Majelis Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Majelis Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Pidato Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Lambok M. Hutasoit

SIMULASI NUMERIK DALAM HIDROGEOLOGI

21 Oktober 2011
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

Hak cipta ada pada penulis

Pidato Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung
21 Oktober 2011

Profesor Lambok M. Hutasoit

SIMULASI NUMERIK DALAM HIDROGEOLOGI

Majelis Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Majelis Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Prof. Lambok M. Hutasoit
21 Oktober 2011

Judul: SIMULASI NUMERIK DALAM HIDROGEOLOGI
Disampaikan pada sidang terbuka Majelis Guru Besar ITB,
tanggal 21 Oktober 2011.

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

Lambok M. Hutasoit
SIMULASI NUMERIK DALAM HIDROGEOLOGI
Disunting oleh Lambok M. Hutasoit

Bandung: Majelis Guru Besar ITB, 2011
vi+56 h., 17,5 x 25 cm
ISBN 978-602-8468-31-2
1. Hidrogeologi 1. Lambok M. Hutasoit

KATA PENGANTAR

Terpujilah Tuhan atas segala karunia dan pendampingan-Nya terhadap penulis selama penyusunan tulisan ini, yang merupakan naskah Pidato Ilmiah Guru Besar di ITB dalam Sidang Majelis Guru Besar ITB hari ini. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada pimpinan dan para anggota Majelis yang terhormat atas kesempatan yang diberikan ini. Penulis yakin bahwa apa yang kita lakukan hari ini akan sangat bermanfaat bagi kemajuan institut yang kita cintai ini.

Pidato Ilmiah ini berjudul **"Simulasi Numerik dalam Hidrogeologi"**, yang pada dasarnya berisi kontribusi yang telah penulis lakukan untuk bidang ini, serta rencana penelitian yang akan penulis lakukan pada masa mendatang. Materi yang disampaikan ini, selain untuk Majelis Guru Besar ITB, adalah juga bentuk pertanggungjawaban seorang Guru Besar ITB kepada masyarakat.

Pembahasan dalam tulisan ini dimulai dengan latar belakang mengapa metoda simulasi numerik diperlukan dalam hidrogeologi, diikuti dengan penerapannya di Bandung, Jakarta, dan Tembagapura, Papua. Selanjutnya dipaparkan kontribusi penulis terhadap metoda simulasi numerik sendiri, yaitu untuk aliran airtanah yang disertai transportasi massa dan panas *(thermohaline)* serta aliran airtanah dengan densitas bervariasi dalam lapisan miring. Bagian terakhir dari tulisan ini

adalah rencana penelitian penulis kedepan, yaitu tentang faktor-faktor hidrogeologi dalam *overpressure* dan cebakan hidrodinamik migas, peresapan air pada lapangan panasbumi, serta mineralisasi tipe MVT di Indonesia.

Selamat membaca dan semoga tulisan ini bermanfaat bagi kita semua.

Bandung, 21 Oktober 2011

Lambok M. Hutasoit

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR iii
DAFTAR ISI v
I. PENDAHULUAN 1
II. DASAR TEORI 2
III. HASIL PENELITIAN PENULIS 4
III.1 Muka Airtanah di Daerah Bandung 4
III.2 Penurunan Muka Tanah di Jakarta 8
III.3 Konveksi Thermohaline dalam Media Berpori 11
III.4 Aliran Airtanah dengan Densitas Bervariasi dalam Lapisan Miring 16
III.5 Aliran Airtanah dalam Media Rekahan 19
IV. RENCANA PENELITIAN MENDATANG 25
IV.1 Overpressure dan Cebakan Hidrodinamik Migas 26
IV.2 Peresapan Air pada Lapangan Panasbumi 30
IV.3 Mineralisasi Tipe MVT di Indonesia 34
V. UCAPAN TERIMA KASIH 38
DAFTAR PUSTAKA 40
REKAMAN KARYA ILMIAH 45
CURRICULUM VITAE 53

SIMULASI NUMERIK DALAM HIDROGEOLOGI

I. PENDAHULUAN

Batuan dan tanah pembentuk kulit bumi terdiri dari massa padat dan pori yang diisi oleh fluida. Salah satu dari fluida tersebut adalah air, objek yang dipelajari dalam bidang hidrogeologi. Air yang mengisi pori tersebut dikenal juga sebagai airtanah, salah satu sumber daya air yang sangat penting. Sebagai ilustrasi, kebutuhan air di Jakarta dan Bandung, sekitar 40% dipenuhi oleh airtanah pada saat ini.

Perlu diperhatikan bahwa airtanah selalu mengalir dalam pori yang diisinya, baik secara alamiah maupun oleh kegiatan manusia, misalnya pemompaan. Selain itu, airtanah juga berinteraksi dengan dan mempengaruhi sifat-sifat fisika dan kimia massa padat maupun keseluruhan massa penyusun batuan atau tanah. Ketika mengalir, airtanah membawa serta massa dan panas. Pada kondisi geologi tertentu, massa yang dibawa dapat terakumulasi atau diendapkan, membentuk cadangan minyak dan gas bumi atau endapan mineral, sementara massa yang tidak diendapkan dapat mempengaruhi kualitas airtanah. Untuk panas, aliran airtanah dapat berfungsi sebagai pembawa panas dari magma ke dekat permukaan bumi, membentuk sumber energi panas bumi. Keberadaan airtanah dalam tanah atau batuan mempengaruhi sifat mekanik tanah atau batuan, yang dapat diketahui pada mekanisme longsor, pembentukan struktur geologi, dan amblesan tanah.

Uraian singkat diatas menunjukkan bahwa penelitian hidrogeologi memainkan peran sangat penting dalam pengelolaan dan eksplorasi sumber daya geologi serta upaya mitigasi bencana geologi di dunia maupun di Indonesia. Salah satu metode kuantitatif termutakhir yang banyak digunakan dalam penelitian hidrogeologi adalah simulasi numerik, yang telah penulis geluti dalam 30 tahun terakhir. Dalam tulisan ini dipaparkan beberapa hasil penelitian yang telah penulis dan tim Laboratorium Hidrogeologi, Prodi Teknik Geologi lakukan dalam selang waktu tersebut, beserta rencana penelitian yang akan kami lakukan pada waktu mendatang.

II. DASAR TEORI

Proses-proses hidrogeologi yang sudah disebutkan diatas berlangsung secara kompleks dan dalam dimensi yang besar, sehingga untuk mempelajarinya diperlukan pemodelan, dimana model adalah sesuatu yang merupakan representasi dari yang terjadi di lapangan. Model ini dapat dibagi dalam dua jenis, yaitu model matematik dan model fisik. Model matematik dapat bersifat statistik atau deterministik. Solusi model deterministik dapat diperoleh secara analitik atau numerik, yang mencakup simulasi numerik. Solusi numerik secara umum diperoleh dengan metoda *finite element* (elemen hingga) dan *finite difference* (beda hingga), metoda yang kami gunakan dalam penelitian-penelitian yang

dibahas dalam tulisan ini.

Dalam pemodelan matematik, langkah pertama yang perlu dilakukan adalah memahami proses-proses fisika dalam sistem yang ingin dianalisis. Proses-proses utama dalam hidrogeologi adalah aliran fluida, transportasi massa, transportasi panas, dan deformasi, yang kemudian dinyatakan dalam persamaan-persamaan matematik. Persamaan-persamaan tersebut merupakan pernyataan dari konservasi massa, momentum, dan energi. Bentuk dari persamaan-persamaan tersebut untuk model deterministik adalah persamaan diferensial parsial beserta syarat batas dan syarat awal.

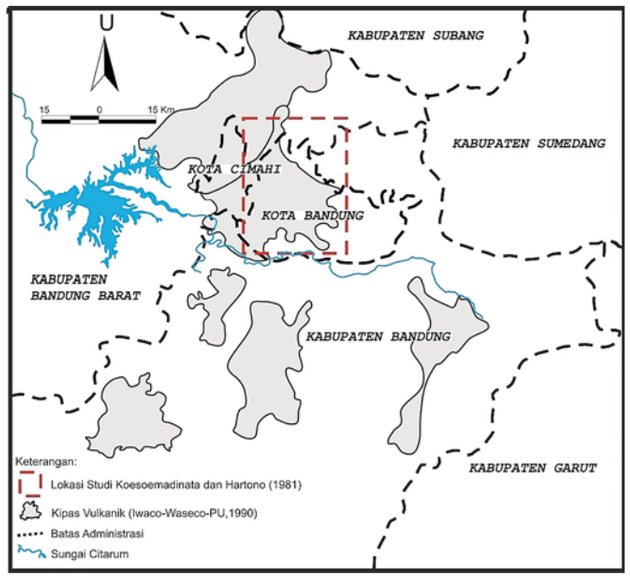
Langkah selanjutnya yang diperlukan adalah mencari solusi dari persamaan-persamaan tersebut. Solusi adalah hal yang kita inginkan, sedang persamaan-persamaan tanpa solusi dapat dikatakan adalah hal yang hanya sedikit gunanya. Solusi analitik hanya dapat diperoleh untuk kasus-kasus yang sangat sederhana, sehingga dengan meningkatnya kompleksitas masalah maka diperlukan solusi numerik. Untuk memperoleh solusi numerik dilakukan pendekatan, yang untuk metode beda hingga adalah pendekatan linier terhadap persamaan diferensial pada sejumlah titik dalam sistem yang dianalisis. Dengan pendekatan ini diperoleh sekumpulan persamaan linier yang jumlahnya dapat relatif besar. Solusi kumpulan persamaan ini dapat dengan relatif lebih mudah diperoleh dengan bantuan komputer.

III. HASIL PENELITIAN PENULIS

Dalam bab ini akan diuraikan beberapa hasil penelitian yang penulis lakukan yang berhubungan dengan simulasi numerik dua dimensi dalam hidrogeologi. Uraian ini dapat berupa hasil penerapan piranti lunak yang disusun pihak lain atau yang disusun oleh penulis.

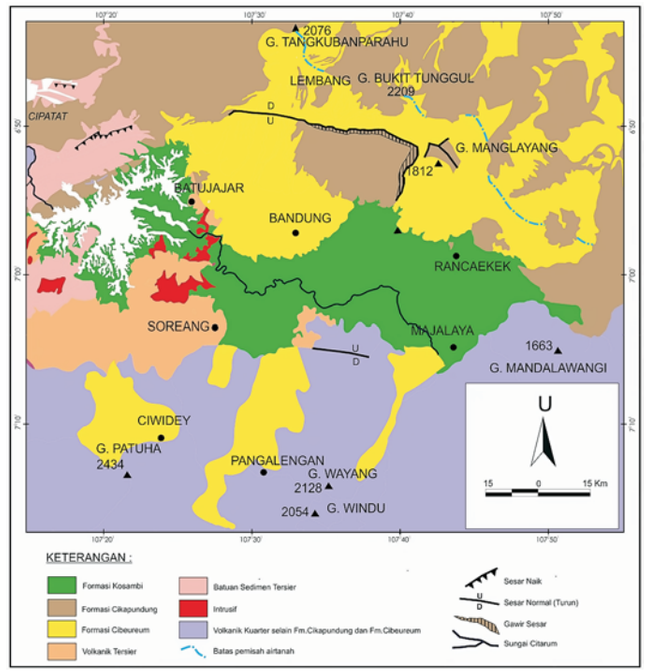
III.1. Muka airtanah di Daerah Bandung

Penelitian ini dilakukan di daerah Kota Bandung dan sekitarnya (Gambar 1). Di daerah ini telah terjadi penurunan muka airtanah (MAT) yang cukup berarti, sebagai akibat dari pengambilan airtanah dan berkurangnya resapan air hujan karena luasnya lahan yang tertutup bangunan (Dinas Pertambangan dan Energi Jawa Barat dan LPPM – ITB, 2002).

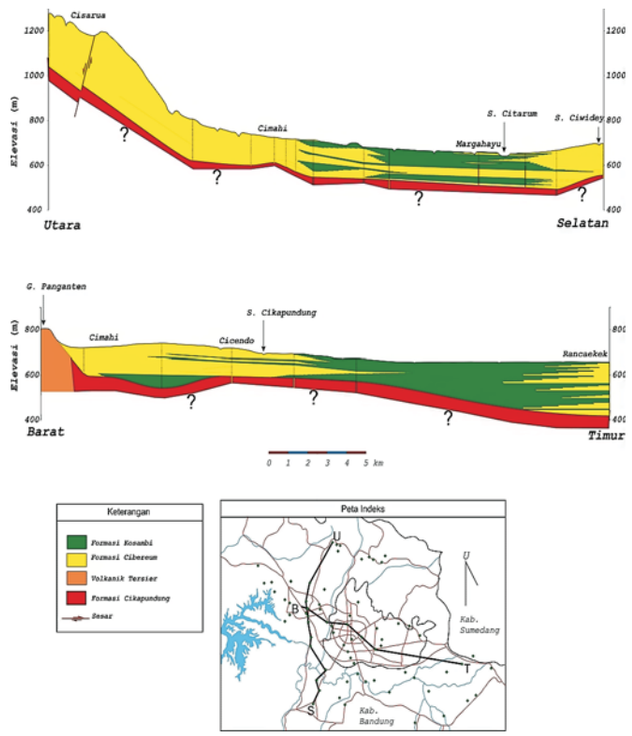


Gambar 1: Daerah Kota Bandung dan sekitarnya.

Lapisan pembawa airtanah (akifer) utama di daerah ini dikenal sebagai Formasi Cibeureum, dengan akitar Formasi Kosambi, serta lapisan batuan dasar (basement) Formasi Cikapundung dan batuan-batuan berumur Tersier (Gambar 2 dan Gambar 3; Hutasoit, 2009). Ketiga lapisan ini membentuk sistem hidrogeologi, dan simulasi numerik dilakukan terhadap sistem ini, terhadap persamaan - persamaan konservasi massa dan momentum untuk kondisi tidak tunak *(unsteady state)*, menggunakan piranti lunak MODFLOW.



Gambar 2: Peta geologi daerah penelitian, hasil kompilasi dan modifikasi dari Alzwar dkk (1992), Iwaco-Waseco dan PU (1990), Koesoemadinata dan Hartono (1981), Kusmono dkk (1996), Silitonga (1973), dan Sujatmiko (2003).



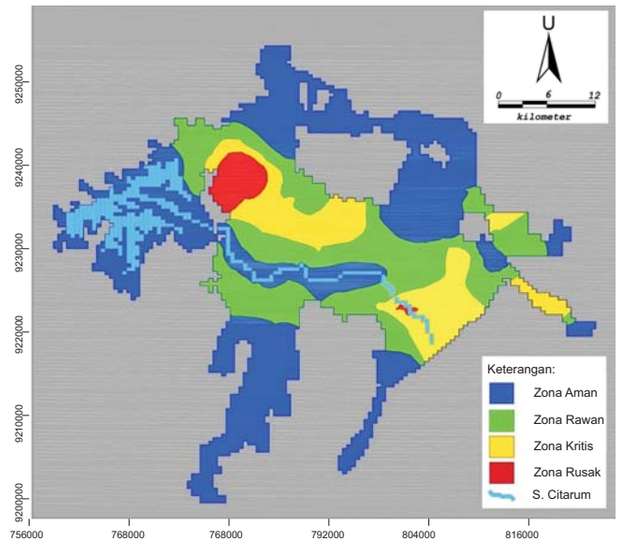
Gambar 3: Penampang geologi daerah penelitian.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui:

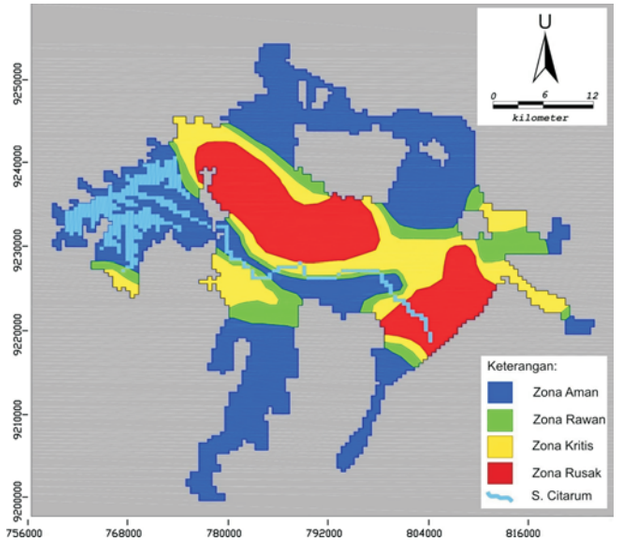
1) Penurunan MAT yang akan terjadi pada tahun 2013 dengan pengambilan yang terus meningkat, seiring pertumbuhan penduduk dan industri, tanpa usaha pemulihan.

2) Jumlah air yang harus diresapkan (peresapan buatan) untuk memulihkan kondisi MAT pada tahun yang sama, mulai tahun 2009. Peresapan buatan (sumur, reservoir, parit, atau injeksi) adalah hal yang sangat layak dilakukan di daerah ini, mengingat curah hujan yang cukup tinggi, yang terbuang percuma pada saat musim hujan.

Simulasi numerik dilakukan mulai tahun 1955 sampai dengan tahun 2000 dan tahun 2013, dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5 (Hutasoit, 2009). Kondisi MAT pada kedua gambar ini digambarkan sebagai zona-zona aman, rawan, kritis, dan rusak, masing-masing dengan penurunan MAT < 40%, 40% - 60%, 60% - 80%, dan > 80%, kriteria yang digunakan dalam Peraturan Gubernur Jawa Barat Nomor 31 Tahun 2006. Perbandingan antara Gambar 4 dan Gambar 5 (Hutasoit, 2009) menunjukkan bahwa dari tahun 2000 sampai dengan tahun 2013 terjadi perluasan Zona Kritis sebesar 116% dan Zona Rusak 570%. Simulasi numerik juga dilakukan untuk memulihkan kondisi MAT dengan peresapan buatan, yang dilakukan di Zona Rusak dan Zona Kritis tahun 2013 (Gambar 5), mulai tahun 2009. Pemulihan dilakukan sampai seluruh daerah penelitian menjadi Zona Aman, dan untuk ini perlu diresapkan air secara buatan sebanyak 164 juta m^3/tahun.



Gambar 4: Zonasi penurunan muka airtanah tahun 2000.

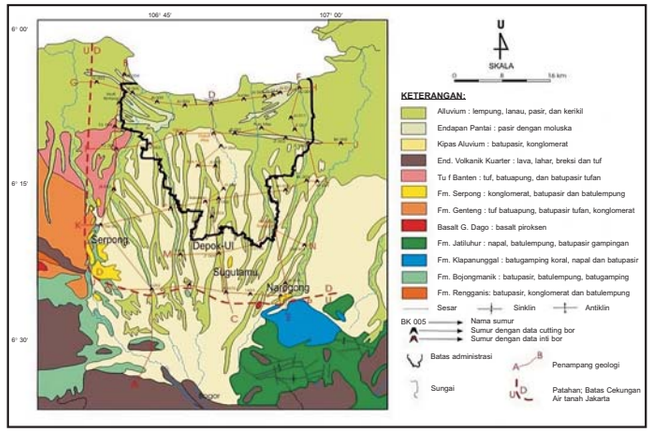


Gambar 5:
Zonasi penurunan muka airtanah tahun 2013.

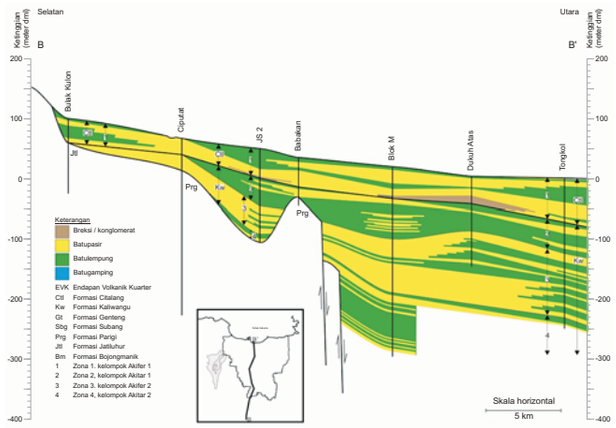
III.2. Penurunan Muka Tanah di Jakarta

Amblesan tanah (penurunan muka tanah) di Jakarta sudah banyak dilaporkan, misalnya oleh Murdohardono dan Tirtomihardjo, 1993; Dinas Pertambangan DKI Jakarta dan LPM – ITB, 1999; dan Abidin dkk, 2007. Mekanisme penyebab fenomena ini secara garis besar dapat dibagi dua yaitu: 1) kenaikan *effective stress* sebagai akibat dari penurunan *pore pressure* dan atau kenaikan *total stress* serta, 2) pergerakan tektonik. Semua faktor diatas terdapat di Jakarta. Penurunan *pore pressure* terjadi akibat pengambilan airtanah dan kompaksi alamiah lapisan-lapisan yang dalam keadaan *overpressured*. Kenaikan *total stress* adalah konsekuensi dari pembebanan oleh bangunan. Adanya patahan-patahan pada lapisan-lapisan berumur Kuarter menunjukkan adanya pergerakan tektonik di daerah ini.

Secara geologi daerah ini dialasi terutama oleh lapisan batupasir (akifer) dan lapisan batulempung (akitar) (Gambar 6 dan Gambar 7; Achdan dan Sudana, 1992; Effendi dkk., 1998; Turkandi dkk., 1992; Fachri dkk., 2002). Dalam sistem seperti ini airtanah diambil dari akifer, yang mengakibatkan penurunan *pore pressure* (MAT) pada akifer dan akitar. Sebagai akibatnya, terjadi amblesan pada keduanya, tetapi, karena kompresibilitas akitar jauh lebih tinggi (10-100 kali) daripada akifer, amblesan pada akitar jauh lebih tinggi daripada akifer.

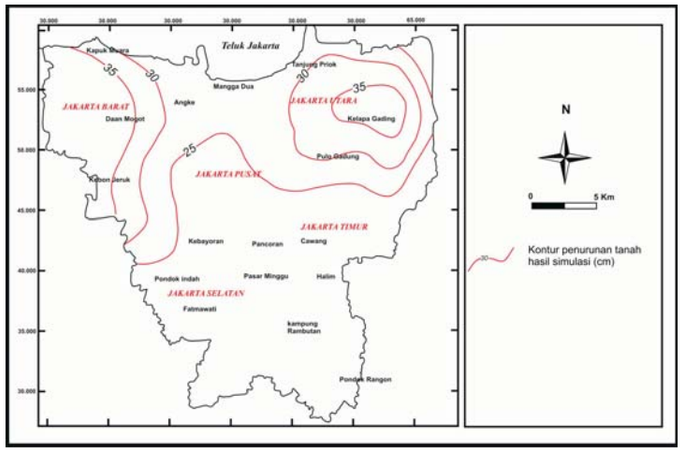


Gambar 6:
Peta geologi Jakarta dan sekitarnya.

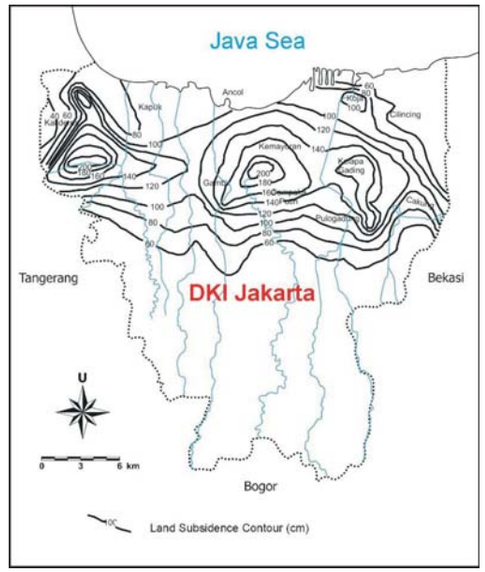


Gambar 7:
Penampang geologi Utara - Selatan daerah Jakarta.

Penelitian ini ditujukan untuk menghitung besarnya amblesan sebagai akibat dari pengambilan airtanah sampai dengan tahun 2000 dengan menggunakan piranti lunak MODFLOW. Simulasi numerik digunakan untuk menghitung penurunan MAT pada akifer dan akitar, yaitu solusi dari persamaan - persamaan konservasi massa dan momentum untuk kondisi tidak tunak. Hasilnya kemudian dikombinasikan dengan nilai kompresibilitas yang masih terbatas, untuk memperoleh nilai amblesan tanah, yang ditunjukkan pada Gambar 8 (Ramdhan dan Hutasoit, 2007). Pada gambar ini dapat dilihat bahwa amblesan tanah maksimum yang terjadi adalah 35 cm. Pengukuran amblesan tanah untuk periode ini menunjukkan nilai maksimum sebesar 200 cm (Gambar 9; Dinas Pertambangan DKI Jakarta dan PT. Sucofindo, 2000), sehingga dapat dikatakan bahwa pengambilan airtanah telah memberikan kontribusi sebesar 17,5% terhadap amblesan tanah total di Jakarta.



Gambar 8: Hasil perhitungan penurunan muka airtanah yang menyebabkan amblesan tanah.



Gambar 9:
Kontur amblesan tanah aktual pada periode 1982-1999.

III.3. Konveksi *Thermohaline* dalam Media Berpori

Gradien panas yang terdapat dalam air akan menyebabkan gradien densitas, yang dapat menyebabkan terjadinya aliran konveksi. Apabila dalam air tersebut terdapat juga gradien konsentrasi massa akan terjadi konveksi yang berbeda dari konveksi biasa, yang dikenal sebagai konveksi *thermohaline*. Perbedaan ini disebabkan oleh dua perbedaan penting dalam transportasi panas dan massa. Keduanya adalah: panas mengurangi densitas sedang massa menambah densitas, serta panas mengalami diffusi lebih cepat daripada massa. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya *oscillatory motion*, yaitu perubahan dalam arah aliran konveksi dengan waktu. Dengan demikian, arah aliran yang awalnya searah dengan putaran jarum jam, kemudian dapat berubah menjadi berlawanan arah dengan putaran jam, kemudian kembali ke arah

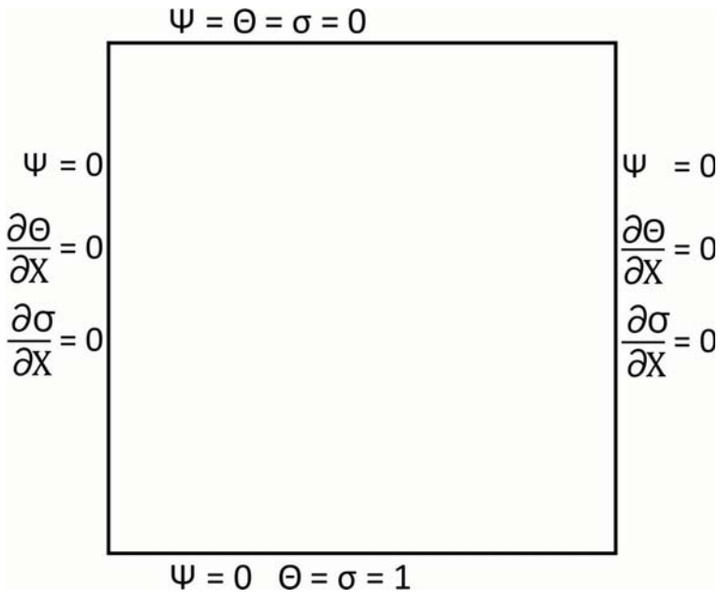
semula, dan seterusnya. Fenomena ini dapat diamati di laboratorium (Veronis, 1965) maupun di lapangan, yaitu di lautan (Stommel dkk, 1956)

Dalam airtanah, diffusivitas massa lebih rendah daripada dalam air, karena airtanah mengalir lebih jauh, seiring dengan kehadiran massa padat batuan. Sementara itu diffusivitas panas dalam airtanah lebih tinggi daripada dalam air, yang juga disebabkan oleh kehadiran massa padat batuan, yang umumnya adalah konduktor panas yang lebih baik daripada air. Dengan demikian, rasio antara diffusivitas panas dan massa dalam airtanah lebih tinggi daripada dalam air (Hutasoit, 1996 a). Tujuan dari penelitian ini adalah, dengan menggunakan simulasi numerik, untuk menganalisa apakah, dengan rasio yang lebih tinggi seperti disebut di atas, *oscillatory motion* tetap dapat terjadi dalam airtanah. Keberadaan gradien panas dan konsentrasi massa dalam airtanah dapat dilihat dengan jelas pada airtanah yang berasal dari kedalaman yang relatif besar, misalnya pada lapangan panas bumi dan lapangan minyak dan gas bumi.

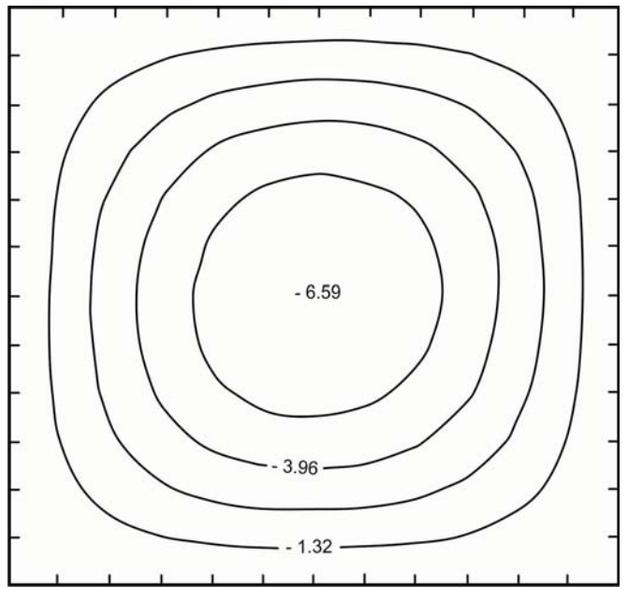
Karena fenomena ini melibatkan transportasi panas, maka persamaan-persamaan yang dicari solusinya adalah pernyataan dari konservasi massa, momentum, dan energi untuk kondisi tidak tunak. Dalam piranti lunak yang penulis susun solusi diperoleh dengan teknik *Successive Over Relaxation* (SOR) dan teknik *upwind* yang dimodifikasi (Hutasoit dan Hsui, 1985; Hutasoit, 1994).

Contoh hasil simulasi numerik yang diperoleh ditunjukkan dalam Gambar 10 – Gambar 14 (Hutasoit, 1996b). Gambar 10 menunjukkan

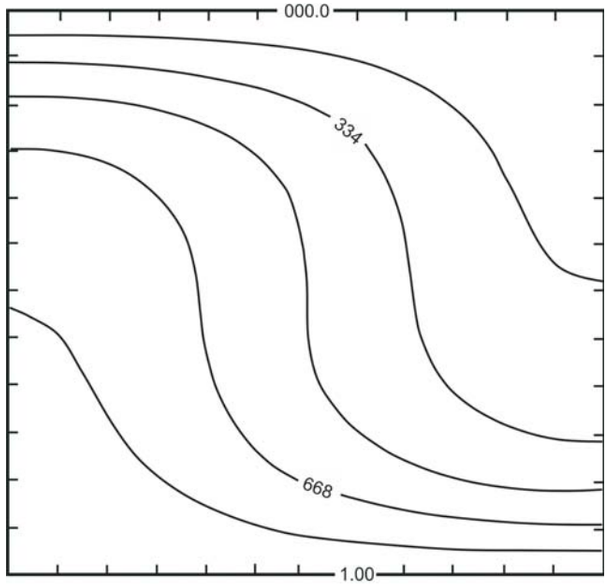
geometri sistem airtanah yang dianalisis, serta syarat batas dan syarat awal. $\theta = T - Tu$, $\sigma = C - Cu$, dan ψ = fungsi aliran *(stream function)*; Tu dan Cu adalah temperatur dan konsentrasi pada batas atas. Gambar 11 adalah sebaran fungsi aliran setelah waktu tertentu, yang menunjukkan arah aliran searah jarum jam, dan Gambar 12 adalah sebaran garis kesamaan temperatur (isotermal) yang disebabkan oleh aliran tersebut. Gambar 13 dan Gambar 14 menunjukkan sebaran parameter - parameter yang sama seperti pada kedua gambar diatas, tetapi untuk waktu selanjutnya. Arah aliran disini berlawanan dengan arah jarum jam.



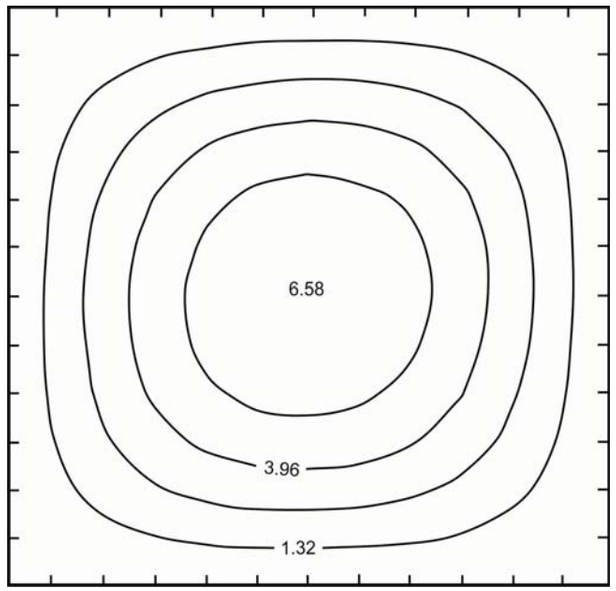
Gambar 10: Model fisik sistem.



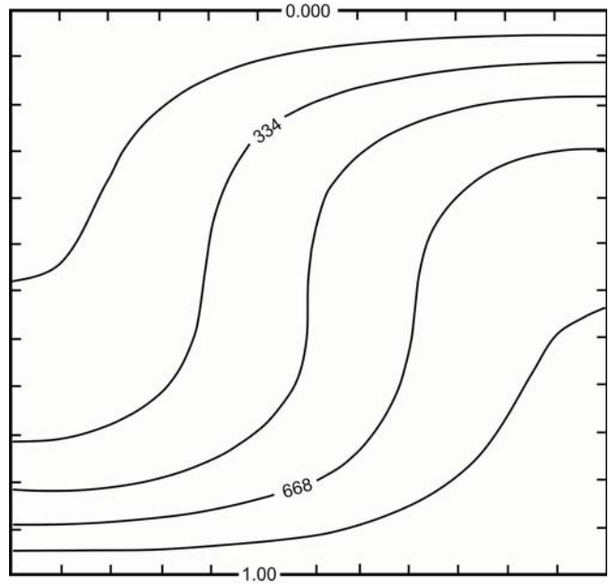
Gambar 11: Distribusi fungsi aliran dengan gerakan searah jarum jam.



Gambar 12: Isotermal untuk gerakan searah jarum jam.



Gambar 13: Distribusi fungsi aliran dengan gerakan berlawanan arah jarum jam.



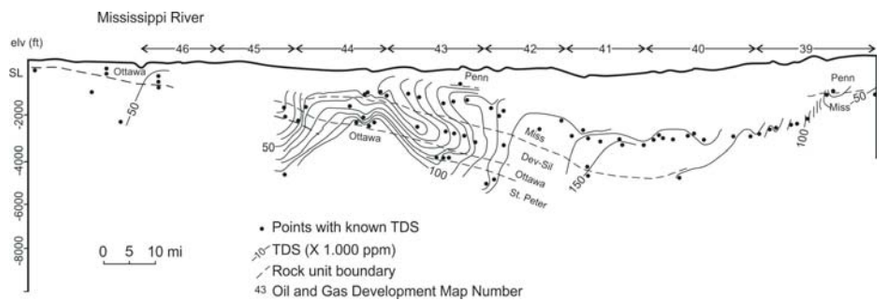
Gambar 14: Isotermal untuk gerakan berlawanan arah jarum jam.

Hasil - hasil diatas menunjukkan bahwa secara simulasi numerik *oscillatory motion* dapat terjadi dalam airtanah (Hutasoit, 1996 b), yang perlu dibuktikan keberadaannya di laboratorium dan di lapangan. Lokasi kontur isotermal yang berubah - ubah dengan waktu membuat kita perlu memikirkan kembali sebaran *spatial* tempat dimana terjadi proses - proses yang dipengaruhi oleh aliran airtanah, panas, dan konsentrasi massa baik pada masa lalu maupun sekarang. Sebagai contoh, mineralisasi biasanya terjadi pada temperatur relatif rendah, sebaliknya dengan pelarutan bahan - bahan mineral tersebut. Dengan adanya *oscillatory motion* mineralisasi tidak terbatas hanya pada suatu daerah, dan pengetahuan mengenai fenomena ini sangat membantu dalam eksplorasi. Pada lapangan panas bumi eksplorasi ditujukan untuk mencari daerah dengan temperatur relatif tinggi, yang lokasinya dapat berubah dengan waktu. Pengetahuan mengenai fenomena ini sangat membantu dalam pengelolaan suatu lapangan panas bumi.

III.4 Aliran airtanah dengan Densitas Bervariasi dalam Lapisan Miring

Hidrodinamika aliran airtanah dalam cekungan sedimen akhir – akhir ini semakin menarik perhatian dalam lingkungan geologi. Hal ini berhubungan dengan semakin disadarinya perlunya pengetahuan ini untuk lebih memahami transportasi dan akumulasi hidrokarbon, mineralisasi, serta penempatan yang optimal dari limbah industri.

Airtanah asin biasanya ditemukan dalam cekungan sedimen, sebagaimana ditunjukkan oleh air yang ikut terproduksi di lapangan migas. Salinitas airtanah ini menunjukkan variasi yang sangat berarti, dari jauh dibawah sampai dengan 10 kali salinitas air laut. Salah satu contohnya, yaitu di *Illinois Basin*, ditunjukkan pada Gambar 15 (Hutasoit, 2002).

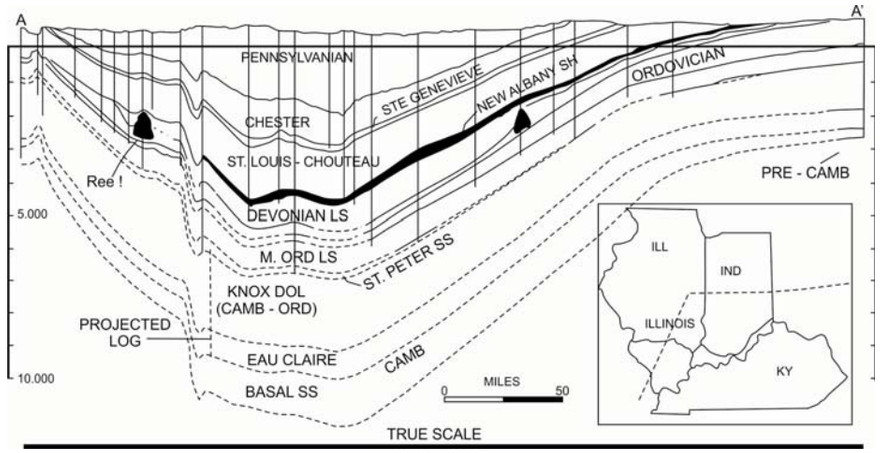


Gambar 15: Penampang Timur-Barat Illinois Basin dengan sebaran Total Dissolved Solids (TDS).

Dalam hidrogeologi, yang biasa dilakukan untuk menghitung kecepatan aliran airtanah adalah dengan pertama-tama menghitung gradien fungsi skalar, yaitu potensi hidrolik, dengan anggapan bahwa medan vektornya adalah konservatif. Untuk medan konservatif persyaratannya adalah bahwa *curl* dari medan tersebut adalah nol. Dapat dibuktikan bahwa, untuk airtanah dengan densitas bervariasi, *curl* nya tidak sama dengan nol, sehingga medan vektor tidak konservatif. Konsekuensinya, kecepatan tidak dapat dihitung dengan menggunakan gradien potensi hidrolik. Secara matematis, persamaan pengaturan yang

tepat untuk kasus ini adalah persamaan diferensial dengan parameter yang tidak diketahui adalah tekanan hidrolik, bukan potensi hidrolik (Hutasoit, 2002). Persamaan ini adalah hasil dari penggabungan persamaan konservasi massa dan momentum.

Untuk lapisan miring digunakan sistem koordinat lokal dengan sumbu - sumbu yang kolinier dengan komponen - komponen prinsipal dari tensor permeabilitas. Permeabilitas maksimum dan minimum dianggap paralel dengan dan tegak lurus terhadap bidang perlapisan, sesuai dengan proses - proses yang terlibat dalam pembentukan batuan sedimen, yaitu sedimentasi dan pembebanan. Batuan dalam cekungan sedimen umumnya membentuk perlapisan, dengan contoh pada Gambar 16 (Swann dan Bell, 1958), dengan nilai permeabilitas tertentu untuk masing - masing lapisan, yang berarti sistem hidrogeologi yang dihadapi adalah sistem heterogen.

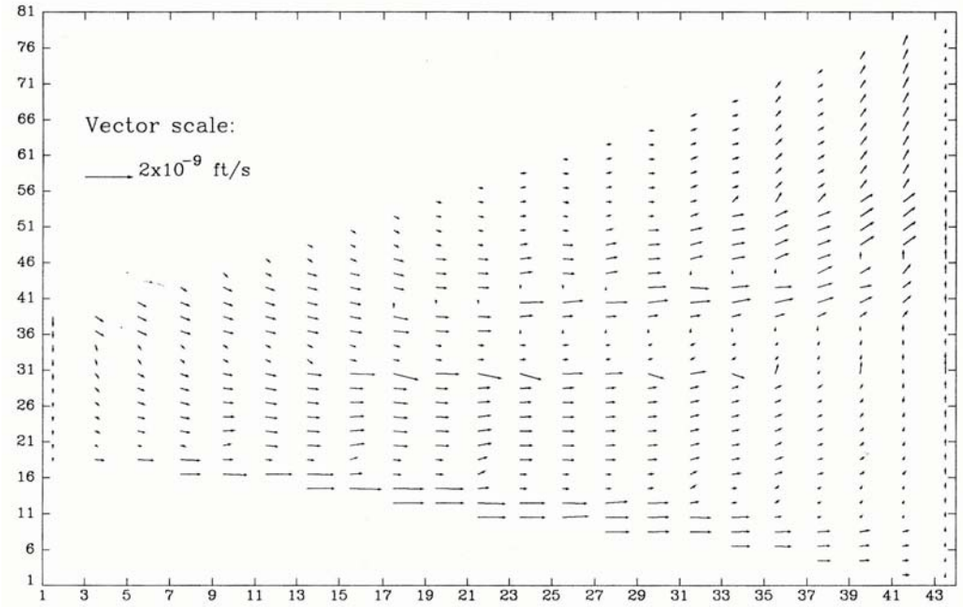


Gambar 16: Penampang Timur - Barat geologi Illinois Basin.

Dalam penelitian ini pendekatan *central difference* yang penulis lakukan menghasilkan persamaan matriks yang solusinya diperoleh dengan menggunakan *Strongly Implicit Procedure* (SIP) (Hutasoit, 2002). Piranti lunak yang disusun juga mengakomodasi simulasi dalam lapisan heterogen dan anisotropis, dengan viskositas dan spacing yang bervariasi. Dari nilai tekanan hidrolik yang diperoleh dihitung kecepatan aliran, yang kemudian diplot dalam bentuk panah, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 17. Metoda ini telah digunakan untuk menganalisis hidrodinamika aliran airtanah di *Illinois Basin*, Amerika Serikat. Data tekanan hidrolik diperoleh dari hasil pengukuran sebelum produksi migas (*DST* dan *RFT*), yang menunjukkan keadaan *underpressured*. Simulasi numerik untuk kondisi tunak pada cekungan sedimen ini menunjukkan bahwa gaya gravitasi saja *(gravity - driven)* tidak cukup untuk menerangkan mekanisme terjadinya keadaan *underpressured*. Proses – proses yang mungkin terlibat adalah osmosis pada batuan serpih, erosi yang mengurangi pembebanan, dan *rebounding* batuan sebagai akibat deglasiasi.

III.5. Aliran airtanah dalam Media Rekahan

Rekahan pada batuan adalah hal yang biasa ditemukan, yang dapat terjadi pada saat pembentukan batuan (rekahan primer) atau setelah pembentukan batuan (rekahan sekunder), terutama oleh gaya tektonik.



Gambar 17: Sebaran vektor aliran airtanah di Illinois Basin.

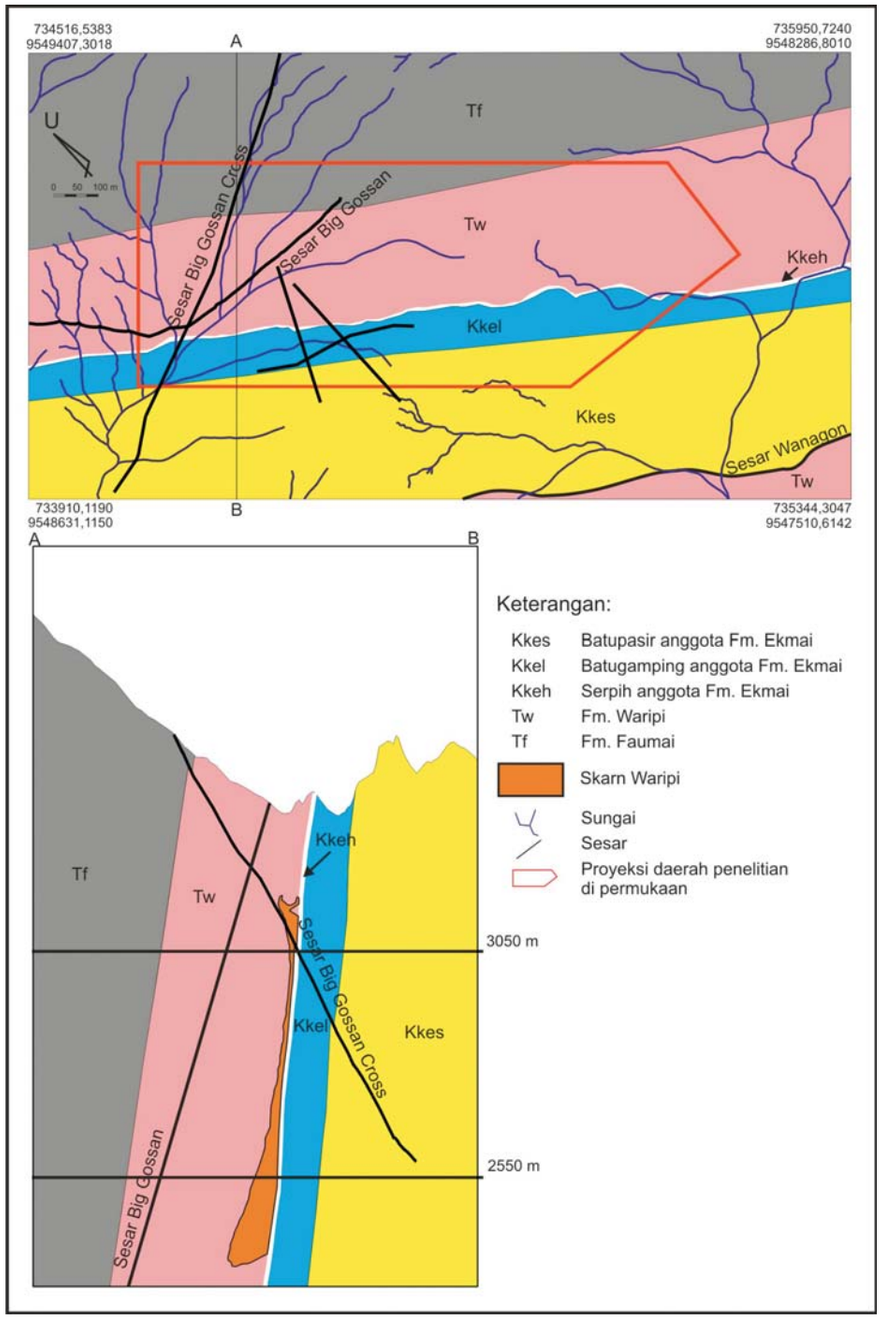
Struktur geologi ini mengakibatkan terbentuknya porositas pada batuan yang semula tidak berpori menjadi berpori sehingga dapat dilalui air. Pola aliran dalam batuan seperti ini tidaklah sesederhana dalam batuan berpori (media antar butir), sangat dipengaruhi oleh orientasi dan geometri rekahan.

Dalam penelitian ini dilakukan simulasi numerik dengan menggunakan piranti lunak Modflow untuk mengetahui sebaran vektor aliran airtanah di daerah tertentu. Pendekatan numerik (Hutasoit dkk, 2010) dilakukan terhadap gabungan antara persamaan konservasi massa dan persamaan konservasi momentum untuk kondisi tunak. Sebelumnya

dilakukan penghitungan distribusi muka airtanah dengan Metoda Gale (1990) dan konduktivitas hidrolik dengan Metoda Oda dkk (1996).

Daerah penelitian terletak di *Big Gossan*, Tembagapura, Papua. Secara geologi, daerah ini disusun oleh Formasi Ekmai (batu pasir, batu gamping, dan serpih), Formasi Waripi (dolomit), dan Formasi Faumai (batu gamping). Formasi Waripi diintrusi oleh monzodiorit, yang membentuk mineralisasi. Formasi – formasi ini disesarkan oleh dua sesar utama, yaitu sesar *Big Gossan* dan sesar *Big Gossan Cross* (Gambar 18) yang mengakibatkan terbentuknya rekahan secara intensif (Setiawan dan Syaifullah, 2004). Berdasarkan uraian diatas dapat dilihat bahwa untuk aliran airtanah kita berhadapan dengan media rekahan, bukan media antar butir.

Di daerah ini direncanakan akan dibuka tambang bawah tanah. Hasil dari beberapa uji *stope* dan pembuatan *stope access* menunjukkan keterdapatan airtanah di beberapa lokasi, sementara beberapa lokasi lainnya berada dalam kondisi kering. Dari lubang yang mengeluarkan airtanah juga diketahui bahwa debitnya bervariasi dari beberapa ratus sampai 1500 *gpm (gallon per minute)*. Sebaran kondisi yang bervariasi ini perlu diprediksi sebelum dilakukan penambangan, yang merupakan sasaran dari penelitian ini.

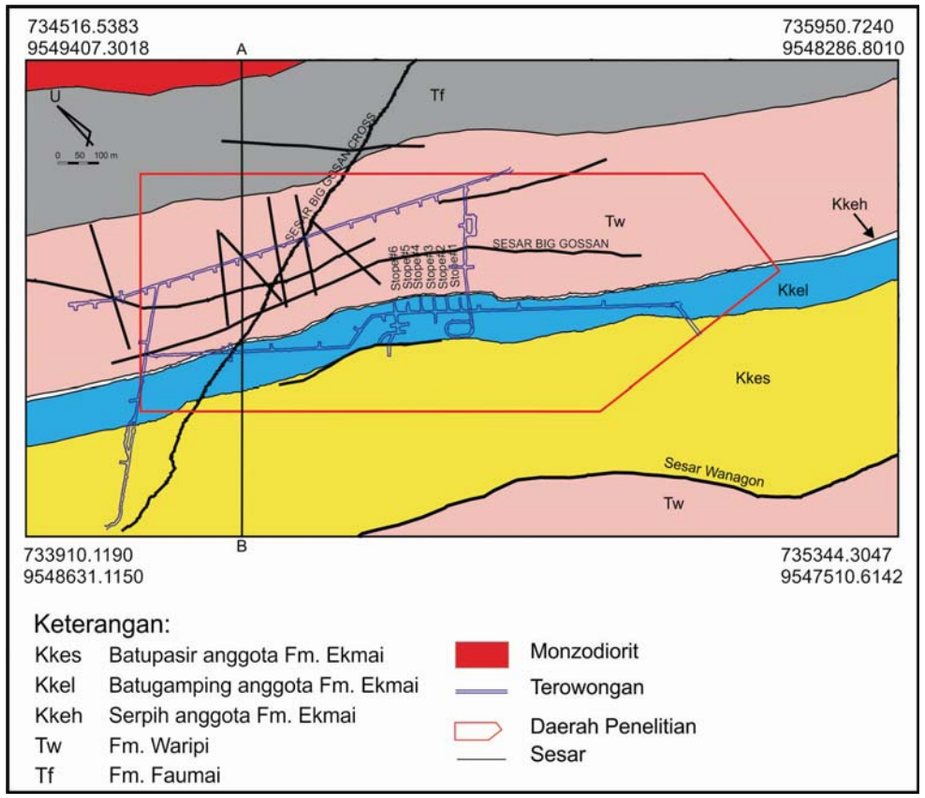


Gambar 18: Peta dan penampang geologi daerah penelitian.

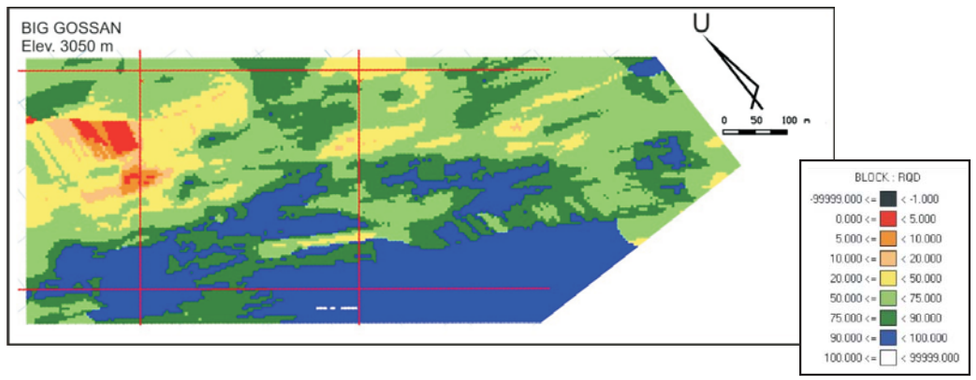
Sebagaimana disebutkan diatas, pola aliran airtanah dalam media rekahan sangat dipengaruhi oleh orientasi dan geometri rekahan. Informasi ini diperoleh dari hasil analisa data *Rock Quality Designation* (RQD), yang didapatkan dari hasil pemboran geoteknik. Hasil analisa tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung parameter hidrolik yang berupa konduktivitas hidrolik dan tinggi muka airtanah. Beberapa rekahan di daerah ini dapat diamati di permukaan dan berpotongan dengan sungai, dimana sungai berfungsi sebagai *constant head boundary* dan sumber resapan. Elevasi sungai pada titik - titik perpotongan tersebut adalah tinggi muka airtanah.

Simulasi numerik dilakukan terhadap sayatan horizontal *(slice)* dengan elevasi 3050 m, dengan proyeksi dipermukaan seperti ditunjukkan pada Gambar 18. Peta geologi sayatan ini ditunjukkan pada Gambar 19, yang menggambarkan kondisi geologi yang tidak jauh berbeda dengan di permukaan (Gambar 18).

Sebaran nilai RQD ditunjukkan pada Gambar 20, yang tidak menunjukkan pengelompokan dalam satuan - satuan batuan. Hal ini berarti bahwa nilai konduktivitas hidrolik pada satuan - satuan batuan tersebut menunjukkan kondisi heterogen. Hasil simulasi yang berupa sebaran vektor aliran airtanah ditunjukkan pada Gambar 21, dimana jelas terlihat ketidakseragaman panjang vektor tersebut di daerah penelitian. Nilai - nilai terbesar diprediksi terdapat di bagian barat laut, sedang di bagian lain nilai - nilai ini sangat kecil sehingga tidak terlihat pada gambar.



Gambar 19: Peta geologi sayatan 3050 m.



Gambar 20: Peta sebaran RQD pada sayatan 3050 m.

Gambar 21: Peta sebaran vektor aliran airtanah pada sayatan 3050 m.

Implikasi dari prediksi ini adalah bahwa penambangan di bagian barat laut perlu memperhatikan faktor airtanah yang dapat mengganggu, tidak seperti di bagian lain, yang relatif kering.

IV. RENCANA PENELITIAN MENDATANG

Penelitian - penelitian yang telah kami lakukan seperti diuraikan diatas akan dilanjutkan, karena masih banyak pertanyaan yang belum terjawab. Selain itu kami juga merencanakan, sebagian malahan sudah kami rintis, melakukan penelitian yang berhubungan dengan simulasi numerik dalam hidrogeologi untuk fenomena - fenomena yang dibahas di bawah. Perencanaan ini terutama ditujukan untuk masalah - masalah di Indonesia, dengan melibatkan instansi pemerintah, universitas lain baik dari dalam maupun luar negeri, serta industri.

IV.1. *Overpressure* dan Cebakan Hidrodinamik Migas

Kondisi *overpressure* (tekanan airtanah di atas tekanan normal) adalah hal yang umum terdapat di cekungan – cekungan sedimen Indonesia, baik di darat maupun lepas pantai. Lingkungan geologi dimana terdapat kondisi ini juga bervariasi, dari mulai daerah dengan sedimen aktif (misalnya Cekungan Kutai Bawah bagian paparan dan laut dalam) hingga daerah dengan sedimentasi tidak aktif (misalnya cekungan yang sama bagian daratan); daerah dengan tektonik aktif (misalnya Cekungan Jawa Timur) hingga daerah dengan tektonik yang *relax* (misalnya Cekungan Jawa Barat). Di Cekungan Jawa Timur contoh paling mutakhir adalah Lumpur Sidoarjo.

Pemahaman tentang penyebaran kondisi ini serta mekanisme pembentukannya dapat dipelajari dengan menggunakan metoda simulasi numerik. Hal - hal ini sangat diperlukan dalam perencanaan pemboran migas, untuk memperkirakan tekanan airtanah yang akan dihadapi di bawah permukaan. Perlunya pengetahuan tentang mekanisme terjadinya *overpressure* ditunjukkan pada Gambar 22. Metoda yang tepat digunakan untuk memperkirakan tekanan airtanah haruslah yang sesuai dengan mekanisme pembentukan *overpressure*.

Walaupun pengetahuan di atas sangat diperlukan, belum ada penelitian yang komprehensif tentang hal ini di Indonesia, dan hal inilah kelihatannya yang mengakibatkan terjadinya kerugian yang demikian besar dalam bencana Lumpur Sidoarjo. Di Cekungan Jawa Timur sudah

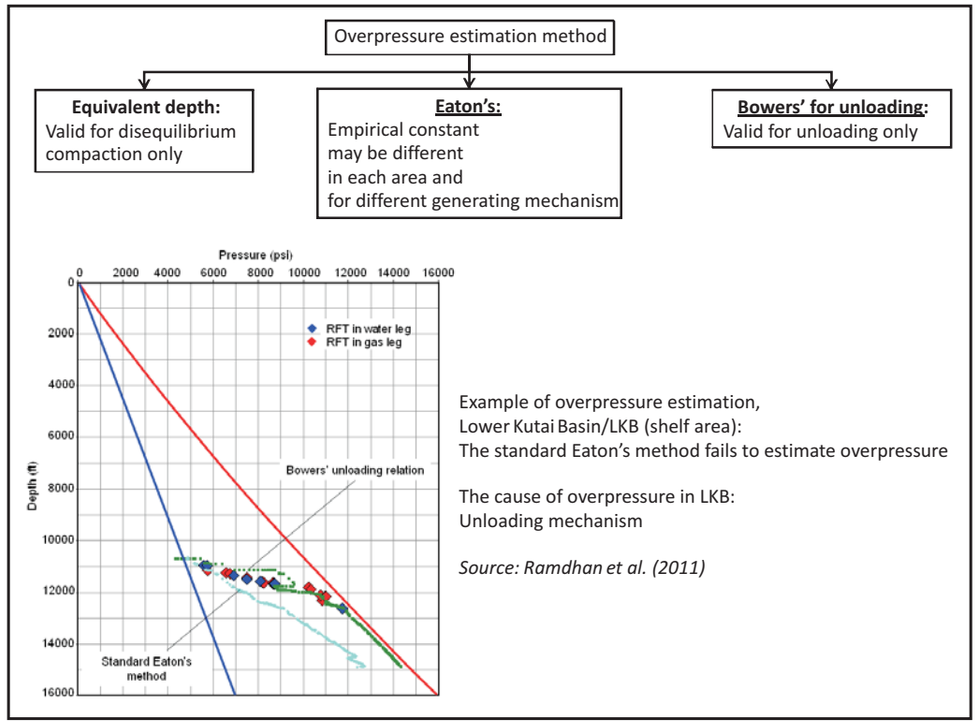


Figure 1. The importance of the knowledge of overpressure generating mechanism to successfully predict overpressure

Gambar 22: Perbedaan estimasi tekanan fluida akibat perbedaan mekanisme pembentukan kondisi *overpressure*.

lama diketahui terdapat relatif banyak gunungapi lumpur *(mud volcano)*, yang terjadi karena keberadaan kondisi *overpressure* (Gambar 23). Namun demikian, hal ini hanya selintas dibahas oleh Manik dan Soedaldjo (1984). Hal yang sama juga terjadi dengan Cekungan Sumatera Utara, yang hanya selintas dibahas oleh Aziz dan Bolt (1984) (Gambar 24). Sementara itu, untuk bagian laut dalam Cekungan Kutai Bawah, belum ada data yang dipublikasikan, padahal dalam waktu dekat diperkirakan akan banyak dilakukan pemboran di daerah ini.

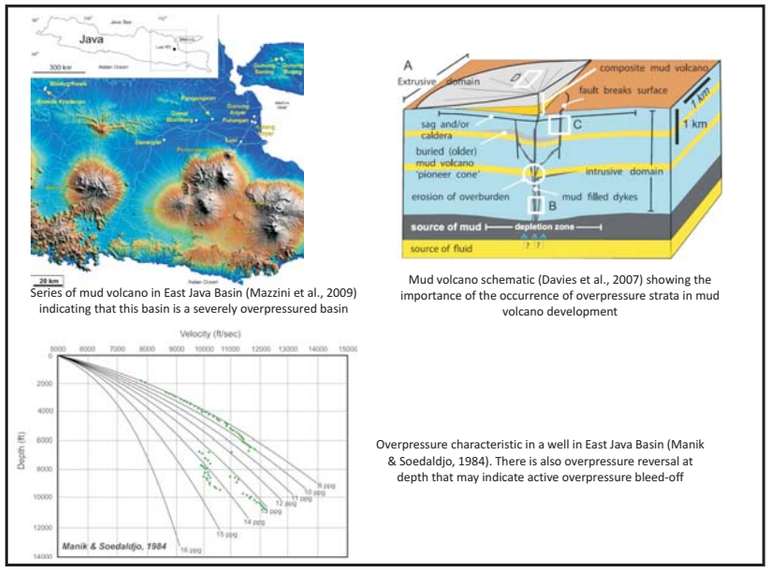


Figure 6. Overpressuring at a glance at East Java Basin

Gambar 23: *Overpressure* di Cekungan Jawa Timur.

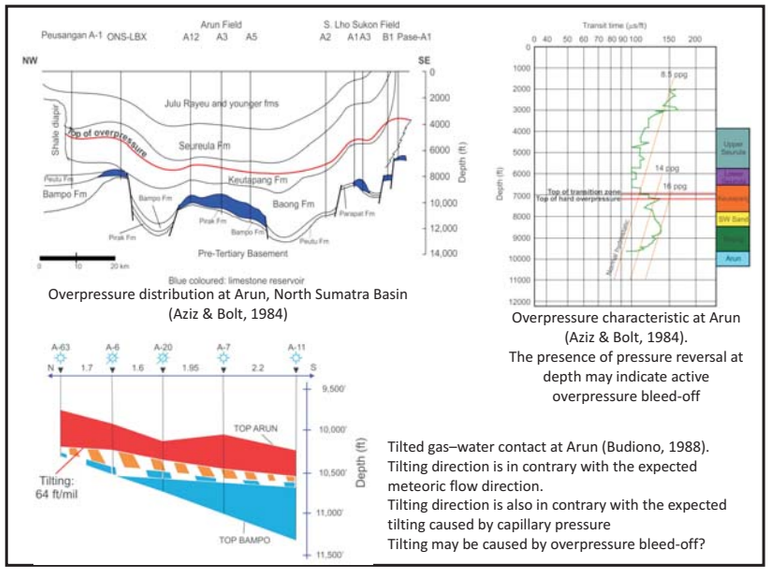


Figure 5. Overpressuring at a glace at Arun, North Sumatra Basin

Gambar 24: *Overpressure* di Cekungan Sumatera Utara.

Dalam analisis *petroleum system* pemahaman tentang *overpressure* sangat membantu dalam penentuan mekanisme migrasi dan pencebakan hidrokarbon, *seal capacity*, serta *reservoir compartmentalization*. Pencebakan hidrodinamik yang disebabkan oleh *overpressure bleed off* akhir - akhir ini sudah dianggap sebagai *play* utama. Contoh paling terkemuka dari cebakan hidrodinamika adalah Lapangan Valhall, Laut Utara (Dennis dkk, 2000). Di Indonesia cebakan jenis ini ditemukan di lapangan Tunu dan Lapangan Peciko, Cekungan Kutai Bawah (Lambert dkk, 2003). Gambar 25 adalah gambaran mekanisme pencebakan di lapangan - lapangan tersebut.

Untuk memenuhi kebutuhan energi nasional yang terus meningkat kita harus terus menemukan cadangan migas baru, dan salah satu yang

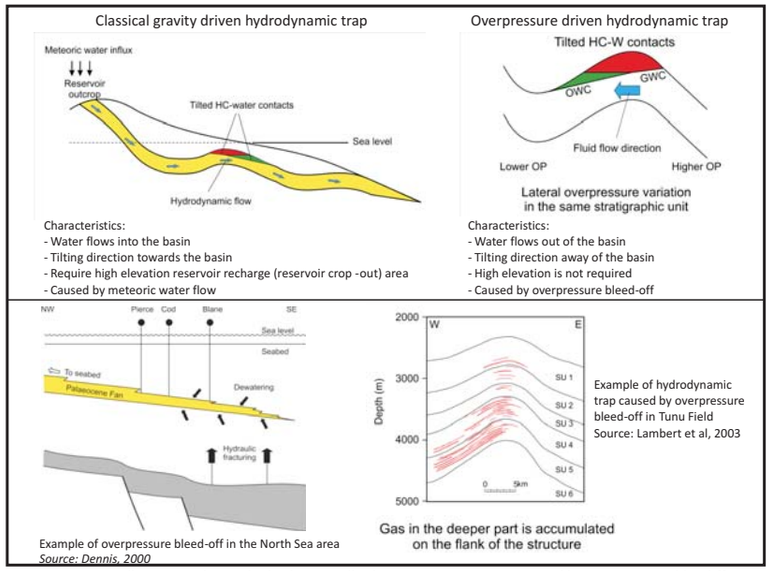


Figure 3. An illustration showing hydrodynamically tilting HC-water contact caused by overpressure bleed-off

Gambar 25: Cebakan hidrodinamik.

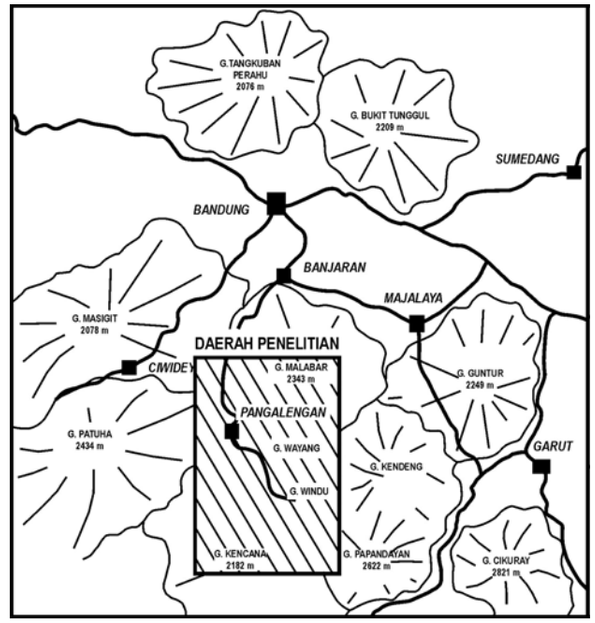
prospect adalah cebakan hidrodinamika. Selain di Cekungan Kutai Bawah, berdasarkan informasi yang sudah dipublikasikan, cebakan jenis ini kemungkinan juga ditemukan di Cekungan Sumatera Utara dan Cekungan Jawa Timur. Khusus untuk Cekungan Sumatera Utara, indikasinya sudah lebih jelas, dengan adanya *hydrocarbon water contact (hwc)* yang miring di cekungan ini, sebagaimana dilaporkan oleh Budiono (1988) dan Dennis (2000) (Gambar 24). Perlu ditambahkan bahwa masih terdapat banyak cekungan sedimen di Indonesia dimana bukan tidak mungkin juga terdapat cebakan hidrodinamik.

IV.2. Peresapan Air pada Lapangan Panasbumi.

Di Indonesia terdapat potensi panas bumi yang sangat besar, sekitar 27.000 MW, yaitu 40% dari potensi dunia, nomor satu di dunia. Panasbumi dikenal sebagai sumber energi yang dapat diperbaharui dan proses pembaruan terjadi di daerah resapan, dimana air hujan memasuki suatu sistem panasbumi. Kelangsungan hidup sumber energi ini dapat dijamin apabila dilakukan konservasi dengan baik terhadap daerah resapan tersebut. Hal ini hanya dapat dilakukan apabila kita mengerti bagaimana proses peresapan itu berlangsung, dan dalam hal ini metoda simulasi numerik akan sangat membantu dalam penelitian – penelitian yang berhubungan dengan proses tersebut. Hal yang menarik untuk daerah panasbumi adalah keberadaan sumber panas, dalam hal ini magma, yang relatif dekat ke permukaan. Penulis yakin bahwa sumber panas ini tentu

mempengaruhi pola aliran airtanah, termasuk peresapan. Studi literatur yang telah penulis lakukan belum menemukan adanya penelitian mengenai hal ini, bukan hanya di Indonesia, tetapi juga di negara – negara lain.

Sebelum penelitian seperti disebutkan diatas dapat dilakukan, perlu ditentukan terlebih dahulu dimana daerah resapan pada suatu lapangan, dan hal ini telah kami rintis untuk lapangan Wayang Windu (Gambar 26) (Hutasoit dan Hendrasto, 2007) dengan menggunakan isotop stabil ^{18}O dan ^{2}H (D, deuterium). Menurut Nicholson (1993) kedua isotop ini dapat digunakan untuk menentukan daerah resapan fluida panasbumi. Metoda ini didasarkan pada hasil penelitian Craig (1963) yang menunjukkan

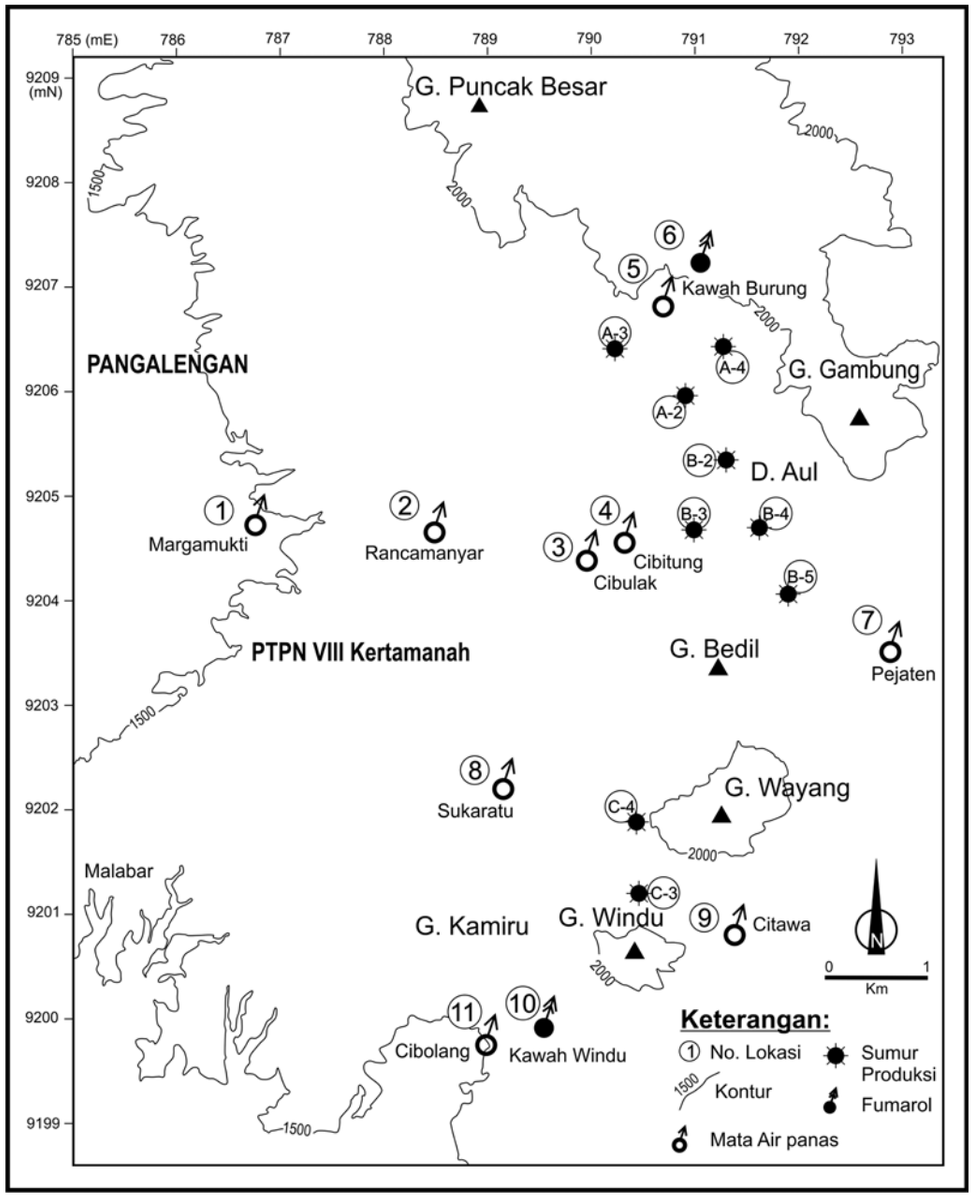


Gambar 26: Daerah penelitian.

bahwa kandungan D fluida dari lapangan - lapangan panasbumi sama dengan kandungan D air meteorik lokal. Untuk Indonesia, air meteorik ini adalah air hujan. Sementara itu, kandungan ^{18}O fluida panasbumi lebih tinggi daripada dalam air meteorik lokal. Berdasarkan fakta - fakta ini disimpulkan bahwa fluida panasbumi berasal dari air meteorik, sedangkan pengayaan kandungan ^{18}O disebabkan oleh interaksi dengan batuan. Dalam penentuan daerah resapan, langkah pertama yang dilakukan adalah mencari titik potong antara garis - garis komposisi fluida panasbumi dengan air meteorik lokal, yang menunjukkan komposisi isotop air hujan di daerah resapan. Komposisi isotop air hujan tergantung pada elevasi, sehingga langkah selanjutnya yang diperlukan adalah analisis isotop pada elevasi yang berbeda - beda (Gambar 27 dan Gambar 28). Penggabungan hasil kedua langkah tersebut akan memberikan elevasi daerah resapan, yang untuk lapangan Wayang Windu, hasilnya ditunjukkan pada Gambar 29. Hasil ini, digabungkan dengan informasi geologi rinci, akan menghasilkan deliniasi daerah resapan yang rinci, dimana penelitian - penelitian hidrogeologi tentang proses peresapan di lapangan ini akan dilakukan.

IV.3. Mineralisasi Tipe MVT di Indonesia.

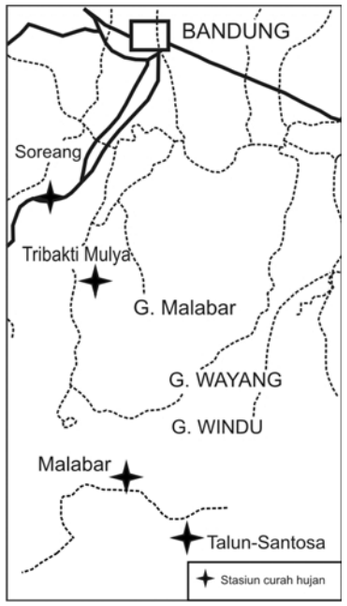
Tipe mineralisasi ini pertama kali ditemukan di Daerah Aliran Sungai (DAS) Mississippi di Amerika Serikat, sehingga disebut sebagai Mississippi Valley Type (MVT), yang kaya akan Pb dan Zn. Mineralisasi

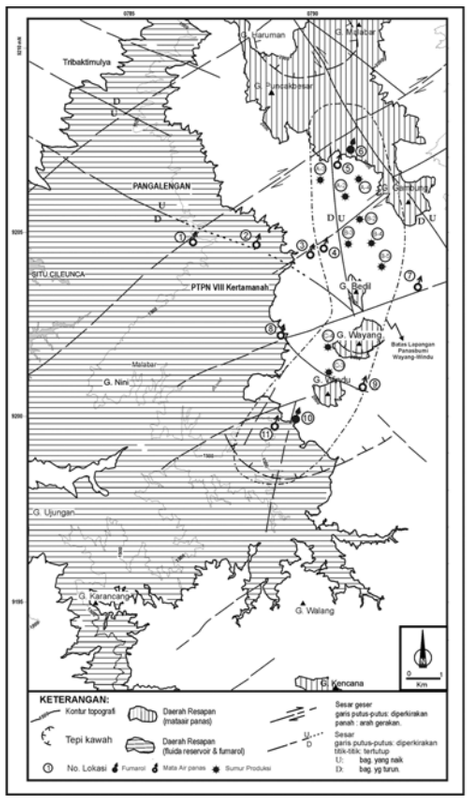


Gambar 27: Lokasi pengambilan sampel mata air panas, fumarol, dan sumur produksi.

Gambar 28:

Lokasi pengambilan sampel air hujan.

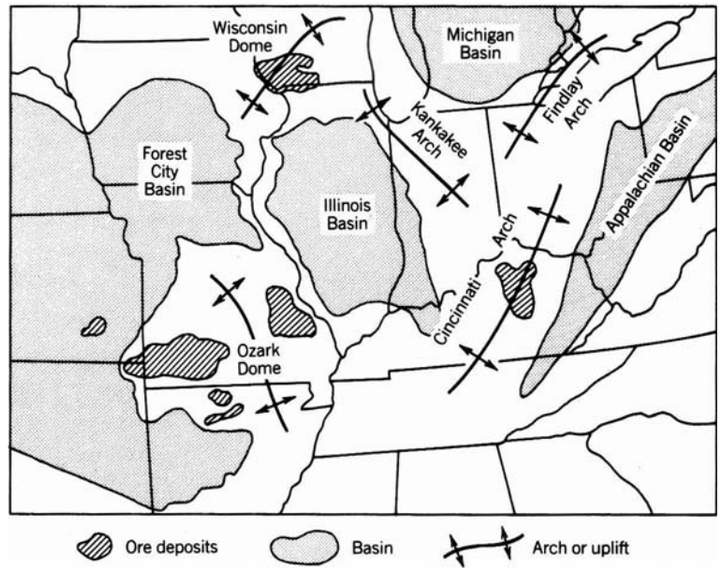




Gambar 29:

Daerah resapan di lapangan panas bumi Wayang Windu.

terutama terjadi pada batuan karbonat secara selaras dengan perlapisan, tanpa berasosiasi dengan batuan beku. Fluida pembawa mineral – mineral tersebut sangat asin, dengan temperatur 50 – 200 °C, yang mirip dengan airtanah asin yang ditemukan pada cekungan sedimen, dan mineralisasi terjadi di bagian pinggir cekungan sedimen (Gambar 30; Heyl dkk., 1970 dalam Domenico dan Schwartz, 1990).

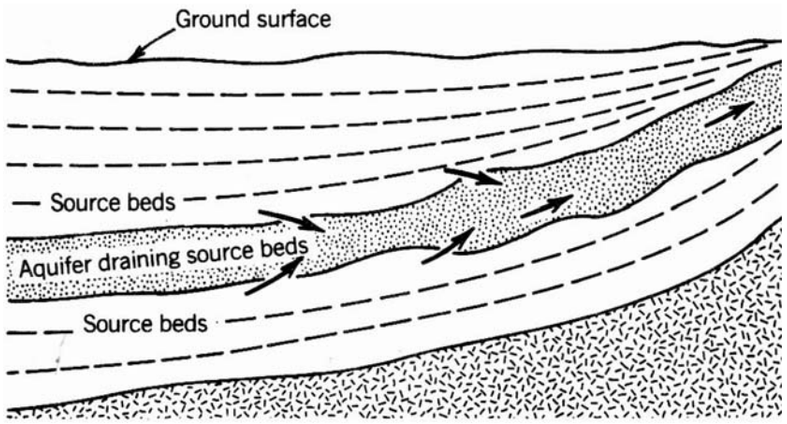


Gambar 30: Lokasi MVT dan cekungan sedimen.

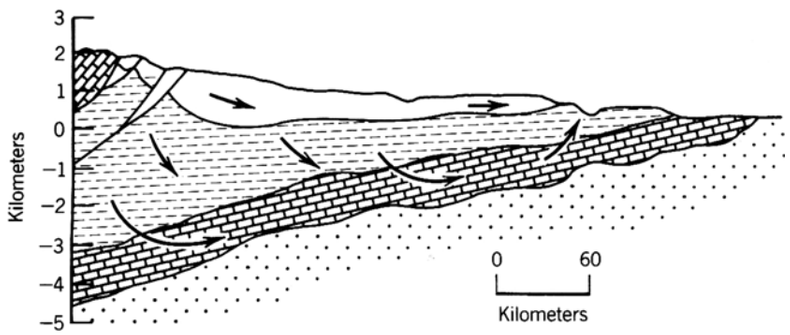
Fakta - fakta di atas diterangkan dengan menyatakan bahwa tipe mineralisasi ini terbentuk oleh aliran airtanah asin ke arah pinggir cekungan sedimen, dimana terjadi proses fisika dan kimia yang mengakibatkan terjadinya mineralisasi. Dalam perjalanannya airtanah asin melarutkan Pb dan Zn, yang kemudian diendapkan di pinggir cekungan. Aliran airtanah dapat terjadi karena adanya kompaksi *(compaction driven flow)* (Nobel, 1963; Gambar 31) dan/atau gravitasi *(gravity driven flow)* (Garven dan Freeze, 1984 ; Bethke, 1986 ; Gambar 32). Perlu ditambahkan bahwa kedua penelitian yang disebutkan terakhir menggunakan simulasi numerik dalam analisis mereka.

Pb dan Zn yang cukup ekonomis di Indonesia pertamakali ditemukan

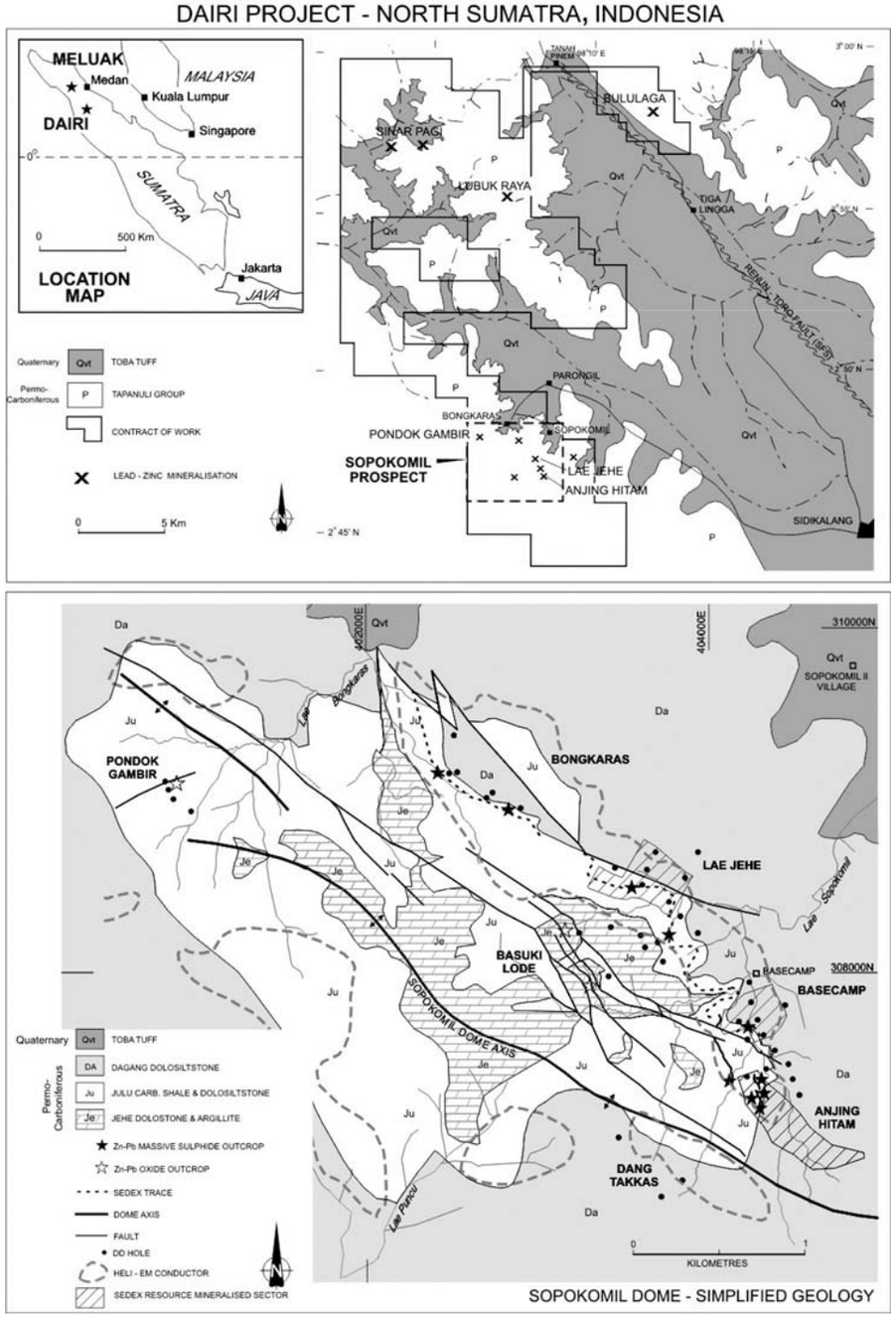
di Kabupaten Dairi, Sumatra Utara pada tahun 1990 an (Gambar 33). Salah satu tipe mineralisasi yang ditemukan adalah *Jehe Mississippi Valley Type* (Middleton, 2011). Penemuan mineralisasi tipe ini di Indonesia telah memicu kami melakukan penelitian hidrogeologi dengan bantuan simulasi numerik untuk mencoba mencari lokasi - lokasi keberadaan Pb dan Zn di sekitar Dairi dan juga di daerah - daerah lain di Indonesia.



Gambar 31: Aliran airtanah karena kompaksi.



Gambar 32: Aliran airtanah karena gravitasi.



Gambar 33: Mineralisasi Pb dan Zn di Dairi, Sumatera Utara.

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Pertama-tama penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada Tuhan Yang Mahakuasa atas segala karuniaNya sehingga penulis dapat mencapai posisi Guru Besar ini.

Kepada Mendiknas dan ITB, terima kasih atas kepercayaan yang diberikan kepada penulis sebagai Guru Besar. Dalam proses untuk pencapaian ini, penulis memperoleh rekomendasi dari Prof. Deny Juanda Puradimaja, Prof. Sudarto Notosiswoyo, Prof. Indratmo Sukarno, dan Prof. Djoko Santoso. Rasa terimakasih penulis sampaikan kepada beliau-beliau ini.

Dalam proses pendidikan penulis memperoleh banyak bimbingan berupa keilmuan geologi dan hidrogeologi serta pengetahuan mengenai kehidupan secara umum. Para pembimbing tersebut adalah Prof. (em) Soejono Martodjojo, alm. Prof. Patrick A. Domenico, Prof. Albert Hsui, Prof. Colin Booth, dan Dr. Keros Cartwright, yang sangat pantas mendapatkan terimakasih dari penulis. Hal yang sama juga penulis sampaikan kepada para dosen yang pernah mengajar penulis.

Rekan-rekan sejawat di KK Geologi Terapan, KK Geologi, Prodi Teknik airtanah, dan Prodi Teknik Geologi sangat sering terlibat dalam diskusi dengan penulis, yang sangat membantu penulis dalam pelaksanaan Tri Dharma Perguruan Tinggi. Penulis menyampaikan terimakasih kepada rekan-rekan seperjuangan ini, terutama kepada Dr. Agus M. Ramdhan, yang akan meneruskan rintisan yang sudah penulis lakukan. Para kolega di luar ITB juga banyak memberikan kontribusi dalam penelitian-penelitian yang penulis lakukan, yang untuk itu penulis memberikan penghargaan yang tulus, terutama kepada Ir. M. Haris Pindratno dari Pemda DKI Jakarta dan Ir. Ismail Hasjim dari Pemda Jawa Barat. Apresiasi juga disampaikan kepada para mahasiswa yang pernah penulis bimbing, terutama Ir. Erik Hermawan, serta staf di Ruang Simulasi Numerik, Laboratorium Hidrogeologi, yang telah banyak membantu penulis dalam melakukan penelitian.

Kepada kedua almarhum orangtua penulis, B. Hutasoit dan L boru Tampubolon, disampaikan terimakasih yang tidak cukup hanya dengan kata-kata. Bimbingan dan pengorbanan merekalah yang telah membawa penulis ke jenjang Guru Besar ini. Terimakasih juga penulis sampaikan kepada para saudara kandung penulis, atas pendampingan yang diberikan selama ini.

Kepada istri tercinta, Rosi, dan kedua anak tersayang, Dame dan Uli, penulis menyampaikan terimakasih yang tak terhingga atas pengertian, dorongan, dan pengorbanan yang diberikan. Perjuangan kita masih berlanjut, yang semuanya adalah untuk kemuliaan nama Tuhan.

DAFTAR PUSTAKA

Abidin, H.Z., Andreas, H., Djaja, R., Darmawan, D., dan Gamal, M. 2007. Land subsidence characteristcs of Jakarta Between 1997 - 2005, as

estimated using GPS Survey, GPS Solutions, Springer Verlag.

Achdan, A., dan Sudana, D. 1992 Peta Geologi Lembar Karawang, Jawa, P3G, Bandung.

Alzwar, M., Akbar, N., dan Bachri, S. 1992. Peta Geologi Lembar Garut dan Pameungpeuk, Jawa Barat, Skala 1:100.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi (PPPG)-Bandung.

Aziz, A., dan Bolt, L.H. 1984. Occurrence and detection of abnormal pressures from geological and drilling data, North Sumatra Basin. Proceedings of Indonesian Petroleum Association, 13th Annual Convention.

Bethke, C.M., 1986. Hydrologic constraints on the genesis of upper Mississippi Valley Mineral District from Illinois Basin Brines: Econ. Geol., v. 81, p. 233-249.

Budiono. 1988. Anomalous Gas – Water Contact Study Arun Field, Offshore North Sumatra, Proceedings of Indonesian Petroleum Association, 17th Annual Convention.

Craig, H. 1963. The isotopic geochemistry of water and carbon in geothermal areas. In: Tongiori, E. (ed.), Nuclear Geology in Geothermal Areas, Spoleto. 1963. Consiglio Nazional delle Richerche, Laboratorio di Geologia Nucleare, Pias, hal 17-53.

Davies, R.J., Swarbrick, R.E., Evans, R.J., and Huuse, M. 2007. Birth of a Mud Volcano: East Java, 29 May 2006, GSA Today, 17.

Dennis, H., Baillie, J., Holt, T. dan Wessel-Berg, D. 2000. Hydrodynamic activity and tilted oil-water contacts in the North Sea. *In*: Ofstad, K., Kittilsen, J.E. & Alexander-Marrack, P. (eds.) *Improving the Exploration Process by Learning from the Past. NPF*, Amsterdam, Special Publication 9, 171-185.

Dinas Pertambangan DKI dan LPM ITB. 1999. Studi Pengaruh Pemompaan Air Bawah Tanah Terhadap Land Subsidence dan Intrusi Air Laut. Laporan Akhir, Dinas Pertambangan DKI, tidak dipublikasikan, 87h.

Dinas Pertambangan DKI Jakarta dan PT Sucofindo. 2000. Pemetaan Resettlement Akibat Beban Bangunan dan Faktor Teknis Geologi. Laporan Akhir. Disbang DKI Jakarta.

Dinas Pertambangan dan Energi Jawa Barat dan LPPM ITB. 2002. Penyusunan Rencana Induk Pendayagunaan Air bawah Tanah di Cekungan Bandung dan Bogor. Laporan Akhir, Distamben Jabar, tidak dipublikasikan, 88h.

Domenico, P.A., dan Schwartz, W. 1990. Physical and Chemical Hydrogeology: New York, John Wiley & Son.

Effendi, A.C., Kusnama, dan Hermanto, B. 1998. Peta Geologi Lembar Bogor, Jawa, P3G, Bandung.

Fachri, M., Djuhaeni, Hutasoit L.M., dan Agus M.R. 2002. Stratigrafi dan Hidrostratigrafi Cekungan airtanah Jakarta. Buletin Geologi, Jilid/Volume 34 No 3. ISSN 0126-3498.

Gale, J. 1990. Hydraulic behaviour of rock joints. Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Loen, Norway, N. Barton and O. Stephansson (eds), Balkema, Rotterdam, h. 351 – 362.

Garven, G., dan Freeze, R.A. 1984. Theoretical analysis of the role of groundwater flow in the genesis of stratabound ore deposits, 1, Mathematical and numerical model. American Journal of Science, v. 284, p. 1085 - 1124.

Hutasoit, L.M., dan Hsui, A.T. 1985. Numerical Simulation of Thermohaline Convection within porous medium. The Geol. Soc. Of America 19th Ann. Meet.

Hutasoit, L.M. 1994. A Numerical Method to Solve the Differential Equation Governing Transport Process within Porous Media. Buletin Geologi Vol 24, No. 3.

Hutasoit, L.M. 1996a. Stability analysis of thermohaline convection within porous medium. Buletin Geologi, Vol. 26, No. 2/3.

Hutasoit, L.M. 1996b. Oscillatory groundwater movement due to thermal and concentration gradients : Result of numerical simulation. Pros. PIT IAGI XXV.

Hutasoit, L.M. 2002. Appropriate Governing Equation and a Proposed Numerical Method for Groundwater with Variable Density in Tilted Layer. Buletin Geologi, Jilid/Volume 34, No 2. ISSN 0126-3498.

Hutasoit, L.M., dan Hendrasto, F. 2007. Daerah Resapan Lapangan Panas Bumi Wayang-Windu Berdasarkan Kandungan Isotop 18O dan 2H Fluida. Jurnal JTM Vol XIV, No 2. ISSN 0854-8528.

Hutasoit, L.M. 2009. Kondisi Muka airtanah dengan dan Tanpa Peresapan Buatan di Daerah Bandung: Hasil Simulasi Numerik. Jurnal Geologi Indonesia Vol. 4, No. 3. ISSN 1907-2953.

Hutasoit, L.M., Daryono, M.R., Widodo, L.E., dan Syaifullah, T. 2010. Distribusi Vektor Aliran airtanah Dua Dimensi dalam Media Rekahan di Big Gossan, Tembagapura, Papua. Jurnal Teknik Sipil Vol 17, No.2. ISSN 0853-2982.

Iwaco–Waseco dan PU. 1990. West Java Provincial Water Sources Master Plan for Water Supply, Bandung Hydrological Study. Government of Indonesia, Ministry of Public Works, Jakarta, and Directorate General for Human Settlements, Directorate of Water Supply and Government of the Netherlands, Ministry of Foreign Affair, Directorate General of International Cooperation. Laporan Akhir, Departemen PU, tidak dipublikasikan, 227h.

Koesoemadinata, R.P., dan Hartono, D. 1981. Stratigrafi dan Sedimentasi Daerah Bandung. Proceedings PIT X Ikatan Ahli Geologi Indonesia, Bandung.

Kusmono, M., Kusnama, dan Suwarna. 1996. Peta Geologi Lembar Sindangbarang dan Bandarwaru, Skala 1: 100.000. PPPG-Bandung.

Lambert, B., Duval, B. C., Grosjean, Y., Umar, I. M., and Zaugg, P. 2003. The Peciko case history: impact of an evolving geological model on the dramatic increase of gas reserves in the Mahakam Delta. *In* M. T. Halbouty, ed., Giant oil and gas field of the decade 1990-1999: AAPG Memoir 78, p. 297-320.

Manik, P., and Soedaldjo, P.A. 1984. Prediction of Abnormal Pressure Based on Seismic Data: A Case Study of Exploratory Well Drilling in Pertamina UEP I and UEP II Work Areas. Proceedings of Indonesian Petroleum Association, 13th Annual Convention.

Mazzini, A., Svensen, H., Akhmanov, G.G., Aloisi, G., Planke, S., Malthe-Sorenssen, A., and Istadi, B. 2007. Triggering and Dynamic Evolution of the LUSI Mud Volcano, Indonesia, Earth and Planetary Science Letters, 261.

Middleton, T.W. 2011. The Dairi Zinc-Lead Project, North Sumatra, Indonesia. http://www.smedg.org.au/Tiger/DairiZinc.htm.

Murdohardono, D., dan Tirtomihardjo, H. 1993. Penurunan tanah di

Jakarta dan rencana pemantauannya. Proceedings PIT XXII Ikatan Ahli Geologi Indonesia, Bandung.

Nicholson, K. 1993. Geothermal Fluids, Chemistry and Exploration Techniques. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 206 hal.

Nobel, E.A. 1963. Formation of ore deposits by water of compaction: Econ. Geol., v. 58, p. 1145-1156.

Oda, M., Kanamaru, M., dan Iwashita, K. 1996. The effect of crack geometry on hydrodynamic dispersion in cracked media. Soils And Foundations, Japanese Geotechnical Society, Vol. 36, No. 2, h. 69-80.

Ramdhan, A.M., dan Hutasoit, L.M. 2007. Contribution of Groundwater Abstraction to Land Subsidence in Jakarta. Proceeding of International Symposium and Workshop on Curent Problem in Groundwater Management and Related Water Resources Issues.

Ramdhan, A.M., Hutasoit, L.M., dan Goulty, N.R. 2011. The challenge of pore pressure prediction in Indonesia's warm Neogene basins. Proceedings of Indonesian Petroleum Association, 35th Annual Convention.

Setiawan, I. dan Syaifullah, T. 2004. Dewatering and identification of groundwater resources at DOZ block cave mine PT. Freeport Indonesia. Prosiding PERHAPI XIII, Palembang.

Silitonga, P.H. 1973. Peta Geologi Lembar Bandung, Jawa Barat, Skala 1:100.000. PPPG-Bandung.

Stommel, H., Arons, A. B., and Blanchard, D. 1965. An oceanographical curiosity: the perpetual salt fountain. Deep Sea Research, v.3: 152-153.

Sujatmiko. 2003. Peta Geologi Lembar Cianjur, Jawa Barat, Skala 1:100.000. PPPG-Bandung.

Swann, D.H., dan Bell, A.H. 1958. Habitat of oil in the Illinois Basin. Dalam: Habitat of Oil. AAPG, Tulsa, OK.

Turkandi, T., Sidarto, Agustyanto, D.A., dan Hadiwidjoyo, M.M.P. 1992. Peta Geologi Lembar Jakarta dan Kepulauan Seribu, Jawa, P3G, Bandung.

Veronis, G. 1965. On finite amplitude instability in thermohaline convection. J. Marine Research, v.23, n. 1:1-17.

REKAMAN KARYA ILMIAH

- **Hutasoit, L.M.,** dan Hsui. A.T., 1985. Numerical Simulation of Thermohaline Convection within porous medium. The Geol. Soc. Of America 19th Ann. Meet.
- **Hutasoit, L.M.**, dan Davidson, D.M., Jr. 1988. Hydrogeology of Precambrium Bedrock, Wood, Portage and Marathon Counties, Central Wisconsin. Am. Wat. Res. Ass 13th Ann. Meet.
- **Hutasoit, L.M.,** Booth, C.J., Marin, L.E., 1989. Regional Hydrodynamic of the Illinois Basin from DST Data. Am. Geoph. Union. Spring Meeting.
- Santoso, Djoko, dan **Hutasoit, L.M.**, 1993. Pemodelan Geometri Geologi Perangkap airtanah, Proc. Simp. Nas. Permasalahan Air di Indonesia, 1993.
- **Hutasoit, L.M.**, 1994. A Numerical Method to Solve the Differential Equation Governing Transport Process within Porous Media, Buletin Geologi Vol 24, No. 3.
- **Hutasoit, L.M.**, 1996. Stability analysis of thermohaline convection

within porous medium. Buletin Geologi Vol. 26, No. 2/3. ISSN 0126 – 3498.

- **Hutasoit, L.M.,** 1996. Oscillatory groundwater movement due to thermal and concentration gradients : Result of numerical simulation. Pros. PIT IAGI XXV.
- **Hutasoit, L.M.,** Pindratno, M.H., dan Rochaddi, B., 1997. Effectiveness of artificial recharge by injection well in Jakarta. Pros. PIT IAGI XXVI.
- Sadisun, I.A., **Hutasoit, L.M.**, dan Pindratno, M.H., 1997. Identifikasi awal dan klasifikasi material bahan timbunan reklamasi di daerah Karawang-Bekasi dan sekitarnya. Pros. Sem. Nas. Sumberdaya Manusia Geologi Indonesia 1997, Jurusan Teknik Geologi, UPN " Veteran " Yogyakarta.
- Sadisun, I.A., **Hutasoit, L.M.**, dan Pindratno, M.H., 1997. Batuan di alam sebagai material reklamasi; Studi kasus: Evaluasi awal dan klasifikasi material reklamasi di Daerah Tangerang. Pros. PIT IAGI XXVI.
- **Hutasoit, L.M.,** dan Pindratno, M.H., 1997. Groundwater salinity and its management in Jakarta. Proc. Workshop on Coastal Nearshore Geological/Oceanographical Assesment of Jakarta Bay : A Basis for Coastal Zone Management and Development. ISSN 0852 – 873X.
- **Hutasoit, L.M.**, dan Darmawan, I., 1998. Some infiltration characteristics of Northern Bandung Area. Proc. PIT IAGI XXVII. ISBN 979-8126-02-5.
- **Hutasoit, L.M.,** dan Ashari, Y., 1998. The origin of saline spring water in Baliem Valley, Irian Jaya based on its isotopic composition. Proc. PIT IAGI XXVII. ISBN 979 – 8126 – 02 – 5.

- **Hutasoit, L.M.,** dan Purwanto, 1999. Variation of water content due to rain and its impact on slope stability of Gunung Merapi volcanic material. Buletin Geologi Vol. 30, No. 3. ISSN 0126 – 3498.
- **Hutasoit, L.M.,** Yulianto, E., dan Pindratno, M.H, 2000. Tertiary-Quaternary Boundary in Jakarta and Some of its Implications on Environmental Geologic Management. Proc. PIT IAGI XXIX ISBN 979-96140-2-3.
- Asseggaf, A., **Hutasoit, L.M.**, 2000. Potensi pencemaran airtanah asin di selatan wilayah DKI Jakarta. Proc. PIT IAGI XXIX ISBN 979-96140-2-3.
- Assegaf, A., **Hutasoit, L.M.**, 2001. Hydrodynamic study of groundwater based on pressure vs depth analysis from wells developed in Jakarta Groundwater Basin. Proc. IAGI 30th Annual Convention Indonesian Association of Geologist, hal 74-77.
- **Hutasoit, L.M.,** 2001. Kemungkinan Hubungan antara Kompaksi Alamiah dengan Daerah Genangan Air di DKI Jakarta. Buletin Geologi, Jilid/Volume 33, No. 1. ISSN 0126-3498.
- Parhusip, H., Legowo, S., **Hutasoit, L.M**., 2001. Ketersediaan airtanah untuk Pengembangan Irigasi di Nainggolan, Pulau Samosir. Buletin Geologi, Jilid/Volume 33, No. 3. ISSN 0126-3498.
- **Hutasoit, L.M.**, 2002. Appropriate Governing Equation and a Proposed Numerical Method for Groundwater with Variable Density in Tilted Layer. Buletin Geologi, Jilid/Volume 34, No 2. ISSN 0126-3498.
- Muhammad Fachri, Djuhaeni, **Hutasoit L.M.,** dan Agus M.R., 2002. Stratigrafi dan Hidrostratigrafi Cekungan airtanah Jakarta. Buletin

Geologi, Jilid/Volume 34 No 3. ISSN 0126-3498.

- Deny Juanda Puradimaja, D. Erwin Irawan, dan **Hutasoit, L.M.,** 2003. The Influence of Hydrogeological Factors on Variations of Volcanic Spring Distribution, Spring Discharge, and Groundwater Flow Pattern. Buletin Geologi. Vol. 35, No. 1. ISSN 0126-3498.
- **Hutasoit, L.M.**, Pindratno, M.H., 2004. Bab : Amblesan Tanah di DKI Jakarta. Buku Longsor – P3TPSLK, BPPT.
- **Hutasoit, L.M.,** 2004. Teknologi Inventarisasi airtanah. Seminar Sehari Tentang airtanah, DTLGKP-Direktorat Jenderal Geologi dan Sumber Daya Mineral, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Deny Juanda Puradimaja, **Hutasoit, L.M.,** Hendri Silaen., D. Erwin Irawan., 2005. The Origin of Hyperthermal Groundwater in Fractured Limestone Aquifer, Parigi Formation in Palimanan, West Java, Based on Its Water Chemistry and Isotopic Composition. Jurnal JTM Volume XII, No. 1. ISSN 0854-8528.
- Sanny, T.A., D.J. Puradimaja., D.E. Irawan., 2005. **L.M. Hutasoit.**, Sudarto N. Aquifer Model and System Imaging By 2D and 3D Resistivity Inversion Technology: Case Study of Tangerang Area. Jurnal JTM Vol XII, No. 2. ISSN 0854-8528.
- Suryantini., A. Ashat., D.R. Achmad., J. Simanjuntak., **Hutasoit, L.M**., I. Hasjim., 2005. Searching for an Opportunity in the Development of Direct Use Geothermal Resources; A Case Study in West Java Province-Indonesia. Proceedings World Geothermal Congress. ISBN: 9989-2315-2-4, Antalya, Turkey.
- **Hutasoit, L.M.**, 2005. Hydrostratigraphy of Minas, Duri, and Dumai. Sumatra Stratigraphy Workshop, ISBN: 978-979-8126-20-8.

- Nasution, A., **Hutasoit, L.M.**, 2006. Study of Gases from PT. Bukit Asam Coal Mine, Tanjung Enim, South Sumatra, Proceedings of 4th International Workshop on Earth Science an Technology. ISBN: 978-4-9902356-7-3.
- S. Azan., **Hutasoit, L.M.**, A.M. Ramdhan., 2006. Penentuan Daerah Resapan Sumber Mataair Daerah Sibolangit, Sumatra Utara. Geoaplika Volume 1, No. 1, hal. 15-30. ISSN 1907-2279.
- **Hutasoit, L.M.,** A.M. Ramdhan., 2006. Recharge Area and The Origin of Brackish Water in East Bandung: Result of Exploration Well. Proceedings of 9th International Symposium on Mineral Exploration. ISBN: 979-3507-88-8.
- **Hutasoit, L.M.,** I. Iskandar., 2006. Potential Arsenic Source and Recharge Area in Buyat Village. Proceedings of 9th International Symposium on Mineral Exploration. ISBN: 979-3507-88-8.
- **Hutasoit, L.M.,** I. Iskandar., A.M. Ramdhan., 2006. Potential of Artifical Groundwater Recharge Through Surface Reservoir for Jakarta Aquifer. Proceedings of 4th International Workshop on Earth Science an Technology. ISBN: 978-4-9902356-7-3.
- **Hutasoit, L.M.,** Hendrasto, F., 2007. Daerah Resapan Lapangan Panas Bumi Wayang-Windu Berdasarkan Kandungan Isotop 18O dan 2H Fluida. Jurnal JTM Vol XIV, No 2. ISSN 0854-8528.
- **Hutasoit, L.M.**, H. Parhusip., dan A.M. Ramdhan., 2007. Potensi Polusi airtanah dari Tangki Penyimpanan BBM di Propinsi DKI Jakarta (Studi Kasus: Depot Pertamina Plumpang). Geoaplika Volume 2, No. 1. ISSN 1907-2279.
- A.M. Ramdhan., **Hutasoit, L.M.,** 2007. Contribution of Groundwater

Abstraction to Land Subsidence in Jakarta. Proceedings of International Symposium and Workshop on Curent Problem in Groundwater Management and Related Water Resources Issues.

- A.M. Ramdhan., **Hutasoit, L.M.,** Richard E. Swarbrick., 2007. Hypothetical Analysis on Hydrodynamic Trap in Kutai Basin and Its Opportunity. Proceedings Joint Convention HAGI-IAGI-IATMI Bali 2007 The 32nd HAGI, the 36th IAGI, and the 29th IATMI Annual Convention and Exhibition.
- **Hutasoit, L. M.,** I.Iskandar., 2007. Groundwater Pathway for Arsenic from Mining Site to Buyat Village. Proceedings of 5th International Symposium on Earth Science and Technology. ISBN: 978-4-9902356-8-1.
- Nasution A., Djedi S. Widarto, **L. M. Hutasoit,** Dewi Yuliani, and Sumarwan Hadisoemarto., 2008. Geothermal Geophysical Study of Mt. Papandayan, Garut District, West Java Indonesia. Proceedings of the 8th Asian Geothermal Symposium.
- **Hutasoit, L.M.,** R.F. Lubis., 2008. Penentuan Daerah Resapan airtanah Berdasarkan Kandungan Isotop ^{18}O dan ^{2}H. Seminar airtanah Badan Geologi 2008, Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Untuk Pemanfaatan dan Konservasi airtanah. ISBN 978-979-18509-0-2.
- **Hutasoit, L.M.**, 2009. Kondisi Muka airtanah dengan dan Tanpa Peresapan Buatan di Daerah Bandung: Hasil Simulasi Numerik. Jurnal Geologi Indonesia Vol. 4, No. 3. ISSN 1907-2953.
- **Hutasoit, L.M,** Mudrik R. Daryono, Lilik Eko Widodo, Toddy Syaifullah., 2010. Distribusi Vektor Aliran airtanah Dua Dimensi dalam Media Rekahan di Big Gossan, Tembagapura, Papua. Jurnal Teknik Sipil Vol 17, No.2. ISSN 0853-2982.

- Ramdhan, A.M., Goulty, N.R., dan **Hutasoit, L.M.,** 2011. Outstanding questions about overpressure and compaction in the Lower Kutai Basin. AAPG Special Meeting on Overpressure, Galveston, Texas, Accepted.
- Ramdhan, A.M., **Hutasoit, L.M.**, dan Goulty, N.R., 2011. The challenge of pore pressure prediction in Indonesia's warm Neogeone Basin, Proc. Of 35th Annual Convention and Exhibition, Indonesian Petroleum Association, Accepted.

CURRICULUM VITAE

Nama : **LAMBOK MARINGAN HUTASOIT**
Tempat/tgl. lahir : Medan, 28 Agustus 1953
Alamat Kantor : Prodi Teknik Geologi, FITB, ITB
Jl. Ganesha No. 10, Bandung
Telp/Fax (022) 25342622
E-mail : lambok@gc.itb.ac.id

Nama Istri : Roosyana Hutasoit
Nama Anak : - Dameria Maranatha Gloriani Hutasoit
- Asiuli Demak Gloriana Hutasoit

RIWAYAT PENDIDIKAN:

- 1992 : Ph.D., Northern Illinois University, USA
- 1986 : M.Sc., University of Illinois at Champaign - Urbana, USA
- 1976 : Sarjana Teknik, ITB

RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

NO.	*JABATAN*	*TAHUN*
1.	Guru Besar	2011 –
2.	Lektor Kepala	2004 – 2011
3.	Lektor Madya	1999 – 2004
4.	Lektor Muda	1994 – 1999
5.	Asisten Ahli	1988 – 1994
6.	Asisten Ahli Madya	1977 – 1988

NO.	*JABATAN*	*TAHUN*
7.	Asisten Muda	1976 – 1977

RIWAYAT KEPANGKATAN:

NO.	*PANGKAT*	*GOLONGAN*	*TAHUN*
1.	Pembina Utama Muda, FITB, ITB	IV/c	2011 –
2.	Pembina Tk. 1, FIKTM, ITB	IV/b	2007 – 2011
3.	Pembina, FIKTM, ITB	IV/a	2005 – 2007
4.	Penata Tk. 1, FIKTM, ITB	III/d	2004 – 2005
5.	Penata, FTM, ITB	III/c	1999 – 2004
6.	Penata Muda Tk. 1, FTM, ITB	III/b	1988 – 1999
7.	Penata Muda , FTI, ITB	III/a	1977 – 1988
8.	Pengatur Muda Tk. 1, FTI, ITB	II/b	1976 – 1977

RIWAYAT JABATAN STRUKTURAL

- 2007-2010 : Dekan Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian ITB
- 2005-2007 : Wakil Ketua Badan Satuan Usaha Komersil (BP SUK) ITB
- 2001-2004 : Ketua Departemen Teknik Geologi ITB
- 1995-1999 : Sekretaris Komisi Disiplin ITB
- 1996-1999 : Koordinator Asrama Mahasiswa ITB

RIWAYAT PENELITIAN (DANA RISET)

- Potensi Lapisan Batuan Dalam Sebagai Akifer di Cekungan Bandung, 1994/1995 (SPP-DPP).

- Potensi Lapisan Batuan Bagian Bawah Formasi Yogyakarta dan Formasi Sleman Sebagai Akifer di Cekungan Yogyakarta Selatan, 1995/1996 (OPF-ITB).
- Kajian Kuantitatif Peresapan Air di Kawasan Bandung Utara, 1996/1997 (OPF-ITB).
- Perubahan Kadar Air Akibat Hujan dan Hubungannya dengan Kestabilan Lereng Endapan Guguran Awan Panas Gunung Merapi, 1997/1998 (SPP-DPP).
- Hubungan antara Karakteristik Peresapan Hujan dengan Hasil Pengukuran Infiltrometer di Daerah Bandung Utara. Riset Unggulan Terpadu VII/1 tahun 1999/2000, VII/2 tahun 2000, VII/3 tahun 2001 (tiga tahun). Kantor Menteri Negara Riset dan Teknologi, Dewan Riset Nasional, dan Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.
- Pengaruh Jenis Batuan, Sifat Fisik Tanah, Kemiringan Lereng dan Tutupan Lahan Terhadap Laju Resapan di Kawasan Bandung Utara, 1998/1999 (OPF-ITB).
- Hubungan antara Karakteristik Peresapan Hujan dengan Hasil Pengukuran Infiltrometer di Daerah Bandung Utara. Riset Unggulan Terpadu VII/1 tahun 1999/2000, VII/2 tahun 2000, VII/3 tahun 2001 (tiga tahun). Kantor Menteri Negara Riset dan Teknologi, Dewan Riset Nasional, dan Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.
- Penentuan Biaya Lingkungan Dampak Pengambilan airtanah yang Mengakibatkan Kerusakan Prasarana Bangunan Sipil (Studi Kasus Cekungan airtanah Jakarta). Hibah Penelitian Tim Pascasarjana-HPTP (Hibah Pasca), Angkatan II Tahun 2004.

Proyek Pengkajian dan Penelitian Ilmu Pengetahuan dan Teknologi, Direktorat Jenderal Perguruan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional. 2004

- Penentuan Biaya Lingkungan Dampak Pengambilan airtanah yang Mengakibatkan Kerusakan Prasarana Bangunan Sipil (Studi Kasus Cekungan airtanah Jakarta). Hibah Penelitian Tim Pascasarjana-HPTP (Hibah Pasca), Angkatan II Tahun 2005. Proyek Pengkajian dan Penelitian Ilmu Pengetahuan.

RIWAYAT DALAM ORGANISASI PROFESI

- I.A.G.I. (Ikatan Ahli Geologi Indonesia):
  - Ketua Pengda Jabar
  - Ketua Umum
- IAEG (International Association of Engineering Geologist): Anggota
- I.A.H. (International Association of Hydrogeologist): Anggota
- NGWA (National Ground Water Association): Anggota.

PENGHARGAAN

- 1998 : Satya Lencana Karya Satya XX, Keputusan Presiden RI
- 2000 : Penyumbang Dana Pengembangan Institusi Terbesar Kedua ke ITB melalui LPM – ITB
- 2002 : Lencana Pengabdian 25 tahun ITB
- 2009 : Satya Lencana Karya Satya XXX, Keputusan Presiden RI
- 2011 : Ganesa Wira Adiutama