



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Ridho Kresna Wattimena

**PERAN MEKANIKA BATUAN
DALAM PERANCANGAN KONSTRUKSI
BAWAH TANAH**

27 Februari 2015
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung
27 Februari 2015

Profesor Ridho Kresna Wattimena

PERAN MEKANIKA BATUAN
DALAM PERANCANGAN KONSTRUKSI
BAWAH TANAH



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Judul: PERAN MEKANIKA BATUAN DALAM PERANCANGAN
KONSTRUKSI BAWAH TANAH
Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,
tanggal 27 Februari 2015.

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

Ridho Kresna Wattimena
PERAN MEKANIKA BATUAN DALAM PERANCANGAN KONSTRUKSI
BAWAH TANAH
Disunting oleh Ridho Kresna Wattimena

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2015
vi+58 h., 17,5 x 25 cm
ISBN 978-602-8468-75-6
1. Teknik 1. Ridho Kresna Wattimena

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan kasih-sayang-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan naskah orasi ilmiah guru besar ITB ini. Penghargaan dan terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada Pimpinan dan Anggota Forum Guru Besar ITB, yang telah memperkenankan penulis menyampaikan orasi ilmiah ini pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar ITB, pada hari Jum’at 27 Februari 2015, sebagai salah satu bentuk pertanggungjawaban akademik kepada ITB dan masyarakat Indonesia yang telah mempercayakan jabatan Guru Besar kepada penulis

Naskah orasi ilmiah berjudul **“Peran Mekanika Batuan dalam Perancangan Kontruksi Bawah Tanah”** ini diawali dengan pengertian dan perkembangan mekanika batuan dan kontruksi bawah tanah, dilanjutkan dengan karakterisasi batuan dan massa batuan serta perancangan konstruksi bawah tanah, disertai beberapa contoh karya ilmiah penulis. Pada bagian akhir naskah pidato ilmiah ini penulis memberikan sumbangan pemikiran untuk pengembangan mekanika batuan di masa yang akan datang.

Semoga tulisan ini dapat memberikan wawasan dan inspirasi yang bermanfaat bagi para pembaca.

Bandung, 27 Februari 2015

Ridho Kresna Wattimena

“Allah telah menurunkan air (hujan) dari langit, maka mengalirlah air di lembah-lembah menurut ukurannya, maka arus itu membawa buih yang mengembang. Dan dari apa (logam) yang mereka lebur dalam api untuk membuat perhiasan atau alat-alat, ada (pula) buihnya seperti buih arus itu. Demikianlah Allah membuat perumpamaan (bagi) yang benar dan yang batil. Adapun buih itu, akan hilang sebagai sesuatu yang tak ada harganya; adapun yang memberi manfaat kepada manusia, maka ia tetap di bumi”(Ar Ra’d, 17)

untuk
Bayu, Yudho, dan Rizqi
dengan cinta

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
1. PENDAHULUAN	1
2. KARAKTERISASI BATUAN DAN MASSA BATUAN	4
2.1. Uji Laboratorium	4
2.2. Uji <i>In Situ</i>	9
3. PERANCANGAN KONSTRUKSI BAWAH TANAH	14
3.1. Metode Empirik	14
3.2. Metode Analitik	17
3.3. Metode Observasi	19
3.4. Metode Hibrid Numerik-Empirik	21
3.5. Metode Probabilistik	26
4. PENUTUP	31
4.1. Peluang ke Depan	31
4.2. Pengembangan ke Depan	32
UCAPAN TERIMA KASIH	33
DAFTAR PUSTAKA	37
CURRICULUM VITAE	45

PERAN MEKANIKA BATUAN DALAM PERANCANGAN KONSTRUKSI BAWAH TANAH

1. PENDAHULUAN

Mekanika merupakan bagian dari ilmu fisika yang mempelajari pengaruh beban pada obyek tertentu dan dapat dikatakan bahwa tidak ada subyek yang mempunyai peran lebih besar daripada mekanika dalam analisis rekayasa. Mekanika batuan sebagai bagian dari mekanika dengan batuan sebagai obyek utama mempunyai beberapa definisi seperti terlihat berikut ini.

Rock mechanics is the theoretical and applied science of the mechanical behaviour of rock and rock masses; it is a branch of mechanics concerned with the response of rock and rock mass to the force fields of their physical environment (US National Committee on Rock Mechanics, 1974).

The term rock mechanics refers to the basic science of mechanics applied to rocks (Hudson & Harrison, 1997).

The field of rock mechanics is taken to include all studies relative to the physical and mechanical behaviour of rocks and rock masses and the applications of this knowledge for the better understanding of geological processes and in the fields of engineering (International Society for Rock Mechanics Statutes, approved in India on 24 October 2010).

Dari beberapa definisi di atas, dapat dikatakan bahwa mekanika batuan merupakan sains teoritis dan terapan tentang perilaku mekanik batuan dan massa batuan dan mencakup pengujian laboratorium dan *in situ*, penyelidikan lapangan, analisis dan pemodelan numerik, serta pemantauan dan instrumentasi.

Perkembangan mekanika batuan telah dimulai jauh sebelum ini, ketika Coulomb menyampaikan hasil pengujian batugamping Bordeaux pada tahun 1773 dalam sebuah makalah di depan *French Academy* pada tahun 1776 (Coulomb, 1776). Selanjutnya, beberapa peneliti dan insinyur mulai mempelajari proses keruntuhan batuan, misalnya von Karman (1911), King (1912), Griggs (1936), Ide (1936), dan Terzaghi (1945). Meskipun mereka tidak mengklasifikasi dirinya sebagai insinyur mekanika batuan, mereka memberikan kontribusi berarti pada dasar-dasar mekanika batuan yang kita kenal sekarang.

Mekanika batuan mulai berkembang secara signifikan pada awal tahun 1960-an, diawali oleh banyaknya longsor yang terjadi di sepanjang terusan Panama baik pada tahap konstruksi (lihat Gambar 1) maupun pada tahap awal operasinya. Rogers (2011) mencatat lebih dari 60 longsor terjadi sejak tahun 1912 sebelum terusan tersebut diserahkan kepada pemerintah Panama pada tahun 1979.

Pekerjaan konstruksi bawah tanah sendiri sudah dilakukan sejak ribuan tahun yang lalu. Penambangan bawah tanah bijih besi telah dilakukan di Swaziland 5000 tahun sebelum masehi sedangkan *Terelek kaya tüneli* di bawah Sungai Kizil River di Turki diperkirakan telah dibangun 5000 tahun yang lalu untuk keperluan militer. Contoh lainnya adalah *qanat* (terowongan air) sepanjang 45 km yang dibangun 2700 tahun yang lalu di Kota Gonabad di Iran (lihat Gambar 2) dan sampai saat ini masih digunakan untuk mengalirkan air untuk keperluan pertanian dan air minum.



Gambar 1. Contoh longsor yang terjadi pada tanggal 21 Agustus 1912 dalam pekerjaan konstruksi terusan Panama (Rogers, 2011)



Gambar 2. *Qanat* di Kota Gonabad, Iran (www.panoramio.com/photo/5567727)

Saat ini tuntutan industri akan perancangan proyek atau proses yang akurat dan presisi telah menyebabkan evolusi yang sangat cepat dalam rekayasa serta perkembangan sains kebumih dan mekanika batuan. Komitmen intelektual dari beberapa peneliti dan institusi pada perkembangan mekanika batuan telah menghasilkan perkembangan yang sangat baik dalam kemampuan perancangan rekayasa pada massa batuan.

2. KARAKTERISASI BATUAN DAN MASSA BATUAN

Titik awal dari setiap analisis mekanika batuan adalah *database* geologi yang secara umum terdiri atas jenis batuan, struktur geologi, dan karakteristik batuan. Analisis yang paling canggih sekalipun akan menjadi tidak berarti jika informasi geologi yang menjadi dasarnya tidak mencukupi atau tidak akurat.

2.1. Uji Laboratorium

Uji laboratorium merupakan kegiatan yang harus dilakukan untuk mendapatkan karakteristik batuan dan uji laboratorium yang paling sering dilakukan untuk mendapatkan sifat mekanik batuan adalah uji kuat tekan uniaksial, uji triaksial, dan uji geser langsung. Meskipun uji laboratorium telah dilakukan sejak beberapa puluh tahun yang lalu, pengembangan peralatan dan prosedur uji tetap berjalan sampai hari ini. Hal ini ditunjukkan dengan terus bekerjanya *Commission on Testing Methods* pada *International Society for Rock Mechanics* (ISRM).

Salah satu uji yang saat ini masih dikembangkan adalah uji rayapan geser sebagai tambahan kepada uji rayapan standar. Sebagai tahap awal, Wattimena et al. (2005a) melakukan uji ini terhadap batulumpur Melawan dengan menggunakan peralatan yang dirancang dan dibuat sendiri di Laboratorium Geomekanika dan Peralatan Tambang FTTM-ITB (lihat Gambar 3). Mereka mendapatkan bahwa rayapan geser batulumpur tersebut mengikuti model *rheology* Burger, yaitu:

$$\gamma(t) = \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{\eta_1} t + \frac{\tau}{G_2} \left(1 - e^{-\frac{G_2 t}{\eta_2}} \right)$$

dengan

τ adalah tegangan geser konstan dalam MPa;

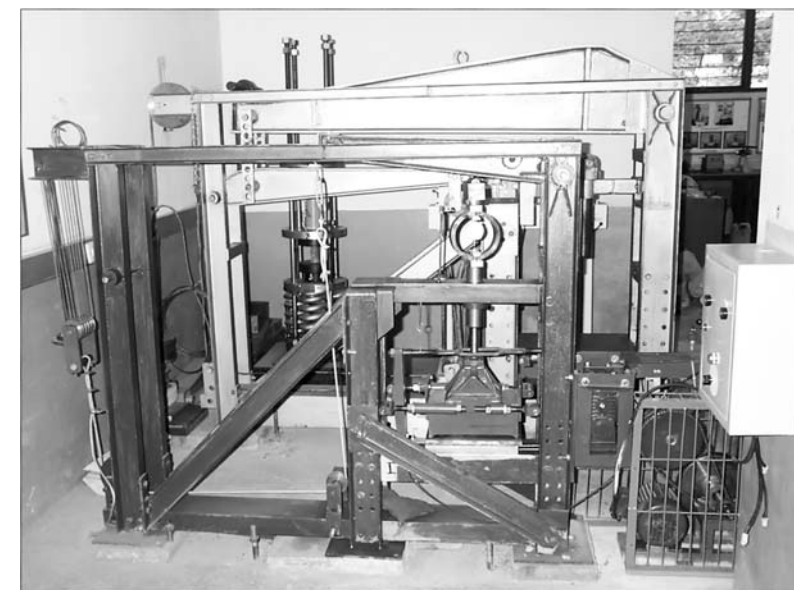
G_1 adalah kekakuan geser bernilai 0.19-0.47 MPa/mm;

G_2 adalah kekakuan geser tertunda bernilai 0.49-2.38 MPa/mm;

η_1 adalah laju aliran viskos bernilai 1250-8210 MPa.menit/mm;

η_2 adalah laju elastisitas tertunda bernilai 107-332 MPa.menit/mm;

t adalah waktu dalam menit



Gambar 3. Peralatan uji rayapan geser yang dibuat di Laboratorium Geomekanika dan Peralatan Tambang FTTM-ITB (Wattimena et al., 2005a)

Mereka juga menemukan bahwa kuat geser jangka panjang batulumpur tersebut adalah 57% dari kuat geser puncaknya.

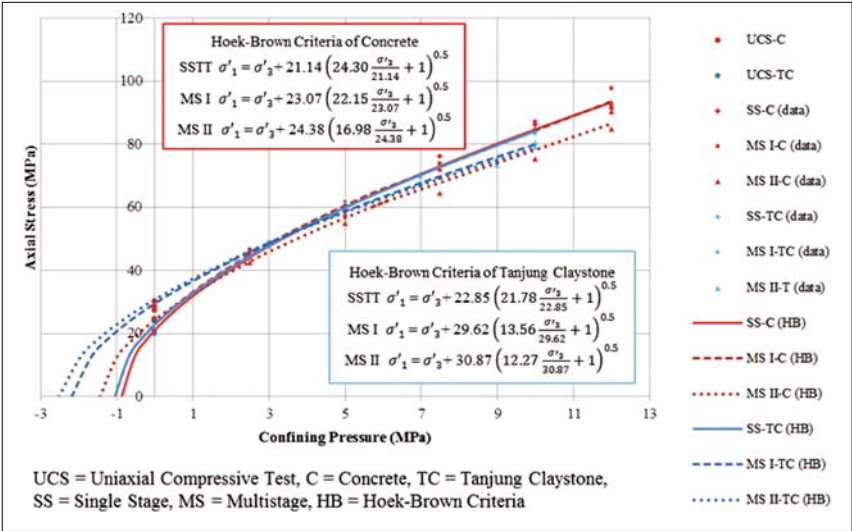
Uji triaksial multistage juga merupakan uji yang perlu dikembangkan sebagai alternatif terhadap uji triaksial standar (konvensional). Uji triaksial multistage ini hanya memerlukan satu spesimen batuan, sehingga dapat menjadi pilihan ketika jumlah contoh untuk uji triaksial konvensional (yang membutuhkan tiga sampai lima spesimen) sangat terbatas. Kramadibrata et al. (2008a) membandingkan hasil pengujian kedua metode tersebut melalui kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb, Hoek-Brown serta Bieniawski untuk batupasir, batupasir lempungan, dan andesit. Mereka menemukan bahwa perbedaan parameter yang diperoleh tidak signifikan, seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan kriteria keruntuhan hasil uji triaksial konvensional dan multistage (dimodifikasi dari Kramadibrata et al., 2008a)

Jenis batuan	Kriteria keruntuhan	Uji triaksial	Persamaan kriteria keruntuhan
Batupasir	Mohr-Coulomb	Konvensional	$\tau = 6.3 + \sigma_n \tan 44^\circ$
		Multistage	$\tau = 7.6 + \sigma_n \tan 41^\circ$
	Hoek-Brown	Konvensional	$\sigma_1 = \sigma_3 + 22.5(0.93\sigma_3 + 1)^{0.5}$
		Multistage	$\sigma_1 = \sigma_3 + 28.6(0.52\sigma_3 + 1)^{0.5}$
Batupasir lempungan	Mohr-Coulomb	Konvensional	$\tau = 8.4 + \sigma_n \tan 39^\circ$
		Multistage	$\tau = 9.3 + \sigma_n \tan 35^\circ$
	Hoek-Brown	Konvensional	$\sigma_1 = \sigma_3 + 50.0(0.14\sigma_3 + 1)^{0.5}$
		Multistage	$\sigma_1 = \sigma_3 + 50.0(0.42\sigma_3 + 1)^{0.5}$
	Bieniawski	Konvensional	$\sigma_1 = 129.5(0.03\sigma_3)^{0.75} + 38.1$
		Multistage	$\sigma_1 = 114.3(0.03\sigma_3)^{0.75} + 38.1$
Andesit	Mohr-Coulomb	Konvensional	$\tau = 11.2 + \sigma_n \tan 39^\circ$
		Multistage	$\tau = 11.9 + \sigma_n \tan 37^\circ$
	Hoek-Brown	Konvensional	$\sigma_1 = \sigma_3 + 27.3(0.90\sigma_3 + 1)^{0.5}$
		Multistage	$\sigma_1 = \sigma_3 + 27.0(0.78\sigma_3 + 1)^{0.5}$
	Bieniawski	Konvensional	$\sigma_1 = 133.4(0.04\sigma_3)^{0.75} + 27.8$
		Multistage	$\sigma_1 = 127.9(0.04\sigma_3)^{0.75} + 27.8$

Keterangan: τ = kuat geser dalam MPa
 σ_n = tegangan normal dalam MPa
 σ_1 = tegangan utama mayor dalam MPa
 σ_3 = tegangan utama minor MPa

Sekalipun penelitian menunjukkan bahwa uji triaksial multistage bisa digunakan untuk menduga kriteria keruntuhan, salah satu hal yang perlu diperhatikan dalam uji triaksial multistage ini adalah pengaruh proses pembebanan (*stress path*) pada hasil pengujian seperti terlihat pada Gambar 4 (Melati et al., 2014). MS I pada Gambar 3 mengacu kepada peningkatan tegangan pemampatan pada perpindahan tahap secara bersamaan dengan tegangan aksial, sedangkan MS II mengacu kepada peningkatan tegangan pemampatan tanpa peningkatan tegangan aksial.



Gambar 4. Perbandingan hasil kriteria keruntuhan uji triaksial (Melati et al., 2014)

Sebagai material alamiah, sifat-sifat batuan bersifat acak, yang menjadi pembeda utama pekerjaan perancangan pada massa batuan

dengan, misalnya, pekerjaan perancangan bangunan. Staveren (2007) menyampaikan bahwa *"no matter how extensive investigation programs are made, information of ground conditions always to some degree remains random, fuzzy and incomplete."*

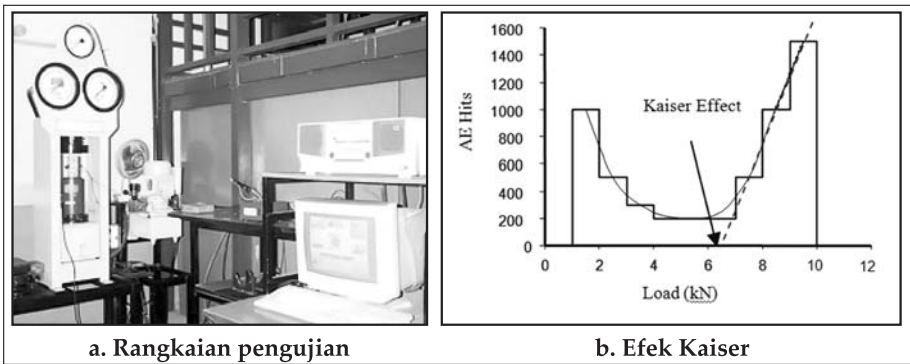
Azizi (2014) melalui serangkaian analisis statistik menemukan bahwa karakteristik mekanik batuan pada tambang terbuka batubara mempunyai distribusi statistik tertentu (normal, log normal, beta, dan gamma) seperti terlihat pada Tabel 2. Oleh karena itu, diperlukan kehati-hatian ketika menetapkan nilai representatif pada perhitungan dan analisis.

Tabel 2. Distribusi statistik karakteristik mekanik batuan pada tambang terbuka batubara (Azizi, 2014)

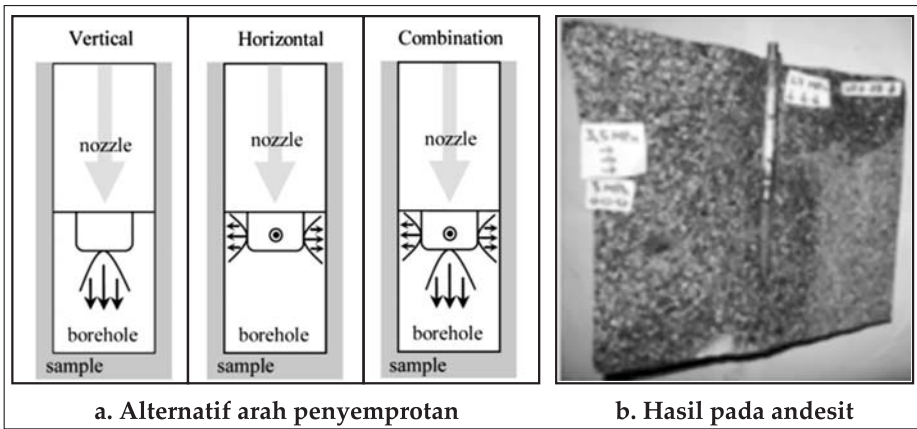
Karakteristik mekanik		Distribusi statistik		
		Batubara	Batulumpur	Batupasir
Kuat tekan uniaksial	σ_c	Gamma	Gamma	Gamma
Modulus Young	E	Gamma	Gamma	Gamma
Konstanta Hoek-Brown	m_b	Gamma	Gamma	Normal
Konstanta Hoek-Brown	s	Beta	Gamma	Beta
Konstanta Hoek-Brown	a	Log normal	Log normal	Log normal
Kohesi puncak	c_{peak}	Beta	Log normal	Log normal
Sudut gesek dalam puncak	ϕ_{peak}	Gamma	Normal	Normal
Kohesi residual	c_{res}	Beta	Log normal	Log normal
Sudut gesek dalam residual	ϕ_{res}	Gamma	Gamma	Normal

Selain menjadi tempat untuk pengembangan peralatan dan prosedur uji untuk mendapatkan sifat-sifat fisik dan mekanik batuan, laboratorium dapat menjadi tempat untuk penelitian lainnya. Kramadibrata et al. (2008b) mendeteksi efek Kaiser melalui pengukuran emisi akustik pada contoh yang mengalami penekanan uniaksial untuk memperkirakan

besar dan arah tegangan *in situ*(lihat Gambar 5). Sedangkan Wattimena et al. (2011) melakukan studi untuk mengevaluasi berbagai alternatif arah penyemprotan fluida pada *nozzle* untuk uji rekah hidrolik (lihat Gambar 6).



Gambar 5. Pengujian emisi akustik (Kramadibrata et al., 2008b)



Gambar 6. Evaluasi arah penyemprotan *nozzle* pada uji rekah hidrolik di laboratorium (Wattimena et al., 2011)

2.2. Uji In Situ

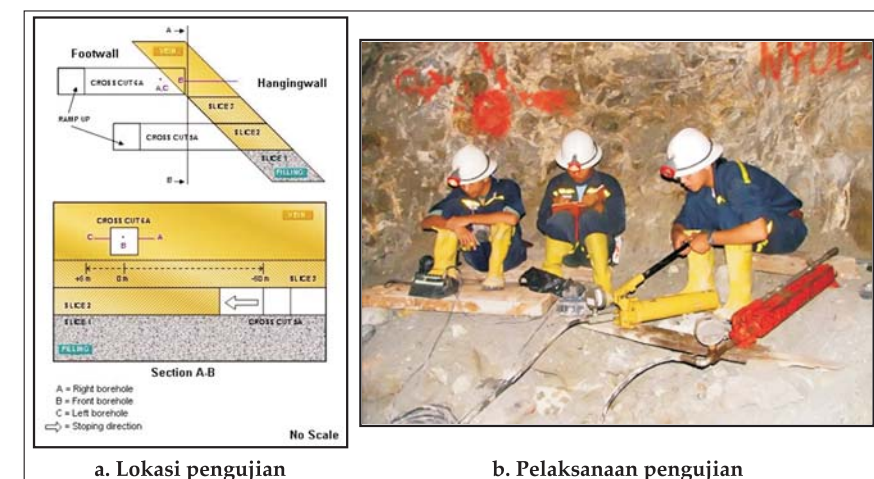
Salah satu kekurangan utama dari uji laboratorium yang menggunakan spesimen batuan adalah bahwa spesimen batuan tersebut

mempunyai ukuran yang terbatas sehingga merepresentasikan contoh yang sangat kecil dan terseleksi dari massa batuan tempat spesimen batuan tersebut diambil. Pada umumnya dalam sebuah proyek rekayasa, contoh yang diuji di laboratorium hanya merepresentasikan fraksi yang sangat kecil (kurang dari 1%) dari volume massa batuan. Selain itu, hanya spesimen batuan yang tidak mengalami kerusakan selama proses pengambilan, pengepakan, pengiriman, sampai preparasi yang dapat diuji, sehingga hasil-hasil uji tentu saja dapat mempunyai bias yang tinggi.

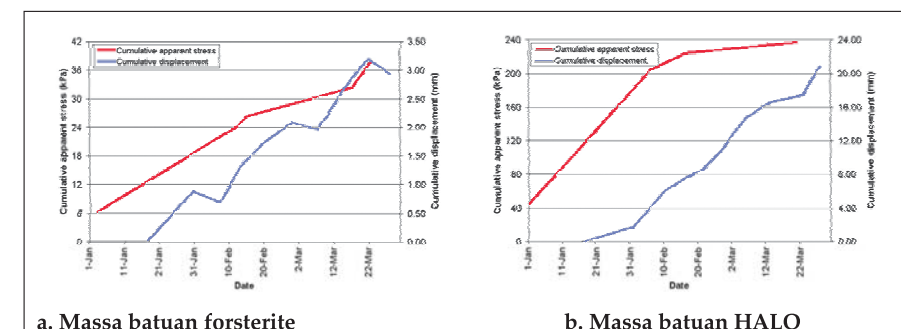
Untuk mendapatkan karakteristik massa batuan yang sebenarnya perlu dilakukan uji *in situ*. Meskipun demikian, perlu disadari bahwa uji *in situ* merupakan pekerjaan yang membutuhkan tenaga dan biaya yang tinggi dan jika dilakukan pada lubang bukaan bawah tanah hasilnya akan dapat dipengaruhi oleh kondisi tegangan terinduksi di sekitar lubang bukaan bawah tanah tersebut. Wattimena et al. (2006a) melakukan pengukuran modulus deformasi massa batuan dengan menggunakan *Goodman jack* di tambang emas bawah tanah Pongkor. Lokasi pengukuran adalah pada sebuah *cross-cut* yang terletak di atas lombong (lokasi dimana penambangan bijih dilakukan) yang aktif (lihat Gambar 7). Mereka menemukan bahwa nilai modulus deformasi yang diperoleh lebih tinggi dibandingkan pengukuran sebelumnya. Hal disebabkan oleh kondisi tegangan dalam massa batuan di lokasi tersebut telah berubah akibat kegiatan penambangan pada lombong di bawahnya.

Sebagai alternatif terhadap pengukuran tegangan *in situ*, Wattimena

et al. (2006b) mengestimasi tegangan yang dialami massa batuan di sekitar lubang bukaan (*panel*) tambang tembaga bawah tanah DOZ berdasarkan hasil pengukuran *microseismic*. Mereka selanjutnya mengorelasi tegangan ini dengan hasil pemantauan perpindahan dinding lubang bukaan dan menemukan bahwa keduanya menunjukkan kecenderungan yang sama (lihat Gambar 8), sesuai dengan pengalaman pengukuran sebelumnya dengan sel tegangan (*stress cell*).



Gambar 7. Pengukuran modulus deformasi massa batuan dengan *Goodman jack* (Wattimena et al., 2006a)



Gambar 8. Korelasi antara perkiraan tegangan hasil pengukuran *microseismic* dan hasil pengukuran konvergen (Wattimena et al., 2006b)

Hal penting lainnya yang perlu menjadi perhatian adalah kekuatan jangka panjang massa batuan dan sampai beberapa tahun yang lalu metode penentuannya belum tersedia (Brown, 2006; Hoek, 2006; Hudson; 2006). Gambar 9 menunjukkan penurunan permukaan tanah akibat keruntuhan pilar yang kekuatannya menurun, hanya lima tahun setelah tambang bawah tanah tersebut selesai beroperasi.

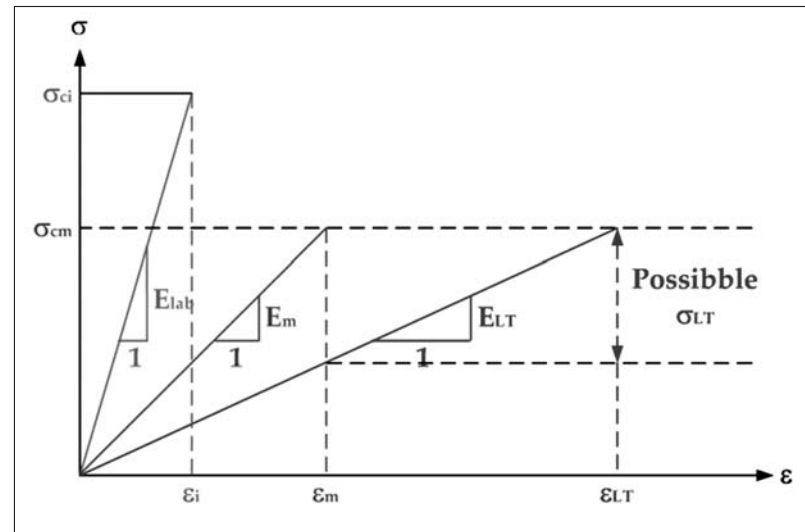


Gambar 9. Penurunan permukaan tanah akibat keruntuhan pilar tambang bawah tanah di Sasolburg, South Africa (foto disumbangkan oleh Prof. N.v.d. Merwe, University of Pretoria)

Dalam banyak kasus, pemodelan numerik digunakan dalam analisis balik ketidakmantapan lubang bukaan bawah tanah untuk memprediksi kekuatan jangka panjang massa batuan. Pada pendekatan ini parameter kekuatan massa batuan disesuaikan sedemikian rupa sehingga model numerik menunjukkan fenomena ketidakmantapan yang sama dengan

ketidakmantapan sesungguhnya. Jelas terlihat bahwa pendekatan ini memerlukan adanya data ketidakmantapan, tetapi pada sisi lainnya ketidakmantapan merupakan satu hal yang dihindari pada lubang bukaan bawah tanah.

Wattimena et al. (2008) mengusulkan sebuah metode alternatif untuk memperkirakan kekuatan jangka panjang massa batuan breksi-andesit di tambang emas bawah tanah Pongkor (lihat Gambar 10). Metode ini mengombinasikan kuat tekan uniaksial (σ_{ci}) dan modulus Young (E_{LAB}) contoh batuan, perkiraan kekuatan massa batuan (σ_{cm}) dari klasifikasi massa batuan, modulus deformasi massa batuan (E_m) yang diukur dengan menggunakan *Goodman jack*, serta modulus deformasi jangka panjang massa batuan (E_{LT}) dari hasil analisis balik terhadap data pemantauan perpindahan dengan model *rheology* Burger. Mereka melaporkan bahwa kekuatan jangka panjang massa batuan breksi-andesit Pongkor adalah sebesar 10%-25% dari kekuatan contoh yang diuji di laboratorium. Adapun Saptono (2012) menemukan bahwa kekuatan jangka panjang batuan sedimen di tambang terbuka batubara adalah sekitar 60% dari kuat tekan uniaksialnya yang diperoleh dari uji laboratorium.



Gambar 10. Pendekatan untuk penentuan kekuatan jangka panjang massa batuan (Wattimena et al., 2008)

3. PERANCANGAN KONSTRUKSI BAWAH TANAH

3.1. Metode Empirik

Metode perancangan empirik dapat didefinisikan sebagai penerapan pengalaman praktis dari proyek konstruksi sebelumnya pada perancangan proyek yang baru. Salah satu metode empirik yang paling sering digunakan adalah klasifikasi massa batuan. Klasifikasi ini sangat bermanfaat pada tahap perencanaan dan perancangan awal proyek konstruksi, meskipun pada beberapa kasus, metode ini juga digunakan sebagai dasar utama pada perancangan akhir lubang bukaan bawah tanah.

Klasifikasi massa batuan dapat berfungsi sebagai kelengkapan pekerjaan perancangan yang sistematis, tetapi Bieniawski (1989) mengingatkan bahwa klasifikasi massa batuan tidak dimaksudkan untuk menggantikan

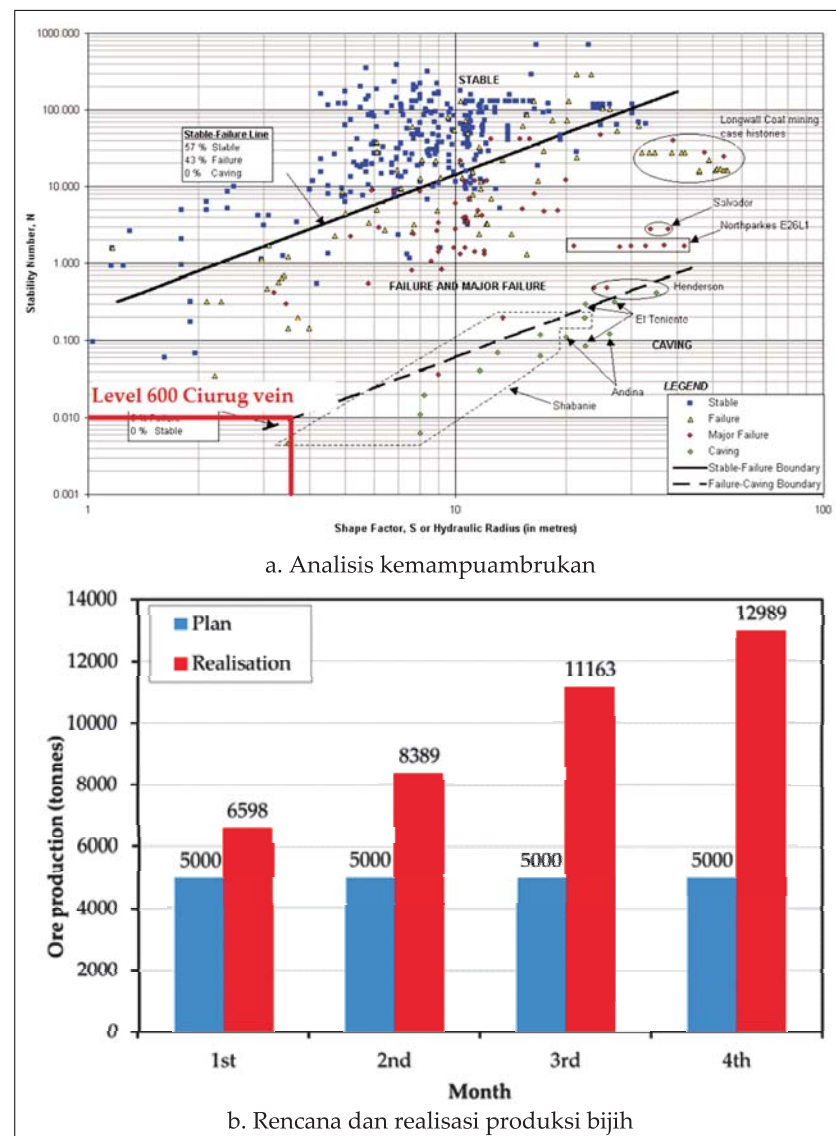
metode analitik, observasi dan pengukuran lapangan, serta penilaian rekayasa. Oleh karena itu, klasifikasi massa batuan harus digunakan bersama-sama dengan metode analitik dan metode observasi untuk menghasilkan rancangan yang sesuai dengan tujuannya dan kondisi geologi lokasi proyek.

Dari sekian banyak sistem klasifikasi massa batuan, dua sistem klasifikasi yang paling sering digunakan adalah Sistem RMR (Bieniawski, 1973; 1976; 1989) dan Sistem Q (Barton et al., 1974). Kedua sistem ini dikembangkan dari studi kasus terowongan-terowongan pada proyek-proyek teknik sipil. Penerapannya pada kasus tambang bawah tanah dirasakan terlalu konservatif, sehingga beberapa penyesuaian perlu dilakukan.

Grafik kestabilan Mathews (Mathews et al., 1981) merupakan salah satu grafik yang dapat digunakan untuk memprediksi kemantapan lombong. Grafik ini didasarkan pada Sistem Q dan dilengkapi dengan pertimbangan untuk tegangan terinduksi, orientasi bidang-bidang diskontinyu, dan geometri lubang bukaan. Grafik ini selanjutnya diperluas oleh Mawdesley et al. (2001) dengan memasukkan analisis probabilitas dan selanjutnya dikenal sebagai grafik kestabilan Mathews yang diperluas.

Wattimena et al., (2004) menggunakan grafik hasil perluasan ini sebagai dasar untuk melakukan metode penambangan *semi-caving* di tambang emas bawah tanah Pongkor. Hal ini dilakukan sebagai solusi

untuk melakukan penambangan di massa batuan yang kekuatannya sangat lemah. Selama empat bulan penerapan metode ini, perolehan bijih menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan rencana produksi (lihat Gambar 11).



Gambar 11. Penerapan metode *semi-caving* di tambang emas bawah tanah Pongkor (Wattimena et al., 2004)

3.2. Metode Analitik

Metode analitik pada perancangan lubang bukaan bawah tanah mencakup beberapa teknik seperti solusi-solusi bentuk tertutup, metode numerik, dan analisis struktural. Metode ini cukup efektif untuk perancangan lubang bukaan bawah tanah karena dengan metode ini dimungkinkan untuk melakukan analisis perbandingan kemantapan lubang bukaan tanah untuk parameter masukan yang bervariasi.

Hal penting yang perlu diperhatikan adalah bahwa metode analitik dan kriteria keruntuhan yang dipilih harus mampu mengantisipasi atau mengidentifikasi mekanisme dan bentuk keruntuhan dan tidak ada metode analitik yang dapat memodelkan keruntuhan secara akurat. Oleh karena itu, lebih dari satu pendekatan perancangan analitik sebaiknya digunakan, sehingga pemahaman mengenai zona keruntuhan dan perluasannya dapat menjadi lebih baik.

Pemodelan numerik lubang bukaan bawah tanah telah sangat banyak dilakukan dalam beberapa puluh terakhir ini, termasuk di Indonesia. Wattimena dan Arif (1996) menganalisis kemantapan terowongan dengan menggunakan metode elemen hingga dan massa batuan diasumsikan berperilaku elasto-plastis. Arif et al. (1996) menggunakan metode elemen *distinct* untuk menganalisis kemantapan terowongan pada massa batuan berlapis. Sedangkan Rai et al. (2001) menggunakan metode elemen hingga untuk menganalisis kemantapan lombong penambangan dimana berdasarkan data pengukuran perpindahan massa batuan diasumsikan

berperilaku elasto-visko-plastis.

Dengan mempertimbangkan fenomena bahwa batuan yang ditekan akan mengalami deformasi dan berdasarkan prinsip bahwa energi merupakan produk dari gaya dan perpindahan, pendekatan energi dapat menjadi alternatif dalam menganalisis kestabilan lubang bukaan bawah tanah. Alternatif ini dapat digunakan pada kasus dimana lubang bukaan berada pada kedalaman yang besar dan dibuat pada massa batuan yang kompeten.

Wattimena (2006) menggunakan metode beda hingga untuk menghitung energi yang dialami massa batuan di sekitar lombong penambangan *cut-and-fill* sejalan dengan kemajuan penambangan pada lombong tersebut. Wattimena et al. (2012a) melakukan pemodelan numerik dengan metode elemen hingga untuk memprediksi potensi terjadinya ledakan batuan (*rockburst*) pada lombong penambangan *cut-and-fill* sejalan dengan kemajuan penambangan pada lombong tersebut (lihat Gambar 12). Potensi terjadinya ledakan batuan dapat ditentukan berdasarkan rasio antara laju penyimpanan energi (*Energy Storage Rate, ESR*) dan laju pelepasan energi (*Energi Release Rate, ERR*) pada massa batuan. Berdasarkan tensor tegangan yang dihasilkan oleh model elemen hingga, *ESR* dan *ERR* dapat dihitung sebagai berikut:

$$ESR = \frac{1}{2} \int \sigma_{ij} \Delta \varepsilon_{ij} dV$$

$$ERR = \frac{1}{2} \int \Delta \sigma_{ij} \Delta \varepsilon_{ij} dV$$

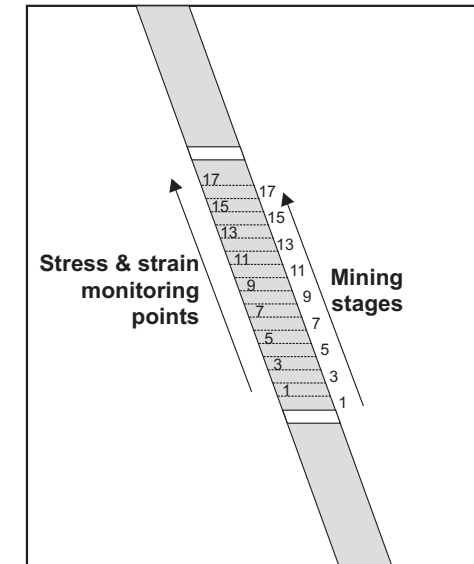
dengan

σ_{ij} = tensor tegangan akibat penambangan,

ε_{ij} = tensor regangan akibat penambangan,

$\Delta \sigma_{ij}$ = tensor pertambahan tegangan akibat penambangan, dan

$\Delta \varepsilon_{ij}$ = tensor pertambahan regangan akibat penambangan.



Gambar 12. Tahapan penggalian lombong serta titik-titik perhitungan tegangan dan regangan pada pemodelan numerik untuk mengevaluasi potensi ledakan batuan pada lombong (Wattimena et al., 2012a)

3.3. Metode Observasi

Metode observasi bergantung kepada pemantauan pada massa batuan untuk mendeteksi ketidakmampuan yang terukur. Jika dibutuhkan, rancangan awal dapat disesuaikan untuk mengoptimalkan kemampuan lubang bukaan bawah tanah. Pendekatan observasi ini memerlukan *database* yang besar dan seharusnya diterapkan mulai dari tahap awal

konstruksi untuk mendapatkan pengukuran yang handal bagi kemantapan lubang bukaan bawah tanah.

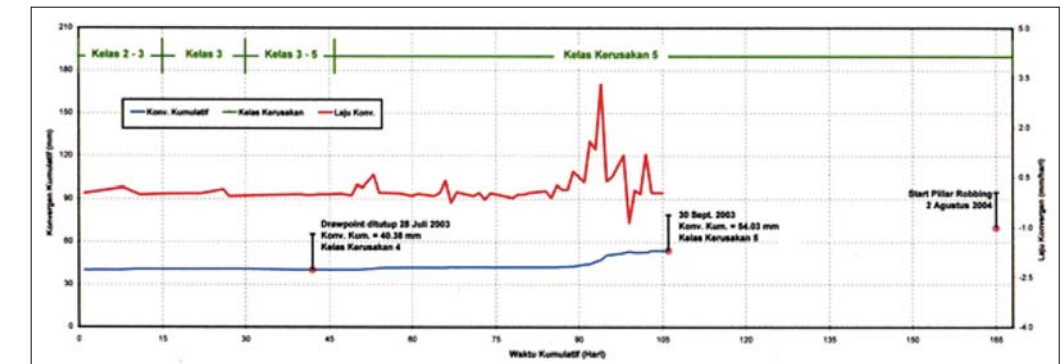
Peck (1969) memformulasikan metode observasi sebagai salah satu metode perancangan. Pada pendekatan ini, data tambahan dikumpulkan selama penggalian dan kemantapan lubang bukaan bawah tanah dipantau. Data baru selanjutnya diumpankan ke dalam model awal dan dianalisis ulang. Rancangan dan kesimpulan terdahulu selanjutnya direvisi sesuai dengan kebutuhan. Oleh karena itu, data tambahan selama pemantauan lubang bukaan bawah tanah merupakan komponen penting dalam proses karakterisasi massa batuan.

Metode Penerowongan Austria Baru (*New Austrian Tunnelling Method, NATM*) menerapkan semua filosofi ini dan sudah mendapatkan perhatian penting dalam pekerjaan penerowongan. *NATM* melibatkan pemantauan perpindahan massa batuan secara kontinyu dan penyesuaian penyangga untuk mendapatkan penyangga yang lebih mantap dan ekonomis.

Di antara beberapa teknik pemantauan, pemantauan perpindahan telah terbukti sangat bermanfaat. Penyebab utamanya adalah karena perpindahan merupakan kuantitas yang dapat diukur langsung, dapat dipantau secara kontinyu dan relatif mudah, dan memberikan informasi mengenai pergerakan massa batuan secara umum dalam jarak terukur sehingga tidak menunjukkan variasi yang besar.

Wattimena et al. (2005b) melakukan pemantauan konvergen untuk menilai kemantapan *panel* level produksi tambang tembaga bawah tanah

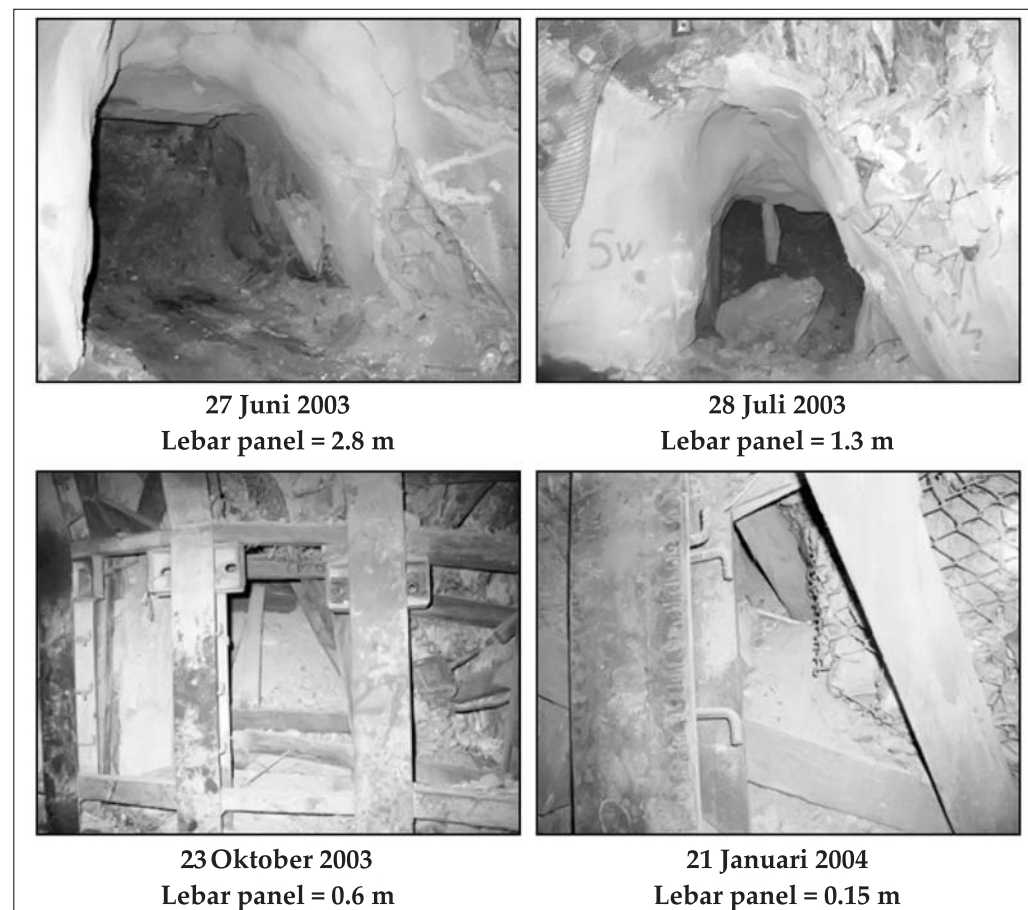
DOZ, khususnya setelah pengambilan bijih hasil ambrukan pada drawpoint dihentikan dan *drawpoint* ditutup. Mereka menemukan bahwa meskipun *drawpoint* sudah ditutup *panel* akan tetap mengalami deformasi (lihat Gambar 13). Pada salah satu *panel*, deformasi tersebut dapat terdokumentasikan secara kontinyu, seperti terlihat pada Gambar 14.



Gambar 13. Grafik konvergen kumulatif, laju konvergen, dan kelas kerusakan panel (digambar ulang dari Wattimena et al., 2005b)

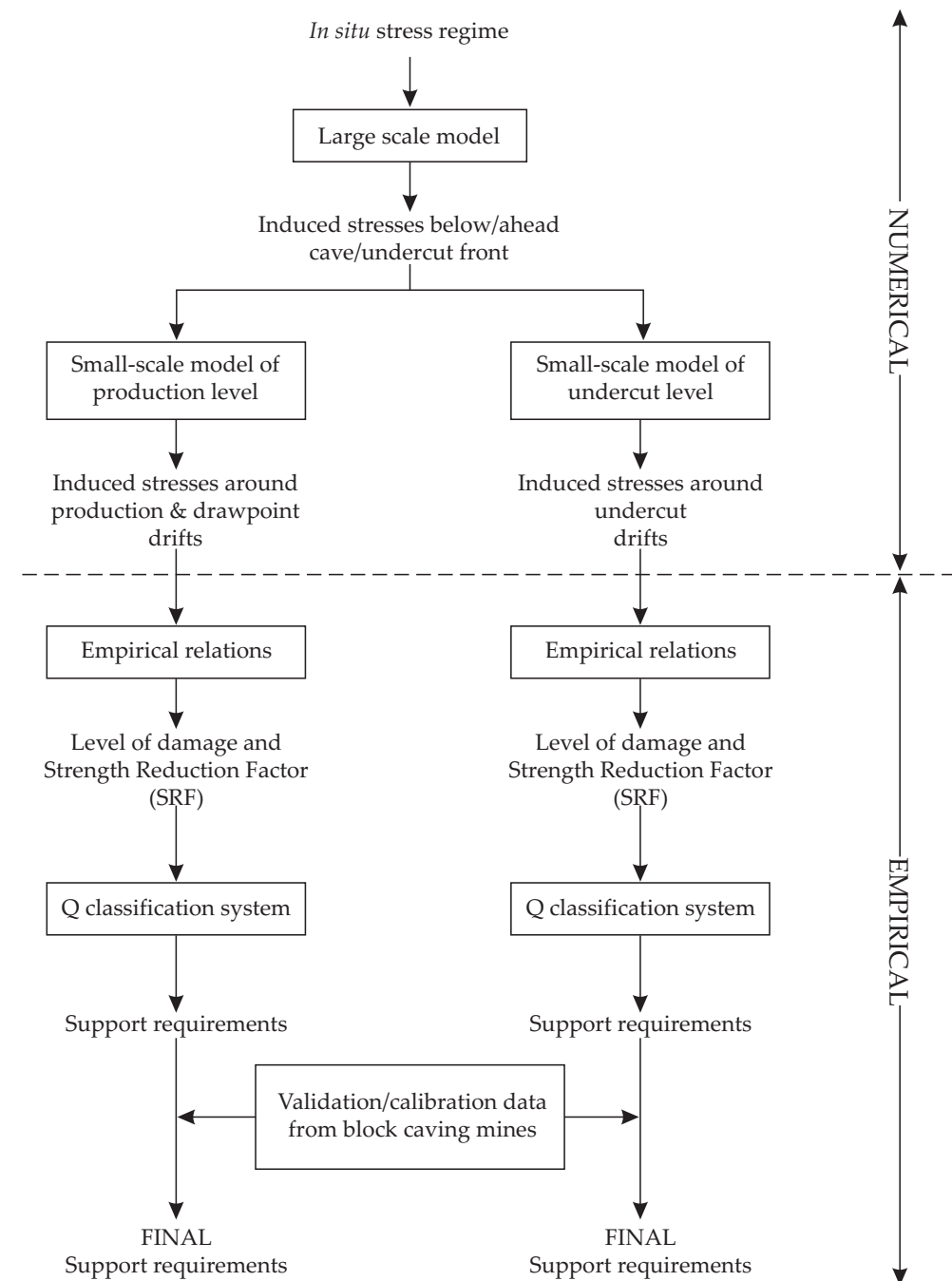
3.4. Metode Hibrid Numerik-Empirik

Pada kasus tertentu seperti pada penambangan dengan metode *block caving*, kemampuan metode numerik untuk analisis kemantapan lubang bukaan bawah tanah menjadi terbatas. Salah satu penyebab utamanya adalah bahwa kekuatan massa batuan di sekitar lubang bukaan secara umum sudah melampaui kekuatan puncaknya dan berada dalam keadaan *post-peak*. Oleh karena itu model material yang sesuai untuk kondisi ini adalah *strain-softening*, tetapi hasil perhitungan metode numerik dengan model material ini akan bergantung kepada ukuran elemen yang digunakan (*mesh dependency*).



Gambar 14. Deformasi *panel* setelah penutupan *drawpoint* (foto-foto disumbangkan oleh PT Freeport Indonesia)

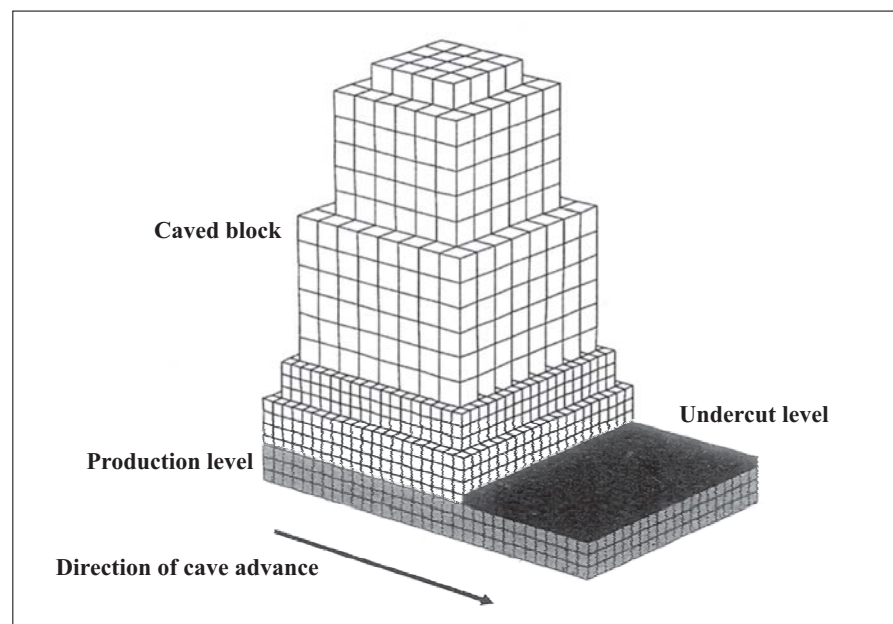
Untuk mengatasi hal ini pada pemodelan numerik level *undercut* dan level produksi pada tambang bawah tanah *block caving* dan *panel caving*, Trueman et al. (2002) dan Wattimena (2003) menggunakan metode hibrid numerik-empirik seperti terlihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Metode hibrid numerik-empirik (Wattimena, 2003)

Mengingat sangat kecilnya ukuran lubang bukaan jika dibandingkan dengan domain permasalahan (sebagai contoh, material ambrukan di atas level produksi dapat setinggi ratusan meter) pemodelan numerik dilakukan dalam dua tahap:

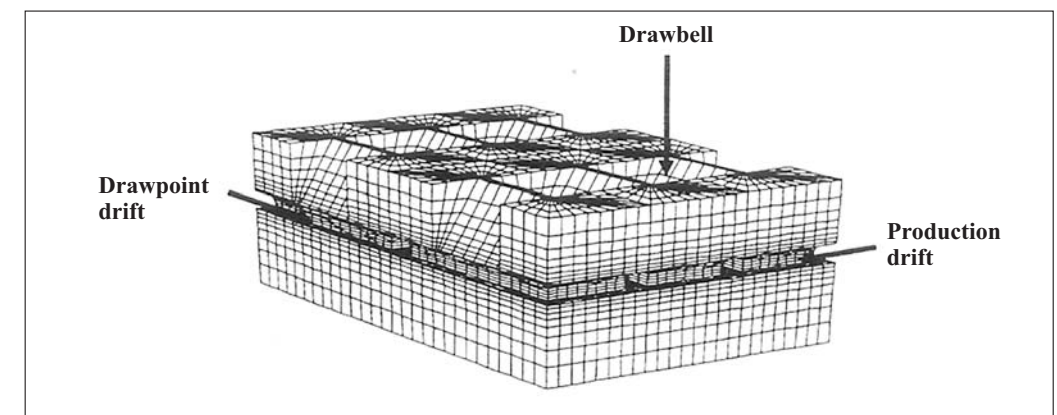
- a. Pada tahap pertama digunakan model skala besar dimana level produksi dan level *undercut* tidak dimodelkan secara eksplisit (lihat Gambar 16).



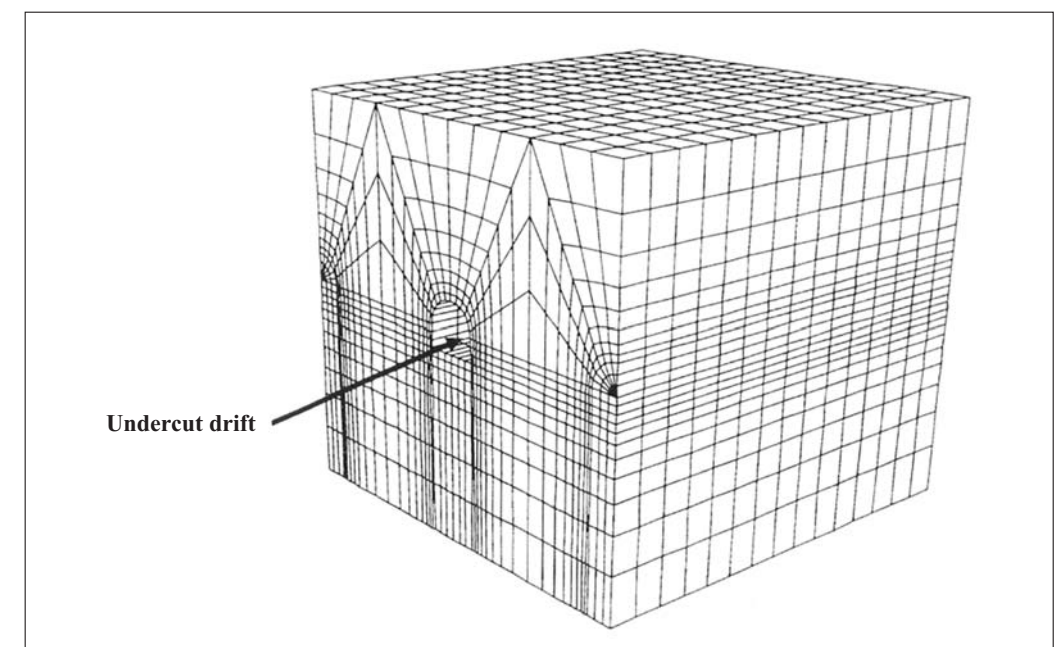
Gambar 16. Model skala besar tambang *block caving* tanpa memperlihatkan massa batuan di sekelilingnya (Wattimena, 2003)

- b. Pada tahap kedua, digunakan model skala kecil yang merepresentasikan level produksi dan level *undercut* (lihat Gambar 17 dan 18), dengan kondisi awal adalah tegangan hasil perhitungan model skala besar.

Klasifikasi massa batuan Sistem Q selanjutnya digunakan untuk menganalisis tegangan serta dijadikan dasar untuk penentuan sistem penyangga. Pendekatan ini telah divalidasi dengan baik oleh studi kasus dari beberapa tambang bawah tanah di dunia, seperti terlihat pada Tabel 3.



Gambar 17. Model skala kecil level produksi tambang *block caving* (Wattimena, 2003)



Gambar 18. Model skala kecil level *undercut* tambang *block caving* (Wattimena, 2003)

Tabel 3. Validasi metode hibrid-numerik melalui perbandingan penyangga pada level produksi (Wattimena, 2003)

Tambang	Penyangga level produksi	
	Estimasi	Aktual
Teniente 4-South, Chile	• Baut batuan 2.3 m • Spasi 1.1 m • Beton tembak 120 mm	• Baut batuan 2.4 m • Spasi 0.75 m • Beton tembak 100 mm
Palabora, South Africa	• Baut batuan 2.4 m • Spasi 1.5 m • Beton tembak 50 mm	• Baut batuan 2.4 m • Spasi 1.0 – 1.25 m • Beton tembak 50 mm
Northparkes Lift I, Australia	• Baut batuan 2.4 m • Spasi 1.6 m • Beton tembak 50 mm	• Baut batuan 2.4 m • Spasi 1.0 m • Beton tembak 50 mm
Andina Panel II dan III, Chile	• Baut batuan 2.2 m • Spasi 1.5 m • Beton tembak 100 mm	• Baut batuan 2.4 m • Spasi 1.0 m • Beton tembak 100 mm
Teniente Esmeralda, Chile	• Baut batuan 2.3 m • Spasi 1.7 m • Beton tembak 45 mm	• Baut batuan 2.3 m • Spasi 1.0 m • Beton tembak 75 mm

Metode hibrid ini juga digunakan oleh Purwanto et al. (2014) untuk perancangan penyangga pada tambang emas bawah tanah Cibaliung. Mereka menemukan bahwa penggunaan metode ini dapat memberikan hasil yang baik untuk penilaian kemantapan dan penentuan penyangga.

3.5. Metode Probabilistik

Kemantapan sebuah konstruksi pada umumnya dinyatakan dengan Faktor Keamanan yang secara sederhana merupakan perbandingan antara kekuatan material konstruksi terhadap beban yang dialaminya. Meskipun demikian, seperti yang telah disampaikan di depan, kekuatan batuan dan massa batuan pada lokasi konstruksi akan tidak seragam. Oleh karena itu Hoek (1998) mengingatkan bahwa:

“.... some geologists go to extraordinary lengths to try to determine an ‘exact’ value of GSI (or RMR). Geology does not lend itself to such precision and it is simply not realistic to assign single value.”

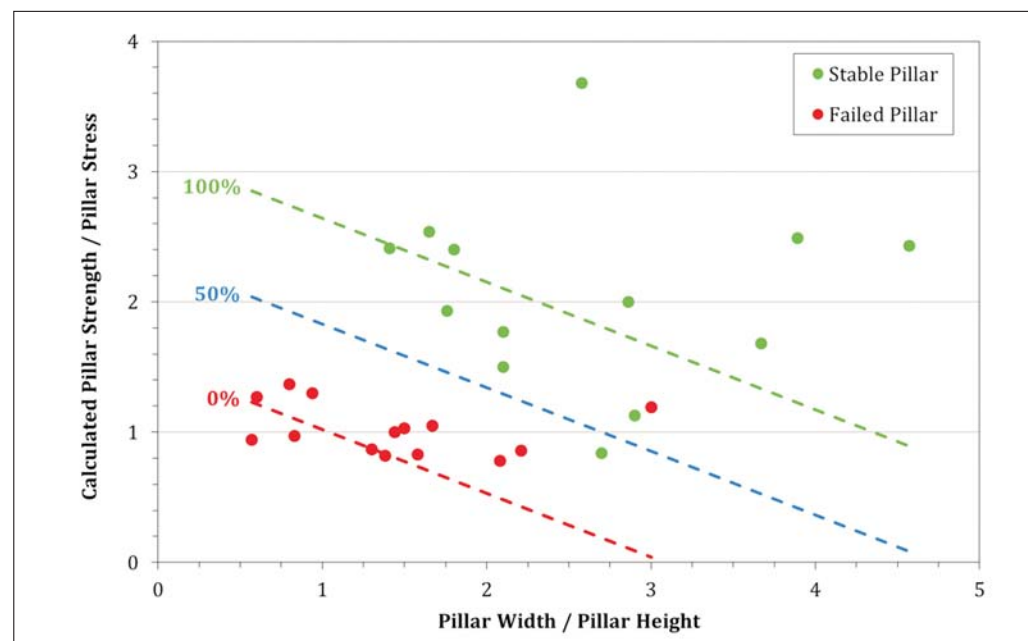
Salah satu pendekatan untuk permasalahan ini adalah dengan menggunakan metode probabilistik. Pada metode ini, sebagai contoh, meskipun Faktor Keamanan dinyatakan lebih besar dari satu (yang berarti konstruksi mantap), probabilitas untuk mendapatkan Faktor Keamanan kurang dari satu tetap diinformasikan. Metode ini semakin diterima sebagai bagian dari analisis resiko di beberapa negara (Baecher, 2005) dan juga dalam perancangan pilar batubara dan pilar batuan keras, yang merupakan bentuk penyangga paling sederhana pada tambang bawah tanah (Ghasemi et al., 2014).

Meskipun terlihat sebagai penyangga tambang bawah tanah yang paling sederhana (dibuat dengan meninggalkan batubara atau bijih), kemantapan pilar harus diyakini sepanjang umur tambang bawah tanah yang bahkan dapat sampai puluhan tahun. Beberapa dokumentasi menunjukkan pilar yang mempunyai Faktor Keamanan hasil perhitungan lebih besar dari satu dapat saja runtuh, demikian juga sebaliknya, pilar yang mempunyai Faktor Keamanan hasil perhitungan lebih rendah dari satu dapat tetap mantap.

Perancangan pilar berdasarkan data aktual kondisi kemantapan pilar dapat menjadi alternatif. Pada pendekatan ini, kondisi kemantapan semua pilar dalam *database* dipertimbangkan secara bersamaan, sehingga probabilitas kemantapan pilar dengan geometri, kekuatan, dan

pembebanan tertentu dapat diperoleh.

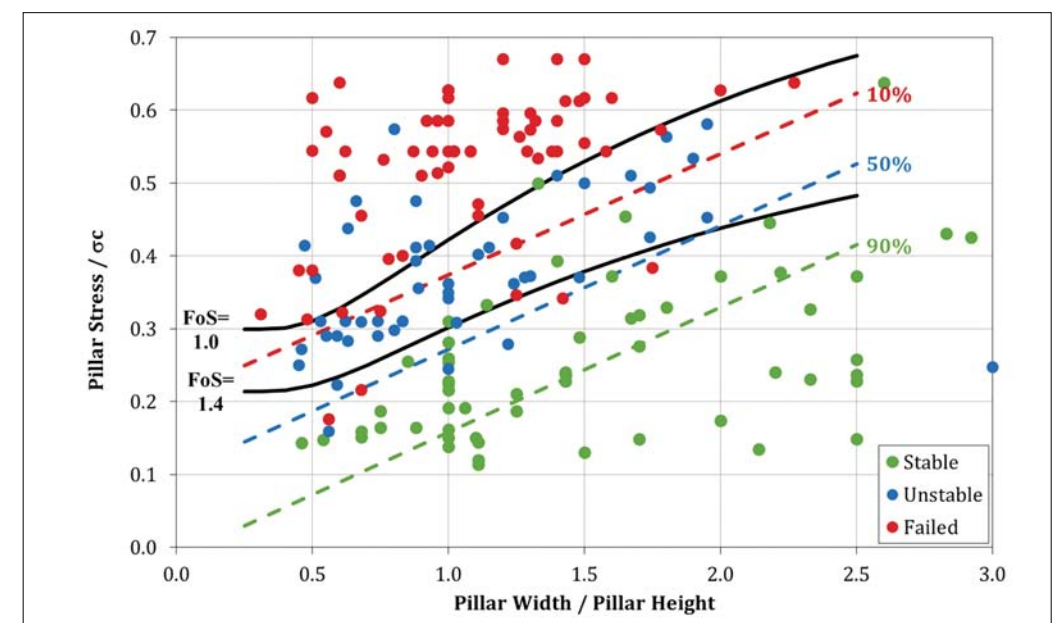
Wattimena et al. (2013) menggunakan metode regresi logistik untuk mengembangkan kurva probabilitas kemantapan pilar batubara (lihat Gambar 19). Pada pendekatan ini data aktual kemantapan pilar batubara (mantap atau runtuh) digunakan sebagai dasar untuk menentukan probabilitas kemantapan pilar. Kurva ini dapat menjadi acuan awal dalam perancangan pilar batubara berdasarkan geometri pilar (perbandingan antara lebar dan tinggi) serta perbandingan antara kekuatan pilar dan tegangan pilar.



Gambar 19. Kurva probabilitas kemantapan pilar batubara (Wattimena et al., 2013)

Wattimena (2014) menggunakan metode regresi logistik multinomial untuk memprediksi probabilitas kemantapan pilar batuan keras. Pada

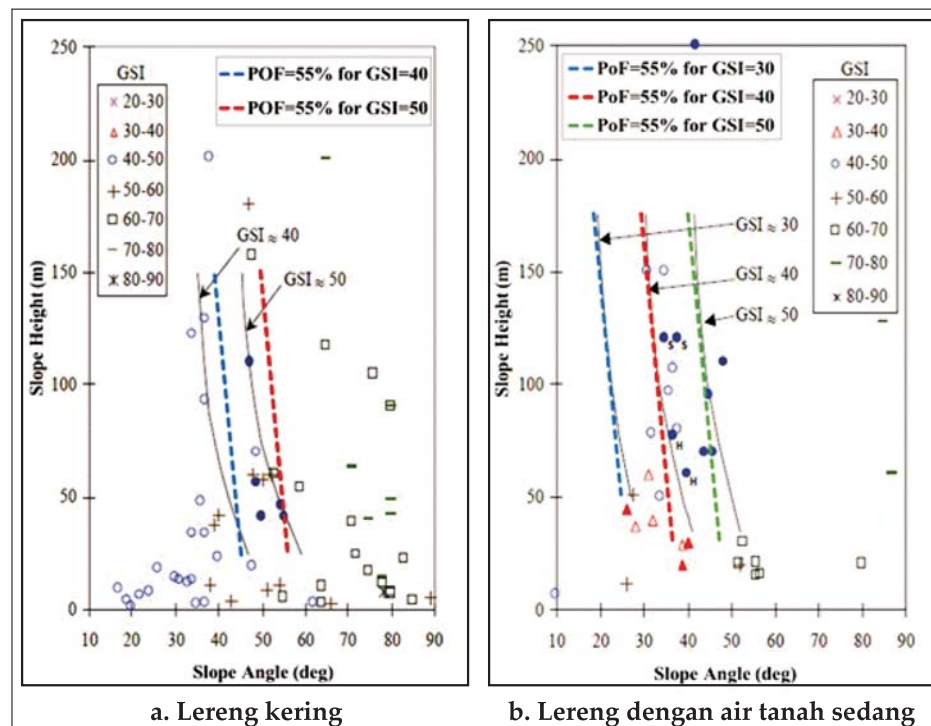
kasus ini data kemantapan pilar dikategorikan ke dalam mantap, tidak stabil, dan runtuh. Probabilitas kemantapan pilar ditentukan berdasarkan perbandingan antara lebar pilar dan tinggi pilar serta perbandingan antara tegangan pilar dan kuat tekan uniaksial contoh batuan. Hasil prediksinya kemudian digambarkan pada kurva kemantapan pilar batuan keras dari Lunder dan Pakalnis (1997) yang telah dipergunakan secara luas pada perancangan pilar batuan keras (lihat Gambar 20).



Gambar 20. Kurva probabilitas kemantapan digambarkan pada kurva kemantapan pilar batuan keras (Wattimena, 2014)

Perlu dicatat bahwa metode probabilistik ini juga digunakan oleh Wattimena et al. (2012b) untuk memprediksi probabilitas lereng tunggal (tinggi 24 m dan kemiringan 60°) dari batuan lunak (berat satuan material pembentuk lereng adalah 24 kN/m³ dan kuat gesernya mengikuti

distribusi normal dengan kohesi sebesar $237 \text{ kPa} \pm 72 \text{ kPa}$ serta sudut gesek dalam sebesar $47^\circ \pm 2^\circ$). Dengan menggunakan metode estimasi titik (*point estimate method*), didapatkan bahwa Faktor Keamanan lereng tersebut adalah 2.62 ± 0.61 dengan probabilitas kelongsoran 40% jika dihitung dengan metode Bishop. Sedangkan perhitungan dengan menggunakan grafik Hoek-Bray menunjukkan bahwa Faktor Keamanan lereng tersebut adalah 3.21 ± 0.69 dengan probabilitas kelongsoran 10%. Adapun Wattimena (2013) menggunakan metode ini untuk memprediksi probabilitas kelongsoran lereng batuan untuk dibandingkan dengan kurva perancangan lereng (Douglas, 2002), seperti terlihat Gambar 21.



Gambar 21. Probabilitas kelongsoran lereng batuan dibandingkan dengan kurva perancangan lereng (Wattimena, 2013)

4. PENUTUP

Beberapa sumbangan pemikiran terkait dengan peran mekanika batuan pada konstruksi bawah tanah telah diberikan, mulai dari karakterisasi batuan sampai kepada perancangan konstruksi bawah tanah. Terlihat bahwa mekanika batuan memainkan peran penting dalam perancangan konstruksi bawah tanah.

Pada saat ini di Indonesia pekerjaan konstruksi bawah tanah di luar bidang pertambangan bawah tanah dan jalur air (*waterway*) di PLTA masih sangat sedikit. Meskipun demikian, perancangan dan pembangunan beberapa terowongan transportasi sudah dimulai.

4.1. Peluang ke Depan

Di bidang pertambangan, terlepas dari kelesuan industri ini pada beberapa tahun terakhir, metode penambangan bawah tanah akan menjadi alternatif. Hal ini disebabkan karena rasio keuntungan-biaya yang semakin rendah jika penambangan deposit yang tersisa terus dilakukan dengan metode penambangan terbuka, di samping adanya tuntutan pemeliharaan lingkungan hidup dan tata guna lahan.

Di bidang energi, khususnya energi listrik, pembangunan PLTA dapat menjadi alternatif karena meskipun umumnya biaya pembangunannya lebih tinggi tetapi biaya operasinya lebih rendah dibandingkan dengan PLTU. Pada PLTA ini terdapat kecenderungan untuk menggunakan jalur air dan rumah pembangkit (*powerhouse*) di bawah tanah agar konstruksinya tidak bergantung kepada konstruksi bendungan.

Di bidang transportasi, terowongan dapat menjadi alternatif untuk mendapatkan jalur transportasi yang lebih singkat. Selain itu, pada beberapa lokasi pembuatan jalur transportasi di permukaan terdapat permasalahan pembebasan lahan serta kerawanan longsor akibat pekerjaan gali-timbun.

4.2. Pengembangan ke Depan

Semua pekerjaan perancangan dan konstruksi bawah tanah akan menggunakan massa batuan sebagai material konstruksi utama. Di sisi yang lain, massa batuan adalah material alamiah yang karakteristik fisik dan mekaniknya bervariasi dan bersifat acak. Oleh karena itu, sebelum perhitungan dan analisis dapat dilakukan, sangat penting untuk mengetahui distribusi karakteristik tersebut. Metode untuk keperluan ini perlu dikembangkan, mulai dari analisis hasil uji laboratorium, korelasinya dengan kondisi massa batuan dari lokasi pengambilan contoh, dan estimasi distribusinya dalam massa batuan.

Umur konstruksi bawah tanah, khususnya yang dipergunakan untuk kepentingan umum dapat sangat lama. Oleh karena itu, metode estimasi kekuatan jangka panjang massa batuan tetap perlu dikembangkan, mulai dari karakterisasi massa batuan, perkiraan perubahan karakteristik massa batuan, sampai kepada analisis balik studi kasus ketidakmantapan.

Pemodelan numerik akan tetap menjadi salah satu kelengkapan penting pada perancangan konstruksi bawah tanah. Untuk mempertimbangkan semua faktor pengendali perilaku massa batuan, pemodelan

numerik interdisiplin yang mengintegrasikan karakteristik termal-kimia-hidro-mekanika massa batuan perlu dikembangkan.

Grafik rancangan lubang bukaan bawah tanah merupakan salah satu alat untuk membuat rancangan awal konstruksi bawah tanah. Saat ini, grafik rancangan ini masih didasarkan pada *database* dari luar negeri. Pembuatan grafik rancangan berdasarkan studi-studi kasus di Indonesia harus menjadi perhatian para peneliti dan praktisi mekanika batuan.

Pengajaran, termasuk pengajaran mekanika batuan merupakan salah satu pilar pendukung rekayasa modern. Pembaharuan dan pengayaan materi perkuliahan baik di jenjang sarjana, magister, maupun doktor harus senantiasa dilakukan. Hal ini hanya dapat dilakukan jika penelitian dalam bidang mekanika batuan berjalan secara kontinyu, dan kesempatan untuk menyelesaikan permasalahan di lapangan dapat diperoleh. Oleh karena itu, interaksi dan kerjasama dengan pemerintah, industri, dan masyarakat harus terus berlangsung.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pertama-tama saya memanjatkan puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala karunia-Nya yang telah dilimpahkan hingga saat ini.

Pada hari yang berbahagia ini, perkenankanlah saya menyampaikan ucapan terima kasih kepada Rektor dan Pimpinan ITB serta Pimpinan dan Anggota Forum Guru Besar ITB atas kesempatan yang diberikan kepada saya untuk menyampaikan orasi ilmiah di hadapan hadirin sekalian pada

forum yang terhormat ini.

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya saya sampaikan kepada Prof. Sri Widiyantoro (Dekan FTTM), Prof. Tutuka Ariadji (WDA FTTM), dan Dr. Eddy Agus Basuki (WDS FTTM) serta staf administrasi FTTM yang telah memberikan motivasi dan dukungan dalam proses kenaikan jabatan fungsional saya.

Ucapan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya saya sampaikan kepada Prof. Made Astawa Rai (KK Teknik Pertambangan FTTM, Pembimbing S1 dan S2 serta pembina saya), Prof. Irwandy Arif (KK Teknik Pertambangan FTTM), Prof. Sudarto Notosiswoyo (Ketua KK Eksplorasi Sumber Daya Bumi FTTM), Prof. Kadarsah Suryadi (KK Manajemen Industri FTI, saat ini Rektor ITB), Prof. Masyhur Irsyam (Ketua KK Rekayasa Geoteknik FTSL), Prof. Xia-Ting Feng (The Chinese Academy of Science, Presiden ISRM 2011-2015), dan Prof. Gideon Chitombo (University of Queensland, Australia, Pembimbing S3 saya) yang telah memberikan dukungan dan rekomendasi kenaikan jabatan saya ke Guru Besar.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Prof. Budi Sulistianto, Ketua KK Teknik Pertambangan FTTM dan Anggota KK: Prof. Rudy Sayoga Gautama, Dr. Aryo Prawoto Wibowo, Dr. Nuhindro Priagung Widodo, Dr. Ganda Marihot Simangunsong, Dr. Ginting Jalu Kusuma, Fadhila Achmadi Rosyid, MT., Yudhidya Wicaksana, MT., Simon Heru Prassetyo, MSc., Tri Karian, MT., dan Firly R. Baskoro, MT., atas segala

dukungan dan kerjasamanya sehingga membuat saya selalu menikmati kegiatan Tri Dharma Perguruan Tinggi di KK Teknik Pertambangan. Ucapan terima kasih saya sampaikan juga kepada Dr. Suseno Kramadibrata (CEO Bumi Resources Minerals, Dosen Luar Biasa KK Teknik Pertambangan) atas diskusi dan kerjasamanya dalam penelitian dan pengembangan laboratorium.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Anggota KK Eksplorasi Sumber Daya Bumi FTTM: Dr. Gatot Hari Priowirjanto, Dr. Komang Anggayana, Teti Indriati, MT., Dr. Budi Sulitijo, Dr. Lilik Eko Widodo, Dr. Syafrizal, Dr. M. Nur Heriawan, Dr. Agus Haris Widayat, Dr. Irwan Iskandar, Ari Naftali, MT., dan Andy Yahya Al Hakim, MT., serta Prof. Syoni Soeprijanto, Ketua KK Teknik Metalurgi FTTM dan Anggota KK: Dr. Ismi Handayani, Dr. Edy Sanwani, Dr. Zufiadi Zulhan, Dr. M. Zaki Mubarak, dan Dr. Akhmad Ardian Korda, atas segala dukungan dan kerjasamanya dalam proses pendidikan dan pengajaran di Program Studi Sarjana Teknik Pertambangan serta Program Studi Magister dan Doktor Rekayasa Pertambangan.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada beberapa perusahaan atas kerjasamanya dalam pelaksanaan penelitian pada konstruksi bawah tanah, yaitu PT Aneka Tambang (Persero) Tbk., PT Bukit Asam (Persero) Tbk., PT Cibaliung Sumber Daya, PT Freeport Indonesia, PT Perusahaan Listrik Negara (Persero), dan PT Natarang Mining.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada para alumni dan

mahasiswa Program Studi Sarjana Teknik Pertambangan serta Program Studi Magister dan Doktor Rekayasa Pertambangan, khususnya Dr. Barlian Dwinagara, Dr. Singgih Saptono, dan Dr. Masagus Ahmad Azizi, atas kerjasamanya dalam pelaksanaan dan publikasi hasil penelitian. Ucapan terima kasih saya sampaikan juga kepada para staf dan teknisi Laboratorium Geomekanika dan Peralatan Tambang FTTM: Rudhy Andry Tanjung, Sudibyo, Iwan Sofyan, Sugito, Sari Munggaran, Kurnia, Purwanto, dan Nurman Hakim, atas segala kerjasama dan bantuannya dalam pelaksanaan penelitian di laboratorium.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Em.Prof. Edwin Thomas Brown (Golder Associate, Brisbane, Australia) dan Dr. Robert Trueman (Golder Associate, Newcastle, Australia) yang pada saat masih bertugas di University of Queensland, bersama-sama dengan Prof. Gideon Chitombo telah membimbing saya selama menempuh studi S3.

Rasa hormat dan terima kasih yang tak terkira saya sampaikan kepada orang tua saya, Ayahanda dr. Charles Frederik Wattimena, DTPH (Alm.) dan Ibunda dr. Shinta Arriyanti Wattimena (Alm.) serta mertua saya, Ayahanda R. Waluyo (Alm.) dan Ibunda H. Sumarni Waluyo atas perhatian, motivasi, do'a, dan kasih sayangnya selama ini. Ucapan terima kasih saya sampaikan juga kepada adik-adik kandung dan adik-adik ipar beserta keluarga yang senantiasa mendukung dan memberi semangat kepada saya.

Akhirnya, dan yang terpenting, penghargaan dan terima kasih yang

tak terhingga saya sampaikan kepada isteri tercinta, Bayu Susilowati Wattimena, SH untuk semua cinta, kesabaran, dan kesetiaannya dalam mendampingi saya dalam suka dan duka selama ini. Demikian juga kedua putera kebanggaan, Fauzan Yudho Pratomo dan Rizqi Dwi Ramadhianto yang selalu menjadi sumber hiburan.

Semoga semua kebaikan tersebut mendapat balasan yang berlipat ganda dari Allah SWT, Aamiin.

DAFTAR PUSTAKA

- Arif, I., Rai, M.A., dan Wattimena, R.K. 1996. "Pemodelan numerik terowongan pada batuan berlapis". Pros. Pertemuan Ilmiah Tahunan III Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia, Jakarta.
- Azizi, M.A. 2014. "Pengembangan Metode Penentuan Reliabilitas Kestabilan Lereng Tambang Terbuka Batubara di Indonesia". Disertasi, Institut Teknologi Bandung, Indonesia.
- Baecher, G. 2005. "The nature of risk in geotechnical engineering". Proc. GISOS Post-Mining Symposium, Nancy, France.
- Barton, N., Lien, R., and Lunde, J. 1974. "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support". Rock Mechanics, 6: 189-236.
- Bieniawski, Z.T. 1973. "Engineering classification of jointed rock masses". Trans. South African Institute of Civil Engineers, 15: 335-344.
- Bieniawski, Z.T. 1976. "Rock mass classification in rock engineering". Proc. Symposium on Exploration for Rock Engineering, Vol. 1,

Johannesburg, South Africa.

Bieniawski, Z.T. 1989. "Engineering Rock Mass Classification". John Wiley and Sons, Inc., New York.

Brown, E.T. 2006. Komunikasi personal.

Coulomb, C.A. 1776. "Essai sur une application des regles de maximis et minimis a quelques problemes de statique, relatifs a l'architecture". *Memoires de Mathematique & de Physique*, 7: 343-382.

Douglas, K.J. 2002. "The Shear Strength of Rock Masses". PhD Thesis, University of New South Wales, Sydney, Australia.

Gashemi, E., Ataei, M., and Shahriar, K. 2014. "An intelligent approach to predict pillar sizing in designing room and pillar coal mines". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 65: 86-95.

Hoek, E. 1998. "Reliability of Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35: 63-68.

Hoek, E. 2006. Komunikasi personal.

Hudson, J.A. 2006. Komunikasi personal.

Hudson, J.A. and Harrison, J.P. 1997. "Engineering Rock Mechanics - An introduction to the principles". Elsevier Science Ltd., Oxford.

Kramadibrata, S., Wattimena, R.K., Sulistanto, B., dan Simangunsong, G.M., Prasetyo, S.H. 2008a. "Failure criteria development using triaxial test multistage and conventional". *Proc. the 6th International Symposium of Earth Science and Technology*, Fukuoka, Japan.

Kramadibrata, S., Wattimena, R.K., Kamil, I., Rai, M.A., and Widijanto, E. 2008b. "Application of AE for determining in situ stress at UG mine". *Proc. Asian Rock Mechanics Symposium 5*, Tehran, Iran.

Lunder, P.J. and Pakalnis, R.C. 1997. "Determination of the strength of hard-rock mine pillars". *Bulletin of Canadian Institute of Mining and Metallurgy*, 90(1013): 51-55.

Mathews, K.E., Hoek, E., Wyllie, D.C., and Stewart S.B.V. 1981. "Prediction of stable excavations for mining at depth below 1000 metres in hard rock". *CANMET Report DSS Serial No. OSQ80-00081, DSS File No. 17SQ.23440-0-9020*.

Mawdesley, C., Trueman, R., and Whiten, W. 2001. "Extending the Mathews stability graph for open stope design". *Trans. Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry*, 110: A27-A39.

Melati, S., Wattimena, R.K., Kramadibrata, S., Simangunsong, G.M., and Sianturi, R.G. 2014. "Stress paths effects on multistage triaxial test". *Proc. Asian Rock Mechanics Symposium 8*, Sapporo, Japan.

Peck, R.B. 1969. "The observational method in applied soil mechanics – 9th Rankine Lecture". *Geotechnique*, 19: 171-187.

Purwanto, Wahyudi, S., Shimada, H., Sasaoka, T., Wattimena, R.K., Karian, T., and Matsui, K. 2014. "Support design of underground cut and fill mine by using hybrid numerical empirical model". *Journal of Geology and Geosciences*, 3: 8 pp.

Rai, M.A., Adisoma, G.S., dan Wattimena, R.K. 2001. "Penggunaan

perilaku elasto-visko-plastis pada analisis kemantapan lubang bukaan bawah tanah". Jurnal Teknologi Mineral, 2001, 8: 375-383.

Rogers, J.D. 2011. "Landslides of the Panama canal". Proc. 2011 Pacific Section Meeting of American Association for the Advancement of Science, San Diego, USA.

Saptono, S. 2012. "Pengembangan Metode Analisis Stabilitas Lereng Berdasarkan Karakterisasi Batuan di Tambang Terbuka Batubara. Disertasi, Institut Teknologi Bandung, Indonesia.

Staveren, M.v. 2007. "Extending to geotechnical risk management". Proc. First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk, Shanghai, China.

Trueman, R., Pierce, M., and Wattimena, R.K. 2002. "Quantifying stresses and support requirements in the undercut and production level drifts of block and panel caving mines". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39: 617-632.

Wattimena, R.K. 2003. "Designing Undercut and Production Level Drifts of Block Caving Mines". PhD Thesis, University of Queensland, Brisbane, Australia.

Wattimena, R.K. 2006. "Numerical modelling of mining-induced energy in a cut-and-fill mine". Proc. The 4th International Symposium of Earth Science and Technology, Fukuoka, Japan.

Wattimena, R.K. 2013. "Predicting probability stability of rock slopes using logistic regression." International Journal of the Japanese Committee

for Rock Mechanics, 9:1-6.

Wattimena, R.K. 2014. "Predicting the stability of hard rock pillars using multinomial logistic regression". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 71: 33-40.

Wattimena, R.K. dan Arif, I. 1996. "Penggunaan model material elasto-plastis pada pemodelan terowongan". Pros. Pertemuan Ilmiah Tahunan III Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia, Jakarta.

Wattimena, R.K., Sulistianto, B., Risono, and Matsui, K. 2004. "A semi-caving method applied at level 600 Ciurug vein, Pongkor underground gold mine, PT Aneka Tambang Tbk." Proc. the 13th International Symposium of Mine Planning and Equipment Selection, Wroclaw, Poland.

Wattimena, R.K., Kramadibrata, S., dan Damanik, B. 2005a. "Studi rayapan geser dan kekuatan jangka panjang batulumpur di laboratorium". Jurnal Teknologi Mineral, 12: 143-147.

Wattimena, R.K., Widijanto, E., and Sahupala, H. 2005b. "Convergence monitoring for evaluating the stability of extraction level after drawpoints closing in DOZ underground mine, PT Freeport Indonesia". The 3rd International Symposium of Earth Science and Technology, Fukuoka, Japan.

Wattimena, R.K., Sulistianto, B., Matsui, K., Dwinagara, B., and Barnas, E. 2006a. "Measuring rock mass modulus in a stoping-affected cross-cut in Pongkor underground gold mine". Proc. Asian Rock Mechanics

Symposium 4, Singapore.

Wattimena, R.K., Widijanto, E., and Ernawan, R. 2006b. "Correlating apparent stresses predicted by microseismic monitoring and tunnel displacements measured with convergencemeter in the DOZ block caving mine". Proc. Asian Rock Mechanics Symposium 4, Singapore.

Wattimena, R.K., Rai, M.A., Kramadibrata, S., Arif, I., and Dwinagara, B. 2008. "Estimating rock mass long-term strength using in situ measurement and testing results". Proc. Asian Rock Mechanics Symposium 5, Tehran, Iran.

Wattimena, R.K., Uripto, R.K., Kramadibrata, S., and Widodo, N.P. 2011. "Study of nozzle design selection for hydraulic fracturing test on rock samples under triaxial condition". Proc. the 12th Congress of International Society for Rock Mechanics, Beijing, China.

Wattimena, R.K., Sirait, B., Widodo, N.P., and Matsui, K. 2012a. "Evaluation of rockburst potential in a cut-and-fill mine using energy balance". International Journal of the Japanese Committee for Rock Mechanics, 8: 19-23.

Wattimena, R.K., Kramadibrata, S., Arif, I., Azizi, M.A., and Sidi, I.D. 2012b. "Probabilistic analysis of single bench using new slope stability curves". Proc. Asian Rock Mechanics Symposium 7, Seoul, Korea.

Wattimena, R.K., Kramadibrata, S., Sidi, I.D., and Azizi, M.A. 2013. "Developing coal pillar stability chart using logistic regression". International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 58: 55-60.

CURRICULUM VITAE



Nama : **RIDHO KRESNA WATTIMENA**

Tempat/tgl. lahir : Ujung Pandang, 5 Februari 1968

Kel. Keahlian : Teknik Pertambangan

Alamat Kantor : Jalan Ganesha 10 Bandung

Nama Istri : Bayu Susilowati Wattimena

Nama Anak : 1. Fauzan Yudho Pratomo
2. Rizqi Dwi Ramadhianto

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- Doctor of Philosophy (PhD), bidang Mekanika Batuan, University of Queensland, Australia, 2003
- Magister Teknik (MT), bidang Rekayasa Pertambangan (Geomekanika), Institut Teknologi Bandung, 1996
- Sarjana Teknik Pertambangan (Ir), Institut Teknologi Bandung, 1991

II RIWAYAT KERJA di ITB

- Staf Pengajar Fakultas ITB, 1993-sekarang
- Manajer Laboratorium Lingkungan Tambang, 2007
- Ketua Program Studi Sarjana Teknik Pertambangan, 2008-2009
- Manajer Laboratorium Perencanaan dan Valuasi Tambang, 2011
- Ketua Studi Program Magister dan Doktor Rekayasa Pertambangan, 2012-2013
- Manajer Laboratorium Geomekanika dan Peralatan Tambang, 2014-sekarang

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- CPNS, III/A, 1 Februari 1993
- Penata Muda, III/A, 1 April 1994
- Penata Muda Tk.I, III/B, 1 April 1997
- Penata, III/C, 1 Oktober 1999
- Penata Tk. I, III/D, 1 Oktober 2007
- Pembina, IV/A, 1 Oktober 2009

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Asisten Ahli Madya, 1 Desember 1994
- Asisten Ahli, 1 Desember 1996
- Lektor Muda, 1 April 1999
- Lektor, 15 Juli 2003
- Lektor Kepala, 1 Mei 2007
- Profesor/Guru Besar, 1 Juni 2014.

V. KEGIATAN PENDIDIKAN DAN PENGAJARAN

- TA2103 Mekanika Teknik, Program Studi Sarjana Teknik Pertambangan
- TA4121 Kestabilan Bawah Tanah, Program Studi Sarjana Teknik Pertambangan
- TA4221 Teknik Terowongan, Program Studi Sarjana Teknik Pertambangan
- TA5106 Mekanika Batuan Lanjut I, Program Studi Magister Rekayasa Pertambangan
- TA6010 Topik Khusus, Program Studi Magister Rekayasa Pertambangan
- TA8003 Studi Komprehensif Pertambangan, Program Studi Doktor Rekayasa Pertambangan

VI. KEGIATAN PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT

- Menginisiasi, menjalankan, dan membimbing penelitian mekanika batuan, khususnya dalam topik: pengujian laboratorium dan *in situ*; kekuatan batuan dan massa batuan; analisis, perancangan, penyanggaan, dan perkuatan lereng dan lubang bukaan bawah tanah pada massa batuan.
- Memberikan konsultasi secara nasional dan internasional dalam aspek rekayasa batuan pada proyek teknik sipil (lereng, terowongan, dan lubang bukaan bawah tanah lainnya) tambang terbuka dan bawah tanah batubara serta bijih.

VII PUBLIKASI

Jurnal Internasional

1. **Wattimena, R.K.** 2014. "Predicting the stability of hard rock pillars using multinomial logistic regression". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 71: 33-40
2. Purwanto, Wahyudi, S., Shimada, H., Sasaoka, T., **Wattimena, R.K.**, Karian, T., and Matsui, K. 2014. "Support design of underground cut and fill mine by using hybrid numerical empirical model". Journal of Geology and Geosciences, 3: 8 pp
3. **Wattimena, R.K.**, Kramadibrata, S., Sidi, I.D., and Azizi, M.A. 2013. "Developing coal pillar stability chart using logistic regression". International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 58: 55-60
4. **Wattimena, R.K.** 2013. "Predicting probability stability of rock slopes using logistic regression". International Journal of the Japanese Committee for Rock Mechanics, 9: 1-6

5. Purwanto, Shimada, H., Sasaoka, T., **Wattimena, R.K.**, and Matsui, K. 2013. "Influence of stope design on hanging wall decline in Cibaliung underground gold mine". International Journal of Geosciences, 4: 1-8
6. **Wattimena, R.K.**, Sirait, B., Widodo, N.P., and Matsui, K. 2012. "Evaluation of rockburst potential in a cut-and-fill mine using energy balance". International Journal of the Japanese Committee for Rock Mechanics, 8: 19-23
7. Sulistianto, B., Sulaiman, M.S., **Wattimena, R.K.**, Ardianto, A., and Matsui, K. 2009. "Determination of stope geometry in jointed rock mass at Pongkor underground gold mine". International Journal of the Japanese Committee for Rock Mechanics, 5: 63-68
8. Trueman, R., Pierce, M., and **Wattimena, R.K.** 2002. "Quantifying stresses and support requirements in the undercut and production level drifts of block and panel caving mines". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39: 617-632

Jurnal Nasional

1. Saptono, S., Kramadibrata, S., Sulistianto, B., dan **Wattimena, R.K.** 2009. "Pengaruh ukuran contoh terhadap kekuatan batuan". Jurnal Teknologi Mineral, 2009, 16: 1-12
2. Sulistianto, B., **Wattimena, R.K.**, Kramadibrata, S., Rabudianto, T.A., dan Ardianto, A. 2009. "Estimation of rock support type for the South ramp down development at Pongkor Underground Mine". Jurnal Teknologi Mineral, 16: 109-118
3. **Wattimena, R.K.**, Kramadibrata, S., dan Damanik, B. 2005. "Studi rayapan geser dan kekuatan jangka panjang batulumpur di laboratorium". Jurnal Teknologi Mineral, 12: 143-147
4. Rai, M.A., Adisoma, G.S., dan **Wattimena, R.K.** 2001. "Penggunaan perilaku elasto-visko-plastis pada analisis kemantapan lubang

bukaan bawah tanah". Jurnal Teknologi Mineral, 8: 375-383

Prosiding Seminar Internasional

1. Melati, S., **Wattimena, R.K.**, Kramadibrata, S., Simangunsong, G.M., and Sianturi, R.G. 2014. "Stress paths effects on multistage triaxial test". Proc. Asian Rock Mechanics Symposium 8, Sapporo, Japan
2. Wicaksana, Y., Kramadibrata, S., and **Wattimena, R.K.** 2014. "A laboratory scale of physical modeling of slope failure generated by centrifugal acceleration with several water content scenarios". Proc. Asian Rock Mechanics Symposium 8, Sapporo, Japan
3. Kramadibrata, S., **Wattimena, R.K.**, Azizi, M.A., Wicaksana, Y., and Sidi, I.D. 2013. "Physical modeling and simulation of slope failure by means of centrifuge acceleration". Proc. Eurock 2013, Wroclaw, Poland
4. Azizi, M.A., Kramadibrata, S., **Wattimena, R.K.**, and Sidi, I.D. 2013. "Characterization of the distribution of physical and mechanical properties of rocks at the Tutupan coal mine, South Kalimantan, Indonesia". Proc. Eurock 2013, Wroclaw, Poland
5. Azizi, M.A., Kramadibrata, S., **Wattimena, R.K.**, and Sidi, I.D. 2013. "Probabilistic analysis of physical models slope failure". Procedia Earth and Planetary Science, 6: 411-418
6. Sirait, B., **Wattimena, R.K.**, and Widodo, N.P. 2013. "Rockburst prediction of a cut and fill mine by using energy balance and induced stress". Procedia Earth and Planetary Science, 6: 426-434
7. **Wattimena, R.K.**, Kramadibrata, S., Arif, I., Azizi, M.A., and Sidi, I.D. 2012. "Probabilistic analysis of single bench using new slope stability curves". Proc. Asian Rock Mechanics Symposium 7, Seoul, Korea
8. Kramadibrata, S., **Wattimena, R.K.**, Sidi, I.D., Azizi, M.A., and Ardiansyah, Y. 2012. "Open pit mine slope stability and uncertainty". Proc. Asian Rock Mechanics Symposium 7, Seoul, Korea

9. **Wattimena, R.K.**, Kramadibrata, S., Widodo, N.P., and Uripto, R.K. 2011. "Study of nozzle design selection for hydraulic fracturing test on rock samples under triaxial condition". Proc. the 12th Congress of International Society for Rock Mechanics, Beijing, China
10. Kramadibrata, S., Saptono, S., **Wattimena, R.K.**, Simangunsong, G.M., and Sulistianto, B. 2011. "Developing a slope stability curve of open pit coal mine by using dimensional analysis method." Roc. the 12th Congress of International Society for Rock Mechanics, Beijing, China
11. **Wattimena, R.K.**, Rai, M.A., Kramadibrata, S., Arif, I., and Dwinagara, B. 2008. "Estimating rock mass long-term strength using insitu measurement and testing results". Proc. Asian Rock Mechanics Symposium 5, Tehran, Iran
12. Kramadibrata, S., **Wattimena, R.K.**, Kamil, I., Rai, M.A., and Widijanto, E. 2008. "Application of AE for determining in situ stress at UG mine". Proc. Asian Rock Mechanics Symposium 5, Tehran, Iran
13. Kramadibrata, S., Sihombing, D., Sulistianto, B., and **Wattimena, R.K.** 2007. "Influence of water on shear strength characteristics of sandstone." Proc. the 5th International Symposium of Earth Science and Technology, Fukuoka, Japan
14. Sasaoka, T., Matsui, K., Shimada, H., Furukawa, H., Kramadibrata, S., Sulistianto, B., and **Wattimena, R.K.** 2007. "Roof support systems at a new underground mine developed from open-cut highwall in Indonesia". Proc. the 4th International Symposium of High Performance Mine Production, Aachen, Germany
15. Kramadibrata, S., **Wattimena, R.K.**, Sulistianto, B., Simangunsong, G.M., and Tobing, A. 2007. "Shear strength characteristic of coal bearing strata". Proc. the 11th Congress of International Society for Rock Mechanics, Lisbon, Portugal

16. **Wattimena, R.K.** 2006. "Numerical modelling of mining-induced energy in a cut-and-fill mine". Proc. the 4th International Symposium of Earth Science and Technology, Fukuoka, Japan
17. Sulaiman, M.S., Sulistianto, B., **Wattimena, R.K.**, Kramadibrata, S., Dwinagara, B., Matsui, K., and Setiawan, I.D. 2006. "Stress distribution and displacement analysis in a stope in Pongkor underground gold mine". Proc. the 4th International Symposium of Earth Science and Technology, Fukuoka, Japan
18. Sulistianto, B., **Wattimena, R.K.**, Arif, I., and Widhy, S. 2006. "Lowwall stability analysis, case study at Abimanyu pit, Satui mine, PT Arutmin Indonesia". Proc. the 9th International Symposium of Mineral Exploration, Bandung, Indonesia
19. **Wattimena, R.K.**, Sulistianto, B., Matsui, K., Dwinagara, B., and Barnas, E. 2006. "Measuring rock mass modulus in a stoping-affected cross-cut in Pongkor underground gold mine". Proc. Asian Rock Mechanics Symposium 4, Singapore
20. **Wattimena, R.K.**, Widijanto, E., and Ernawan, R. 2006. "Correlating apparent stresses predicted by microseismic monitoring and tunnel displacements measured with convergencemeter in the DOZ block caving mine". Proc. Asian Rock Mechanics Symposium 4, Singapore
21. **Wattimena, R.K.**, Widijanto, E., and Sahupala, H. 2005. "Convergence monitoring for evaluating the stability of extraction level after drawpoints closing in DOZ underground mine, PT Freeport Indonesia". Proc. the 3rd International Symposium of Earth Science and Technology, Fukuoka, Japan
22. Kramadibrata, S., Rai, M.A., Hartami, P.N., Sulistianto, B., **Wattimena, R.K.**, and Matsui, K. 2004. "Determination of three dimensional in situ stress regime using hydraulic fracturing and acoustic emission

- methods". Proc. Asian Rock Mechanics Symposium 3, Kyoto, Japan
23. Sulistianto, B., **Wattimena, R.K.**, Kramadibrata, S., Rai, M.A., Dwinagara, B., Matsui. K., Setiawan, I.D., Sudarman, H., and Herlambang, E.J. 2004. "Influence of a stope on drift displacements in a fractured rock mass at Pongkor underground gold mine, Indonesia. Proc. Asian Rock Mechanics Symposium 3, Kyoto, Japan
 24. **Wattimena, R.K.**, Sulistianto, B., Risono, and Matsui, K. 2004. "A semi-caving method applied at level 600 Ciurug Vein, Pongkor Underground Gold Mine, PT Aneka Tambang Tbk". Proc. the 13th International Symposium of Mine Planning and Equipment Selection, Wroclaw, Poland
 25. **Wattimena, R.K.**, Rai, M.A., and Kramadibrata, S. 2004. "An alternative method for designing the production level of a block caving mine". Proc. the 2nd International Symposium of Earth Science and Technology, Fukuoka, Japan
 26. Dwinagara, B., **Wattimena, R.K.**, Kramadibrata, S., Sulistianto, B., Rai, M.A., Matsui, K., Shiraishi, N., Setiawan, I.D., and Sudarman, H. 2004. "Measurement of rock mass deformation modulus using Goodman's Jack in Pongkor Underground Gold Mine, Indonesia". Proc. the 2nd International Symposium of Earth Science and Technology, Fukuoka, Japan
 27. Arif, I., Sulistianto, B., **Wattimena, R.K.**, Carrugan, D., and Siahaan, A.R. 2003. "Slope stability analysis in a granite quarry with complex geological structure – Case study of a granite quarry in Karimun Island, Indonesia". Proc. the 12th International Symposium of Mine Planning and Equipment Selection, Kalgoorlie, Australia

Prosiding Seminar Nasional

1. Azizi, M.A., Kramadibrata, S., **Wattimena, R.K.**, Sidi, I.D., dan Adriansyah, Y. 2012. "Analisis risiko kestabilan lereng tambang terbuka (Studi kasus Tambang Mineral X)". Pros. Seminar Geomekanika I, Yogyakarta
2. Azizi, M.A., Kramadibrata, S., **Wattimena, R.K.**, dan Sidi, I.D. 2011. "Karakterisasi variabel acak interburden MN untuk disain lereng tunggal menggunakan Metode Kolmogorov-Smirnov (Studi kasus di PT. Kaltim Prima Coal, Sanggatta, Kalimantan Timur)". Pros. Seminar Nasional Kebumihan, Yogyakarta
3. Azizi, M.A., Kramadibrata, S., **Wattimena, R.K.**, dan Sidi, I.D. 2011. "Aplikasi probalistik untuk analisis kestabilan lereng tunggal (Studi kasus di PT. Bukit Asam (Persero), Tbk)". Pros. Temu Profesi Tahunan XVIII Perhimpunan Ahli Pertambangan Indonesia, Mataram, 2011
4. Azizi, M.A., Kramadibrata, S., **Wattimena, R.K.**, dan Arif, I. 2011. "Aplikasi pendekatan probabilitas dalam analisis kestabilan lereng tunggal menggunakan metode kesetimbangan batas". Pros. Seminar Nasional Statistik, Semarang, 2011
5. Wicaksana, Y., Widodo, N.P., Kramadibrata, S., **Wattimena, R.K.**, Hermawan, F., Nardono, dan Kresna, B. 2009. "Studi penentuan tahanan gulir pada beberapa material jalan untuk operasi alat angkut di tambang terbuka batubara". Pros. Temu Profesi Tahunan XVIII Perhimpunan Ahli Pertambangan Indonesia, Jakarta
6. Saptono, S., Kramadibrata, S., Sulistianto, B., dan **Wattimena, R.K.** 2009. "Klasifikasi massa batuan untuk perancangan lereng di PT Adaro Indonesia". Pros. Temu Profesi Tahunan XVIII Perhimpunan Ahli Pertambangan Indonesia, Jakarta

7. **Wattimena, R.K.** and Kramadibrata, S. 2007. "Underground mining rock mechanics researches in ITB". Pros. Indonesian Mining Association Conference, Jakarta
8. Sulistianto, B., Sulaiman, M.S., **Wattimena, R.K.**, dan Arif, I. 2006. "Analisis kestabilan lowwall dengan kemiringan curam di tambang batubara." Pros. Temu Profesi Tahunan XV Perhimpunan Ahli Pertambangan Indonesia, Jakarta
9. Rosyid, F.A., **Wattimena, R.K.**, dan Sulistianto, B. 2004. "Analisis kemantapan lereng menggunakan pendekatan strength reduction". Pros. Temu Profesi Tahunan XIII Perhimpunan Ahli Pertambangan Indonesia, Palembang, 2004
10. **Wattimena, R.K.**, Sulistianto, B., dan Kusuma, G.J. 2004. "Perkembangan terkini penelitian mekanika batuan di Departemen Teknik Pertambangan ITB". Pros. Temu Profesi Tahunan XIII Perhimpunan Ahli Pertambangan Indonesia, Palembang, 2004
11. Dwinagara, B., Kramadibrata, S., Sulistianto, B., dan **Wattimena, R.K.** 2004. "Observasi visual lubang bor menggunakan kamera lubang bor". Pros. Temu Profesi Tahunan XIII Perhimpunan Ahli Pertambangan Indonesia, Palembang
12. **Wattimena, R.K.**, Rai, M.A., Arif, I., Kramadibrata, S., and Sulistianto, B. 2003. "Minimising damage to production level of a block caving mine". Proc. Indonesian Mining Association Conference, Jakarta
13. Rai, M.A., Koesnaryo, S., dan **Wattimena, R.K.** 1998. "Penggunaan metode observasi untuk pengendalian kestabilan terowongan". Pros. Seminar Geoteknik Indonesia, Bandung
14. Kramadibrata, S., Arif, I., dan **Wattimena, R.K.** 1997. "Perkembangan dan penggunaan peralatan gali mekanis pada lubang bukaan bawah tanah". Pros. Temu Profesi Tahunan VI Perhimpunan Ahli

- Pertambangan Indonesia, Jakarta
15. Rai, M.A., Arif, I., Kramadibrata, S., dan **Wattimena, R.K.** 1996. "The role of geomechanics in solving excavation problems encountered in open pit and underground mines". Proc. Indonesian Mining Association Conference, Jakarta
16. **Wattimena, R.K.** dan Arif, I. 1996. "Penggunaan model material elastoplastis pada pemodelan terowongan". Pros. Pertemuan Ilmiah Tahunan III Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia, Jakarta
17. Arif, I., Rai, M.A., dan **Wattimena, R.K.** 1996. "Pemodelan numerik terowongan pada batuan berlapis". Pros. Pertemuan Ilmiah Tahunan III Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia, Jakarta
18. Rai, M.A., Arif, I., **Wattimena, R.K.**, dan Soedibyo. 1995. "Analisis kemantapan bendungan PLTA Saguling dengan menggunakan data pemantauan". Pros. Seminar Nasional Teknik Sipil, Bandung
19. Soedibyo, Arif, I., dan **Wattimena, R.K.** 1995. "Analisis kemantapan rumah pembangkit bawah tanah PLTA Cirata dengan menggunakan data pemantauan". Pros. Seminar Nasional Terowongan, Bandung
20. Arif, I., Rai, M.A., Sugeng, M.B., **Wattimena, R.K.**, dan Susanto, Y.A. 1994. "Perkembangan terkini pemodelan tambang di Indonesia". Pros. Temu Profesi Tahunan III Perhimpunan Ahli Pertambangan Indonesia, Yogyakarta

VIII. PEMBICARA KUNCI DAN DOSEN TAMU

1. Seminar Nasional Geomekanika, Jayapura, 24-25 September 2014
2. Seminar Nasional Pertambangan Indonesia, Jakarta, 25-26 Juni 2014
3. Seminar Nasional Kebumihan, Yogyakarta, 5 September 2013
4. Dong-A University, Busan, Korea Selatan, 6 Mei 2013

5. Pukyong National University, Busan, Korea Selatan, 7 Mei 2013
6. Sejong University, Seoul, Korea Selatan, 9 May 2013
7. International Symposium on Design, Calculation and Measurements for Tunnels, Bandung, 11 September 2012

IX. BUKU

Rai, M.A., Kramadibrata, S., Wattimena, R.K. 2013. "Mekanika Batuan", Penerbit ITB, Bandung

X. KERJASAMA

- University of Queensland, Australia, kerjasama penelitian, 2013
- Kyushu University, Jepang, kerjasama penelitian serta pembimbingan tesis dan disertasi, 2013-sekarang
- Dong-A University, Korea Selatan, kerjasama *internship program*, 2012-sekarang
- ValeINCO, *Advisory Board Member* untuk Proyek PLTA Karebbe, 2007-2011
- PT PLN (Persero), *Chairman of Project Review Panel* untuk Proyek PLTA Upper Cisokan, 2011-sekarang

XI. PENGHARGAAN

Satya Lencana Karya Satya 10 tahun dari Presiden Republik Indonesia, tahun 2006.