



Majelis Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung



Majelis Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

Pidato Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

**Profesor Umar Fauzi**

**PERKEMBANGAN FISIKA BATUAN  
DAN APLIKASINYA UNTUK EKSPLORASI  
SAMPAI PADA ERA DIGITAL**

25 Mei 2012  
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

Hak cipta ada pada penulis

**Pidato Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung**  
25 Mei 2012

**Profesor Umar Fauzi**

**PERKEMBANGAN FISIKA BATUAN  
DAN APLIKASINYA UNTUK EKSPLORASI  
SAMPAI PADA ERA DIGITAL**



Majelis Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: PERKEMBANGAN FISIKA BATUAN DAN APLIKASINYA  
UNTUK EKSPLORASI SAMPAI PADA ERA DIGITAL.  
Disampaikan pada sidang terbuka Majelis Guru Besar ITB,  
tanggal 25 Mei 2012.

#### Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

#### UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama **7 (tujuh) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)**.
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama **5 (lima) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)**.

Hak Cipta ada pada penulis  
Data katalog dalam terbitan

Umar Fauzi  
PERKEMBANGAN FISIKA BATUAN DAN APLIKASINYA UNTUK EKSPLORASI  
SAMPAI PADA ERA DIGITAL  
Disunting oleh Umar Fauzi

Bandung: Majelis Guru Besar ITB, 2012  
vi+52 h., 17,5 x 25 cm  
**ISBN 978-602-8468-49-7**  
1. Fisika Batuan 1. Umar Fauzi

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, Pencipta, Penguasa, dan Pemilik seluruh alam semesta atas seluruh nikmat dan karunia-NYA. Sholawat dan salam penulis sampaikan kepada Rasul Allah, Nabi Muhammad SAW., yang telah menyampaikan kebenaran kepada manusia dan menjadi suri tauladan dalam menjalani kehidupan, termasuk dalam mengembangkan dan menerapkan ilmu pengetahuan dan teknologi untuk menjadi rahmat bagi seluruh alam.

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada pimpinan dan seluruh anggota Majelis Guru Besar ITB atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menyampaikan pidato ilmiah guru besar ini. Pidato ilmiah ini merupakan salah satu bentuk pertanggungjawaban akademik penulis sebagai guru besar ITB kepada ITB, pemerintah dan masyarakat.

Sesuai dengan keilmuan yang penulis tekuni saat ini, pidato ilmiah yang penulis sampaikan berjudul '**Perkembangan fisika batuan dan aplikasinya untuk eksplorasi sampai pada era digital**'. Pidato ilmiah ini akan menyampaikan secara ringkas tonggak-tonggak perkembangan ilmu fisika batuan, dilanjutkan dengan membahas perkembangan estimasi sifat fisis penting untuk eksplorasi yang merupakan salah satu aplikasi fisika batuan dan perkembangan ilmu fisika batuan yang pesat pada era digital, dan diakhiri dengan penelitian dalam bidang fisika batuan yang akan dikembangkan di masa datang.

## DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR .....	iii
DAFTAR ISI .....	v
1. PENDAHULUAN .....	1
2. SIFAT FISIS BATUAN .....	6
2.1. Porositas .....	7
2.2. Fluida Pengisi Pori Batuan .....	10
2.3. Pola Histerisis Besaran Fisis Terhadap Derajad Saturasi .....	13
2.4. Permeabilitas .....	14
3. RUMUSAN PERMEABILITAS .....	19
3.1. Model Kapiler Sederhana .....	21
3.2. Bilangan Koordinasi .....	22
3.3. Ambang Perkolasi .....	24
4. PEMODELAN STRUKTUR MIKRO BATUAN .....	26
4.1. Model Butiran Random .....	26
4.2. Model Fraktal .....	29
5. FISIKA BATUAN DIGITAL (DIGITAL ROCK PHYSICS) .....	30
5.1. Estimasi Permeabilitas dari Data Citra Batuan .....	32
5.2. Rekonstruksi 3 Dimensi .....	33
5.3. Estimasi Modulus Elastik Berdasarkan Data Citra Batuan .....	35
6. PEMODELAN ALIRAN FLUIDA DALAM BATUAN .....	35
7. PENSKALAAN (UP-SCALING) .....	37

Penulis berharap bahwa tulisan sederhana ini dapat memberikan manfaat kepada para pembaca dan perkembangan bidang terkait pada masa datang. Penulis memohon kepada Alloh SWT, semoga selalu diberi petunjuk ke jalan yang benar, sehingga penelitian yang sedang dilakukan dan akan terus dilanjutkan bermanfaat bagi sesama dan menjadi amal sebagai bekal kehidupan di dunia dan akhirat.

Bandung, 25 Mei 2012

**Umar Fauzi**

8. PENELITIAN DI LABORATORIUM FISIKA BATUAN FMIPA ITB .....	40
8.1. Fisika Batuan Digital .....	41
8.2. Pemodelan Struktur Mikro Batuan .....	41
8.3. Pemodelan Aliran Fluida .....	42
9. PENUTUP .....	43
10. UCAPAN TERIMA KASIH .....	44
11. DAFTAR PUSTAKA .....	47
CURRICULUM VITAE PENULIS .....	59

## PERKEMBANGAN FISIKA BATUAN DAN APLIKASINYA UNTUK EKSPLORASI SAMPAI PADA ERA DIGITAL

### 1. PENDAHULUAN

Batuan sebagai tempat tersimpannya fluida seperti air, telah lama secara alamiah dikenal oleh manusia. Inspirasi mengenai batuan sebagai reservoir fluida tersirat juga dalam kitab suci, seperti tersebut dalam QS:2:74, yang terjemahannya 'Kemudian setelah itu hatimu menjadi keras seperti batu, bahkan lebih keras lagi. Padahal di antara batu-batu itu sungguh ada yang mengalir sungai-sungai daripadanya dan di antaranya sungguh ada yang terbelah lalu keluarlah mata air daripadanya dan di antaranya sungguh ada yang meluncur jatuh, karena takut kepada Allah. Dan Allah sekali-kali tidak lengah dari apa yang kamu kerjakan'. Demikian sekilas inspirasi mengenai batuan sebagai reservoir fluida dan analogi ajaran kehidupan yang terkandung didalamnya.

Fisika Batuan atau *Rock Physics* menurut bahasa Indonesia mempunyai arti yang sama dengan *petrophysics* (petrofisika) dimana suku kata awal dari *petrophysics* adalah *petro* yang berasal dari bahasa Latin dan mempunyai arti batuan. Namun demikian beberapa pakar sedikit membedakan kedua terminologi di atas.

Terminologi petrofisika diperkenalkan lebih awal, dengan pencetus pertama G. E. Archie. Archie (1950) dalam abstrak salah satu makalahnya

mengemukakan bahwa: *There is a need for a term to express the physics of rocks. It should be related to petrology much as geophysics related to geology. "Petrophysics" is suggested as the term to the physics of particular rock types, where as geophysics pertains to the physics of larger rock systems composing the earth* (Archie, 1950). Petrofisika berkembang sangat pesat hingga saat ini. Ilmu petrofisika telah berperan amat besar dalam mendukung keberhasilan eksplorasi dan eksploitasi fluida dari dalam perut bumi. Pemahaman yang baik mengenai petrofisika juga sangat membantu program *carbon capture and storage (CCS)*.

Istilah *Rock Physics* dipopulerkan beberapa tahun terakhir, terutama dimotori oleh para pakar dari Universitas Stanford dengan *Rock Physics Group* yang berada di bawah program SRB (*Stanford Rock Physics and Borehole Geophysics Project*), meskipun di beberapa universitas di dunia telah mulai tumbuh pula kelompok riset *rock physics* (fisika batuan). Salah satu pakar senior dari SRB adalah Amos Nur yang dianggap "sinonim" dengan *rock physics* oleh muridnya yang bernama Gary Mavko, guru besar dan direktur *Rock Physics Group* di Universitas Stanford saat ini. Pada tahun 1998, Gary Mavko dan kawan-kawan menulis buku berjudul '*The rock physics handbook (tools for seismic analysis in porous media)*' yang membahas ilmu fisika batuan, dimana dalam buku tersebut dipaparkan secara komprehensif teori dan kajian hasil eksperimen laboratorium dengan harapan agar dapat diakses oleh para pengguna, mengingat masih banyak aspek fisika batuan yang belum dipahami dengan baik

bahkan kontroversial (Mavko, 1998). Schoen (1998) menggunakan istilah *rock physics* dalam uraiannya meskipun buku yang ditulisnya berjudul '*Physical properties of rocks (fundamentals and principles of petrophysics)*'. Yves Gueguen dan Victor Palciauskas (1994) ahli dari Perancis juga menggunakan istilah *rock physics* dalam bukunya yang berjudul '*Introduction to the physics of rocks*'.

Meskipun bidang fisika batuan ini sudah banyak dikaji dan dibahas para peneliti dalam berbagai publikasi ilmiah, namun workshop internasional pertama dalam bidang fisika batuan atau *rock physics*, (*1IWRP – 1<sup>st</sup> International Workshop on Rock Physics*) baru diselenggarakan pada tahun 2011 di *Colorado School of Mines, USA*. Workshop internasional ini direncanakan diselenggarakan tiap dua tahun sekali, dan workshop kedua pada tahun 2013 akan diselenggarakan di Inggris. Dalam situs <http://www.rockphysicists.org/> yang menjadi wadah komunikasi maya para peneliti fisika batuan (*rock physicist*), dijelaskan bahwa "*Rock Physics provides the connections between elastic properties measured at the surface of the earth, within the borehole environment or in the laboratory with the intrinsic properties of rocks, such as mineralogy, porosity, pore shapes, pore fluids, pore pressures, permeability, viscosity, stresses and overall architecture such as laminations and fractures. Rock Physics provides the understanding and theoretical tools required to optimize all imaging and characterization solutions based on elastic data.*"

Dewar (2001) mengutarakan perbedaan *rock physics* (fisika batuan)

dengan *petrophysics* (petrofisika) sebagaimana disajikan pada tabel 1 berikut (dialihbahasakan dari Dewar (2001)).

**Tabel 1:**  
**FISIKA BATUAN (ROCK PHYSICS) - PETROFISIKA**

FISIKA BATUAN (ROCK PHYSICS)	PETROFISIKA
Fisika batuan memanfaatkan log sonik, log densitas, dan juga log dipol (kecepatan gelombang S) jika tersedia.	Petrofisika memanfaatkan semua data log, data batuan inti ( <i>core</i> ) dan data produksi, dan mengintegrasikan semua informasi yang terkait.
Fisika batuan bertujuan untuk menentukan kecepatan gelombang seismik ( $v_p$ , $v_s$ ), densitas, hubungannya dengan modulus elastik, modulus geser, porositas, fluida pori, suhu, tekanan, dan lain-lain untuk litologi dan jenis fluida tertentu.	Petrofisika bertujuan untuk memperoleh sifat fisika seperti porositas, saturasi dan permeabilitas yang terkait dengan parameter produksi.
Fisika batuan membahas kecepatan dan parameter elastik, karena parameter tersebut menghubungkan sifat fisika batuan dengan ungkapan data seismik.	Petrofisika pada umumnya tidak terlalu memperhatikan seismik, dan lebih pada memanfaatkan pengukuran di sumur bor untuk memberikan kontribusi pada deskripsi reservoir.
Fisika batuan kadang memanfaatkan informasi yang disajikan petrofisikawan, seperti volume serpih, tingkat saturasi, dan porositas dalam upaya menghubungkannya dengan sifat batuan atau analisa substitusi fluida.	Petrofisika dapat memberikan informasi mengenai porositas, saturasi, permeabilitas, <i>net pay</i> , kontak fluida, volume serpih, dan zona reservoir.
Fisika batuan menjadi perhatian geofisikawan dan juga fisikawan.	Petrofisika menjadi perhatian ahli bidang perminyakan, analisis well log, analisis batuan inti, geologiwan dan geofisikawan.

Dalam perkembangan selanjutnya, kedua bidang ini nampaknya saling mendukung dan melengkapi.

Fisika batuan dikembangkan antara lain dengan tujuan agar dapat mengekstrak lebih detail mengenai informasi bawah permukaan bumi seperti porositas (struktur pori/retakan), sifat anisotropi, saturasi fluida, permeabilitas, dan lain-lain. Tantangan ini telah mendorong pertumbuhan dan perkembangan bidang ilmu fisika batuan (*rock physics*). Schoen (1998) menjelaskan bahwa fisika batuan merupakan bidang interdisiplin yang melibatkan bidang geologi, geofisika, geokimia, fisika, akustik, *wellogging*, analisa batuan inti (*core*), perminyakan, teknik kimia dan mesin. Selain untuk membantu estimasi sifat fisika batuan yang diperlukan dalam rekayasa, bidang fisika batuan dikembangkan pula untuk menjelaskan fenomena fisika yang terkadang tidak sederhana atau belum dapat dijelaskan dengan baik, seperti pola histeresis pada sifat fisika batuan yang berlaku pada kecepatan gelombang seismik dan konduktivitas listrik sebagai fungsi saturasi fluida, masalah penskalaan (*upscaling*), dispersi sifat fisika dan lain-lain. Dalam beberapa aspek, fenomena terkait fisika batuan masih belum dapat dipahami dengan baik atau bahkan kontroversial (Mavko dkk, 1998).

Pada sekitar tahun 1980-an, perkembangan konsep modern dalam fisika seperti fraktal, perkolasi, grup renormalisasi, pendekatan medium efektif, juga pendekatan diskrit seperti selular automata, kisi Boltzmann, dan dinamika molekular telah memberikan sumbangan yang signifikan

untuk menjawab permasalahan yang dihadapi dalam fisika batuan di atas (Wong, 1988). Perkembangan konsep fisika untuk fisika batuan dan pemodelan struktur mikro batuan yang mengendalikan sifat fisis batuan masih secara intensif terus dikembangkan, sebagai upaya untuk memahami secara lebih baik mekanisme yang terjadi dalam batuan. Pemahaman mekanisme fisis yang terjadi di dalam batuan akan memberikan kontribusi yang lebih baik dalam eksplorasi, kajian lingkungan, maupun bencana seperti longsor dan erosi yang dipengaruhi oleh mekanisme mikroskopis dan interaksi yang terjadi di dalamnya. Perkembangan luar biasa dalam bidang teknologi komputer dan teknik komputasi telah mendorong perkembangan fisika batuan digital (*digital rock physics*) yang kemudian memberikan kontribusi sangat signifikan dalam perkembangan ilmu fisika batuan dan keperluan praktis.

Selanjutnya akan dibahas perkembangan dan peran fisika batuan serta aplikasinya sampai pada era digital, yang dimulai dengan membahas relasi empiris beberapa besaran fisika batuan, rumusan besaran fisis, pemodelan struktur mikro batuan, dan diakhiri dengan pembahasan fisika batuan digital dan perkembangan di masa yang akan datang.

## 2. SIFAT FISIS BATUAN

Besaran fisis batuan yang biasa dibahas dalam literatur pada

umumnya terdiri atas densitas, porositas, besaran elastik atau kecepatan gelombang seismik, resistivitas atau konduktivitas listrik, permeabilitas, dielektrisitas, sifat magnetik, dan konduktivitas panas, serta radioaktivitas. Dalam bab ini hanya akan dibahas sebagian kecil dari sifat fisis batuan terutama yang banyak terkait dengan eksplorasi.

Pertanyaan mengenai berapa besar kemampuan suatu jenis batuan dapat menyimpan fluida (porositas), jenis fluida apa dan berapa banyak yang terkandung dalam pori batuan (saturasi fluida), seberapa mudah fluida dapat mengalir dalam batuan (permeabilitas), bagaimana distribusi fluida berada dalam pori batuan, dan bagaimana mekanisme fluida menempati pori saat proses pengisian dan pengosongan yang mempengaruhi sifat fisis batuan merupakan tantangan yang memerlukan jawaban, oleh karena informasi tersebut amat diperlukan dalam berbagai bidang.

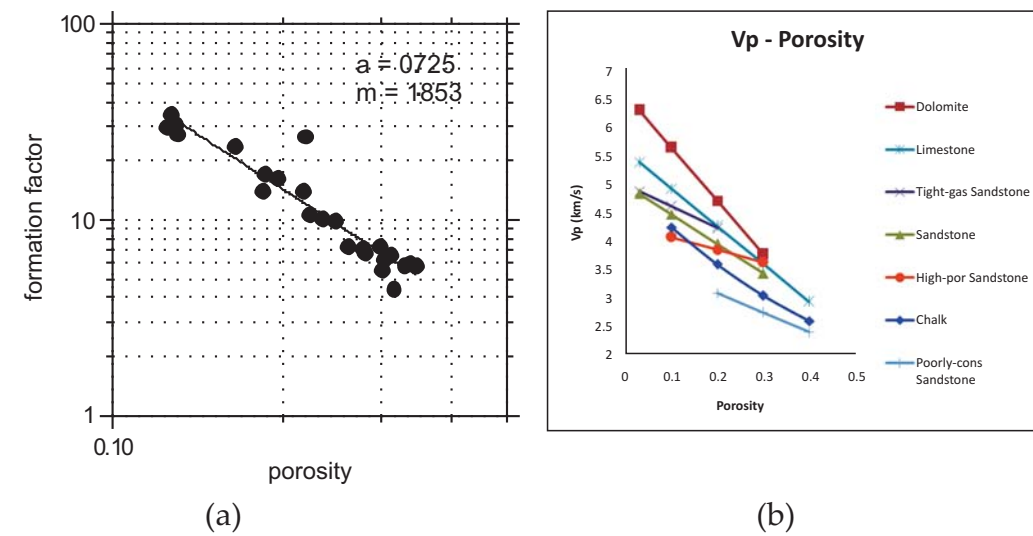
Dalam eksplorasi, besaran-besaran penting di atas pada umumnya tidak dapat diperoleh secara langsung dari data survei geofisika di permukaan tanah, maka perumusan atau korelasi empiris antar sifat fisis batuan dikembangkan dan digunakan untuk estimasi besaran fisis yang tidak mudah untuk diperoleh tersebut. Korelasi empiris dapat diperoleh dari pengukuran di lapangan atau data eksperimen di laboratorium.

### 2.1. Porositas

Porositas dapat diestimasi dengan cukup baik berdasarkan pendekatan empiris, antara lain melalui hukum Archie yang biasa



digunakan untuk data yang diperoleh dari pengukuran di sumur bor. Estimasi porositas dari data resistivitas untuk berbagai jenis batuan dapat dilakukan dengan baik, mengingat korelasi kedua besaran yang amat baik antara lain seperti ditunjukkan pada gambar 1a. Relasi atau hubungan empiris yang menyatakan kaitan antara resistivitas atau konduktivitas listrik dengan porositas dirumuskan oleh Archie (1942). Oleh karena pada umumnya informasi yang diinginkan adalah sebaran porositas dalam skala yang lebih luas, maka informasi di sekitar sumur bor dirasa perlu untuk diperluas.



**Gambar 1.** Relasi antara porositas dan faktor formasi (Fauzi, 1994) (a) serta kecepatan gelombang seismik (b).

Pada saat ini data yang biasa tersedia untuk jangkauan yang lebih luas adalah data seismik, selain itu daya resolusi metoda seismik lebih baik dibandingkan metoda kelistrikan seperti geolistrik dan elektromagnetik,

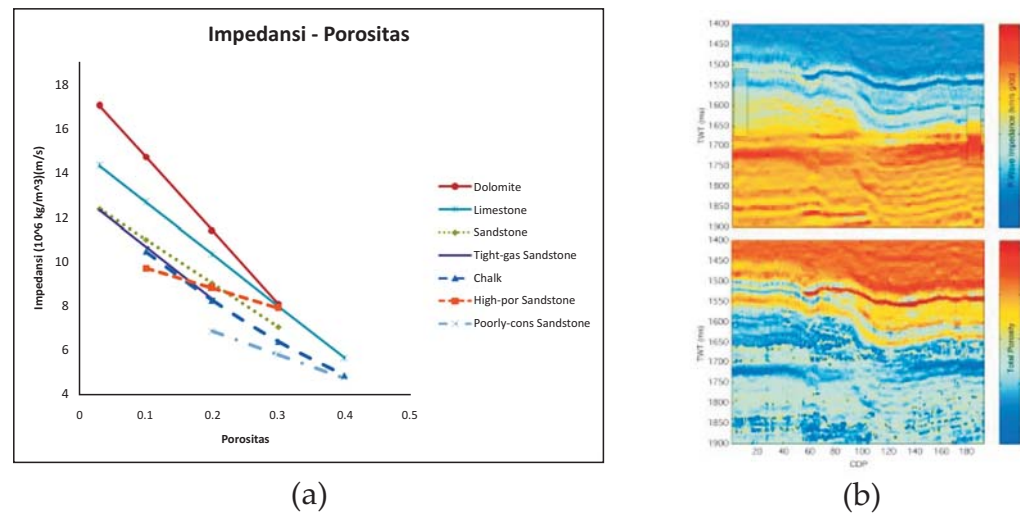
maka upaya mencari korelasi empiris antara porositas dengan besaran seismik menjadi perhatian para peneliti dan praktisi. Data pengukuran porositas dan kecepatan gelombang seismik menunjukkan korelasi yang cukup baik seperti terlihat pada gambar 1b. Secara empiris hubungan antara kecepatan gelombang seismik jenis P ( $v_p$ ) dengan porositas ( $\phi$ ) sebagian besar dapat dinyatakan sebagai hubungan yang linier atau mendekati linier seperti ditunjukkan pada gambar 1b (Mavko dkk, 1998; Schoen, 1998). Mengingat lempung mempunyai pengaruh yang cukup signifikan pada kecepatan gelombang seismik, maka persamaan empiris pada umumnya ditambahkan pengaruh lempung (Tosaya dan Nur, 1982; Castagna dkk, 1985; Han, 1986; Marion dkk., 1992). Persamaan empiris secara umum dapat diringkas sebagaimana persamaan 1 (Mavko dkk, 1998; Schoen, 1998).

$$v = A_0 - A_1\phi - A_2C \dots\dots\dots (1)$$

dimana  $v$  adalah kecepatan perambatan gelombang P atau S,  $C$  adalah fraksi lempung, dan  $A_0, A_1, A_2$  adalah konstanta. Konstanta untuk gelombang tipe P ( $v_p$ ) lebih besar dari gelombang tipe S ( $v_s$ ) dan batuan dengan saturasi air memiliki harga konstanta yang lebih besar dari batuan tersaturasi gas.

Selain relasi antara porositas dan kecepatan gelombang seismik, impedansi seismik ( $I_p = \rho v_p$  dengan  $\rho$  adalah densitas batuan) sering digunakan untuk estimasi porositas mengingat hasil inversi data seismik

pada umumnya disajikan dalam impedansi seismik. Bentuk relasi antara impedansi seismik dan porositas juga mendekati linier seperti terlihat pada gambar 2a (Mavko dkk, 1998). Gambar 2b menunjukkan hasil estimasi porositas dari data impedansi (Dvorkin & Alkather, 2004).



**Gambar 2.** Relasi antara Impedansi ( $I_p$ ) dan porositas ( $\phi$ ) (a) dan hasil pemetaan porositas dari Impedansi (b) (Dvorkin & Alkather, 2004).

## 2.2. Fluida Pengisi Pori Batuan

Pendeteksian fluida dalam pori merupakan permasalahan yang menjadi tantangan para peneliti dan praktisi yang bergerak di bidang eksplorasi dan juga lingkungan. Dalam beberapa kasus, jenis fluida pengisi pori atau sering dinyatakan sebagai saturasi fluida mempunyai korelasi yang baik dengan resistivitas dan pada umumnya dinyatakan dalam hukum Archie yang diperluas, sehingga estimasi saturasi di sekitar

lubang bor sering dilakukan dengan memanfaatkan data resistivitas. Metoda ini sudah berhasil dengan baik untuk penentuan jenis fluida dan derajat saturasi fluida di sekitar sumur bor, jika data-data sumur yang diperlukan tersedia.

Seperti pada kasus estimasi porositas, untuk jangkauan yang luas diupayakan informasi saturasi dapat diperoleh juga dari data seismik. Untuk mendeteksi jenis fluida pengisi pori, para peneliti mengkaji konstanta elastik yang terkandung dalam kecepatan perambatan gelombang seismik dan juga direpresentasikan oleh amplitudo. Salah satu pendekatan yang sering digunakan adalah persamaan Gassman untuk substitusi fluida, dimana persamaan tersebut mempertimbangkan konstanta elastik seperti modulus bulk yang dipengaruhi oleh jenis fluida. Dengan mengetahui perubahan modulus bulk tersebut, dapat diperkirakan perubahan jenis fluida pengisi pori (Gassmann, 1951). Perbedaan kecepatan gelombang seismik untuk kasus tersaturasi penuh satu jenis fluida atau kering sempurna dapat dinyatakan dalam tabel 2 (Gueguen & Palciauskas, 1994). Wang (2001) mencoba memperluas pendekatan Gassmann untuk kasus saturasi sebagian atau multi fasa.

Dengan mempertimbangkan kebergantungan sifat elastik dan rapat massa pada saturasi fluida, maka Goodway (2001) mengembangkan plot kombinasi konstanta elastik ( $\lambda, \mu, \rho$ ) untuk identifikasi jenis reservoir dan kemungkinan jenis fluida. Besaran konstanta elastik seperti  $\lambda\rho$  dan  $\mu\rho$  dapat diperoleh dari data seismik, melalui analisa AVO (*Amplitude*

Versus Offset). Oleh karenanya analisa AVO sering dimanfaatkan dalam penafsiran jenis fluida pengisi pori. Metoda semacam ini cukup banyak dikembangkan oleh para peneliti dan diterapkan di industri (Russell dkk., 2003; Castagna, 1993).

**Tabel 2.**

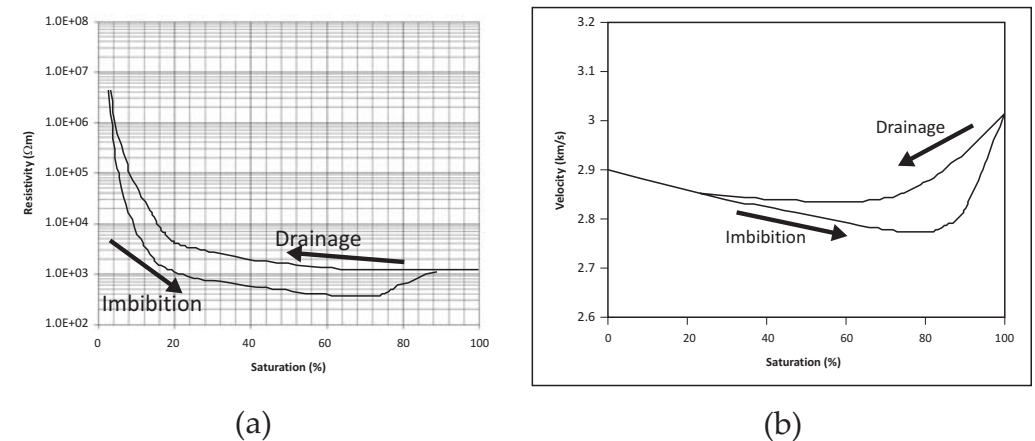
Konstanta elastik dan kecepatan gelombang seismik dalam kondisi tersaturasi penuh fluida dan keadaan kering sempurna (Gueguen & Palciauskas, 1994).

BESARAN FISIS	MEDIUM BERPORI TANPA FLUIDA	MEDIUM BERPORI TERSATURASI PENUH OLEH FLUIDA
Kecepatan gelombang tipe P	$K_{dry} \quad K_0(1 - B\frac{\phi}{A})$	$K_{sat} \quad K_{dry} \frac{K_f(1 - \frac{K_{dry}}{K_0})^2}{\phi(1 - \frac{K_{dry}}{K_0} - \phi)\frac{K_f}{K_0}}$
Modulus geser	$\mu_{dry} \quad \mu_0(1 - B'\frac{\phi}{A})$	$\mu_{sat} \quad \mu_{dry}$
Densitas	$\rho_{dry} \quad \rho_0(1 - \phi)$	$\rho_{sat} \quad \rho_0(1 - \phi) + \rho_f\phi$
Kecepatan gelombang tipe P	$v_p \quad \sqrt{\frac{K_{dry} + \frac{4}{3}\mu_{dry}}{\rho_{dry}}}$	$v_p \quad \sqrt{\frac{K_{sat} + \frac{4}{3}\mu_{sat}}{\rho_{sat}}}$
Kecepatan gelombang tipe S	$v_s \quad \sqrt{\frac{\mu_{dry}}{\rho_{dry}}}$	$v_s \quad \sqrt{\frac{\mu_{sat}}{\rho_{sat}}}$

(Ket.:  $K_{sat}$  adalah modulus bulk efektif batuan yang tersaturasi fluida,  $K_{dry}$  adalah modulus bulk fluida,  $K_f$  adalah modulus bulk efektif batuan kering,  $K_0$  adalah modulus bulk mineral yang membentuk batuan,  $\phi$  adalah porositas batuan; A, B dan B' adalah konstanta).

### 2.3. Pola Histerisis Besaran Fisis Terhadap Derajat Saturasi

Dalam kasus saturasi sebagian, data perubahan resistivitas terhadap saturasi air untuk proses pengisian dan pengosongan memberikan fenomena yang menunjukkan adanya pola histerisis, dimana harga resistivitas berbeda pada tingkat saturasi yang sama bergantung pada proses yang terjadi, seperti terlihat pada gambar-3a (Knight, 1991; Roberts, 2002). Demikian pula untuk kecepatan gelombang seismik, hasil eksperimen menunjukkan bahwa perubahan kecepatan gelombang seismik akibat perubahan saturasi memiliki pola yang tidak sederhana dan memperlihatkan adanya pola histerisis seperti terlihat pada gambar-3b (Knight & Hoeksema (1990), Knight dkk (1998), Barach (1998), Le Ravalec (1996)). Penjelasan mekanisme fisis pola histerisis seperti yang diperlihatkan pada gambar 3, hingga kini masih menjadi bahan topik penelitian para pakar.

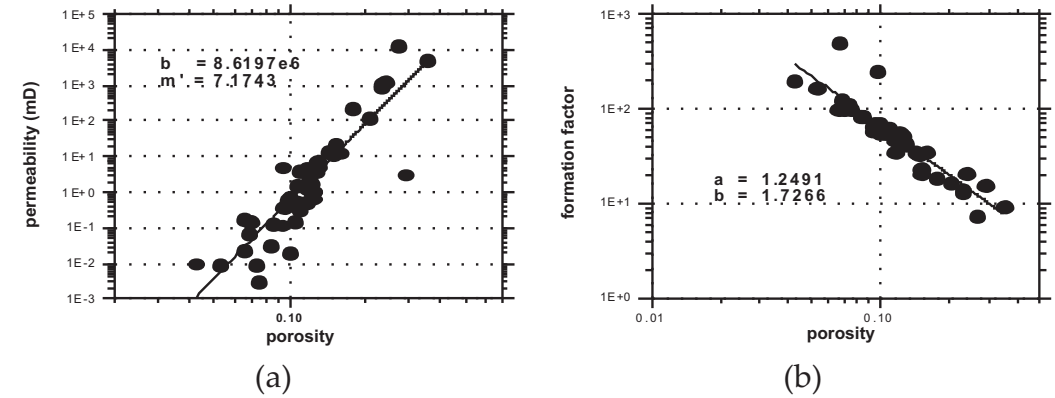


**Gambar 3.** Ilustrasi pola histerisis pada resistivitas dan kecepatan gelombang seismik.

## 2.4. Permeabilitas

Permeabilitas yang menggambarkan kemampuan batuan untuk meloloskan fluida, merupakan besaran fisis yang sangat diperlukan dalam rekayasa reservoir, hidrologi, dan porous media secara umum. Pada umumnya besaran ini diperoleh dari pengukuran langsung di laboratorium atau dari sumur. Mengingat pengukuran langsung pada umumnya terbatas dan besaran permeabilitas ini amat penting, maka kajian estimasi permeabilitas berkembang dengan pesat termasuk estimasinya berdasarkan besaran fisis lain yang lebih mudah didapat.

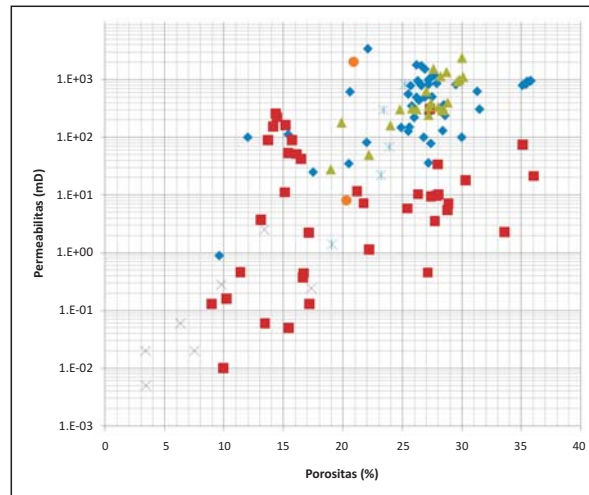
Oleh karena porositas merupakan besaran yang amat berpengaruh pada permeabilitas, dan porositas memiliki hubungan yang baik dengan besaran fisis lain, seperti resistivitas dan kecepatan gelombang seismik seperti telah dijelaskan di atas, maka hubungan besaran-besaran fisis tersebut sering dimanfaatkan untuk estimasi permeabilitas. Dalam beberapa kasus, hubungan porositas dan permeabilitas cukup baik seperti terlihat pada gambar 4a, dan untuk data seperti pada gambar 4a, relasi antara porositas dengan faktor formasi untuk batuan tersebut pada umumnya juga cukup baik, seperti terlihat pada gambar 4b. Dengan demikian biasanya dikembangkan hubungan antara permeabilitas dengan faktor formasi.



**Gambar 4.** Relasi antara porositas dengan permeabilitas (a) dan porositas dengan faktor formasi (b) (Fauzi, 1994).

Untuk data yang seperti ditampilkan di atas, relasi empiris antara permeabilitas dan faktor formasi dapat diformulasikan (Wong, 1988; Fauzi, 1997). Melalui formula tersebut, permeabilitas memungkinkan untuk diestimasi berdasarkan data faktor formasi atau resistivitas, hanya faktor geometri pori yang menjadi penghubung kedua besaran perlu diketahui dengan baik, karena bergantung pada struktur geometri pori batuan.

Pada beberapa sampel, relasi antara permeabilitas dengan porositas sering dijumpai tidak sesederhana seperti yang telah disebutkan di atas, sebagai salah satu contoh terlihat pada gambar 5. Meskipun data tersebut berasal dari hasil pengukuran jenis batuan pasir, tetapi hubungan antara permeabilitas dan porositas terlihat tersebar, tidak memperlihatkan adanya hubungan empiris yang sederhana.



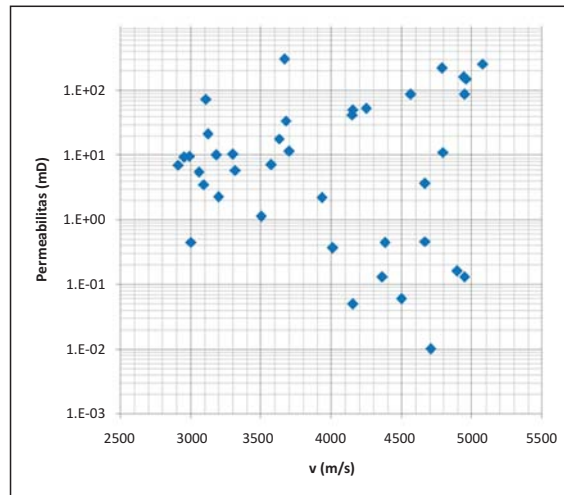
**Gambar 5.** Grafik permeabilitas terhadap porositas, dimana simbol atau warna menunjukkan asal sumber data (data diambil dari beberapa sumber: Tiab & Donaldson (2004), Klimentos & McCann (1990), Fauzi (1997), Prasad (2003)).

Mengingat relasi empiris antara permeabilitas dengan porositas terkadang tidak menunjukkan relasi yang sederhana, maka banyak peneliti mengembangkan hubungan empiris permeabilitas dan porositas dengan melibatkan besaran-besaran fisis lain. Berdasarkan pada model sederhana, dimana permeabilitas dapat dinyatakan dalam porositas dan radius pori atau luas permukaan spesifik atau juga besar butiran, maka peneliti berusaha untuk mendapatkan hubungan empiris antara permeabilitas dengan besaran fisis lain yang terkait dengan besaran penting di atas, selain porositas. Disamping porositas, besaran yang sering digunakan untuk mendapatkan hubungan empiris dengan permeabilitas adalah ukuran besar butiran (Berg, 1970; Van Baaren, 1979; Shepherd, 1989), ukuran pori (Katz & Thompson, 1986; Fauzi (2002); luas permukaan

spesifik (Sen et al., 1990); konduktivitas kompleks (Slater, 2007); waktu relaksasi spin yang dapat diperoleh dari *nuclear magnetic resonance* (Sen et al., 1990); kapasitas pertukaran ion (Sen et al., 1990), dan *irreducible water saturation* (Tixier, 1949; Willy & Rose, 1950; Timur, 1968; Coats & Dumanoir, 1974).

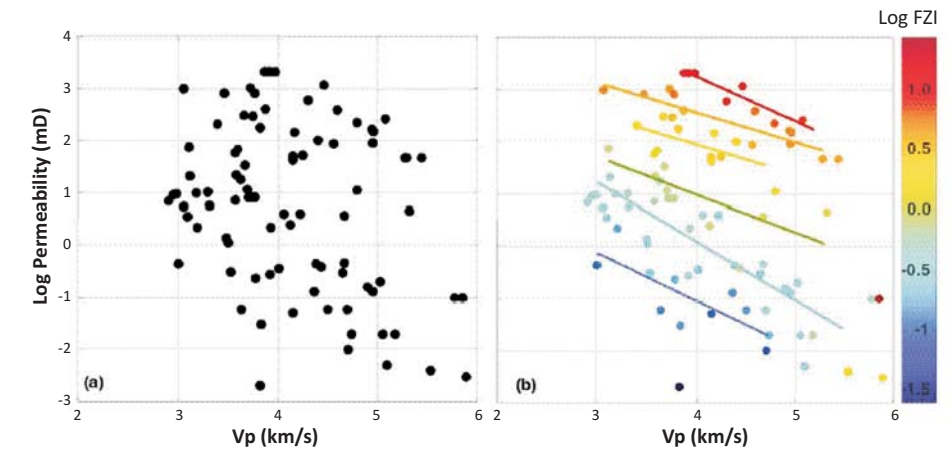
Seperti halnya porositas, permeabilitas juga sedapat mungkin dapat dipetakan untuk daerah yang lebih luas, tidak terbatas pada daerah sekitar sumur. Penelitian ke arah tersebut banyak dilakukan dengan mengembangkan beberapa metoda seperti seismoelektrik (Berryman, 2003a; Thompson & Gist, 1993), *surface nuclear magnetic resonance* (SNMR) (Legchenko dkk, 2003), dan *Induced Polarization* yang melibatkan konduktivitas kompleks (Hoerdt dkk, 2007; Slater, 2007). Metoda-metoda tersebut adalah metoda geofisika permukaan yang dapat memetakan bawah permukaan dengan jangkauan lebih luas dan besaran fisis yang diperoleh dapat dikaitkan dengan permeabilitas. Semua metoda tersebut di atas masih menjadi topik yang menantang hingga saat ini.

Sebagaimana telah disebutkan sebelumnya, bahwa banyak daerah telah tersedia data seismik yang mempunyai jangkauan luas dan resolusi yang tinggi, maka upaya untuk dapat mengestimasi permeabilitas dari data seismikpun terus diupayakan. Namun seperti dapat diduga, bahwa korelasi antara permeabilitas dan kecepatan gelombang seismik terlihat lebih kompleks, seperti pada gambar 6 berikut:



**Gambar 6.** Permeabilitas dan  $v_p$  (data berasal dari Klimentos & McCann, 1990).

Permeabilitas tidak mudah untuk diestimasi berdasarkan data kecepatan gelombang seismik, mengingat korelasi yang tidak sederhana antara kedua besaran tersebut. Hal ini tentu dapat dimengerti oleh karena kecepatan gelombang seismik lebih banyak memberikan informasi porositas, sedangkan permeabilitas bergantung pula pada besaran fisis yang lain. Namun demikian Prasad (2003) mencoba mendefinisikan FZI (*Flow Zone Indicator*) untuk melakukan estimasi permeabilitas dari kecepatan gelombang seismik. Dengan pengelompokan berdasarkan FZI, dapat diperoleh suatu hubungan yang relatif linier antara permeabilitas dan kecepatan gelombang seismik, seperti terlihat pada gambar 7. Gambar 7 menunjukkan plot permeabilitas dengan  $v_p$  tanpa FZI dan setelah dikelompokkan berdasarkan FZI.



**Gambar 7.** Permeabilitas dan  $v_p$  dengan kelompok FZI (Prasad, 2003; Castillo & Prasad, 2012).

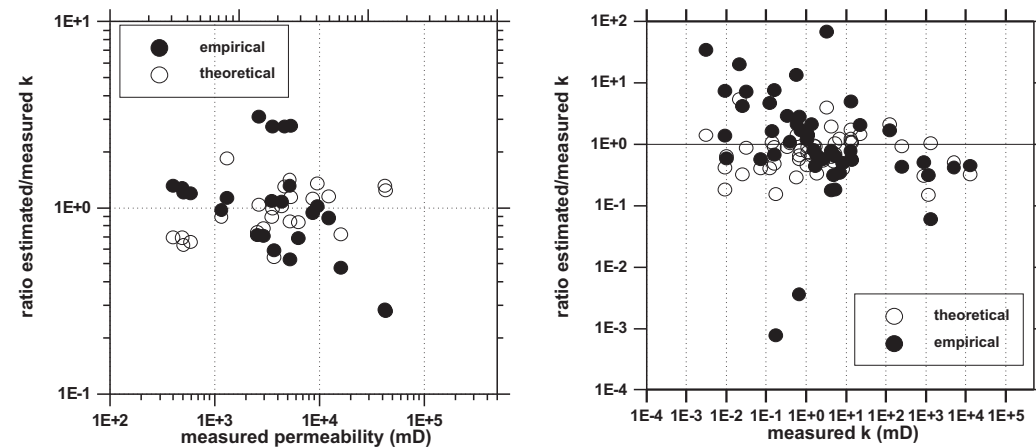
Dengan membuat suatu pengelompokan berdasarkan FZI, korelasi perkelompok cukup menjanjikan, namun demikian FZI memerlukan data eksperimen. Estimasi permeabilitas dari data atau survei seismik masih menjadi tantangan hingga kini.

### 3. RUMUSAN PERMEABILITAS

Mengingat korelasi empiris memerlukan banyak data yang kadang tidak murah dan tidak mudah untuk diperoleh, serta didorong untuk lebih memahami faktor apa saja dan mekanisme fisis seperti apa yang berperan dan menentukan sifat fisis batuan, maka para peneliti secara intensif mengembangkan berbagai pemodelan dan pendekatan.

Salah satu besaran fisis yang akan dibahas sebagai salah satu contoh dalam makalah ini adalah permeabilitas, mengingat pentingnya besaran ini dan dibutuhkan dalam berbagai bidang. Melalui pemodelan dan pendekatan, besaran struktur pori yang mempengaruhi permeabilitas dapat dikaji dan dipelajari dengan lebih baik.

Dalam beberapa kasus, estimasi permeabilitas yang didasarkan pada pendekatan analitik memberikan hasil yang lebih baik dari pada korelasi empirik, seperti terlihat pada gambar 8.



**Gambar 8.** Perbandingan hasil estimasi permeabilitas secara analitik yang memberikan hasil lebih baik dari empirik (Fauzi dkk., 1994).

Gambar 8 memperlihatkan bahwa estimasi secara analitik memberikan hasil yang lebih mendekati harga pengukuran dari pada hasil estimasi berdasarkan rumusan empirik. Hasil semacam ini lebih mendorong peneliti untuk mengembangkan berbagai rumusan permeabilitas.

### 3.1. Model Kapiler Sederhana

Permeabilitas untuk model kapiler sederhana dapat dinyatakan sebagai fungsi porositas dan radius kapiler seperti dituliskan pada persamaan 2.

$$k = \frac{\phi r_k^2}{4f_h} \dots\dots\dots (2)$$

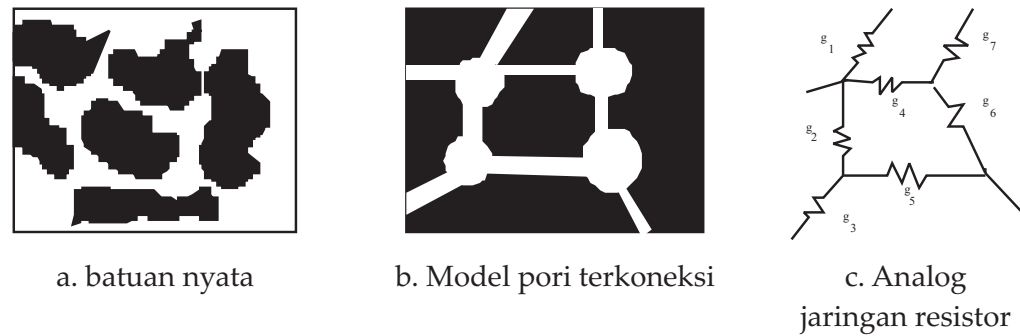
dimana  $r_k$  adalah radius kapiler,  $\tau_h$  tortuositas hidrolis,  $f$  disebut sebagai faktor bentuk kapiler ( $f=2$  untuk bentuk penampang kapiler lingkaran). Fauzi (2002) memperluas persamaan (2) untuk kapiler dengan berbagai ukuran radius dan menerapkannya untuk estimasi permeabilitas. Dengan mendefinisikan luas permukaan spesifik total  $S$ , yaitu luas pori dibagi dengan volume total, persamaan (2) dapat dituliskan dalam persamaan 3 berikut:

$$k = \frac{\phi^3}{h_f S^2} \dots\dots\dots (3)$$

Rumusan untuk model sederhana tersebut sudah banyak diterapkan untuk berbagai keperluan. Rumusan di atas diperoleh dari model sederhana tanpa mempertimbangkan adanya konektivitas antar kapiler atau pori. Dullien (1992) merangkum berbagai model kapiler, namun masih belum mempertimbangkan konektivitas. Pada kenyataannya kapiler dalam batuan tentunya berhubungan antara satu dengan yang lain. Untuk mengakomodasi konektivitas antar pori, beberapa peneliti mengembangkan model dengan mencoba mempertimbangkan konektivitas antar kapiler melalui bilangan koordinasi ( $z$ ).

### 3.2. Bilangan Koordinasi

Dalam rumusan sebelumnya, model yang digunakan adalah kapiler tanpa adanya konektivitas antara kapiler, tentu ini kurang memuaskan peneliti, karena dari kenyataan yang ada kapiler tersebut saling berhubungan, maka berkembanglah berbagai model untuk melibatkan konektivitas, salah satu model yang banyak dikembangkan adalah jaringan resistor (Koplik, 1981; Kirkpatrick, 1973), seperti terlihat pada ilustrasi berikut:

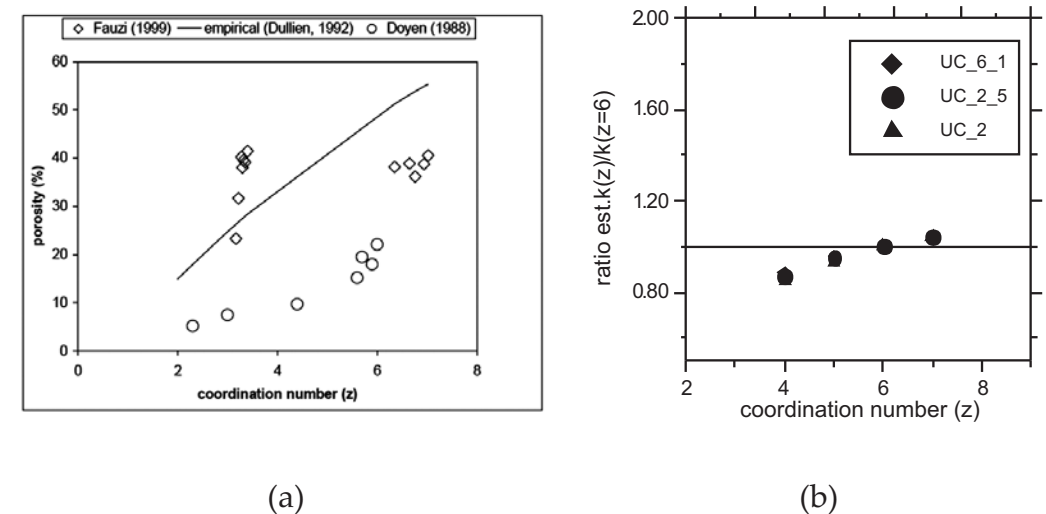


Gambar-9. Ilustrasi analogi jaringan resistor untuk pori batuan.

Penyelesaian jaringan resistor dapat dilakukan dengan menerapkan pendekatan medium efektif (PME), dimana konduktivitas ekuivalen dari jaringan dapat diperoleh dengan menyelesaikan persamaan 4 berikut (Kirkpatrick (1973)):

$$f(g) = \frac{g_{eq}}{g} \frac{g}{\left(\frac{z}{2} - 1\right)g_{eq}} dg = 0 \dots\dots\dots (4)$$

dengan  $g_{eq}$ : besaran konduktansi ekuivalen yang dicari,  $f(g)$  adalah fungsi distribusi konduktansi  $g$ , dan  $z$  adalah bilangan koordinasi (jumlah resistor atau konduktor yang tersambung di suatu simpul). Dalam persamaan di atas bilangan koordinasi ( $z$ ) secara eksplisit turut dipertimbangkan. Metoda tersebut telah diterapkan untuk estimasi permeabilitas, antara lain oleh Doyen (1988), David dkk. (1990), dan Fauzi (1999). Mengingat bilangan koordinasi tidak mudah untuk diperoleh, maka beberapa teknik dikembangkan untuk menentukan bilangan koordinasi, antara lain melalui kaitannya dengan porositas, seperti terlihat pada gambar 10a (kiri) (Fauzi, 2002).



Gambar-10. Bilangan koordinasi sebagai fungsi porositas (a) dan pengaruhnya terhadap estimasi permeabilitas (b).

Berdasarkan model dan teknik penyelesaian di atas, pengaruh bilangan koordinasi dapat dikaji, seperti terlihat pada gambar 10b



(kanan). Bilangan koordinasi mempunyai pengaruh yang cukup signifikan dalam estimasi permeabilitas. Kajian mengenai pengaruh jaringan pori atau bilangan koordinasi yang dilakukan oleh Bernabe dkk (2010) untuk model jaringan menyimpulkan bahwa hasil yang diperolehnya mendukung hasil dari Fauzi (2002).

### 3.3. Ambang Perkolasi

Parameter lain yang mempengaruhi permeabilitas adalah batas perkolasi, dimana sampel batuan tidak permeabel atau mempunyai harga permeabilitas nol, meskipun porositas batuan tersebut tidak sama dengan nol. Artinya bahwa sampel batuan jenis tersebut mempunyai ambang perkolasi untuk dapat melewati fluida. Kenyataan ini tentunya tidak dapat dijelaskan dengan persamaan sebelumnya. Bagaimana ambang perkolasi ini dapat diakomodasi atau dipertimbangkan dalam perumusan estimasi permeabilitas, merupakan masalah yang masih menjadi kajian penelitian hingga kini. Salah satu alternatif diberikan oleh Mavko & Nur (1997) yang memasukkan ambang porositas dalam persamaan permeabilitas untuk kapiler sederhana, sehingga permeabilitas dinyatakan sebagai:

$$k = \frac{(\phi - \phi_c)^3}{S^2} \dots\dots\dots (5)$$

Menurut formula di atas, permeabilitas akan berharga nol, jika porositas belum melampaui porositas ambang ( $\phi_c$ ). Hilfer (1991; 1992; 1993; 1996) mengembangkan teori porositas lokal (TPL), yang mempertimbangkan

ambang perkolasi, dimana permeabilitas dinyatakan sebagai:

$$k = k_o(p - p_c)^t \dots\dots\dots (6)$$

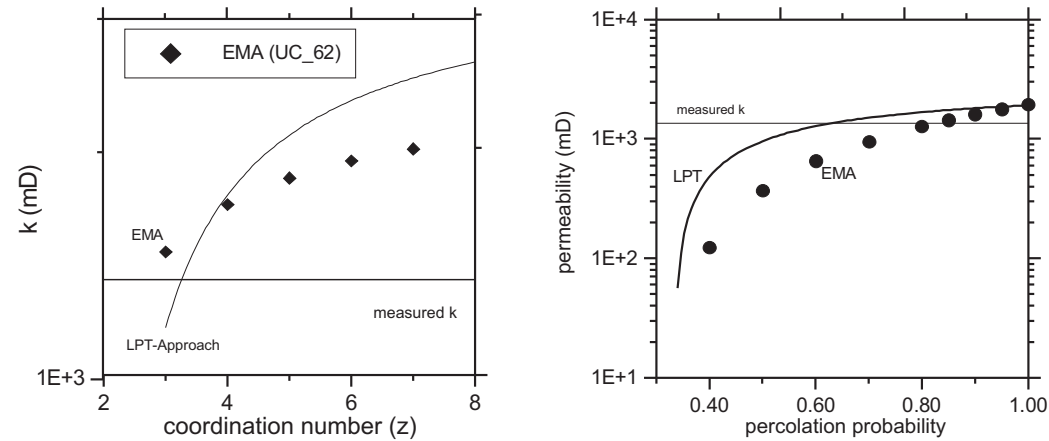
$$\text{dengan, } k_o = \int_0^1 \frac{h S^2}{\phi^3} \lambda(\phi, S) \mu(\phi, S) d\phi dS, \quad p_c = \int_0^1 \lambda(\phi, S) \mu(\phi, S) d\phi dS,$$

$p_c = \frac{2}{z}$ ,  $\mu$  adalah distribusi porositas lokal,  $\lambda$  adalah probabilitas perkolasi lokal. Teori porositas lokal telah diterapkan untuk beberapa kasus, antara lain estimasi dispersi konstanta dielektrik (Hansen dkk., 1993; Haslund dkk., 1994; Hilfer dkk., 1994) dan permeabilitas (Fauzi dkk., 1996; Fauzi, 1998).

Fauzi dkk (2002) melakukan modifikasi terhadap Pendekatan Medium Efektif (PME) yang digunakan Hilfer (1992) dalam mengembangkan TPL, untuk mempertimbangkan bilangan koordinasi dan probabilitas perkolasi, sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut (Fauzi dkk, 2002):

$$f(k) = \frac{k_{eq} \left(\frac{z}{2} \lambda - 1\right)}{\left(\frac{z}{2} - 1\right) k_p(k)} dk = 0 \dots\dots\dots (7)$$

dengan  $k_p = \frac{\phi_k^3}{h f S^2} \frac{(L^*)^2}{L}$ , dimana  $L^*$  adalah optimum sel yang diperoleh dari fungsi entropi ataupun fungsi korelasi dua titik (Fauzi, 2002). Dalam persamaan 7 di atas, probabilitas perkolasi dan bilangan koordinasi secara eksplisit terangkum dalam satu persamaan. Dengan persamaan ini pengaruh bilangan koordinasi dan probabilitas perkolasi dapat dilihat dengan relatif mudah, seperti pada gambar 11.



**Gambar 11.** Pengaruh bilangan koordinasi dan probabilitas perkolasi terhadap penghitungan permeabilitas menurut TPL dan PME.

#### 4. PEMODELAN STRUKTUR MIKRO BATUAN

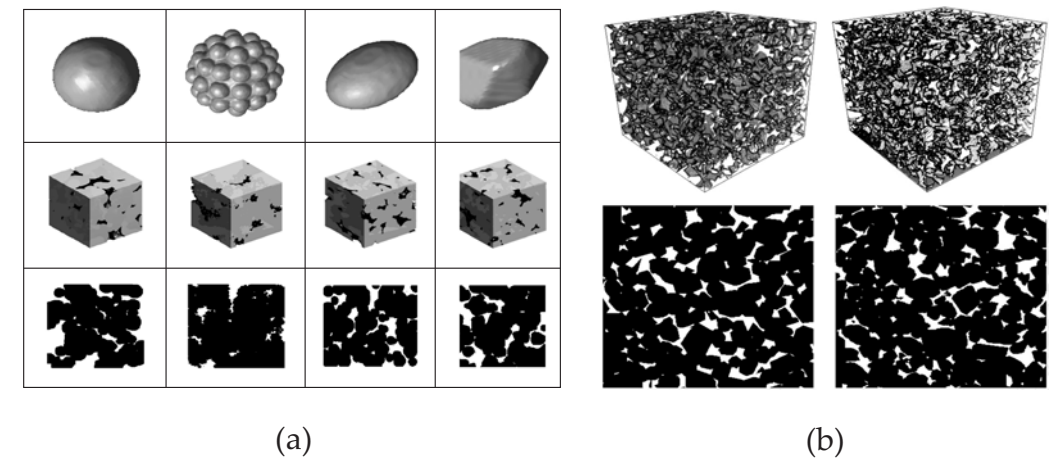
Seperti kita ketahui bahwa kadang sampel batuan tidak dapat diperoleh dengan mudah atau memerlukan biaya yang tidak murah. Selain itu berdasarkan hasil pengukuran, ada beberapa fenomena fisis yang belum dapat dimengerti dengan baik bahkan kontroversial. Untuk menutupi kekurangan dan sekaligus dalam upaya memahami proses atau mekanisme yang terjadi dalam pori batuan, para peneliti mengembangkan model struktur mikro batuan. Melalui pemodelan pula, diharapkan prediksi sifat fisis dapat dilakukan dengan mudah, murah dan cepat.

##### 4.1. Model Butiran Random

Pemodelan mikrostruktur batuan dapat dilakukan dengan berbagai cara atau metoda, banyak model telah dikembangkan untuk meniru

batuan sesungguhnya (Latief dkk., 2010a; Okabe & Blunt, 2004; Bakke & Oren, 1997).

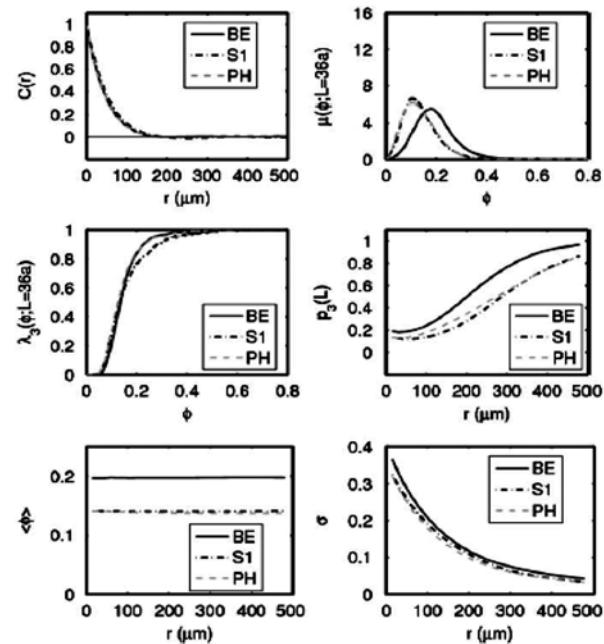
Model dasar yang digunakan dapat bervariasi disesuaikan dengan jenis batuan yang akan dimodelkan, mengingat butiran dasar penyusun batuan juga bervariasi. Beberapa model dasar yang sering digunakan dan hasil pemodelan antara lain ditunjukkan pada gambar 12 (Latief dkk., 2010b):



**Gambar-12.** Model dasar bola, pigeon-hole, elip, dan poligon (a). Gambar (b) memperlihatkan hasil pemodelan dan citra batuan asli (Latief dan Fauzi, 2012; Latief dkk., 2010b).

Gambar 12 memperlihatkan bahwa secara kualitatif, hasil citra model yang dikembangkan mirip dengan citra batuan asli. Karakterisasi besaran yang digunakan sebagai kriteria kemiripan model dengan batuan nyata antara lain fungsional Minowski, fungsi korelasi dua titik, perkolasi

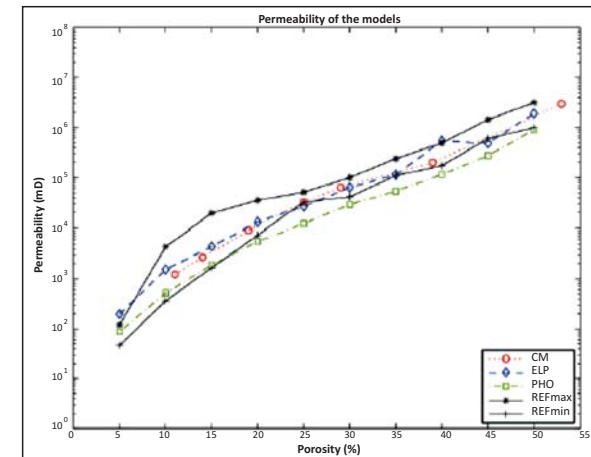
lokal, dan porositas lokal, sebagai contoh ditampilkan pada gambar 13 (Latief dkk., 2010).



Gambar 13. Karakterisasi model batuan.

Berdasarkan model di atas, selain karakteristik yang juga menyerupai batuan asli, besaran fisis hasil estimasi dari model dapat mendekati hasil pengukuran, seperti contoh gambar 14 berikut (Latief & Fauzi, 2012). Gambar 14 menunjukkan bahwa sebagian besar model memberikan perkiraan permeabilitas yang berada dalam rentang harga permeabilitas berbagai sampel batuan.

**Keterangan gambar 13:** Fungsi korelasi dua titik ( $C(r)$ ), distribusi lokal porositas ( $\mu$ ), lokal perkolasi ( $\lambda$ ), total fraksi perkolasi ( $p$ ), rata-rata distribusi lokal porositas ( $\langle\phi\rangle$ ) dan variansi distribusi porositas lokal ( $\sigma$ ) masing-masing untuk batuan pasir Berea (BE), sampel S1 (S1) dan model pigeon-hole (PH) (Latief dkk., 2010)

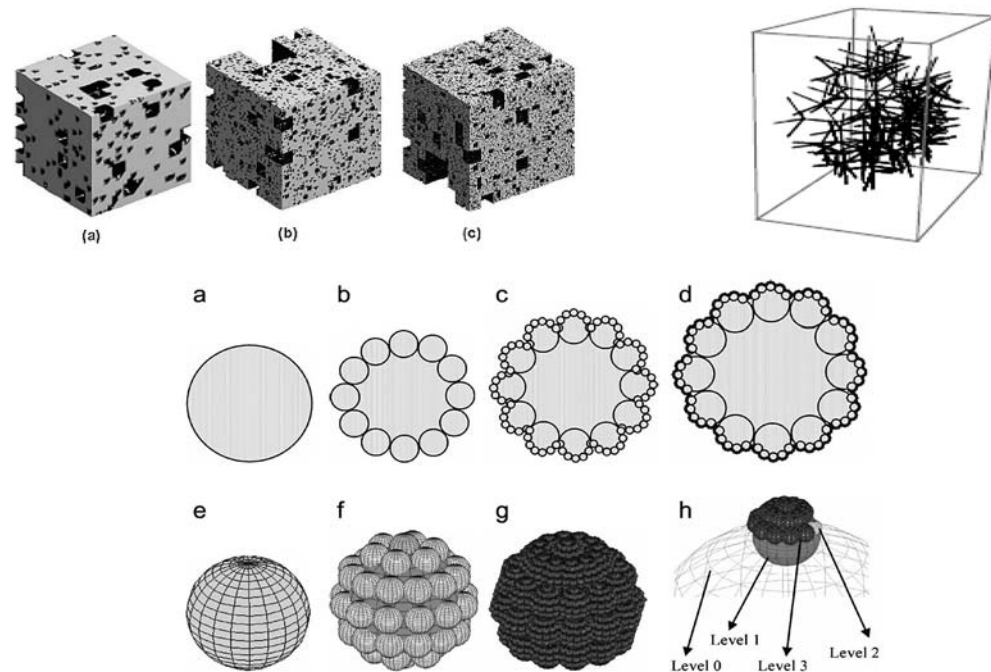


Gambar 14. Komparasi permeabilitas berdasarkan model dan hasil pengukuran sampel (Latief & Fauzi, 2012).

#### 4.2. Model Fraktal

Dalam majalah *Physics Today*, yang terbit pada bulan Desember 1988, dengan isu khusus tentang material tak beraturan, Wong (1988) mengemukakan: *The Statistical Physics of Sedimentary Rocks: 'The complexity of million-year-old sedimentary rock is being unraveled by such modern concepts of random systems as fractals, percolation and diffusion-limited growth'*. Diawali oleh Mandelbrot (1984) mengenai konsep fraktal, banyak peneliti yang mengkaji batuan dengan memanfaatkan konsep fraktal. Dimensi fraktal dari batuan dilaporkan beberapa peneliti berkisar antara 2.4 – 2.7 (Pape dkk., 2000; Krohn dan Thompson, 1986; Feranie dkk., 2011). Dengan memanfaatkan teknik *box-counting*, beberapa batuan hasil rekonstruksi tiga dimensi dapat dengan mudah ditentukan dimensi fraktal dari batuan tersebut.

Pemodelan struktur mikro batuan dengan fraktal banyak dilakukan oleh peneliti sebagai contoh dapat dilihat pada gambar 15.



**Gambar 15.** Model fraktal 3 dimensi dengan karpet serpinski dan retakan (gambar paling atas) dan pigeon-hole (gambar bawah a-h) (Feranie, 2011; Latief dkk, 2011).

## 5. FISIKA BATUAN DIGITAL (*DIGITAL ROCK PHYSICS*)

Perkembangan komputer dan komputasi yang pesat telah mendorong kemajuan di bidang fisika batuan, sehingga saat ini berkembang dengan pesat *digital rock physics* (fisika batuan digital). Perkembangan dan prospek masa depan fisika batuan digital banyak dibahas tidak saja dalam makalah-makalah ilmiah namun juga dalam majalah bisnis antara lain *Pittsburgh Business Times*, edisi Jum'at 16 Desember 2011 dengan reporter

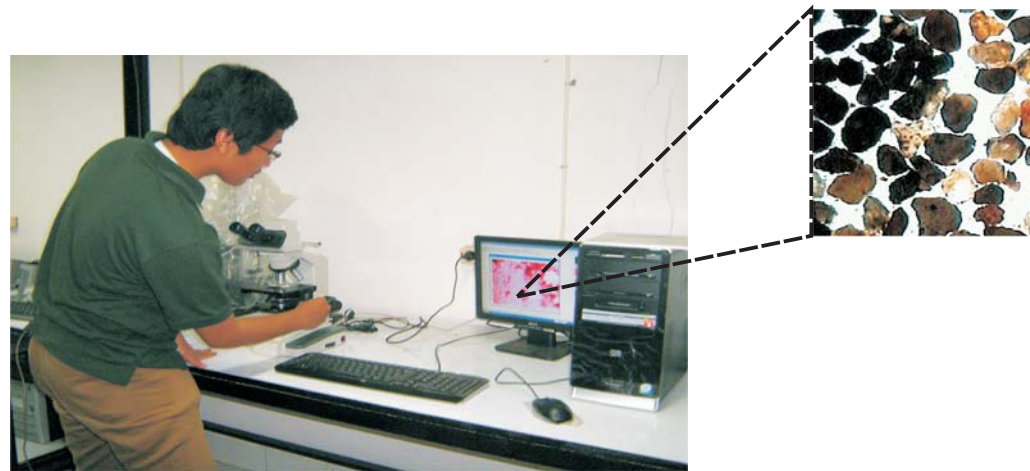
Anya Litvak (2011). Kemajuan fisika batuan digital telah mendorong berdirinya beberapa industri yang berasal atau didukung oleh kelompok riset di universitas, seperti:

- <http://www.ingrainrocks.com/digital-rock-physics-lab/> (berdiri 2008, diawali dari *Rock Physics Research Group*, Universitas Stanford, USA).
- [http://www.digitalcore.com.au/corporate\\_profile/corporate\\_overview.php](http://www.digitalcore.com.au/corporate_profile/corporate_overview.php) (berdiri 2009, didukung oleh para peneliti di ANU dan UNSW, Australia).
- [http://www.numericalrocks.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=77&Itemid=35](http://www.numericalrocks.com/index.php?option=com_content&task=view&id=77&Itemid=35) (Norwegia, berdiri tahun 2004 dan pada tahun 2012 bergabung dengan digital core Australia).

Fisika batuan digital pada dasarnya memanfaatkan peralatan yang menghasilkan data digital untuk kemudian dilakukan analisa dan kajian terkait dengan sifat fisis batuan. Beberapa besaran fisika batuan dapat diestimasi berdasarkan citra digital, misalnya: porositas, luas permukaan spesifik yang merupakan besaran utama untuk menghitung permeabilitas. Permeabilitas dapat juga diperoleh secara 'langsung' dengan melakukan pemodelan aliran fluida ke dalam citra digital batuan (Koplik dkk, 1984; Berryman & Blair (1986; 1987); Lock dkk, 2002; Fauzi dkk (1998; 2002; 2011); Keehm dkk., 2004). Beberapa tahun terakhir juga mulai berkembang analisa citra digital untuk kajian sifat fisis batuan yang lain seperti sifat elastik (Knacksted dkk (2006; 2009); Arns dkk., 2002).

### 5.1. Estimasi Permeabilitas dari Data Citra Batuan

Citra digital dari struktur mikro batuan dapat diperoleh dengan mudah dari sayatan tipis dan mikroskop yang tersambung dengan kamera digital. Sebagai contoh dapat dilihat pada gambar 16 berikut:



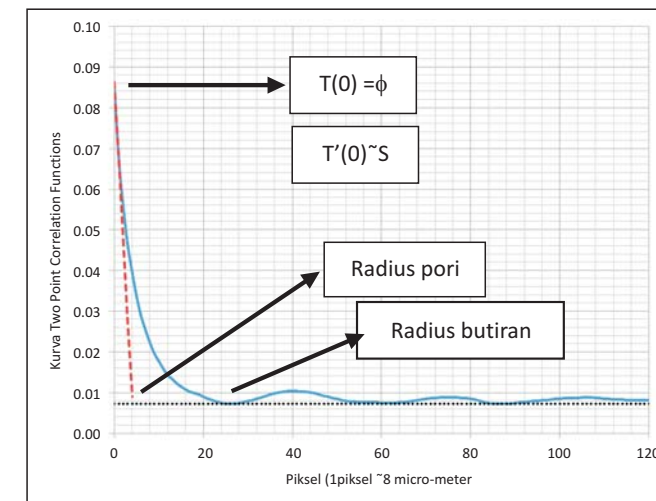
Gambar 16. Mikroskop dengan kamera dan contoh citra digital.

Berdasarkan citra digital batuan dapat diperoleh dengan cukup mudah besaran fisis seperti porositas dan luas permukaan spesifik, misalnya melalui fungsi korelasi dua titik (*two point correlation functions*) yang dapat dinyatakan dalam persamaan 8 (Berryman dan Blair (1985; 1986)).

$$T(m,n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i_{max}} \sum_{j=1}^{j_{max}} f_{ij} f_{i+m,j+n}, \text{ dimana } f_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \text{ didalam padat} \\ 1 & \text{jika } x \text{ didalam pori} \end{cases} \dots (8)$$

Dari fungsi di atas, kita dapat memperoleh porositas dan luas permukaan spesifik, yaitu  $T'(0)$  yang sebanding dengan luas permukaan spesifik dan

$T(0)$  yang tidak lain adalah porositas dari sampel. Hanya dengan satu fungsi, dapat diperoleh dua besaran penting, sehingga permeabilitas dapat dihitung. Contoh grafik fungsi korelasi dua titik dapat dilihat pada gambar 17. Selain porositas dan luas permukaan spesifik, kurva korelasi dua titik ini juga dapat dimanfaatkan untuk estimasi rata-rata ukuran butiran dan radius pori (Blair dkk, 1993).



Gambar 17. Fungsi korelasi dua titik.

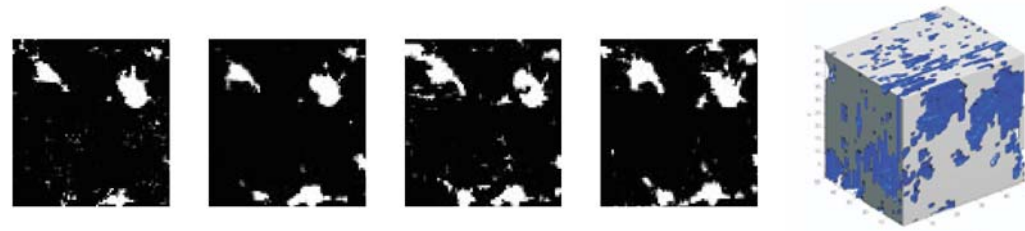
Minimum pertama dari fungsi tersebut juga dapat digunakan sebagai ukuran sel optimal dalam estimasi besaran fisis atau untuk pemilihan sel optimum dalam renormalisasi (Fauzi, 2011).

### 5.2. Rekonstruksi 3 Dimensi

Dengan kemajuan peralatan dan perangkat pendukung lainnya, citra 3 dimensi dari struktur mikro batuan dapat dihasilkan dengan relatif

mudah, antara lain melalui penyayatan serial atau x-ray-ct-scan.

Dengan melakukan penyayatan beberapa kali dan kemudian dilakukan penyusunan dapat diperoleh citra 3 dimensi dari struktur pori batuan, sebagai contoh dapat dilihat pada gambar 18 berikut:

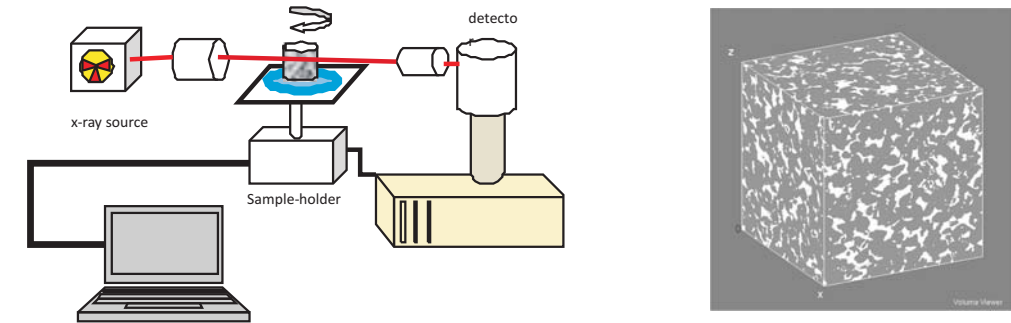


**Gambar 18.** Rekonstruksi dari sayatan bersusun (Fauzi & Nomeira, 2007; Fauzi & Latief, 2009).

Berdasarkan data rekonstruksi ini dapat dihitung besaran-besaran fisis dengan memanfaatkan analisa citra (Keehm, 2004; Fauzi dkk, 2007).

Dengan memanfaatkan peralatan x ray ct-scan, rekonstruksi 3 dimensi struktur pori batuan dapat dilakukan tanpa merusak sampel (*non-destructive method*). Gambar 19 memperlihatkan skema peralatan tomografi sinar-X dan contoh hasil rekonstruksi struktur pori. Berdasarkan citra ini banyak besaran mikro struktur yang dapat diperoleh, seperti bilangan koordinasi, ukuran pori, dan lain-lain. Bilangan kordinasi berdasarkan estimasi dari rekonstruksi 3 dimensi berkisar dari 0 sampai 10, dengan puncak di sekitar 3 dan 4. Berdasarkan struktur 3 dimensi juga dapat didefinisikan radius dan leher pori yang berperan dalam aliran fluida (Dong & Blunt, 2009; Al-kharusi & Blunt,

2007). Tortuositas yang menggambarkan panjang jejak aliran dapat pula dihitung berdasarkan data digital ini (Fauzi dkk., 2007).



**Gambar 19.** Skema peralatan tomografi sinar-X dan hasil citra batuan.

### 5.3. Estimasi Modulus Elastik Berdasarkan Data Citra Batuan

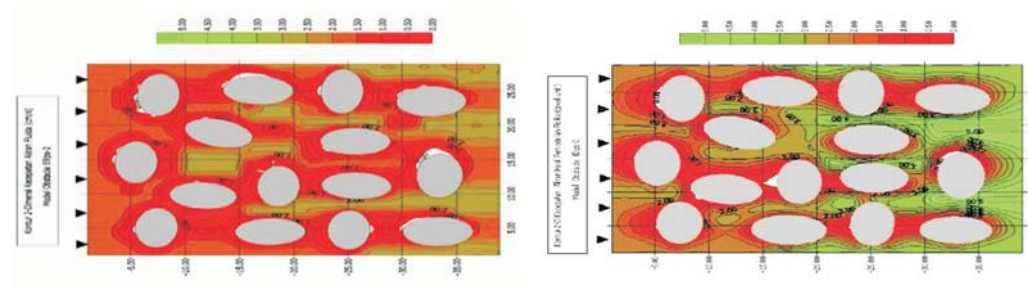
Estimasi parameter elastik dari citra digital saat ini juga mulai dikembangkan oleh para peneliti, dan hasilnya menunjukkan bahwa estimasi yang diperoleh mendekati hasil eksperimen meskipun masih belum sempurna, sedangkan pendekatan lain seperti *Self consistent model (SCA)*, *Differential Effective Medium* dan pendekatan Hashin-Strikman masih jauh dari hasil eksperimen (Arns dkk., 2002).

## 6. PEMODELAN ALIRAN FLUIDA DALAM BATUAN

Alira fluida dalam media berpori banyak dikaji oleh berbagai peneliti, antara lain para ahli reservoir, material, air tanah, dan porous media. Beberapa tahun terakhir, pemodelan aliran fluida dalam batuan berpori

banyak dilakukan dengan menerapkan pendekatan diskrit seperti LGA (automata gas kisi) dan LBM (*Lattice Boltzmann Method*). Pendekatan LBM untuk memodelkan aliran fluida tidak berangkat dari penyelesaian persamaan Navier-Stokes, tetapi berdasarkan pada model tumbukan. Melalui pendekatan ini, pemodelan aliran fluida menjadi lebih sederhana dan dapat mengakomodasi bentuk medium berpori yang sangat kompleks. LGA dan LBM untuk kajian geometri pori telah dikembangkan oleh banyak peneliti antara lain Frisch dkk. (1986); Rothman & Zaleski (1984); Heijs & Lowe (1995); Koponen (1998); Okabe & Blunt (2004); Latief & Fauzi (2007).

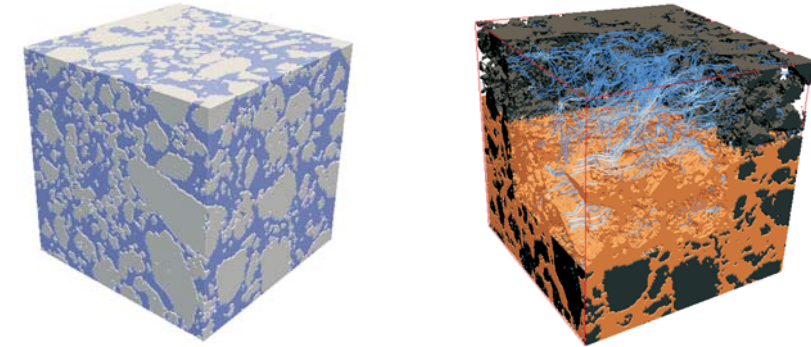
Pemodelan LGA dan contoh komparasi antara model dengan percobaan dapat dilihat pada gambar 20 berikut (Fauzi dkk., 2005):



**Gambar 20.** Perbandingan antara pemodelan LGA (kiri) dan percobaan laboratorium (kanan).

Model LGA memiliki kelemahan misalnya adanya derau statistik, sehingga beberapa peneliti mencoba memperbaiki kelemahan tersebut dengan mengembangkan LBM. Contoh hasil pemodelan menggunakan

pendekatan LBM untuk aliran fluida dalam pori batuan yang diperoleh dari tomografi sinar-x, dapat dilihat pada gambar 21.



**Gambar 21.** Hasil rekonstruksi tomografi dengan sinar-X struktur pori batuan dan pola aliran fluida dalam pori (Latief dkk., 2012).

Dengan LBM, penghitungan permeabilitas dari batuan dapat dilakukan dengan cukup mudah (Latief dkk, 2012). Dalam buku *flow and transport in porous media and fractured rocks*, Sahimi (1995) menyimpulkan bahwa metoda LGA dan LBM saat ini semakin canggih dan realistis, sehingga diperkirakan akan menggantikan metoda beda hingga di masa datang untuk aliran fluida dalam pori batuan.

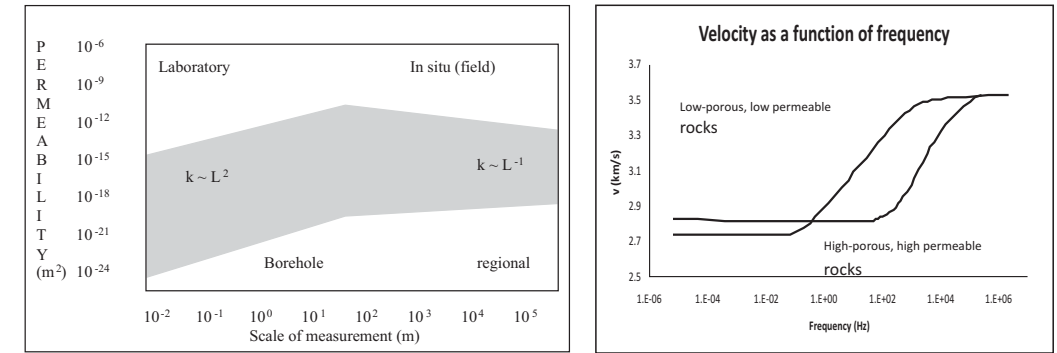
## 7. PENSKALAN (*UPSCALING*)

Masalah skala atau ukuran dan pencarian harga ekuivalen besaran fisika ukuran besar yang terdiri dari kumpulan ukuran yang lebih kecil merupakan isu yang cukup banyak dikaji oleh para peneliti (Jackson dkk.,

2003; Berryman, 2003b). Hal ini dapat dimaklumi karena harga besaran fisika pada umumnya bergantung pada ukuran (*scale*). Sampai saat ini masalah *scaling* tersebut masih belum sepenuhnya dimengerti, sebagai konsekwensinya maka besaran fisika yang dijadikan masukan untuk pemodelan dan estimasi skala besar (*field scale*) sering diperoleh dari pengukuran skala kecil (seperti *micro* atau *core scale*). Dvorkin dan Coper (2005) mengemukakan bahwa transformasi langsung dan tanpa persyaratan tertentu dari impedansi seismik tanpa memperhitungkan pengaruh skala akan menghasilkan kesalahan. Permasalahan utama dari suatu sistem heterogen adalah bahwa kelakuan skala makro tidak cukup untuk dideskripsikan dengan persamaan yang berlaku pada skala mikro (Berryman, 2003b). Besaran fisis juga dipengaruhi oleh adanya syarat batas, maka harga besaran fisis pada umumnya bergantung pada ukuran. Untuk memecahkan masalah ini, para peneliti mengkaji bagaimana agar dapat melakukan *upscaling* sehingga hasil yang diperoleh menjadi lebih baik.

Clauser (1992) meneliti kompilasi hasil pengukuran permeabilitas pada ukuran yang berbeda untuk batuan kristalin beberapa lokasi di berbagai belahan dunia dan data dari rujukan untuk skala yang berbeda (skala laboratorium sampai dengan skala lapangan). Gambaran ilustrasi hasil yang memperlihatkan variasi skala untuk permeabilitas dan kecepatan gelombang seismik berdasarkan sifat dispersinya disajikan pada gambar 22. Fauzi (2007) juga menunjukkan pengaruh besar ukuran

pada pengukuran porositas dan permeabilitas dari citra batuan. Hal tersebut menunjukkan pengaruh skala atau ukuran pada sifat fisis batuan.



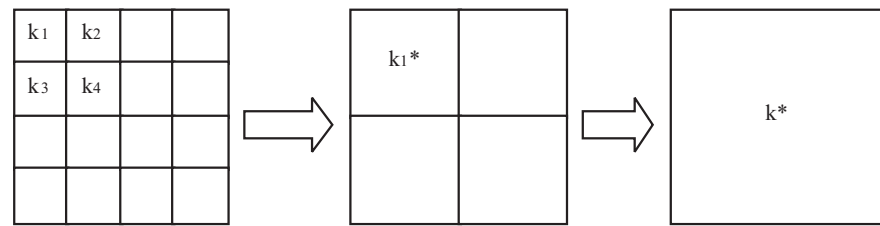
**Gambar 22.** Ilustrasi variasi permeabilitas rekahan (*fractured rocks*) sebagai fungsi skala (penggambaran kembali berdasarkan Renshaw (1998) dan Vila et al. (1996)) dan Ilustrasi dispersi kecepatan perambatan gelombang elastik (digambarkan kembali berdasarkan hasil Moerig, 1994; Batzle dkk, 2006).

Beberapa metoda, teknik atau pendekatan *upscaling* untuk memperoleh nilai besaran fisis ekuivalen yang sering digunakan antara lain: perata-rataan volume, homogenisasi, dan pendekatan renormalisasi. Pendekatan sederhana namun cukup banyak diterapkan adalah perata-rataan seperti *arithmetic averaging*, *geometric averaging*, dan *harmonic averaging*. Pada umumnya perata-rataan ini menjadi batas atas dan batas bawah dari harga efektif atau ekuivalen suatu besaran fisis.

Selain perata-rataan, pendekatan atau metoda homogenisasi banyak pula dikembangkan para peneliti, antara lain adalah pendekatan medium efektif, seperti: *Reuss*, *Voigt*, *self consistent method*, *differential effective medium* (DEM) (Mavko et al., 1998).



Pendekatan lain yang banyak diterapkan dan cukup mudah untuk mengkaji anisotropi adalah metoda renormalisasi. Pendekatan renormalisasi sering digunakan dalam mencari harga permeabilitas ekivalen (Aharony, 1991; King, 1989; Fauzi, 2011). Teknik renormalisasi dapat dilihat pada gambar 23 berikut:



Gambar 23. Ilustrasi pendekatan renormalisasi.

Harga permeabilitas ekivalen diperoleh dari harga permeabilitas pada ukuran kecil melalui prinsip jaringan resistor, selain itu anisotropi dari permeabilitas juga dapat diperoleh dengan mudah (Fauzi, 2011).

## 8. PENELITIAN DI LABORATORIUM FISIKA BATUAN FMIPA-ITB

Kajian fisika batuan terus dilakukan di Laboratorium Fisika Batuan FMIPA-ITB. Sejak tahun 1997, sekitar 11 mahasiswa S3, 21 mahasiswa S2, dan 48 mahasiswa S1 telah terlibat dalam penelitian tugas akhir, thesis dan disertasi. Beberapa topik kajian yang sedang dan direncanakan dilakukan di laboratorium Fisika Batuan meliputi:

### 8.1. Fisika Batuan Digital (*Digital Rock Physics*)

Di laboratorium fisika batuan FMIPA ITB, fisika batuan digital (*digital rock physics*) telah dikembangkan untuk estimasi besaran fisis berdasarkan analisa data citra, karakterisasi sampel dan kajian mekanisme fisis fluida dalam pori batuan.

Selain itu, kajian gelombang elastik dan estimasi besaran elastik berdasarkan pada citra digital juga mulai dikembangkan. Penelitian bidang ini akan memberikan kontribusi pada aplikasi praktis bidang seismik dan pemahaman terhadap beberapa fenomena fisis yang masih belum dipahami dengan baik.

Penelitian ke arah *digital rock physics* yang dilakukan di Laboratorium Fisika Batuan FMIPA ITB telah mendapat perhatian di kalangan profesi geofisika Indonesia, terbukti dengan penghargaan yang diberikan oleh HAGI (Himpunan Ahli Geofisika Indonesia), sebagai makalah dengan presentasi terbaik pada Pertemuan Ilmiah Tahunan (PIT-HAGI) tahun 2009 di Yogyakarta untuk makalah kami yang berjudul "*Physical and computer modeling for 3-D pore structure of rocks and its characterization*". Selain itu, telah dikembangkan pula kamera lubang bor, meskipun masih perlu penyempurnaan.

### 8.2. Pemodelan Struktur Mikro Batuan

Pemodelan struktur mikro batuan dikembangkan untuk melakukan kajian besaran fisis fisika batuan dengan lebih murah dan jumlah model

sampel yang hampir tidak terbatas sehingga akan melengkapi sampel batuan nyata yang terbatas. Pemodelan yang dilakukan di Laboratorium Fisika Batuan FMIPA-ITB mencakup pemodelan granular, poligon, model pengotor (seperti lempung), retakan, dan lain-lain. Pemodelan ini sangat bermanfaat untuk prediksi sifat fisis batuan.

### 8.3. Pemodelan Aliran Fluida

Pemodelan aliran fluida dalam batuan nyata untuk kasus multi fasa dengan memanfaatkan pendekatan baru atau modern, seperti LBM (*Lattice Boltzman Method*), dinamika molekular, SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*), dan sejenisnya sedang dan terus akan dikembangkan di laboratorium fisika batuan FMIPA-ITB. Penelitian pada topik ini dimasa datang akan semakin menjanjikan dan mungkin dapat merubah pendekatan yang saat ini berkembang. Jika kemampuan komputer memadai, tidak menutup kemungkinan bahwa aliran fluida dalam batuan untuk ukuran besar dapat dimodelkan dengan cepat.

Selain itu, metoda baru di atas juga cukup mudah dapat dikembangkan dan sangat menjanjikan untuk berbagai keperluan seperti prediksi aliran lava yang merupakan kajian penting untuk wilayah di Indonesia.

Kajian lain terkait dengan aliran fluida adalah interaksi pada bidang batas. Kajian interaksi bidang batas, terutama interaksi antar dan antara padatan dengan fluida akan sangat bermanfaat untuk dapat memahami

mekanisme fisis terjadinya beberapa fenomena alam, seperti erosi, longsor, dan lain-lain. Prediksi jangkauan longsor dan erosi dapat diperkirakan dengan melakukan pengembangan metoda atau pendekatan baru di atas.

Dengan demikian kontribusi yang akan dihasilkan dari penelitian dalam topik ini diharapkan dapat mendorong kemajuan dunia industri selain terutama akan mendorong perkembangan keilmuan fisika yang akan dapat menjelaskan beberapa fenomena yang masih belum dapat diterangkan dengan baik.

Pada masa mendatang, jika bidang ilmu ini dapat dikuasai dengan baik dan berkembang dengan pesat di Indonesia, maka dapat membantu industri untuk analisa struktur mikro batuan. Selain itu, jika ilmu dalam bidang fisika batuan ini dikembangkan dengan pesat di Indonesia, diharapkan akan mempunyai peran yang signifikan dalam skala internasional, oleh karena masih banyak fenomena yang belum terungkap.

## 9. PENUTUP

Perkembangan dunia digital disertai perkembangan metoda diskrit serta pendekatan-pendekatan atau konsep baru akan sangat mendorong perkembangan ilmu fisika batuan yang pada gilirannya dapat membantu pemahaman mekanisme fisis yang terjadi dalam batuan selain akan

bermanfaat dalam bidang praktis atau terapan.

Penguasaan bidang fisika batuan tentunya akan mendorong kemandirian bangsa antara lain dalam mendukung eksplorasi sumber daya, mitigasi bencana, hidrologi, lingkungan, dan lain-lain. Selain itu, mengingat masih banyaknya fenomena alam yang belum dapat dijelaskan, penguasaan dalam hal ini akan membuka kemungkinan untuk dapat menemukan hal baru atau menjelaskan yang selama ini masih menjadi misteri.

## 10. UCAPAN TERIMA KASIH

Pertama, penulis menghaturkan puji syukur kehadirat Allah SWT atas hidayah, segala nikmat karunia dan rahmat-Nya termasuk jabatan Guru Besar Institut Teknologi Bandung ini.

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang tinggi penulis sampaikan kepada segenap pimpinan dan seluruh anggota Majelis Guru Besar Institut Teknologi Bandung atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menyampaikan pidato ilmiah di hadapan sidang yang mulia ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Rektor Institut Teknologi Bandung, Prof. Akhmaloka beserta para wakil rektor dan seluruh jajarannya, pimpinan dan anggota senat akademik ITB atas segala dukungannya. Kami mengucapkan terima kasih kepada seluruh mantan dekan FMIPA, terutama Prof. Pudji Astuti, serta dekanat FMIPA, yang

telah mendukung penulis untuk mengajukan usulan guru besar. Terima kasih secara khusus kami sampaikan kepada Prof. Edy Tri Baskoro, Prof. Salman M. N. M., Prof. Andreas Hoerdt (Universitas Braunschweig, Jerman), dan Prof. Buelent Tezkan (Universitaet zu Koeln, Jerman) yang telah memberikan dukungan untuk usulan guru besar kami.

Kami mengucapkan banyak terima kasih kepada Prof. Lilik Hendrajaya yang telah membimbing dan membina kami sejak saat mahasiswa di ITB. Kami mengucapkan terima kasih kepada tim pembimbing selama sekolah di Universitaet zu Koeln, yaitu Prof. F. M. Neubauer, Prof. Keeva Vozoff, Prof. Dr. A. Hoerdt. Begitu pula kepada para peneliti yang membantu penelitian kami, terutama Prof. Rudolf Hilfer dari ICA-Universitas Stuttgart - Jerman, dalam diskusi mengenai teori yang dikembangkan yaitu *Local Porosity Theory* dan kerjasamanya hingga saat ini, juga kepada Prof. Ugur Yaramanci, Dr. Johannes Kulenkampf, Dr. Wolfgang Debschuetz ketika penelitian di TU Clausthal - Jerman. Tidak lupa kami mengucapkan terima kasih kepada Prof. M. T. Zen dan Dr. Helmut Gebert yang telah membantu kami sehingga penulis berkesempatan menimba ilmu ke Jerman melalui beasiswa DAAD.

Kami mengucapkan terima kasih atas bimbingan para senior dan guru kami di Fisika, Prof. Hariadi P. Soepangkat, Prof. Dr. Waloejo Loeksmanto, Prof. The Houw Liong, Prof. Tjia May On, Prof. Sri Jatno (alm.), Prof. Marsongkohadi (alm.), Prof. P. Silaban, dan Prof. Benny Suprpto. Kepada rekan seperjuangan ketika diberi amanah menjalankan

departemen atau prodi fisika, yaitu Prof. Triyanta, Dr. Pepen Arifin dan Prof. Khairurrijal, Dr. A. Waris dan Dr. Widayani, penulis mengucapkan terima kasih. Kepada Prof. Mitra Djamal, Prof. Mikrajuddin, Prof. Zaki Su'ud, Prof. Freddy P. Zen, Prof. Toto Winata, dan Prof. Sukirno (alm.), serta seluruh rekan-rekan di FMIPA, terutama fisika, kami mengucapkan terima kasih atas kerjasamanya. Seluruh anggota KK Fisika Bumi dan Sistem Kompleks, Prof. Lilik Hendrajaya, Prof. Doddy Sutarno, Dr. Gunawan Handayani, Dr. Neny Kurniasih, Dr. Alamta Singarimbun, Dr. Linus A. Pasasa, Dr. Bagus Endar B. N., Dr. Enjang J. Mustopa, Dr. Wahyu Srigutomo, Dr. Nurhasan, Dr. Acep Purqon, Dr. Fourier D. E. Latief, terima kasih atas kebersamaannya. Seluruh rekan kerja di FMIPA baik dosen maupun karyawan yang tidak dapat kami sebut satu persatu, kami mengucapkan terima kasih atas dukungan dan kerjasamanya.

Tidak lupa saya ingin mengucapkan terima kasih kepada rekan sejak mahasiswa hingga saat ini, yaitu Prof. Satria Bijaksana atas kebersamaannya. Kepada seluruh mahasiswa bimbingan kami, baik S3, S2 maupun S1, yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu, kami mengucapkan terima kasih atas diskusi dan kerjasamanya.

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang tinggi kami sampaikan kepada para guru kami di Madrasah Wajib Belajar Payaman, SDN I Payaman, SMPN 3 Magelang dan SMAN 1 Magelang serta guru nonformal kami KH. A. Shabikun (alm.) dan KH. Mawali (alm.) atas jasanya yang sangat berharga bagi kami.

Penulis mengucapkan terima kasih setinggi-tingginya kepada kedua orang tua kami yang kami hormati dan kami cintai, KH. Umaeri (alm.) dan Hj. Siti Fauzatun, mertua kami, H. Karis (alm.) dan Siti Ismilah yang tiada henti mendoakan dan berjuang untuk kami tanpa mengharapkan balasan dari kami. Semoga beliau mendapat ridlo dari Allah SWT. Kepada adik-adik kami Amirotul Muflikhah, Imron Fathoni, SH., Achmad Faizin, SE., Ak., MSi, kami mengucapkan banyak terima kasih atas kebersamaannya yang tidak terlupakan.

Secara sangat khusus penulis mengucapkan terima kasih kepada isteri yang kami sayangi Dra. Issuilaningtias, ketiga anak kami Muhammad Al-Falah Fauzi, Naf'an Muttaqin Fauzi, dan Ibrahim Asysyafi'i Fauzi. Mereka dengan sabar dan tulus ikhlas menyertai penulis dalam suka dan duka. Semoga menjadi amal untuk bekal menghadapNYA.

## 11. DAFTAR PUSTAKA

- Archie, G. E., 1950, Introduction to petrophysics of reservoir rocks, Bulletin of the American Association of Petroleum Geologist, Vol. 34., No. 5.
- Aharony, A., Hinrichsen, E.L., Hansen, A., Feder, J., Jssang, T., Hardy, H.H., 1991, Effective renormalization group algorithm for transport in oil reservoirs, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 177 (1-3), pp. 260-266.

Al-Kharusi A. S., M. J. Blunt, 2007, Network extraction from sandstone and carbonate pore space images, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 56, 219–231.

Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics: *Trans., Amer. Inst. Mineral Met.*, 146, 54-62.

Arns, C., M. A. Knacksted, V. W. Pinczewski, 2002, Computational of linear elastic properties from microtomographic images: methodology and agreement between theory and experiment, *Geophysics*, Vol. 67, 1396-1405.

Baechle, G. T., Weger, R. J., Eberli, G. P., Massafero, J. L., Sun, Y. F., 2005 Change of shear moduli in carbonate rocks: implication of Gasmann applicability, *The Leading Edge*.

Bakke S. & P. E. Oren, 1997, 3-D pore-scale modeling of sandstone and flow simulations in pore network, *SPE Journal*, 2, 136.

Bachrach, R., 1998, High resolution shallow seismic subsurface characterization, *Dissertation, Stanford University*.

Batzle, M. L., Han, D-H., Hofmann, R., 2006, Fluid mobility and frequency-dependent seismic velocity-direct measurements, *Geophysics*, Vol. 71, No. 1.

Berg, R. R., 1970, Method for determining permeability from reservoir rock properties, *Trans. Gulf Coast Assoc. Geol. Soc.*, Vol. 20.

Bernabé, Y. , Li, M. , Maineuult, A. , 2010, Permeability and pore connectivity: A new model based on network simulations, *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*.

Berryman, J. G., 1985, Measurement of spatial correlation functions using

image processing techniques: *J. Appl. Phys.*, 57, 2374-2384.

Berryman, J. G. und S. C. Blair, 1986, use of digital image analysis to estimate fluid permeability of porous materials: Application of Two-Point Correlation Functions: *J. Appl. Phys.*, 60, 1930-1938.

Berryman, J. G. und Blair, S. C., 1987, Kozeny-Carman relations and image processing methods for estimating Darcy`s constant: *J. Appl. Phys.*, 62, 2221-2228.

Berryman, J. G., 2003a, Electrokinetic effects and fluid permeability, *Physica B*, 338, 270-273.

Berryman J. G., 2003b, Scale-up in poroelastic systems and applications to reservoirs, 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, University of Washington, Seattle.

Blair, S. C., P. A. Berge, J. G. Berryman, 1993, Two-point correlation functions to characterize microgeomerty and estimate permeabilities of synthetic and natural sandstones, *Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California 94551*.

Castagna, J. P., M. L. Batzle, R. L. Eastwood, 1985, Relationship between compressional wave and shear wave velocities in clastic silcate rocks, *Geophysics*, 50, 571-581.

Castagna, J. P., 1993, AVO analysis – tutorial and review, in *Offset dependent reflectivity – Theory and Practice of AVO analysis*, J. P. Castagna and M. Backus, eds., *Investigation in geophysics*, No. 8., SEG, Tulsa, Oklahoma, 3-36.

Castillo P. & Prasad, M., 2012, *Petrophysical Description of Tight Gas Sands (under review)*.

Clauser, C., 1992, Permeability of crystalline rocks, *EOS*, 73:233-238.

- Coats, G.R. and Dumanoir, J.L., 1974, "A New Approach to Improved Log-Derived Permeability," *The Log Analyst*, (January-February), pp. 17.
- David, C., Gueguen, Y., Pampoukis, G., 1990, Effective medium theory and network theory applied to the transport properties of rock, *Journal of Geophysical Research*, 95 (B5), pp. 6993-7005.
- Dewar, J., 2001, Rock physics for the rest of us – an informal discussion, *CSEG Recorder*.
- Doyen, P.M., Permeability, 1998, conductivity, and pore geometry of sandstone, *Journal of Geophysical Research*, 93 (B7), pp. 7729-7740.
- Dong H., M. J. Blunt, 2009, Pore-network extraction from micro-computerized-tomography images, *Physical Review E*, 80, 036307.
- Dullien, F. A. L., 1992, *Porous Media: Fluid transport and pore structure*, Academic, New York.
- Dvorkin, J. dan Alkather, S., 2004, Pore fluid and porosity mapping from seismic, *First Break*, Vol. 22.
- Dvorkin J. and Coper R., 2005, Scale in rock physics: caveats and a remedy, report from Stanford University and Rock Solid Images.
- Fauzi, U., Vozoff, K., Neubauer, F. M., und Hördt, A., 1994, Zusammenhänge zwischen hydraulischer Permeabilität und elektrischer Leitfähigkeit: in Bahr, K. und Junge A., (Hrgb.), *Protokol über das 15. Kolloquium „Elektromagnetische Tiefenforschung“*, Höchst.
- Fauzi, U., Hördt, A., Neubauer, F. M., und Vozoff, K., 1996, Permeability estimation of rocks using local porosity theory: 58th annual meeting, *European Association of Geoscientists & Engineers*, Amsterdam, ext. abstract vol.

- Fauzi, U., 1997, *Untersuchungen zur Charakterisierung der Porengeometrie von Gesteinen zur Abschätzung der hydraulischen Permeabilität und des Formationsfaktors mit Hilfe von Bildanalysen*, ISSN 0069-5882. Diterbitkan oleh: Institute of Geophysics and Meteorology, University of Cologne, Germany; 1997. Editor: A. Ebel, M. Kerschgens, F. M., Neubauer, P. Speth.
- Fauzi, U., 1998, Permeability estimation of rocks with the help of image analysis and local porosity theory, *Kontribusi Fisika Indonesia*, vol. 9, no. 1.
- Fauzi, U., 1999, Influence of coordination number on permeability estimation, *Proceeding PIT-HAGI*, Surabaya.
- Fauzi, U., A. Hoerdt and F. M. Neubauer, 2002, Influence of Coordination Number and Percolation Probability on Rock Permeability Estimation, *Geophys. Res. Letters*, Vol. 29, No. 8.
- Fauzi, U., 2002, Permeability estimation based on pore radius and its distribution, *Kontribusi Fisika Indonesia*, Vol. 13, no. 1.
- Umar Fauzi, 2007, *Microstructure Characterization of Pigeon Hole Rock Models at Different Scale: A Preliminary Study*, *Indonesian Journal of Physics*, 18.3, pp. 73-76.
- Fauzi U. dan H. Nomeira, 2008, Reconstruction of 3-dimentional real rocks and its tortuosity estimation, *The 2<sup>nd</sup> International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS)*, Bandung.
- Fauzi, U, T. Ariwibowo, S. Feranie, 2007, Dependence of Tortuosity on Porosity of Rock Models, *Society of Exploration Geophysicists of Japan*, SEGJ, Hokkaido, Japan.
- Fauzi, U., Mulyadi, Bachri A. S., 2005, *Physical and Lattice Gas Automata*

Fluid Flow Modeling in Real Porous Media, Indonesian Journal of Physics, Vol 16, No 3.

- Fauzi, U. , 2011, Estimation of rock permeability and its anisotropy from thin sections using renormalization group approach, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, vol 33 no. 6.
- Feranie, S., 2011, Penyelidikan sifat fraktal dan besaran transport struktur pori 3D batuan dan model fraktal : menger sponges dan IFS model, disertasi, ITB.
- Feranie, S. , Fauzi, U., Bijaksana, S., 2011, 3D fractal dimension and flow properties in the pore structure of geological rocks, Fractals , Volume 19, Issue 3, Pages 291-297.
- Frisch U., B. Hasslacher, and Y. Pomeau, 1986, Lattice gas automata for the Navier-Stokes equations, Phys. Rev. Lett., 56, 1505-1508.
- Gassmann, F., 1951, Ueber die elastizitaet poroesermedien: Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zurich, 96, 1-23.
- Goodway, B., 2001, AVO and Lamé constants for rock parameterization and fluid detection, CSEG Recorder.
- Gueguen, Y., Palciauskas, 1994, Introduction to the physics of rocks, Princeton University Press.
- Han, D. H., 1986, Effect of porosity and clay content in acoustic properties of sandstones unconsolidated sediments, Ph.D. dissertation, Stanford University.
- Hansen, B., Haslund, E., Hilfer, R., und Nøst, B., 1993, Dielectric dispersion measurement of salt water saturated porous glass compared with local porosity theory: Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 290, 185-190.

- Haslund, E., Hansen, B. D., Hilfer, R., und Nøst, B., 1994, Measurement of local porosities and dielectric dispersion for water saturated porous medium: J. Appl. Phys., 76, 5473-5480.
- Heijs, A. W. J. dan C. P. Lowe, 1995, Numerical evaluation of the permeability and the Kozeny constant for two types of porous media, Phys. Rev. E 51, 4346-4352.
- Hilfer, R., 1991, Geometric and dielectric characterization of porous media: Phys. Rev. B, 44, 60-75.
- Hilfer, R., 1992, Local porosity theory for flow in porous media: Phys. Rev. B, 45, 7115-7121.
- Hilfer, R., 1993, Local porosity theory for electrical and hydrodynamical transport through porous media: Physica A, 194, 406-414.
- Hilfer, R., Nøst, B., Haslund, E., Kautzsch, Th., Virgin, B., und Hansen, B. D., 1994, Local porosity theory for the frequency dependent dielectric function of porous rocks and polymer blends: Physica A, 207, 19-27.
- Hilfer, R., 1996, Transport and relaxation phenomena in porous media: advances in chemical physics, XCII, ed. I. Prigogine and Stuart A. Rice, 299-424.
- Hördt, A., R. Blaschek, A. Kemna, N. Zisser, 2007, Hydraulic conductivity estimation from induced polarisation data at the field scale — the Krauthausen case history, Journal of Applied Geophysics 62, 33-46.
- Jackson, M. D., Muggeridge A. H., Yoshida S., Johnson, H., 2003, Upscaling permeability measurements within complex heterolithic tidal sandstones, Math. Geology, Vol. 35, No. 5.
- Katz, A. J. und A. H. Thompson, 1986, Quantitative prediction of permeability in porous rock: Phys. Rev. B, 34, 8179-8181.

Keehm, Y-s., 2003, Computational rock physics: transport properties in porous media and applications, dissertation, Stanford University.

King, P. R., 1989, The Use of Renormalization for calculating effective permeability, *Transport in Porous Media* 4, 37.

Kirkpatrick, S., 1973, Percolation and conduction: *Rev. Mod. Phys.*, 45, 574-588.

Klimentos, T. und McCann, C., 1990, Relationships among compressional wave attenuation, porosity, clay content, and permeability in sandstones: *Geophysics*, 55, 998-1014.

Knacksted, M. A., S. Latham, M. Madadi, A. Sheppard, T. Varslot, C. Arns, 2009, Digital rock physics: 3D imaging of core material and correlations to acoustic and flow properties, *The Leading Edge*, 2009.

Knacksted, M., C. Arns, M. Saadatfar, T. J., Senden, A. Limaye, A. Sakellariou, A. Sheppard, R. M. Sok, W. Schrof, H. Steininger, 2006, Elastic and transport properties of cellular solids derived from three-dimensional tomographic images, *Proceeding of The Royal Society A*, 462, 2833-2862.

Knight, R., Dvorkin, J., Nur, A., 1998, Acoustic signature of partial saturation, *Geophysics*, Vol. 63, No. 1.

Knight, R., 1991, Hysterisis in the electrical resistivity of partially saturated sandstones, *Geophysics*, Vol. 56, No. 12.

Knight R. and R. N.-Hoeksema, 1990, A laboratory study of the dependence of elastic wave velocities on pore scale fluid distribution, *Geophysical Research Letters*, vol. 17, no. 10, pp. 1529-1532.

Koplik, J., 1981, On the effective medium theory of random linear networks, *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 14 (32), no. 018, pp.

4821-4837.

Koplik, J., Lin, C., Vermette, M., 1984, Conductivity and permeability from microgeometry, *Journal of Applied Physics*, 56 (11), pp. 3127-3131.

Koponen, A., 1998, Simulations of fluid flow in porous media by lattice-gas and lattice-Boltzmann methods, Department of Physics, University of Jyvaeskylae,, Disertasi.

Krohn, C. E. und A. H. Thompson, 1986, Fractal sandstone pores: automated measurements using scanning-electron-microscope images: *Phys. Rev. B*, 33, 6366-6374.

Latief F. D. E. and U. Fauzi, 2007, Performance Analysis of 2D and 3D Fluid Flow Modelling Using Lattice Boltzmann Method, *Indonesian Journal of Physics*. 18.2, pp. 47-52.

Latief, F.D.E., Biswal, B., Fauzi, U., Hilfer, R., 2010a, Continuum reconstruction of the pore scale microstructure for Fontainebleau sandstone, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* , Volume 389, Issue 8, Pages 1607-1618.

Latief, F. D. E; U. Fauzi; S. Bijaksana; Y. Bindar, 2010b, Pore Structure Characterization of 3D Random Pigeon Hole Rock Models, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 47, Issue 3, Pages 523-531.

Latief, F.D.E. and Fauzi, U., 2012, Kozeny-Carman and empirical formula for the permeability of computer rock models, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 50, Pages 117-123.

Latief, F. D. E, Z. Irayani, U. Fauzi, 2012, Resolution Dependency of Sandstone's Physical Properties, *SkyScan User Meeting*, Belgium.

Le Ravalec, M., Y. Gueguen, T. Chelidze, 1996, Elastic wave velocities in



partially saturated rocks: saturation hysteresis, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, No. B1, pp: 837-844.

Legchenko, J. M., Baltassat, A. Beauce, J. Bernard, 2002, Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologists, *Journal of Applied Geophysics*, 50, 21-46.

Lock P. A., X. Jing, R. W. Zimmerman, dan E. M. Schlueter, 2002, Predicting the permeability of sandstone from image analysis of pore structure, *J. Appl. Phys.* 92, 6311 (2002).

Mandelbrot, B., 1984, *The fractal geometry of nature*, Henry Holt & Company, New York, 18.

Marion, D., A. Nur, H. Yin, D. Han, 1992, Compressional velocity and porosity in sand-clay mixtures, *Geophysics*, 57, 554-563.

Mavko, G., Mukerji, T., Dvorkin, J., 1998, *The rock physics handbook: tools for seismic analysis in porous media*, Cambridge University Press.

Mavko, G., Nur, A., 1997, The effect of a percolation threshold in the Kozeny-Carman relation, *Geophysics*, 62 (5), pp. 1480-1482.

Moerig, R., 1994, *Untersuchungen zum Zusammenhang von seismischen und lithologischen Parametern sedimentaerer Festgesteine*, Dissertation, Verlag fuer Wissenschaft und Forschung, Berlin.

Okabe, H. & M. Blunt, 2004, Prediction of permeability for porous media reconstructed using multiple-point statistics, *Physical Review A* 70, 066135.

Pape, H., C. Clauser, J. Iffland, 2000, Variation of permeability with porosity in sandstone diagenesis interpreted with a fractal pore space model, *Pure and applied geophysics*, 157, 603-619.

Prasad, M., 2003, Velocity-permeability relations within hydraulic units,

*Geophysics*, v. 68 no. 1 p. 108-117.

Renshaw, C. E., 1998, Sample bias and rescaling of hydraulic conductivity in fractured rock, *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, No. 1, pp: 121-124.

Roberts, J. J., 2002, Electrical properties of microporous rocks as a function of saturation and temperature, *Journal of applied physics*, Vol. 91, No. 3.

Rothman D. H. and S. Zaleski, 1994, Lattice-gas models of phase separation: interface, phase transitions, and multiphase flow, *Rev. Mod. Phys.*, 66:4.

Russell, B. H., K. Hedlin, F. J. Hiltebert, L. R. Lines, 2003, Tutorial: Fluid-property discrimination with AVO: A Bito-Gassmann perspective, *Geophysics*, Vol. 68, No. 1, p. 29-39.

Sahimi, M., 1995, *Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock*. VCH Verlagsgesellschaft mbH., Germany.

Schoen, J., 1998, *The rock physics handbook 'physical properties of rocks (fundamentals and principles of petrophysics)*, Cambridge University Press, 2nd ed.

Sen, P. N., Straley, C., Kenyon, W. E., und Wittingham, M. S., 1990, Surface-to-volume ratio, charge density, nuclear magnetic relaxation, and permeability in clay-bearing sandstones: *Geophysics*, 55, 61-69.

Shepherd, R. G., 1989, Correlations of permeability and grain size, *Ground water*, Vol. 27, No. 5.

Slater, L., 2007, Near Surface Electrical Characterization of Hydraulic Conductivity: From Petrophysical Properties to Aquifer Geometries—A Review, *Surv Geophys* (2007) 28:169–197.

Tiab D. & E. C. Donaldson, 2004, *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*, Gulf Professional Publishing.

Thompson A. H., G. A. Gist, 1993, Geophysical application of elektrokinetic conversion: *The Leading Edge*, 12, 1169-1173.

Tosaya, C. & A. Nur, 1982, Effects of diagenesis and clays on compressional velocities in rocks, *Geophysical Research Letters*, vol. 9, no. 1, pp. 5-8.

Tixier, M.P. 1949, "Evaluation of Permeability From Electric-Log Resistivity Gradients," *Oil & Gas Journal*, pp. 113.

Van Baaren, J. P., 1979, Quick-look permeability estimates using sidewall samples and porosity logs, *SPWLA Sixth European Symposium Transaction*.

Vila, X. S., Carrera, J., Girardi, J. P., 1996, Scale effects in transmissivity, *Journal of Hydrology*, 183, pp:1-22.

Wang, Z. Z., 2001, Y2K Tutorial 'Fundamentals of seismic rock physics', *Geophysics*, Vol. 68, No. 2, 398-412.

Wyllie, M.R.J. and Rose, W.D., 1950, "Some Theoretical Considerations Related to the Quantitative Evaluation of the Physical Characteristics of Reservoir Rock from Electric Log Data," *Trans., AIME*, Vol. 189, pp. 105.

Wong, P. z., 1988, *The statistical physics of sedimentary rock: Physics Today*, 24, Dec.

## CURRICULUM VITAE



Nama : **UMAR FAUZI**  
 Tempat lahir : Temanggung  
 Tanggal lahir : 4 Mei 1964  
 Alamat Kantor : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, ITB  
 E-mail : umarf@fi.itb.ac.id

Nama Isteri : Issusilaningtias  
 Nama Anak : 1. Muhammad Al-Falah Fauzi  
 2. Naf'an Muttaqin Fauzi  
 3. Ibrahim Asysyafi'i Fauzi

### RIWAYAT PENDIDIKAN:

NO.	UNIVERSITAS	JENJANG PENDIDIKAN	TAHUN LULUS
1.	Jurusan Fisika FMIPA, Institut Teknologi Bandung, Indonesia	S1	1988
2.	Departemen Fisika FMIPA, Institut Teknologi Bandung, Indonesia	S2	1992
3.	Intitute for Geophysics and Meteorology, Universitaet zu Koeln, Jerman	S3	1997

**RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL:**

NO.	JABATAN	TAHUN
1.	Asisten Ahli Madya	1 Juni 1990
2.	Asisten Ahli	1 Januari 1992
3.	Lektor	1 Oktober 1997
4.	Lektor Kepala	1 Juni 2004
5.	Guru Besar	1 Agustus 2011

**JABATAN PIMPINAN DI ITB:**

NO.	NAMA JABATAN	TAHUN
1.	Sekretaris eksekutif proyek Development Undergraduate Education (DUE-like TPB ITB)	1998-2000
2.	Administrator proyek pada Development Undergraduate Education (DUE-like TPB ITB) project	2001
3.	Sekretaris Jurusan Fisika FMIPA ITB	2001 - 2004
4.	Sekretaris Akademik dan Kemahasiswaan Fisika FMIPA ITB	2004 - 2005
5.	Sekretaris program studi Fisika FMIPA ITB	2006 - 2007
6.	Ketua Kelompok Keahlian Fisika Sistem Kompleks FMIPA	2006 - 2009
7.	Ketua Program Studi Sarjana Fisika FMIPA ITB	2008 - 2009
8.	Wakil Dekan Bidang Akademik	2010
9.	Dekan FMIPA ITB	2011 - skrg.

**LAIN-LAIN**

NO.	KEGIATAN	TAHUN
1.	Anggota tim penyusun kurikulum 1998 Departemen Fisika FMIPA ITB	1998
2.	Anggota tim policy study QUE-Fisika untuk evaluasi kurikulum dan sistem evaluasi	1999
3.	Anggota Majelis Departemen Fisika Periode 2004 s/d 2005	2004-2005
4.	Anggota KPPs Departemen Fisika Periode 2004-2005	2004-2005
5.	Pengurus Yayasan Fisika Periode 2005-2008	2005 – 2008
6.	Peserta International Deans Course "South East Asia - Part I, Jerman	2008
7.	Anggota Tim Evaluasi Diri Prodi Sarjana Fisika FMIPA ITB	2008
8.	Anggota Tim Persiapan Implementasi Kurikulum 2008 FMIPA ITB	2008
9.	Anggota Tim SAR-AUN-QA dan Akreditasi Program Studi Sarjana Fisika FMIPA ITB	2008
10.	Anggota Tim adhoc 3 <sup>rd</sup> AUN Actual Quality Assessment at Programme Level	2008
11.	Peserta International Deans' Course " South East Asia Part III, Yogyakarta	2009

**PENGHARGAAN**

NO.	NAMA PENGHARGAAN	PEMBERI PENGHARGAAN	TAHUN
1.	Satyalancana Karya Satya 10 tahun	Presiden RI	2003
2.	Ketua Program Studi Berprestasi Tingkat Nasional	DIKNAS Jakarta	2009

## KERJASAMA PENELITIAN

NO.	NAMA MITRA (Institusi/Individu)	TAHUN	KETERANGAN
1.	Prof. Yaramanci, TU-Clausthal, Jerman	1995	Riset
2.	Prof. Buelent Tezkan, IGM Universitas Cologne, Jerman	2001	IRL (International Research Linkage)
3.	Prof. R. Hilfer, ICA, Universitas Stuttgart, Jerman	2009	Publikasi bersama & sandwich S3

## PENGALAMAN SEBAGAI REVIEWER JURNAL ILMIAH:

- American Geophysical Union, 2002.
- Indonesian Journal of Physics.
- Jurnal Matematika dan Sains.
- ITB Journal of Sciences.
- Jurnal Geofisika, Himpunan Ahli Geofisika Indonesia.
- Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Francis and Taylor, 2009-2011

## HIBAH RISET:

1. Penggunaan peralatan geofisika untuk mengukur parameter penyebab terjadinya longsor daerah Pasirmuncang PPR-ITB Dago, Research report, O&M-ITB, 1989.
2. Pengembangan cara prospeksi EM-VLF dengan memanfaatkan sumber gelombang kuat, SPP-DPPITB, 1989.
3. Perancangan peralatan pengukuran kerentanan awal magnetik

- dan magnetisasi remanen batuan, OPF-ITB, 1990.
4. Fauzi, U., 1998, Relasi antara kecepatan perambatan gelombang elastik dengan konduktivitas panas batuan, SPP-DPPITB.
5. Fauzi, U., Pengembangan analisa citra digital untuk estimasi permeabilitas batuan, RUT VI, 1998 – 2000.
6. Fauzi, U., Influence of coordination number and percolation probability on permeability estimation by means of digital image analysis, Young Academics batch III, URGE, 1998 – 2000.
7. Djamal, M., Fauzi, U, Rena, W., Evaluasi kurikulum dan sistem evaluasi (policy study QUE-Fisika), 1999.
8. Fauzi, U., Arif, I., Budiman, M., Reposisi jurusan Fisika (Policy study QUE-Fisika), 2000.
9. Fauzi, U., kajian kurikulum berbasis kompetensi untuk mata pelajaran IPA Sekolah Dasar, Direktorat TK-SD, pendidikan dasar menengah, 2002.
10. Fauzi, U., Uji coba kurikulum berbasis kompetensi untuk mata pelajaran IPA Sekolah Dasar, Direktorat TK-SD, pendidikan dasar menengah, 2003.
11. Nurhasan, Fauzi, U., 2003, Pemodelan inversi elektromagnetik 2-D dan penerapannya untuk menginterpretasi data CSAMT Gunung Merapi, Jawa Tengah, Research Report from JBPTITBPP / 2003-07-16
12. Fauzi, U. dan Hendro, 2005-2006, Borehole kamera untuk investagsi sumur/lubang bor, Hibah Bersaing.
13. Srigutomo, W., Enjang, J. M., Fauzi, U., Metoda EM untuk studi cekungan Bandung, Riset ITB, 2005.
14. Bijaksana, S. dan U. Fauzi, 2005-2007, Kajian anisotropi pada

batuan untuk keperluan eksplorasi dan lingkungan, Hibah Penelitian Tim Pascasarjana angkatan III.

15. U. Fauzi, 2007, Kajian up-scaling berdasarkan struktur ruang pori batuan, Riset KK.
16. Enjang J. M., Sutarno D., Srigutomo, W., Fauzi, U., 2007, Riset terapan, KNRT.
17. Alamta Singarimbun, Wahyu Srigutomo, Umar Fauzi, 2008, Riset insentif KNRT.
18. Fauzi, U., Simulasi aliran fluida dalam model batuan pigeon hole 3-dimensi menggunakan metode kisi boltzmann untuk estimasi besaran fisis aliran fluida, Riset KK ITB, 2009.
19. Fauzi, U., Sparisoma Viridi, Nurhasan, Pemodelan dinamika molekuler dan struktur resistivitas pada bahan butiran tanah untuk prediksi longsor, Hibah Kompetensi, 2009-2011.
20. Fauzi, U., Pemodelan batuan berlapis, Riset KK-ITB, 2010.
21. Fauzi, U., Pemodelan dan karakterisasi batuan pasir berpengotor lempung, Riset desentralisasi, 2012.
22. Fauzi, U., Pemodelan sedimentasi butiran 3D di bawah pengaruh gravitasi dengan menggunakan dinamika molekuler, Riset KK-ITB, 2012.

## PUBLIKASI

### Journal atau manuskrip Internasional

1. **Fauzi, U.**, 1997, Untersuchungen zur Charakterisierung der Porengeometrie von Gesteinen zur Abschätzung der hydraulischen Permeabilität und des Formationsfaktors mit Hilfe

von Bildanalysen, ISSN 0069-5882. Diterbitkan oleh: Institute of Geophysics and Meteorology, University of Cologne, Germany; 1997. Editor: A. Ebel, M. Kerschgens, F. M., Neubauer, P. Speth.

2. **Fauzi, U.**, A. Hoerdt and F. M. Neubauer, 2002, Influence of Coordination Number and Percolation Probability on Rock Permeability Estimation, Geophys. Res. Letters, Vol. 29, No. 8.
3. Tezkan, B., Georgescu, P., **Fauzi, U.**, 2005, A radiomagnetotelluric survey on an oil-contaminated area near the Brazi Refinery, Romania, Geophysical Prospecting, 53, pp. 311-323.
4. F. D. E. Latief, B. Biswal, **U. Fauzi**, R. Hilfer, 2010, Continuum reconstruction of the pore scale microstructure for Fontainebleau sandstone, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Volume 389, Issue 8, Pages 1607-1618.
5. Fourier Dzar Eljabbar Latief; **Umar Fauzi**; Satria Bijaksana; Yazid Bindar, 2010, Pore Structure Characterization of 3D Random Pigeon Hole Rock Models, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 47, Issue 3, Pages 523-531.
6. **Fauzi, U.**, 2011, Estimation of rock permeability and its anisotropy from thin sections using renormalization group approach, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, vol 33 no. 6.
7. Selly Feranie, **Umar Fauzi** and Satria Bijaksana, 2011, 3D fractal dimension and flow properties in the pore structure of geological rocks, fractals, vol. 19, no. 3, 1-7.
8. Fourier Dzar Eljabbar Latief & **Umar Fauzi**, 2012, Kozeny-Carman and Empirical Formula for Permeability Calculation of Computer Rock Models, International Journal of Rock Mechanics and

### Jurnal Nasional

1. **Fauzi, U.**, 1998, Permeability estimation of rocks with the help of image analysis and local porosity theory, *Kontribusi Fisika Indonesia*, vol. 9, no. 1.
2. **Fauzi, U.**, 2002, Permeability estimation based on pore radius and its distribution, *Kontribusi Fisika Indonesia*, Vol. 13, no. 1.
3. Zulaikah, S., Liong, T. H., Bijaksana, S., **Fauzi, U.**, Yulita, N., 2003, Preliminary result of magnetic records in stalagmites, *Jurnal Geofisika* 2.
4. Zulaikah, S., Liong, T. H., Bijaksana, S., **Fauzi, U.**, 2004, Rekaman variasi arah medan magnetik bumi selama  $\pm 3000$  tahun pada stalagmit dari Trenggalek dan perbandingan dengan data lain, *Jurnal Geofisika* 2, pp. 20-26.
5. **Fauzi, U.** And Sarwoto, 2004, Anisotropi permeabilitas skala mikro, *Jurnal Geofisika*, ISSN 0854-4352, Edisi THN 2004 No. 1, pp. 19-22.
6. **Fauzi, U.**, Mulyadi, Bachri A. S., 2005, Physical and Lattice Gas Automata Fluid Flow Modeling in Real Porous Media, *Indonesian Journal of Physics*, Vol 16, No 3.
7. Hamdi Rifai, Satria Bijaksana, **Umar Fauzi**, and Bagus E.B. Nurhandoko, 2007, Challenges in the Measurement of LUSI's Physical Properties, *Indonesian Journal of Physics*, 18.4, October, pp. 87-90.
8. Fourier Dzar Eljabbar Latief and **Umar Fauzi**, 2007, Performance Analysis of 2D and 3D Fluid Flow Modelling Using Lattice

Boltzmann Method, *Indonesian Journal of Physics*. 18.2, pp. 47-52.

9. **Umar Fauzi**, 2007, Microstructure Characterization of Pigeon Hole Rock Models at Different Scale: A Preliminary Study, *Indonesian Journal of Physics*, 18.3, pp. 73-76.
10. Khumaedi Sastrawiharja, Satria Bijaksana, **Umar Fauzi**, and Linus Ampang Pasasa, Anisotropy of Magnetic Susceptibility and Elemental Compositions in Andesitic Rocks, *Indonesian Journal of Physics* 19.1, January, 2008, pp. 19-22.
11. Alamta Singarimbun, Harry Mahardika, Wahyu Srigutomo, and **Umar Fauzi**, 2008, A Preliminary Result of Seismoelectric Responses Study on Shallow Fluid-Saturated Layer: Numerical Modeling Using Transfer Function Approach, *Indonesian Journal of Physics*, Vol 19 No. 3.
12. Memoria Rosi, Fourier Dzar Eljabbar Latief, **Umar Fauzi**, Mikrajuddin Abdullah, dan Khairurrijal, 2009, Pengolahan Citra SEM dengan Matlab untuk Analisis Pori pada Material Nanopori, *Jurnal Nanosains & Nanoteknologi* ISSN 1979-0880 Edisi Khusus, Agustus.

### SEMINAR/PROCEEDING

#### Internasional (selected):

1. **Fauzi, U.**, 1992, Erfolgreiche Anwendungen der VLF am ITB, Indonesien, German geophysicist Association (DGG), Kiel, Germany.
2. **Fauzi, U.**, 1994, Zusammenhänge zwischen hydraulischer Permeabilität und elektrischer Leitfähigkeit, *Petrophysics*

Seminar, Bucha Leipzig, Germany.

3. **Fauzi, U.**, Vozoff, K., Neubauer, F. M., und Hördt, A., 1994, Zusammenhänge zwischen hydraulischer Permeabilität und elektrischer Leitfähigkeit: in Bahr, K. und Junge A., (Hrsg.), Protokoll über das 15. Kolloquium „Elektromagnetische Tiefenforschung“, Höchst, Germany.
4. **Fauzi, U.**, 1995, Permeabilitätsmessung mittels lokaler Porositätstheorie, Arbeitsseminar 'Petrophysik und Umwelt, Bucha Leipzig, Germany.
5. **Fauzi, U.**, 1996, Untersuchung hydraulischer Permeabilität und elektrischer Leitfähigkeit von Gesteinen durch Bildverarbeitung und lokale Porositätstheorie, German geophysicist Association (DGG), Freiberg, Germany.
6. **Fauzi, U.**, Hordt, A., Neubauer, F. M. and Vozoff, K., 1996, Permeability estimation of rocks using local porosity theory, 58th Mtg.: Eur. Assn. Geosci. Eng., Amsterdam, The Netherland.
7. **Fauzi, U.**, Hoerdt, A., Neubauer F. M., Vozoff, K., The application of local porosity theory for hydraulic estimation of real rocks, Workshop on wave propagation in rocks, Society of Exploration Geophysicist (SEG) and EAGE, Montana, USA, 1996.
8. **Fauzi, U.** And Harsawardana, Sumbangan Ilmuwan Muslim di Bidang Optika Geometri pada Zaman Keemasan Islam dan Contoh Kemanfaatan Praktis di Bidang Pertanian dan Fisika Batuan, IPASOSTEK seminar, Institute for science and technology studies, Frankfurt, Germany, 1996.
9. Tezkan, B. and **Fauzi, U.**, 2001, Detecting and monitoring of oil-contamination using radimagnetotellurics, Annual meeting of

German Association of Geophysicists (DGG), Frankfurt, Germany.

10. **Fauzi, U.**, 2001, Digital Image Processing for Rock Characterization, Indonesia-German Conference, Bandung – Indonesia.
11. J. Padmono, B. Sugiyanto, **U. Fauzi**, Loektamaji, R. Wawan, 2004, Seismic physical parameters of sands and carbonate reservoirs at Tambun Oil-field, ext. Abstract, EAGE meeting 2004, Paris, French.
12. Eddy, I., Hendrajaya, L., Handayani, G., **Fauzi, U.**, 2004, Determination of geometry and bedding plane orientation in coal seam use of GPR method, The 32<sup>nd</sup> International Geological Congress (32IGC) August 20 to 28, Florence, Italy.
13. Eddy, I., Syaeful, I., **Fauzi, U.**, Handayani, G, Hendrajaya, L., 2004, Influence of application of height of different antenna to quality data by GPR (Evaluation by experiment at data seal coal outcrop), The 32<sup>nd</sup> International Geological Congress (32IGC) August 20 to 28, Florence, Italy.
14. Fourier Dzar Eljabbar and **Umar Fauzi**, The effect of water saturation on the complex seismic attribute, Asean Physics Symposium, Bandung, 2005.
15. Fourier Dzar Eljabbar and **Umar Fauzi**, Model based acoustic impedance inversion, Asean Physics Symposium, Bandung, 2005.
16. Dharmawan. A. I., **Fauzi, U.**, Prastowo, T., Lattice Boltzmann Method for simulating fluid flow through porous media, Asean Physics Symposium, Bandung, 2005.
17. **U. Fauzi**, Application of local porosity theory and renormalization

group approach to estimate permeability anisotropy of sandstone, Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 01473, 2006, Vienna, Austria.

18. Ibrahim, E., Hendrajaya, L., Handayani, G., **Fauzi, U.**, Laboratory experiments for coal rank characterization using 1 GHz GPR antenna, Proceeding of International Geosciences Conference and Exhibition, Jakarta, 2006.
19. **Umar Fauzi** and Ismail Hamzah, Reconstruction of Microstructure Using Pigeon-hole Model as a Preliminary Study to Investigate Relationship between Porosity and Hydraulic Radius with Fractal Dimension International Conference on Mathematics and Natural Sciences, 2006, Bandung.
20. **Umar Fauzi** and Tungky Ariwibowo, Tortuosity and Coordination Number of Highly Porous Artificial Rocks Created Using Random Number Generator, International Conference on Mathematics and Natural Sciences, 2006, Bandung.
21. Enjang Jaenal, Mustopa, Wahyu Srigutomo, Doddy Sutarno, **Umar Fauzi**, Asep Harja, CSAMT Measurement in Kamojang Geothermal Field, Garut. Asian Physics Symposium, Bandung, 2007.
22. **Umar Fauzi** dan Hamami Nomeira, Reconstruction of 3-dimensional real rocks and its tortuosity estimation, The 2nd International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS), Bandung, 2008.
23. Enjang, J.M., Nurhasan, D. Sutarno, W. Srigutomo, **U. Fauzi**; Two Dimensional Electromagnetic Image of The Kamojang Geothermal field, Indonesia by CSAMT Data; The 19th IAGA

Workshop on EM Induction in the earth; Beijing; October ; 2008.

24. Enjang, J.M., W. Srigutomo, D. Sutarno, , **U. Fauzi**, Asep Harja, Imaging Kamojang Geothermal Reservoir by CSAMT Method, The 2<sup>nd</sup> International Conference on Mathematics and Natural Sciences ICMNS, Bandung, 2008
25. **Fauzi, U**, T. Ariwibowo, S. Feranie. Dependence of Tortuosity on Porosity of Rock Models, Society of Exploration Geophysicists of Japan, SEGJ, Hokkaido, Japan, 2007.
26. Fourier D. E. Latief, **Umar Fauzi**: Pore structure characteristics of rock models with various grain shape, the 8th Euroconference 2009 of rock physics and geomechanics, Ascona, Switzerland.
27. Fourier Dzar Eljabbar Latief and **Umar Fauzi**, Flow Porperties of 3D Pigeon Hole Models, The 3<sup>rd</sup> Asian Physics Symposium, Bandung, 2009.
28. **Umar Fauzi**, Sparisoma Viridi, and Qisthina Ghaisani; Two Dimension Numerical Modeling and Laboratory Experiment of Slope Change in Granular Piles Due to Water Content, AIP (American Institute of Physics) Conf. Proc. 1325, 124 (2010).
29. Sparisoma Viridi, **Umar Fauzi**, and Adelia; To Divide or not to Divide: Simulation of Two-Dimensional Stability of Three Grains using Molecular Dynamics, AIP (American Institute of Physics) Conf. Proc. 1325, 175 (2010).
30. **U. Fauzi**, Permeability estimation of rock models, DGG-Tagung, Koeln, Germany, 2011.
31. F.D.E. Latief, Z. Irayani, **U. Fauzi**, Resolution Dependency of Sandstone's Physical Properties, SkyScan User Meeting 2012, Belgium.



### Nasional (selected):

1. Fauzi, U., 1989, VLF-EM method, 14<sup>th</sup> annually HAGI meeting (PIT HAGI), Jakarta.
2. **Fauzi, U.**, 1990, Measurement of simple models by Abem Wadi VLF instrument, 15<sup>th</sup> PIT-HAGI, Yogyakarta.
3. **Fauzi, U.**, 1997, Estimation of permeability by means of effective medium approximation, Proceeding PIT-HAGI, Bandung.
4. Irfan, M, **Fauzi, U.**, Bijaksana, S., dan Hendrajaya, L., 1998, Relasi antara kecepatan perambatan gelombang elastik dengan konduktivitas panas batuan, Proceeding PIT-HAGI, Yogyakarta.
5. Syukri, M., **Fauzi, U.**, Bijaksana, S., Santoso, D., 1998, Radargram sintetik untuk studi kontaminasi, Proceeding PIT-HAGI, Yogyakarta.
6. **Fauzi, U.**, Influence of coordination number on permeability estimation, Proceeding PIT-HAGI, Surabaya, 1999.
7. Nurheriawan, M., **Fauzi, U.**, and Handayani, G., 2000, Studi kualitas batubara berdasarkan sifat dielektrik, Annual HAGI meeting, Proceeding PIT HAGI ke-25, Bandung.
8. Irham, M, **Fauzi, U.**, and Handayani, G., 2000, Permeability of loose sands: image analysis, sieve analysis, falling head method, Annual HAGI meeting, Proceeding PIT HAGI ke-25, Bandung.
9. **Fauzi, U.**, Sumentadireja, P. A., Kuku, 2000, Digital image analysis for permeability estimation of rock samples, IAGI, Bandung.
10. **Fauzi, U.** and Syuhada, 2001, Micropermeability of rocks, Proceeding PIT HAGI ke-26, Jakarta.
11. Is Mardianto, **Umar Fauzi**, Benyamin Kusumoputro, 2002, Teknik

Migrasi Citra Ground Penetrating Radar dalam Domain T-K, Prosiding Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi, Vol. 3, No. 1.

12. Eddy Ibrahim, Lilik Hendrajaya, Gunawan Handayani, **Umar Fauzi**, Syaiful Islam, 2003, Studi penentuan ketebalan lapisan batubara menggunakan GPR, Joint Convention IAGI dan HAGI, Jakarta.
13. Zulaikah, S., Bijaksana, S., Liang, T. H., **Fauzi, U.**, Yulita, N., 2003, Magnetic records in stalagmites as proxy indicators of paleoclimate, HAGI-IAGI Joint Convention, Jakarta.
14. **Fauzi, U.** dan Hendro, 2006, Pengembangan awal kamera lubang bor, Seminar Instrumentasi berbasis fisika, Bandung.
15. **Umar Fauzi** and Fourier Dzar Eljabbar Latief, Physical and Computer Modeling for 3-D Pore Structure of Rocks and Its Characterization, HAGI-Annual meeting, 2009.
16. F. D. E. Latief, **U. Fauzi**, S. Bijaksana, Y. Bindar, S. Viridi, The Effect of Grain Size Distribution to the Pore Structure of Non-Spherical Granular Model, HAGI-Annual meeting, 2009.
17. Nurhasan, D. Sutarno, W. Srigutomo, E J Mustopa, **U. Fauzi**, Y. Ogawa, Three Dimensional Resistivity Structure of Papandayan Volcano, Indonesia derived from Magnetotelluric Data, The 34<sup>th</sup> HAGI Annual Convention, Exhibition and 2<sup>nd</sup> Geophysics Education Symposium Yogyakarta, 10-12 November 2009.

### AKTIVITAS DI ASOSIASI:

- Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI):
  - o Bendahara II, perioda 1998 – 2000.

- o Seksi beasiswa, perioda 1998–2000.
- o Anggota HAGI.
- Anggota European Geophysical Union (EGU), tahun 2006.
- Anggota Society of Exploration Geophysicist of Japan (SEGJ), tahun 2007.