	411,66	10025,63	0,39
24	GT - 9P	144,59 - 144,92	58,79	6824,11	0,33	2098,91	828,57	40111,16	0,41
25	GT - 9R	150,15 - 150,75	41,61	6995,52	0,30	1387,22	615,00	21562,93	0,38
26	GT - 9AB	214,49 - 215,15	43,01	4303,18	0,29	1948,85	670,77	27206,32	0,43
27	GT - 9AD	219,15 - 219,70	50,42	5647,62	0,31	2051,72	908,40	50335,06	0,38

Tabel 3. Hasil pengujian dan perhitungan nilai UCS dan ultasonik pada batu napal

No	Kode Percontoh	Kedalaman (m)	Sifat-sifat Mekanik Batuan						
			Uji UCS			Uji Ultrasonik			
			σ_c (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	μ	Vp (m/det)	Vs (m/det)	E (kg/cm ²)	μ
1	UCG-NS1	18,40 - 18,90	276,45	54250,84	0,11	7920,16	4689,97	1107627,93	0,23
2	UCG-NS2	19,48 - 19,95	9,10	342,29	0,30	948,00	402,57	8384,37	0,39
3	UCG-NS3	19,48 - 19,95	35,48	5784,32	0,29	4196,70	1480,23	157611,45	0,43
4	UCG-NS4	20,40 - 20,90	31,10	2454,05	0,23	2324,05	1147,50	79592,81	0,34
5	UCG-NS5	20,40 - 20,90	41,06	8513,22	0,28	2062,29	1037,07	64837,11	0,33
6	UCG-NS6	30,40 - 30,90	51,97	7137,98	0,29	4546,55	1801,69	171611,02	0,40
7	UCG-NS7	40,20 - 40,70	219,50	17809,98	0,22	7518,75	2506,25	421576,65	0,44
8	UCG-NS8	46,90 - 47,40	151,58	97760,86	0,23	3285,85	1393,20	134696,57	0,39
9	UCG-NS9	50,90 - 51,40	297,88	87908,29	0,27	8722,22	2855,02	550494,05	0,44
10	UCG-NS0	70,40 - 70,90	262,98	27183,45	0,34	6926,83	3563,82	730288,49	0,32
11	GT - 8C	19,48 - 19,95	9,38	999,29	0,30	1123,15	525,11	15840,77	0,36
12	GT - 8D-1	21,26 - 21,94	7,60	331,01	0,28	861,85	351,85	6766,28	0,40
13	GT - 8AG	69,00 - 69,57	13,69	1046,01	0,27	1135,09	459,95	11723,01	0,40
14	GT - 8H	102,24 - 104,67	15,66	3074,68	0,29	1827,42	674,40	26426,16	0,42
15	GT - 8O	197,00 - 197,65	63,07	4925,44	0,30	1628,57	770,27	34458,82	0,36
16	GT - 8Q	216,35 - 216,92	16,30	1295,43	0,30	1062,73	389,67	8819,17	0,42
17	GT - 8T	240,03 - 241,00	9,82	338,77	0,28	1014,97	376,67	8505,95	0,42
18	GT - 9C	37,25 - 37,75	17,73	1149,00	0,29	1548,39	709,80	27096,24	0,37
19	GT - 9H	90,15 - 90,23	57,53	5759,84	0,32	1366,15	754,14	31879,83	0,28
20	GT - 9K	96,40 - 97,00	24,37	2209,62	0,30	1327,87	458,92	11955,10	0,43
21	GT - 9U	158,79 - 159,15	10,17	3963,55	0,28	2119,78	652,17	29242,23	0,45
22	GT - 9W-1	164,15 - 164,65	13,91	799,82	0,28	1123,15	510,20	14314,50	0,37
23	GT - 9Y	173,15 - 173,55	22,99	3533,20	0,30	1389,71	720,00	29555,85	0,32
24	GT - 9L	104,15 - 104,82	25,77	2889,73	0,30	977,36	411,66	10025,63	0,39
25	GT - 9AB	214,49 - 215,15	43,01	4303,18	0,29	1948,85	670,77	27206,32	0,43

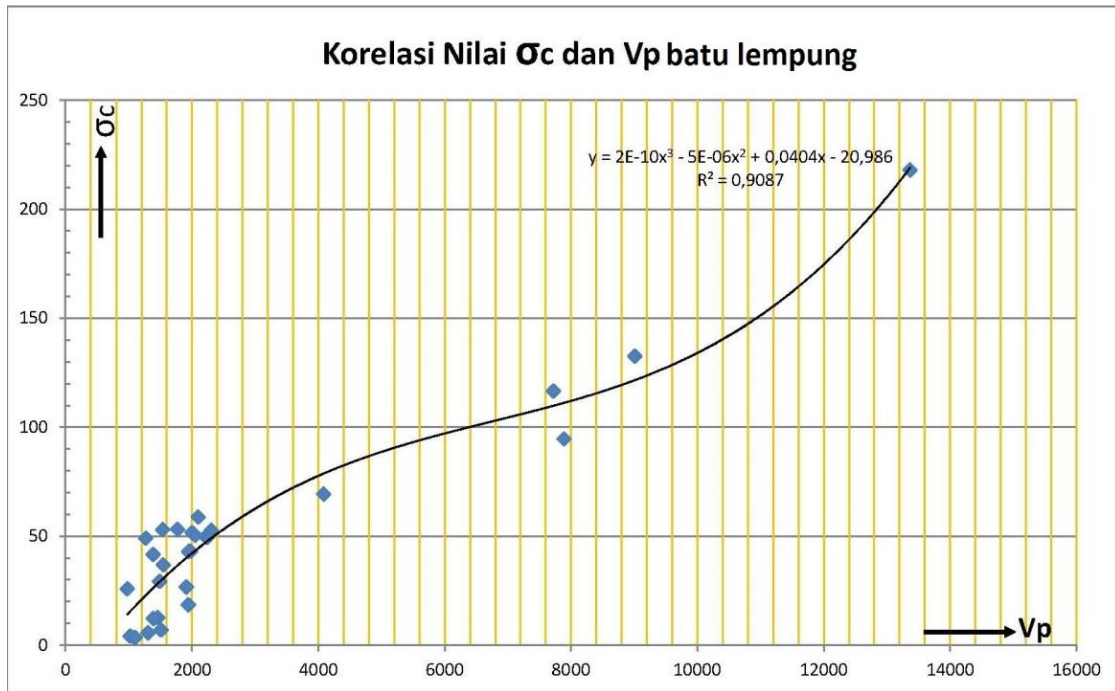
Tabel 4. Hasil Pengujian dan Perhitungan nilai UCS dan Ultrasonik pada batu pasir

No	Kode percontoh	kedalaman (m)	Sifat-sifat Mekanik Batuan						
			Uji UCS			Uji Ultrasonik			
			σ_c (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	μ	Vp (m/det)	Vs (m/det)	E (kg/cm ²)	μ
1	UCG-PS1	40,15 - 40,70	11,41	2900,71	0,21	1325,27	514,54	12645,00	0,41
2	UCG-PS2	68,90 - 69,40	271,33	20849,83	0,13	7120,00	2780,84	490225,50	0,41
3	UCG-PS3	68,90 - 69,40	21,22	618,36	0,09	1647,59	611,90	17534,74	0,42
4	UCG-PS4	68,90 - 69,40	20,51	697,91	0,16	1595,65	837,32	29518,68	0,31
5	UCG-PS5	94,40 - 94,80	28,20	1005,70	0,19	2272,13	1307,55	62618,94	0,25
6	UCG-PS6	112,60 - 133,60	7,07	1775,07	0,37	3606,19	1507,76	124077,57	0,39
7	UCG-PS7	197,00 - 197,40	22,28	813,89	0,24	1684,21	883,79	28158,97	0,31
8	UCG-PS8	218,40 - 218,87	16,46	1776,55	0,50	2145,35	1030,73	60051,56	0,35
9	UCG-PS9	218,40 - 218,87	219,75	24774,39	0,38	4331,71	1909,68	228828,00	0,38
10	GT - 8A	9,40 - 10,00	86,43	7409,01	0,27	1686,79	777,39	30689,84	0,37
11	GT - 8B	14,26 - 14,85	11,63	1767,11	0,29	1540,21	776,10	28566,11	0,33
12	GT - 8KF	93,00 - 93,58	66,93	8538,57	0,33	2379,63	1095,17	69713,09	0,37
13	GT - 8I	108,32 - 108,79	14,63	1116,01	0,28	1239,08	453,48	11346,87	0,42
14	GT - 8R	218,40 - 218,87	17,58	981,84	0,32	1186,54	411,33	10215,63	0,43
15	GT - 8S	228,38 - 228,80	14,74	803,98	0,26	1011,63	377,17	8183,83	0,42
16	GT - 8YZ	260,00 - 260,53	52,00	6471,22	0,33	1801,40	973,45	55854,95	0,29
17	GT - 8AA	264,38 - 264,78	9,88	762,92	0,26	1280,60	472,73	13408,04	0,42
18	GT - 8AE	335,00 - 335,49	35,43	6098,08	0,32	1533,78	790,02	34530,68	0,32
19	GT - 8AF	345,00 - 345,49	87,08	7860,43	0,27	1821,43	1022,73	59236,28	0,27
20	GT - 9B1	33,25 - 33,85	4,90	341,26	0,25	926,35	378,18	6951,95	0,40
21	GT - 9D1	40,15 - 40,70	9,67	479,94	0,26	1033,00	508,61	13338,79	0,34
22	GT - 9F	67,15 - 67,57	13,79	1502,84	0,29	1615,38	598,10	20224,06	0,42
23	GT - 9G	71,15 - 71,45	9,94	695,12	0,27	1419,32	600,48	19881,37	0,39
24	GT - 9J1	94,40 - 94,80	13,95	942,64	0,27	1264,55	556,33	16973,39	0,38
25	GT - 9M	110,15 - 110,71	13,09	737,21	0,29	1244,90	352,60	7257,96	0,46
26	GT - 9N	112,60 - 113,60	7,64	302,23	0,28	759,74	485,71	8104,28	0,33
27	GT - 9O1	115,15 - 115,58	448,04	36130,61	0,34	51130,93	25175,13	41206813	0,34
28	GT - 9Q	147,15 - 147,74	6,89	3051,42	0,24	1428,57	666,67	25052,53	0,36
29	GT - 9S	155,15 - 155,58	8,49	769,14	0,26	1425,57	781,25	32442,01	0,29
30	GT - 9V	163,23 - 163,68	12,92	764,44	0,24	1033,90	362,02	7793,36	0,43
31	GT - 9X	171,75 - 172,15	26,01	2191,96	0,27	1783,41	579,34	19629,48	0,44
32	GT - 9Z	177,15 - 177,57	26,44	2863,53	0,28	1508,24	497,28	16054,44	0,44
33	GT - 9AC	216,15 - 216,70	49,80	6060,24	0,30	2038,26	965,93	55994,68	0,36
34	GT - 9AE	279,30 - 279,78	55,04	5549,86	0,31	1727,03	868,21	42315,04	0,33
35	GT - 9AF	287,69 - 288,15	77,81	10943,24	0,33	1549,14	764,68	34098,74	0,34
36	GT - 9L	104,15 - 104,82	25,77	2889,73	0,3	977,36	411,66	10025,63	0,39
37	GT - 9AB	214,49 - 215,15	43,01	4303,18	0,29	1948,85	670,77	27206,32	0,43

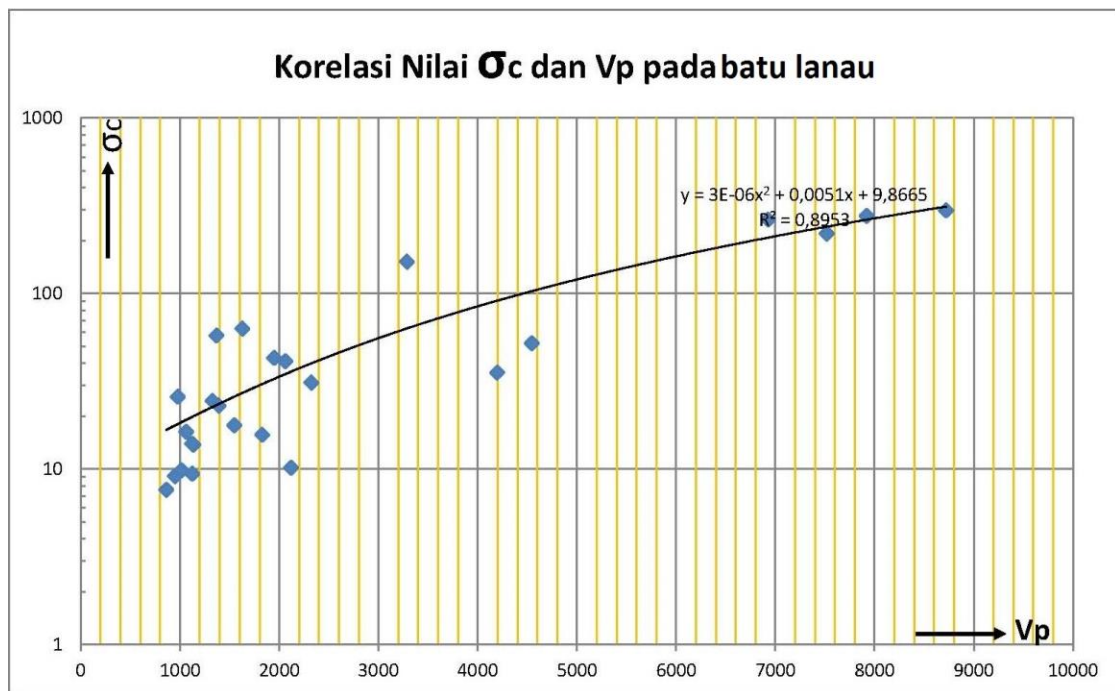
Dengan melakukan korelasi antara nilai σ_c hasil uji UCS dan V_p hasil uji ultrasonik diperoleh nilai persamaan polinomial seperti ditunjukkan pada Gambar 3, 4 dan 5.

Dengan melihat nilai *coefficient of determination* (R^2) yang cukup tinggi dari hasil korelasi antara uji UCS dan ultrasonik dari

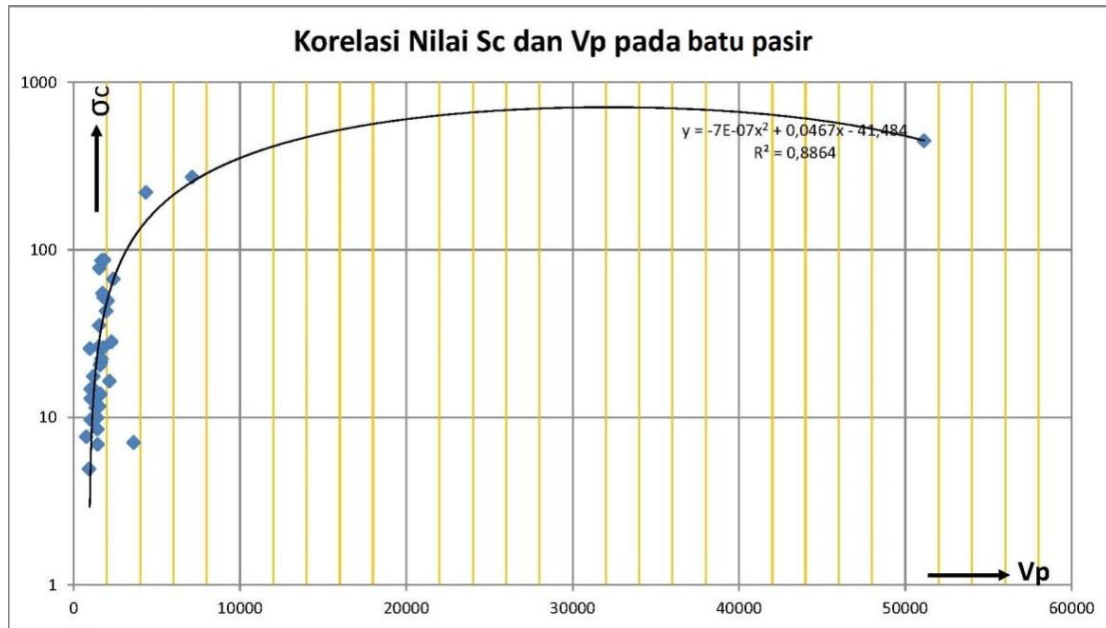
ketiga batu lempung, batu lanau dan batu pasir yaitu di atas 85%, maka secara empiris nilai kedua uji ini cukup meyakinkan untuk dijadikan data awal atau data empiris untuk menentukan salah satu nilai dari kedua pengujian ini. Artinya apabila telah dilakukan uji ultrasonik, maka secara empiris dapat ditentukan nilai UCS dari batuan tersebut.



Gambar 3. Korelasi nilai σ_c (uji UCS) dan nilai kecepatan rambat gelombang P (uji ultrasonik) pada batu lempung



Gambar 4. Korelasi nilai σ_c (uji UCS) dan nilai kecepatan rambat gelombang P (uji ultrasonik) pada batu lanau



Gambar 5. Korelasi nilai σ_c (uji UCS) dan nilai kecepatan rambat gelombang P (uji ultrasonik) pada batu pasir

KESIMPULAN DAN SARAN

Telah diperoleh tiga korelasi empiris untuk tiga jenis batuan pengapit batubara di lokasi telitian di desa Macang Sakti, Kecamatan Sangadesa, Kabupaten Musi Banyuasin, Propinsi Sumatera Selatan yaitu batu lempung, batu lanau dan batu pasir. Korelasi ini dapat digunakan untuk memprediksi nilai UCS dari hasil uji ultrasonik. Pengujian dengan ultrasonik sangat mudah, tidak merusak percontoh batuan dan dapat digunakan untuk pengujian lain, sehingga penggunaan percontoh dapat lebih optimal. Korelasi empiris untuk ketiga batuan tersebut diperoleh dari persamaan polinomial ordo 2 dan ordo 3, yaitu untuk Claystone nilai σ_c dapat diperoleh dari $UCS_{cls} = (2 \times 10^{-10})V_p^3 - (5 \times 10^{-6})V_p^2 + 0,0404V_p - 20,986$ dengan nilai $R^2 = 0,9087$. Untuk Siltstone nilai σ_c dapat diperoleh $UCS_{sis} = (3 \times 10^{-6})V_p^2 + 0,0051V_p + 9,8665$ dengan nilai $R^2 = 0,8953$ dan nilai σ_c Sandstone dapat diperoleh dari $UCS_{sas} = -(7 \times 10^{-7})V_p^2 + 0,0467V_p - 41,484$ dengan nilai $R^2 = 0,8864$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kegiatan penelitian ini dibiayai oleh anggaran kegiatan penelitian Puslitbang

Teknologi Mineral dan Batubara (*tekMIRA*) yang berada di lokasi PT. Astaka Dodol. Terima kasih disampaikan kepada manajemen *tekMIRA* dan PT. Astaka Dodol yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk melakukan penelitian ini. Terimakasih juga disampaikan kepada tim aplikasi teknologi UCG baik yang melaksanakan kegiatan lapangan maupun kegiatan administratif, sehingga terkumpul data yang tak ternilai harganya ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, B. A. H. (2008) Assessment of concrete compressive strength by ultrasonic non-destructive test. University of Baghdad.
- Asian Pacific Economy Cooperation (2013) APEC energy demand and outlook 5th edition.
- Badan Standardisasi Nasional (1991) SNI 03-2485-1991: Benda uji batu, metode pengujian laboratorium cepat rambat ultrasonik dan konstanta elastis.
- Badan Standardisasi Nasional (2008) SNI 2825:2008: Cara uji kuat tekan batu uniaksial. Indonesia.
- Barton, N. (2002) "Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel

- design," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(2), hal. 185–216. doi: 10.1016/S1365-1609(02)00011-4.
- Briševac, Z., Hrženjak, P. dan Buljan, R. (2015) "Models for estimating uniaxial compressive strength and elastic modulus," *GRAĐEVINAR*, 68(1), hal. 19–28. doi: 10.14256/JCE.1431.2015.
- Chang, C., Zoback, M. dan Khaksar, A. (2006) "Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 51(3–4), hal. 223–237. doi: 10.1016/j.petrol.2006.01.003.
- De Coster, G. L. (1974) "The geology of central and South Sumetra basin," in *Proceedings Indonesian Petroleum Association. 3rd Annual Convention*. Jakarta: Indonesian Petroleum Association, hal. 77–110.
- Horsrud, P. (2001) "Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations," *Society of petroleum engineers, SPE 56017*(June), hal. 68–73. doi: 10.2118/56017-PA.
- Kabilan, N., Muttharam, M., Siva, A. dan Philips, N. (2016) "Prediction of uniaxial compressive strength using point load index for jointed rocks," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 13(3), hal. 1–7.
- Karaman, K., Cihangir, F., Ercikdi, B., Kesimal, A. dan Demirel, S. (2015) "Utilization of the Brazilian test for estimating the uniaxial compressive strength and shear strength parameters," *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115(3), hal. 185–192.
- Lai, G. T., Rafek, A. G., Serasa, A. S., Hussin, A. dan Lee, K. E. (2016) "Use of ultrasonic velocity travel time to estimate uniaxial compressive strength of granite and schist in Malaysia," *Use of Ultrasonic Velocity Travel Time to Estimate Uniaxial Compressive Strength of Granite and Schist in Malaysia*, 45(2), hal. 185–193.
- Lai, G. T., Rafek, A. G., Serasa, A. S., Simon, N. dan Lee, K. E. (2014) "Empirical correlation of uniaxial compressive strength and primary wave velocity of Malaysian granites," *19(Bund. E)*, hal. 1064–1072.
- Martinez-Martinez, J., Benavente, D., Cura, M. a G. D. E. L. dan Canaveras, J. . (2006) *Application of ultrasonics to brecciated dolostones for assessing their mechanical properties*, IAEG. 243.
- McNally, G. H. (1987) "Estimation of coal measures rock strength using sonic and neutron logs," *Geoexploration*, 24(4–5), hal. 381–395. doi: 10.1016/0016-7142(87)90008-1.
- Minjouw, S. N. V. (1978) *Explanatory notes to the geological map of the South Sumatran coal Province*.
- Pusat Sumber Daya Geologi (2012) *Neraca energi fosil tahun 2011*. Bandung.
- Rao, S. K., Sravana, P. dan Rao, T. C. (2016) "Relationship between ultrasonic pulse velocity and compressive strength for roller compacted concrete containing GGBS," *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(3), hal. 2077–2084.
- Sugiyono, A., Permana, A. D., Boedoyo, M. S. dan Adiarso (2013) *Outlook energi Indonesia 2013*. Diedit oleh A. Sugiyono, A. D. Permana, M. S. Boedoyo, dan Adiarso. Jakarta: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi.
- Yurdakul, M., Ceylan, H. dan Akdas, H. (2011) "A predictive model for uniaxial compressive strength of carbonate rocks from Schmidt hardness," *American Rock Mechanics Association*, 11–533, hal. American Rock Mechanics Association (ARMA).