

# Pemecahan Gelombang-S Akustik Sebagai Indikasi Orientasi Umum Rekahan pada Reservoir Gas Metana Batubara

Oleh: **Bambang Widarsono**

Peneliti Madya pada Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi "LEMIGAS"

Jl. Ciledug Raya Kav. 109, Cipulir, Kebayoran Lama, Jakarta Selatan 12230, Indonesia

Tromol Pos : 6022/KBYB-Jakarta 12120, Telepon : 62-21-7394422, Faksimile : 62-21-7246150

Teregistrasi I Tanggal 01 Desember 2010; Diterima setelah perbaikan tanggal 13 Desember 2010

Disetujui terbit tanggal: 31 Desember 2010

## S A R I

Rekahan muka (*face cleat*) pada batubara memainkan peran yang sangat penting dalam produksi gas metana batubara (GMB). Informasi atas orientasi dari rekahan-rekahan tersebut memiliki arti yang sangat penting dalam penempatan sumur produksi dan perekahan hidrolik dalam rangka pemaksimalan produksi GMB. Pemecahan gelombang-S akustik (PGSA) diketahui sebagai fenomena yang terjadi pada saat gelombang-S menemui seperangkat rekahan dalam bentuk terpecahnya gelombang tersebut menjadi dua gelombang-S yang berpropagasi dengan kecepatan yang berbeda. Penjajagan atas perangkat uji akustik laboratorium yang digunakan dalam studi ini ternyata memungkinkan untuk diamatinya fenomena ini. Dengan menggunakan tiga percontoh batubara yang diambil dari sebuah sumur produksi berhasil ditentukan orientasi dari rekahan-rekahan muka pada interior dari percontoh-percontoh tersebut. Hasil-hasil lain yang diperoleh dari studi ini adalah kesimpulan berupa bukti nyata terjadinya fenomena PGSA pada batubara, kurang baiknya signal gelombang-S pada batubara sehingga membutuhkan kecermatan dalam analisis, dan bergunanya metode ini untuk batubara yang memiliki rekahan halus dan tidak terdeteksi secara visual. Kelebihan yang dimiliki metode ini dapat melengkapi metode-metode yang sudah ada bagi pendeskripsian reservoir GMB.

**Kata kunci:** gas metan batubara, rekahan muka (*face cleat*) batubara, orientasi, pemecahan gelombang-S akustik, uji laboratorium, optimasi produksi

## ABSTRACT

*Face cleats in coal play a very important role in coal bed methane (CBM) production. Information over the cleats' orientation is regarded as very useful for supporting effective well emplacement and success of the well's subsequent hydraulic fracturing implementation. Shear wave (S-wave) splitting is known as a phenomenon occurs when a single S-wave is split into two S-waves travelling at different velocities when it encounters a set of oriented cracks. Investigation over a set of laboratory acoustic equipment has proved that this S-wave splitting phenomenon indeed occurs and it can be used to determine crack orientation of a tested sample. Tests over three deep coal samples taken from a vertical production well have clearly resulted in orientation of the face cleats in the samples' interior. Other results from the study are proof of the occurrence of S-wave splitting in coal, low quality S-wave signals due to energy attenuation that requires careful observation and analysis, and evidence of the usefulness of this technique for coals having very fine and virtually invisible cracks. The advantages shown by this technique make it useful as a supporting source of information to the existing/traditional coal bed methane reservoir description tools.*

**Keywords:** coal bed methane, face cleats, orientation, acoustic S-wave splitting, laboratory test, production optimization

## I. PENDAHULUAN

Sebagaimana telah diketahui proses eksploitasi gas metana batubara (GMB) – *coal bed methane* (CBM) – bekerja di bawah mekanisme yang berbeda dengan proses eksploitasi reservoir gas konvensional. Seperti yang dirangkum dalam Widarsono (2010), paling sedikit ada empat mekanisme yang mempengaruhi mekanisme penyimpanan dan pengaliran GMB yaitu struktur fisik, mekanisme adsorpsi/desorpsi, mekanisme alir difusi di dalam padatan batubara, dan mekanisme aliran – baik satu-fase maupun dua-fase – di dalam rekahan batubara (*cleat*). Berkaitan dengan mekanisme aliran, berbagai sumber seperti Saghafi (2001) dan Karimi (2005), mengemukakan bahwa batubara pada umumnya memiliki porositas sampai tingkat tertentu tetapi hanya memiliki permeabilitas matriks yang sangat rendah. Untuk mengalirkan GMB ke sumur produksi – setelah terbebaskan dari matriks melalui proses desorpsi – diperlukan permeabilitas sekunder yaitu rekahan batubara.

Rekahan batubara terbentuk sebagai hasil dehidrasi dan penekanan tektonik yang mengiringi proses maturasi dari batubara. Peran yang dimainkan oleh permeabilitas rekahan batubara ini dalam mengalirkan GMB menuju sumur sangat besar mempertinggi peluang sukses dalam produksi. Seperti dinyatakan oleh Stewart dan Barro (1982), penempatan sumur yang tepat akan memaksimalkan kemungkinan untuk menghubungkan sebanyak mungkin rekahan yang ada, sehingga informasi mengenai orientasi umum dan jumlah dari rekahan-rekahan tersebut menjadi sangat penting.

Ada beberapa cara yang secara potensial dapat dipakai untuk mendeskripsi reservoir GMB berkenaan dengan informasi tersebut di atas. Salah satunya adalah dengan menggunakan data dari survei pencitraan sumur (*wellbore imaging*) yang menghasilkan tinjauan visual langsung atas kondisi rekahan pada dinding sumur. Teknik ini akan sangat berguna sekali jika rekahan-rekahan yang tertembus oleh sumur berukuran cukup besar sehingga dapat terlihat secara visual. Keadaan yang berlainan akan menimbulkan masalah jika rekahan-rekahan yang ada berukuran halus, bahkan hingga selebar hanya beberapa puluh mikron saja, seperti sering diamati pada jenis-jenis batubara tertentu. Dalam keadaan ini rekahan-rekahan tersebut akan sulit dibedakan secara visual dari matriks maseral batubara. Untuk

mengatasi hal ini maka tulisan ini menyajikan suatu teknik alternatif yaitu ‘pemecahan gelombang-S akustik’ (PGSA) yang semula dirintis oleh Yale dan Sprunt (1989) dan dikembangkan lebih lanjut oleh Widarsono (1996).

Teknik PGSA pada mulanya adalah suatu fitur khusus dari analisis gelombang seismik (baik buatan maupun alami) untuk mengamati orientasi dari patahan dan rekahan-rekahan besar yang ada di bawah permukaan. Selanjutnya fenomena ini diterapkan pada skala laboratorium untuk mengamati rekahan-rekahan halus pada skala percontoh batuan. Sebuah studi telah dilakukan untuk penerapannya pada batubara yang kemudian hasilnya disajikan dalam tulisan ini. Teknik alternatif ini diharapkan dapat memberikan solusi untuk batubara yang memiliki rekahan halus pada khususnya dan pengayaan dalam mendukung teknik-teknik deskripsi lain secara umum.

## II. PEMECAHAN GELOMBANG-S

Konsep pemecahan gelombang-S (gelombang sekunder) akustik (*acoustic S-wave splitting*) sebagai teknik deskripsi batuan formasi pada mulanya banyak berhubungan dengan bidang keilmuan seismologi gempa bumi. Indikasi awal atas pemecahan gelombang-S – fenomena di mana gelombang-S tersebut terpecah menjadi dua gelombang-S yang menjalar dengan kecepatan berbeda – diperoleh oleh Crampin dkk., (1980) dengan menggunakan survei seismik tiga-komponen (*three-component seismic survey*) pada saat terjadinya beberapa gempa bumi lokal. Penemuan ini membuka area baru di seismologi meskipun potensinya telah dikemukakan oleh beberapa peneliti jauh sebelumnya (mis.: Raitt dkk., 1969).

Pada awalnya tidak diketahui apa yang menyebabkan terjadinya fenomena di atas, tetapi Crampin dan Booth (1985) belakangan mengamati kemiripan antara pola gelombang-S dari suatu survei serupa dengan seismogram sintetik yang dihitung dengan asumsi adanya rekahan-rekahan vertikal. Dari kemiripan tersebut kemudian mereka berkesimpulan bahwa penyebab utama dari fenomena pemecahan gelombang-S di kerak bumi adalah kehadiran rekahan-rekahan akibat proses tektonik. Secara eksperimental, kesimpulan ini diperkuat oleh King dan Xu (1989) yang mengamati fenomena serupa pada uji propagasi gelombang-S ultrasonik pada percontoh batuan yang diketahui memiliki rekahan-rekahan halus.

### A. Gelombang-S

Jika sebuah ketukan acak mengenai sebuah media padat tak terbatas maka akan timbul kombinasi dari dua jenis deformasi yang diwujudkan dalam bentuk dua jenis gelombang tubuh (*body waves*), gelombang primer (gelombang-P) dan gelombang sekunder atau *shear* (gelombang-S). Jika pada gelombang-P deformasi terjadi searah dengan propagasi gelombang tersebut, maka pada gelombang-S deformasi terjadi tegak lurus terhadap arah propagasi sehingga secara fisik gelombang-S bergerak dengan cara menyobek (*shearing motion*) yang cenderung memperlambat laju propagasi gelombang tersebut. Kecepatan propagasi gelombang-S selalu lebih rendah dibanding kecepatan propagasi gelombang-P.

Secara matematis, untuk gelombang-S murni dan sederhana, jika propagasi dianggap sebagai bergerak pada arah- $x$  dan deformasi terjadi pada arah- $y$  dan - $z$  maka sebuah partikel pada media yang mengalami penjalaraan gelombang-S tersebut akan bergerak mengikuti

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial t^2} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} \quad \text{dan} \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial t^2} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} \quad (1)$$

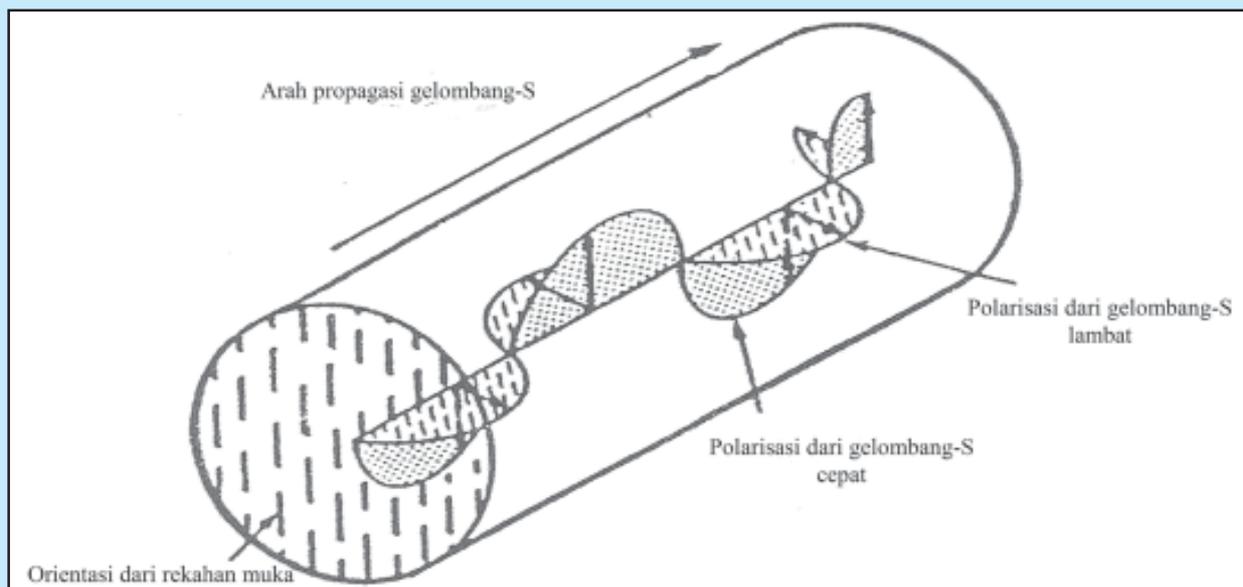
dengan  $\varepsilon$ ,  $t$ ,  $\eta$ , dan  $\rho$  masing-masing adalah deformasi, waktu, modulus *shear*/kekakuan medium,

dan rapat massa medium. Lihat Fjaer dkk. (1992) misalnya untuk pembahasan lebih mendalam.

### B. Pemecahan gelombang-S

Disebabkan pergerakannya yang bersifat menyobek, gelombang-S akan terpolarisasi menjadi dua gelombang yang masing-masing deformasinya tegak lurus satu sama lain jika menemui sebuah sumber anisotropi (mis.: rekahan). Pada sebuah medium anisotropik di mana modulus kekakuan ( $\eta$ ) pada arah- $y$  dan arah- $z$  berbeda maka kecepatan penjalaraan dari kedua gelombang-S tersebut menjadi berbeda (Persamaan 1). Fenomena ini dikenal sebagai *S-wave splitting* atau pemecahan gelombang-S. Besar kecilnya pemecahan atau *split* antara kedua gelombang direpresentasikan oleh perbedaan waktu transit (*transit time*,  $\Delta t_s$ ) di antara kedua gelombang.

Untuk sebuah medium yang memiliki sumber anisotropi berupa satu set rekahan yang sama dalam orientasi maka gelombang-S akan terpecah menjadi dua gelombang yang terpolarisasi secara ortogonal, satu dengan deformasi terpolarisasi paralel dengan bidang rekahan dan yang satunya – berkecepatan penjalaraan lebih rendah – dengan polarisasi tegak lurus terhadap bidang rekahan (Gambar 1). Berbagai teori berusaha menjelaskan mengenai variasi kecepatan gelombang-S ( $V_s$ ) akibat hadirnya rekahan pada sebuah medium. Salah satunya adalah dari Garbin



Gambar 1  
Dua gelombang-S hasil pemecahan dalam suatu medium yang memiliki rekahan-rekahan berorientasi (dari Yale and Sprunt, 1989)

dan Knopoff (1975), dengan mengasumsikan rekahan-rekahan berbentuk koin pada matriks isotropik, yang mengusulkan sebuah hubungan

$$V_s^2 = \frac{V_{so}^2}{1 + 16\zeta \left[ \frac{C^2 \cos^2 \psi}{7} + \frac{(1-2C^2)^2}{7} \sin^2 \psi + \left[ \frac{(C^2 - C^4)}{4} \sin^2 \psi \right] \right]} \quad (2)$$

dengan  $V_{so}$  adalah kecepatan gelombang-S pada medium matriks tanpa rekahan,  $\zeta = Na^2/v$  adalah kerapatan rekahan (jumlah N rekahan dengan radius a dalam volume v),  $C = \cos \theta$  ( $\theta$  adalah sudut dari arah propagasi gelombang-S terhadap arah tegak lurus bidang rekahan), dan  $\psi$  adalah sudut polarisasi dari gelombang-S terhadap tegak lurus arah propagasi.

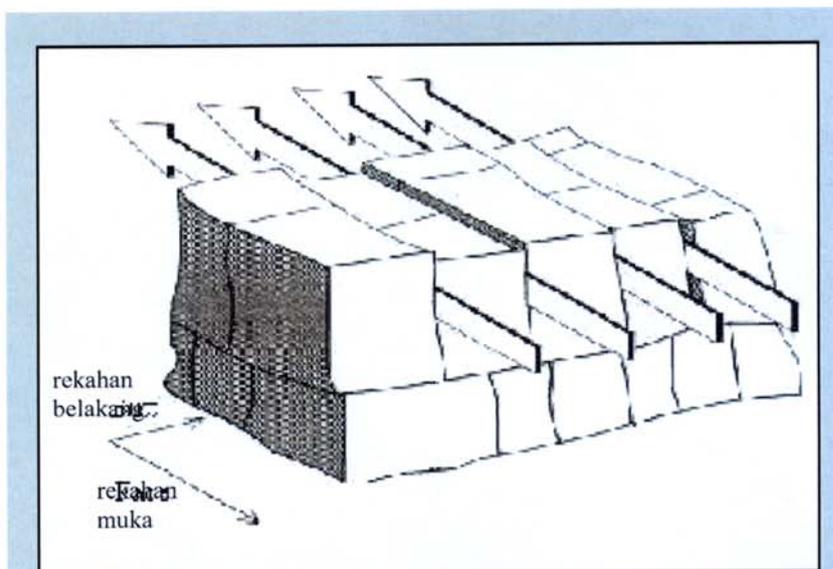
Persamaan 2 memperlihatkan bahwa kecepatan gelombang-S yang terpolarisasi pada arah manapun ( $\theta$  konstan; jika menjalar pada sumbu percontoh pada Gambar 1,  $\theta=90^\circ$ ) akan bervariasi secara menerus bersamaan dengan variasi pada  $\psi$ . Kecepatan gelombang-S akan mencapai maksimum ( $=V_{so}$ ) untuk arah polarisasi paralel terhadap bidang rekahan ( $\psi=0^\circ$ ) dan mencapai minimum ketika gelombang-S terpolarisasi pada arah tegak lurus terhadap bidang rekahan ( $\psi=90^\circ$ ). Kedua gelombang-S yang terpecah karena hadirnya rekahan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1 akan menjalar dengan kedua kecepatan tersebut. Satu catatan penting yang juga harus diambil dari Persamaan 2 adalah dengan bertambahnya jumlah rekahan (N) maka perbedaan kecepatan antara kedua gelombang-S menjadi semakin besar.

### C. Sumber pemecahan gelombang-S pada batubara

Batubara selalu dalam keadaan berekah-rekah meskipun ukuran dan intensitas rekahannya berbeda-beda sesuai antara lain dengan intensitas

tektonik, umur, maturitas, dan kedalaman penimbunan (*burrial*). Secara umum dikenal dua jenis rekahan di batubara, rekahan muka (*face cleat*) dan rekahan belakang (*butt cleat*). Di luar kedua jenis rekahan utama ini ada juga rekahan tersier (*tertiary cleat*, seperti yang dikemukakan oleh Karimi, 2005) yang pada dasarnya berupa rekahan-rekahan mikro yang bersifat random dalam orientasinya. Rekahan muka umumnya bersifat menerus dan berperan sebagai saluran utama bagi aliran di dalam batubara. Rekahan belakang umumnya berukuran lebih kecil, sempit, dan pendek, serta biasanya berorientasi tegak lurus terhadap rekahan muka (Koenig, 1989, 1991). Gambar 2 menggambarkan sistem rekahan batubara.

Disebabkan oleh ukuran dan tingkat kemenerusannya maka aliran-aliran yang terjadi di dalam batubara akan berlangsung dengan lebih cepat di rekahan muka dibanding di rekahan belakang, sehingga aliran GMB menuju sumur umumnya bersifat eliptikal (Koenig, 1989, 1991). Dengan peranan pentingnya itu, maka seperti yang dikemukakan sebelumnya, adalah menjadi suatu keharusan untuk dapat memperoleh informasi mengenai orientasi umum dari rekahan muka. Berkenaan dengan fenomena pemecahan gelombang-



**Gambar 2**  
Penggambaran sistem ideal rekahan batubara beserta orientasinya. Rekahan muka (*face cleats*) merupakan saluran utama pada batubara karena bukaannya cukup lebar sementara rekahan belakang (*butt cleats*) berorientasi tegak lurus terhadap orientasi rekahan muka. Tanda panah putih menunjukkan arah aliran utama didalam batubara, yaitu melalui rekahan muka (sumber : <http://outburst.uow.edu.au>)

S maka rekahan-rekahan muka inilah yang akan menjadi sumber utama dari anisotropi di batubara. Rekahan belakang juga sebenarnya berpotensi sebagai sumber anisotropi tetapi karena ukuran dan intensitasnya yang kurang dibanding dengan rekahan muka maka pengaruhnya terhadap fenomena pemecahan gelombang-S relatif kecil. Dengan kata lain, rekahan-rekahan ini akan lebih bertindak sebagai ‘latar belakang’ bagi rekahan-rekahan muka.

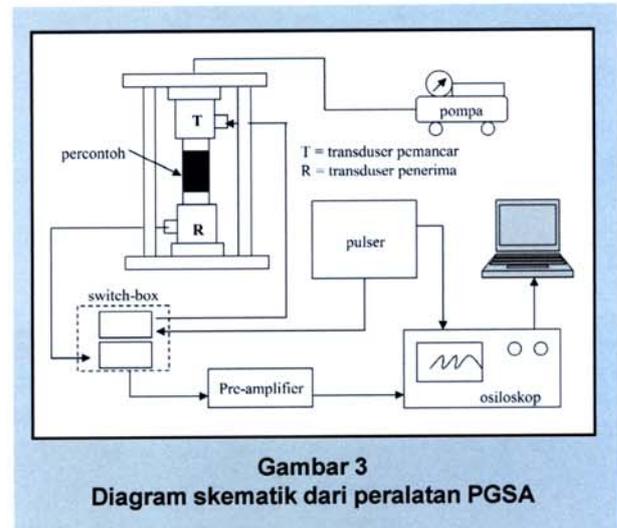
### III. INVESTIGASI LABORATORIUM

#### A. Metode

Pengukuran laboratorium PGSA dilakukan dengan memutar percontoh silinder batuan sementara gelombang-S yang sudah terpolarisasi dari awal dipropagasikan searah dengan sumbu percontoh (Yale & Sprunt, 1989). Gelombang-S terpolarisasi dihasilkan dan dipancarkan oleh sebuah transduser pemancar (*transmitting transducer*) dengan polarisasi deformasi tertentu. Kemudian, signal yang telah melalui percontoh diterima oleh sebuah transduser penerima (*receiving transducer*). Gambar 3 memperlihatkan diagram skematik dari peralatan PGSA.

Pada peralatan PGSA yang dipakai dalam Widarsono (1996), proses paling awal adalah pembangkitan signal voltase listrik oleh ‘pulser’ dengan frekuensi tertentu. Signal listrik ini kemudian dialirkan ke *switch-box* yang berfungsi sebagai distributor signal menuju transduser gelombang-P atau gelombang-S di transduser pemancar. Di dalam transduser pemancar signal voltase listrik dari *switch-box* diubah menjadi gelombang mekanis (akustik) oleh seperangkat material piezoelektrik keramik dan kemudian dikirim ke percontoh silinder (diameter 2 inci). Setelah melalui percontoh gelombang-S (atau gelombang-P) ini kemudian diubah oleh material piezoelektri keramik serupa di dalam transduser penerima menjadi signal listrik kembali. Signal listrik ini kemudian dikirim ke *pre-amplifier* untuk diperkuat signalnya – seringkali signal akustik yang diterima transduser penerima telah mengalami atenuasi intensif – dan kemudian dikirim ke osiloskop. Di osiloskop signal gelombang diamati dan waktu transit gelombang-S ditentukan sehingga kecepatan gelombang-S kemudian dapat dihitung dan diolah lebih lanjut di komputer.

Pada saat percontoh diputar, kecepatan



Gambar 3  
Diagram skematik dari peralatan PGSA

gelombang-S yang diamati pada transduser penerima akan menunjukkan variasi kecepatan bersamaan dengan perubahan polarisasi gelombang-S relatif terhadap polarisasi dari transduser pemancar. Pada saat arah dari polarisasi transduser pemancar paralel terhadap orientasi rekahan ( $\psi = 0^\circ$  di Persamaan 2) maka kecepatan gelombang-S mencapai maksimum (modulus *shear*,  $\mu$ , maksimum), dan pada saat arah dari polarisasi transduser pemancar tegak lurus terhadap orientasi rekahan ( $\psi = 90^\circ$  di Persamaan 2) maka kecepatan gelombang-S berada pada minimum.

Metode analisisnya adalah mengamati signal gelombang-S yang diterima oleh transduser penerima, dengan pengertian bahwa gelombang-S dengan waktu transit ( $Dt_s$ ) terlama (kecepatan  $V_s$  terendah) adalah merupakan indikasi dari orientasi rekahan-rekahan muka. Hal ini terjadi karena polarisasi transduser pemancar – yang kemudian menjadi polarisasi gelombang-S yang dipancarkan – berada pada posisi tegak lurus terhadap bidang rekahan muka. Sebaliknya, waktu transit tersingkat (kecepatan  $V_s$  tertinggi) terjadi pada arah tegak lurus terhadap orientasi rekahan-rekahan awal.

#### B. Percontoh batubara

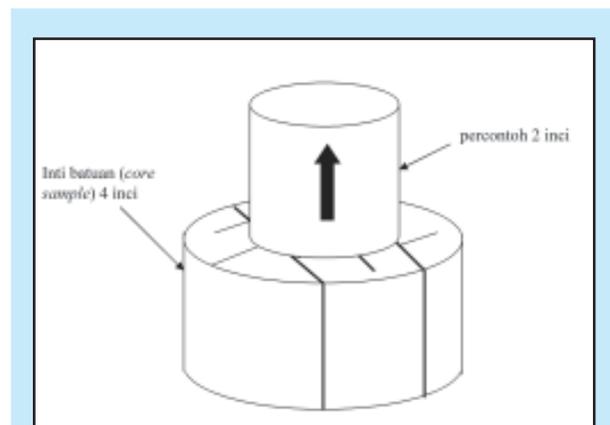
Pada Widarsono (1996), seperangkat pengukuran laboratorium dengan menggunakan PGSA dilakukan dengan memakai tiga (3) percontoh batubara yang diperoleh dari sebuah sumur migas. Pada studi itu, pengukuran dan eksperimen tersebut sebenarnya dimaksudkan untuk mengestimasi stres bawah permukaan. Tetapi berbeda dengan pengukuran

serupa yang berhasil atas beberapa percontoh batupasir dan batu lanau, pengukuran atas percontoh-percontoh batubara gagal untuk mencapai hasil yang diharapkan. Kegagalan tersebut terutama disebabkan oleh adanya rekahan-rekahan muka yang menutupi hadirnya *stress-relief cracks* atau rekahan-rekahan halus yang timbul akibat terjadinya relaksasi stres bawah permukaan pada saat percontoh tersebut diangkat dari bawah permukaan. Hal ini menyebabkan rekahan-rekahan halus tersebut tidak dapat dideteksi dengan menggunakan metode PGSA. Meskipun demikian, seperti yang kemudian menjadi nyata bahwa data tersebut ternyata masih tetap berguna sehubungan dengan peninjauan metode PGSA untuk menentukan orientasi rekahan-rekahan muka yang dilakukan dalam studi ini.

Tiga spesimen batubara bitumen tersebut diperoleh dari kedalaman berbeda (2555–2573 m bpl) pada sebuah sumur produksi yang berlokasi di bagian selatan Laut Utara pada sektor Inggris. Inti batuan (*core samples*) berjenis *oriented* yaitu inti batuan yang memiliki penandaan untuk mengetahui arah mata angin, dengan arah Utara sebagai acuan. Percontoh diambil dari inti batuan (*core sample*) pada arah vertikal (Gambar 4). Percontoh batubara berwarna hitam, padat tapi relatif rapuh, dan kurang menunjukkan hadirnya sistem rekahan. Pada keadaan percontoh seperti inilah teknik PGSA ini diterapkan.

### C. Pengujian

Pada setiap pengujian PGSA ( $0^\circ$  diambil pada arah sumbu- $x$ ) percontoh silinder ditaruh di antara kedua transduser dengan aplikasi tekanan aksial sebesar 2,5 MPa agar diperoleh kopling akustik yang baik antara transduser dan percontoh. Dengan sumbu- $x$  diambil sebagai arah propagasi maka sumbu- $y$  diambil sebagai arah dari polarisasinya. Rotasi diambil setiap  $15^\circ$ , dari  $0^\circ$  sampai dengan  $180^\circ$ , relatif terhadap sumbu- $x$ . Pada setiap langkah rotasi, waktu transit (*transit time*,  $\Delta t_s$ ) dari signal akustik diambil dari pengamatan di osiloskop. Kecepatan gelombang-S ( $V_s$ ) kemudian dihitung dengan menggunakan data waktu transit tersebut dan dimensi dari percontoh. Contoh hasil pengamatan atas variasi waktu transit terhadap sudut rotasi percontoh diperlihatkan oleh Gambar 5.



**Gambar 4**  
Pengambilan percontoh dari inti batuan (*core samples*). Sumur dimana inti batuan batubara diambil adalah sumur vertikal sehingga percontoh-percontoh yang diambil mewakili arah vertikal dari formasi batubara

## IV. ANALISIS DATA

### A. Kualitas signal

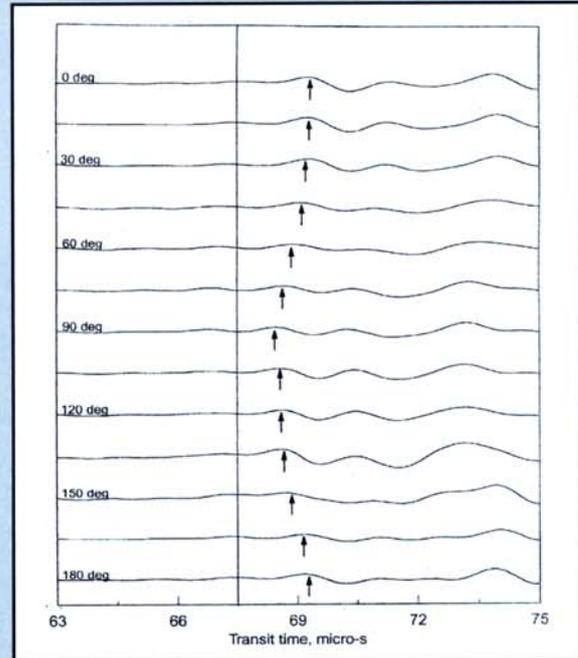
Dari Gambar 5, secara umum terlihat terjadinya atenuasi signal yang cukup kuat terlihat dari lemahnya amplitudo signal yang dimonitor pada osiloskop. Hal ini menyebabkan timbulnya kesulitan untuk menentukan *first break* – atau saat kedatangan paling awal dari signal pada transduser penerima – sehingga puncak dari amplitudo gelombang yang pertama (*first peak*) kemudian dipakai sebagai acuan. Hal ini memang berdampak bahwa waktu transit dan kecepatan gelombang-S yang diperoleh bukanlah harga yang sebenarnya karena harga yang sebenarnya haruslah ditentukan pada titik kedatangan awal signal (*first break*). Pada aplikasi-aplikasi yang membutuhkan akurasi data kecepatan gelombang, misalnya bagi penentuan properti elastik batuan, hal ini tentu menjadi masalah karena kecepatan gelombang yang salah akan menghasilkan properti elastik yang salah juga tetapi untuk penerapan konsep PGSA hal ini tidak menjadi masalah. Dalam penerapan konsep PGSA bagi penentuan arah rekahan batubara yang diperlukan hanyalah variasi dari kecepatan gelombang dan bukan harga absolutnya, sehingga dengan demikian penerapan konsep ini atas batubara seharusnya tidak akan menjadi masalah, kecuali dalam kasus-kasus khusus di mana atenuasi gelombang yang terjadi sangat parah.

Atenuasi signal akustik dapat disebabkan oleh berbagai hal. Sebagai contoh, Johnston dkk. (1979) mengemukakan bahwa friksi antara butiran pembentuk batuan (pada batuan klastik) dan antara dinding-dinding rekahan dapat meredam energi akustik yang melewatinya. Faktor lain yang dapat menjadi penyebab adalah ketidakelastikan batuan. Berkowitz (1994) menyatakan bahwa sifat ketidakelastikan (sifat plastis atau viskoelastik) suatu medium cenderung menghasilkan deformasi yang permanen jika terkena stres sehingga peredaman energi juga terjadi. Ia juga berpendapat bahwa meskipun batubara pada ukuran besar umumnya bersifat getas (*brittle*) tetapi pada ukuran kecil (di bawah 50  $\mu\text{m}$ ) batubara dapat bersifat plastis, dan kemungkinan besar pada ukuran inilah amplitudo gelombang-S dengan frekuensi ultrasonik ( $\pm 1$  GHz) bekerja. Kedua faktor di atas dapat menjadi penghambat dalam aplikasi PGSA atas batubara sehingga diperlukan kecermatan dalam menentukan *first break* atau titik acuan lainnya dalam signal gelombang-S batubara.

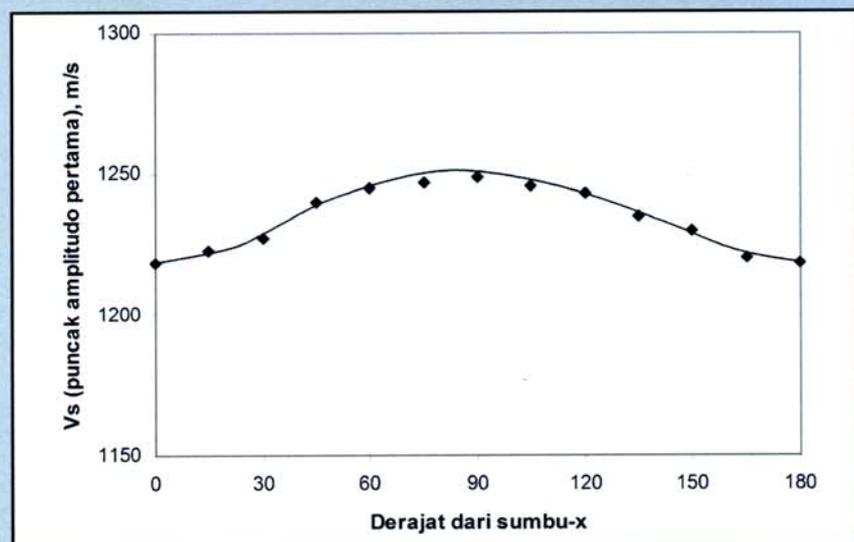
### B. Profil kecepatan gelombang-S

Gambar 6 menyajikan contoh variasi kecepatan dari puncak pertama (*first peak*) dari percontoh #2. Plot kecepatan tersebut disajikan dengan toleransi kesalahan  $\pm 0,5\%$  yang dihitung dari kesalahan potensial dalam menentukan *first peak*, variasi dalam kualitas signal, dan keterbatasan resolusi osiloskop.

Secara umum, plot kecepatan gelombang-S menunjukkan pola sinusoidal sehingga mengindikasikan hadirnya anisotropi kecepatan pada arah sekitar  $0^\circ$  (atau  $180^\circ$ ) azimuth relatif terhadap acuan sumbu-x. Kehadiran anisotropi kecepatan ini memberikan indikasi terjadinya pemecahan gelombang-S menjadi dua gelombang yang berpropagasi pada kecepatan berbeda. Perbedaan kecepatan diantara keduanya mengindikasikan besarnya pemecahan (*splitting*) di antara keduanya. Pengukuran atas ketiga



**Gambar 5**  
Contoh variasi waktu transit gelombang-S dengan sudut rotasi pemutaran percontoh (percontoh no.2). Puncak amplitudo pertama diambil sebagai *first break* yang menandai titik dimana waktu transit diambil (panah). Untuk percontoh ini orientasi rekahan muka ada pada sekitar  $0^\circ/180^\circ$  atau berhimpit dengan sumbu yaitu sumbu-x



**Gambar 6**  
Contoh variasi kecepatan gelombang-S (puncak amplitudo pertama) dengan sudut rotasi percontoh (percontoh #2). Anisotropi kecepatan teramati pada arah sekitar  $0^\circ$  (atau  $180^\circ$ ) relatif terhadap arah acuan (sumbu-x). Kisaran arah ini adalah orientasi dari perangkat rekahan muka (*face cleats*) percontoh ini

percontoh menunjukkan kisaran pemecahan antara 2% dan 2,5%. Mengingat angka-angka tersebut masih di atas toleransi kesalahan 0,5% yang dimiliki, maka dapat disimpulkan bahwa memang telah diperoleh kontras kecepatan yang diperlukan dan bukanlah variasi kecepatan yang diakibatkan oleh keterbatasan-keterbatasan pengukuran.

Pemecahan gelombang-S sebesar 2% - 2,5% sebenarnya tidaklah begitu besar. Yale dan Sprunt (1989) melaporkan pemecahan sebesar 5% dari eksperimen mereka dan Widarsono (1996) bahkan mendapatkan pemecahan sampai setinggi 13,5% dari seperangkat percontoh batupasir yang diuji. Rendahnya harga pemecahan gelombang-S pada percontoh-percontoh batubara ini paling tidak mengindikasikan bahwa kerapatan rekahan muka yang ada tidaklah begitu tinggi. Hal ini diperkuat dengan deskripsi visual atas percontoh yang mengindikasikan batubara yang padat dan tidak berekah-rekah secara jelas. Perhitungan dengan menggunakan Persamaan 2 menghasilkan kerapatan rekahan ( $\rho$ ) kurang dari 0,07 (kerapatan moderat umumnya diindikasikan oleh  $\rho > 0,1$ ). Meskipun demikian, rendahnya harga  $\rho$  yang diperoleh menunjukkan bahwa teknik PGSA dapat bekerja untuk batubara yang padat dan memiliki rekahan-rekahan halus.

### C. Orientasi rekahan muka

Seperti yang diperlihatkan oleh Persamaan 2, orientasi dari rekahan-rekahan muka (*face cleats*) – sebagai rekahan utama – terjadi pada arah di mana kecepatan gelombang-S mencapai yang terendah (*slow S-wave*). Hal ini disebabkan bahwa pada arah ini polarisasi dari gelombang-S berada pada arah tegak lurus terhadap bidang rekahan utama (Gambar 1). Dari ketiga percontoh batubara yang dipakai dalam pengujian diperoleh orientasi perangkat rekahan muka pada 352° (percontoh #1), 0° (percontoh #2), dan 340° (percontoh #3) relatif terhadap acuan sumbu-x (arah Utara). Gambar 7 memperlihatkan plot dari orientasi ketiga percontoh pada stereonet.

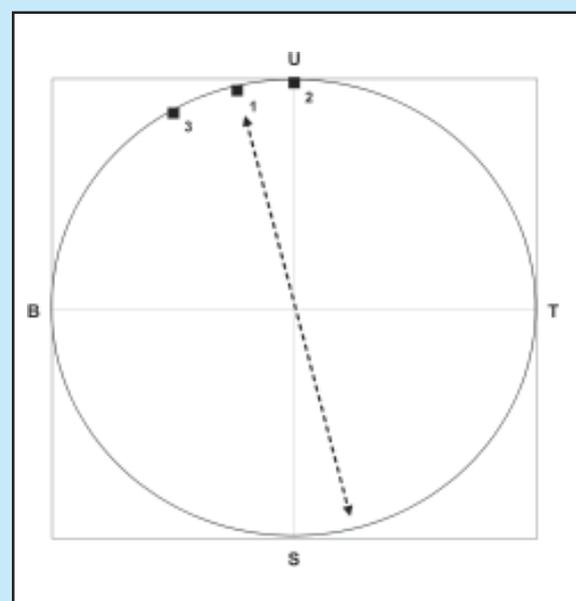
Plot pada Gambar 7 memperlihatkan keacakan yang lazim dijumpai pada pengukuran properti atas percontoh inti batuan. Meskipun demikian, berdasarkan data dari ketiga percontoh orientasi umum pada poros Barat laut – Tenggara telah dapat diidentifikasi, dengan sudut azimut 350° N (atau 170°

N). Dengan kesimpulan ini maka telah dapat ditunjukkan bahwa metode PGSA dapat berfungsi dengan baik untuk menentukan orientasi rekahan muka pada batubara..

### V. DISKUSI LANJUT

Orientasi umum yang diperoleh dan disajikan pada Gambar 7 ditentukan atas dasar penggunaan data yang diperoleh dari tiga percontoh batubara yang diuji. Pengujian dengan menggunakan lebih banyak percontoh akan memberikan kumpulan data (*cluster*) yang tentunya akan memberikan orientasi yang berbeda tetapi lebih representatif untuk batubara yang diuji. Seperti pada umumnya pengukuran pada skala percontoh inti batuan, informasi yang diperoleh terpengaruh oleh heterogenitas yang seringkali masih hadir bahkan pada skala lebih besar dibanding skala percontoh-percontoh tersebut. Dengan demikian maka usaha optimisasi jumlah percontoh versus waktu dan pembiayaan perlu dilakukan untuk mendapatkan jumlah percontoh yang cukup mewakili.

Hasil yang diperoleh dan diplot pada Gambar 7 dapat dipastikan mewakili kondisi interior dari percontoh. Dengan kata lain, karena pengukuran



**Gambar 7**  
Hasil plot orientasi rekahan muka (*face cleats*) dari ketiga percontoh batubara yang diuji. Orientasi umum adalah pada orientasi sekitar 350° relatif terhadap acuan sumbu-x (arah Utara)

PGSA dapat 'membaca' bagian dalam dari percontoh maka pengukuran tidak tergantung pada tampilan visual saja. Hal ini dapat dipastikan karena gelombang-S – seperti juga halnya gelombang-P – adalah jenis gelombang akustik yang dikategorikan sebagai gelombang tubuh (*body waves*). Gelombang-gelombang tubuh selalu berpropagasi pada interior dari suatu tubuh medium dan berkecepatan lebih tinggi dibanding gelombang-gelombang 'permukaan' atau 'antar-muka' (*surface/interfacial waves*) seperti gelombang Stoneley dan Raleigh. Hal ini merupakan keuntungan dan kelebihan metode PGSA dibanding pengamatan langsung/visual.

Pengukuran yang dilakukan dalam studi ini dilakukan pada percontoh-percontoh yang dibor secara vertikal pada inti batuan yang diambil dari sebuah sumur vertikal (Gambar 4). Dengan demikian orientasi yang diperoleh mewakili rekahan-rekahan muka yang memiliki bidang vertikal atau sub-vertikal. Kenyataannya, setelah melalui proses maturasi yang melibatkan proses-proses tektonik dan penimbunan (*burial*) rekahan-rekahan muka yang ada bisa saja tidak dalam posisi yang vertikal. Bahkan, setelah mengalami proses pelipatan akibat kompresi tektonik rekahan tersebut maka bidang rekahan-rekahan tersebut bisa justru lebih mendekati bidang horizontal. Dengan demikian diusulkan untuk melakukan pengukuran tidak hanya atas percontoh vertikal tapi juga atas percontoh yang mewakili arah horizontal. Dengan demikian gambaran secara keseluruhan atas orientasi umum rekahan-rekahan muka dapat diperoleh.

Dari persiapan percontoh yang dilakukan selama studi, permasalahan yang cukup menyulitkan adalah sifat getas (*brittle*) batubara. Hal ini sering menyebabkan rontoknya percontoh pada saat pemboran percontoh (*plugging*) dan pemrosesan setelahnya. Ini menyebabkan rendahnya tingkat sukses preparasi percontoh batubara. Ada hal-hal yang dapat dilakukan untuk mengatasi hal ini. Salah satunya adalah – praktek yang umum bagi penanganan percontoh batupasir tidak kompak – dengan membekukan inti batuan yang tersaturasi air dan kemudian pemboran percontoh dilakukan dengan memakai nitrogen cair. Metode ini terbukti baik dan percontoh yang diperoleh umumnya bagus. Meskipun demikian, hal yang perlu diwaspadai adalah kemungkinan timbulnya rekahan-rekahan baru akibat proses pembekuan, pemboran dengan nitrogen cair,

dan proses *defrosting* yang dilakukan sebelum pengukuran/uji. Jika hal ini terjadi maka akan menyebabkan hilangnya orisinalitas dari percontoh. Studi khusus diperlukan untuk menyelidiki hal ini.

## VI. KESIMPULAN

Studi atas potensi metode pemecahan gelombang-S akustik (PGSA) bagi penentuan orientasi rekahan-rekahan muka (*face cleats*) pada batubara menghasilkan beberapa kesimpulan utama:

1. Metode PGSA terbukti dapat mendeteksi orientasi dari rekahan-rekahan yang mendominasi sistem rekahan batubara, yaitu rekahan muka. Kemampuan gelombang-S untuk menginvestigasi bagian interior dari percontoh merupakan nilai tambah dibanding dengan metode visual/langsung yang hanya mengacu pada kenampakan rekahan pada permukaan batuan.
2. Orientasi dari rekahan belakang (*butt cleats*) terbukti tidak dapat dideteksi. Hal ini disebabkan ukuran dan kerapatan rekahan-rekahan muka lebih tinggi dibanding rekahan-rekahan belakang. Terjadinya pemecahan gelombang-S akibat rekahan belakang jelas tertutup oleh fenomena serupa yang terjadi akibat hadirnya rekahan muka.
3. Acak dari orientasi rekahan yang diperoleh dari ketiga percontoh menyulitkan untuk menarik orientasi secara umum. Hal yang disebabkan oleh heterogenitas batuan ini diharapkan dapat diatasi dengan jumlah percontoh yang lebih besar secara optimum.
4. Metode PGSA terbukti dapat bekerja mendeteksi rekahan-rekahan halus yang ada pada interior percontoh. Untuk batubara yang memiliki ukuran rekahan yang lebih besar diperkirakan besar pemecahan gelombang-S (*S-wave splitting*) yang terjadi akan lebih besar sehingga lebih mudah ditentukan orientasinya.
5. Signal gelombang-S pada pengukuran batubara umumnya berkualitas kurang baik karena adanya atenuasi energi yang besar akibat friksi rekahan dan sifat ketidakelastikan batubara pada skala kecil. Kecermatan dan konsistensi yang tinggi dalam pemilihan titik acuan dalam signal gelombang diperlukan untuk mendapatkan variasi gelombang-S yang sah.
6. Permasalahan sifat batubara yang getas (*brittle*) menyulitkan dalam preparasi percontoh. Perlu dicari dan diteliti metode yang tepat untuk dapat

menghasilkan percontoh yang baik dan mudah dipakai dalam pengujian.

#### KEPUSTAKAAN

1. Berkowitz, N. (1994). *An Introduction to Coal Technology*. 2<sup>nd</sup> edition, Academic Press, Inc., p: 398.
2. Crampin, S. and Booth, D.C. (1985). *Shear-wave Polarization Near the Anatolian Fault-II, Interpretatio in Terms of Crack-induced Anisotropy*. Geophys. J.R. Astr. Soc., 83, pp: 75 – 92.
3. Crampin, S., Evans, R., Ucer, B., Doyle, M., Davis, J.P., Yegorkina, G.V. and Miller, A. (1980). *Observation of Dilatancy-induced Polarization Anomalies and Earthquake Prediction*. Nature, 286: pp: 874 – 877.
4. Fjaer, E., Holt, R.M., Raaen, A.M. and Risnes, R. (1992). *Petroleum Related Rock Mechanics*. Elsevier Science Publishers BV., Amsterdam, p: 338.
5. Garbin, H.D. and Knopoff, L. (1975). *Elastic Moduli of A Medium With Liquid-filled Cracks*. Q. Appl. Math., 33, pp: 301 – 303.
6. Johnston, D.H., Toksoz, M.N. and Timur, A. (1979). *Attenuation of Seismic Waves in Dry and Saturated Rocks: II. Mechanism*. Geophysics, 44, pp: 691 – 711.
7. Karimi, K. (2005). *Coal bed methane reservoir simulation studies*. M.Sc Thesis, School of Petroleum Engineering – University of New South Wales, Australia, pp: 1 – 149.
8. King, M.S. and Xu, S. (1989). *Shear-wave Birefringece and Directional Permeability in Fractured Rock*. Rock at Great Depth, Maury & Fourmaintraux (eds), vol. 1, pp: 265 – 272.
9. Koenig, R.A. (1989). *Hydrologic characterization of coal seams for optimal dewatering and methane drainage*. Quarterly Review of Methane from Coal Seams Technology, Vo. 35, pp: 30 – 31.
10. Koenig, R.A. (1991). *Directional permeability in coal*. In W.J. Bambery and A.M. Depers, eds., Gas in Australian coal: Geological Society of Australia, Symposium Proceeding 2, pp: 65 – 75.
11. Raitt, R.W., Shor, G.G., Francis, T.H.G. and Morris, G.B. (1969). *Anisotropy of the Pacific Upper Mantle*. J. Geophys. Res., 74, pp: 3095 – 3109.
12. Saghafi, A. (2001). *Coal Seam Gas Reservoir Characterization*. Proceeding, Gas from Coal Symposium, Brisbane – Australia, May.
13. Stewart, W.J. and Barro, L. (1982). *Coal Seam Degassification by Use of Hydraulic Fracturing in Vertical Wells: Case Histories*. Proceeding, The Aus IMM Illawara Branch Symposium “Seam Gas with particular reference to the Working Seam”, May.
14. Widarsono, B. (1996). *In situ stress determination using differential strain analysis and ultrasonic shear-wave splitting*. Ph.D thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, Univ. of London, pp: 274.
15. Widarsono B. (2010). *Differential Strain Analysis: an Investigation over Its Feasibility for Determining Coal's Cleat Orientation*. Diterima untuk dipublikasikan dalam Lemigas Scientific Contribution to Petroleum Science and Technology.
16. Yale, D.P. and Sprunt, E.S. (1989). *Prediction of Fracture Direction Using Shear Acoustic Anisotropy*. The Log Analyst, 30: pp: 65 – 70.