

# PROSIDING 2019



## **Workshop dan Simposium Nasional Geomekanika Ke-5**

**“Geomekanika Dalam Keselamatan Kerja  
di Industri Pertambangan dan Infrastruktur”**

**Makassar, 26-30 Agustus 2019**



**UNIVERSITAS HASANUDDIN MAKASSAR**

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala karunia-Nya sehingga kegiatan Workshop dan Simposium Nasional Geomekanika (WSNG) ke-5 tahun 2019 dapat terlaksana.

Kegiatan WSNG ke-5 ini merupakan kerja sama antara Indonesian Rock Mechanics Society (IRMS) dengan Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin beserta institusi pendidikan yang memiliki Program Studi Teknik Pertambangan di Kota Makassar.

Prosiding Workshop dan Simposium Nasional Geomekanika ke-5 ini berisikan berbagai makalah ilmiah mengenai **Properti Batuan dan Karakteristik Massa Batuan pada Aktivitas Pertambangan dan Infrastruktur, Rekayasa Pertambangan dan Batuan, Rock Dynamics, Peran Geomekanika dalam Mitigasi Bencana, Impak terhadap Lingkungan pada Rekayasa Batuan, dan Site Investigation and Monitoring**. Makalah ilmiah tersebut merupakan kontribusi dari industri/praktisi, pemerintah, akademisi/peneliti, dan mahasiswa.

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada semua pihak yang telah membantu terselenggaranya kegiatan ini. Semoga berbagai karya ilmiah yang dihasilkan dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Makassar, Agustus 2019

**Panitia Pelaksana**

**Workshop dan Simposium Nasional Geomekanika Ke-5 (WSNG 5)**

---

---

# PROSIDING

## Workshop dan Simposium Nasional Geomekanika Ke-5

### “Geomekanika dalam Keselamatan Kerja di Industri Pertambangan dan Infrastruktur”

#### **Panitia Pelaksana:**

Ketua Pelaksana	: Dr.Eng. Purwanto, S.T., M.T., <i>Universitas Hasanuddin</i>
Sekretaris	: Nirmana Fiqra Qaidahiyani, S.T., M.T., <i>Universitas Hasanuddin</i>
Bendahara	: Dr. Aryanti Virtanti Anas, S.T., M.T., <i>Universitas Hasanuddin</i>
Humas dan Publikasi	: Asran Ilyas, S.T., M.T., Ph.D, <i>Universitas Hasanuddin</i> Dr.Eng. Hendra Pachri, S.T., M.Eng., <i>Universitas Hasanuddin</i>
Sponsorship	: Dr. Ir. Irzal Nur, M.T., <i>Universitas Hasanuddin</i>
Paper & Administrasi	: Dr. Sufriadin, S.T., M.T., <i>Universitas Hasanuddin</i>
Workshop	: Dr.Eng. Ardi Arsyad, S.T., M.Eng.Sc., <i>Universitas Hasanuddin</i>
Field Trip	: Ir. Djamaluddin, M.T., <i>Universitas Hasanuddin</i> Habibie Anwar, S.T., M.T., <i>Universitas Muslim Indonesia</i>
Simposium	: Dr.phil.nat. Sri Widodo, S.T., M.T., <i>Universitas Hasanuddin</i> Dr.Eng. Ilham Alimuuddin, S.T., M.Gis, <i>Universitas Hasanuddin</i>
Akomodasi & Transportasi	: Firman Nullah Yusuf, S.T., M.T., <i>Universitas Muslim Indonesia</i> Abdul Salam Munir, S.T., M.T., <i>Universitas Muslim Indonesia</i>
Logistik	: Rizki Amalia, S.T., M.T., <i>Universitas Hasanuddin</i>
Konsumsi	: Meinarni Thamrin, S.T., M.T., <i>Universitas Hasanuddin</i>

#### **Steering Committee:**

- Dr. Ir. Suseno Kramadibrata, M.Sc., *Presiden IMRS dan Direktur PT Bumi Resources Minerals Tbk.*
- Prof. Dr. Ir. Ridho K. Wattimena, M.T., *Sekretaris IRMS dan Institut Teknologi Bandung*
- Prof. Dr. Ir. Made Astawa Rai, DEA., *Institut Teknologi Bandung*
- Prof. Dr. Ir. Irwandy Arif, M.Sc., *Institut Teknologi Bandung*
- Prof. Dr. Ir. Budi Sulistianto, MT., *Institut Teknologi Bandung*
- Dr.Eng. Ganda M. Simangunsong, S.T., M.T., *Institut Teknologi Bandung*
- Dr.Eng. Nuhindro P. Widodo, S.T., M.T., *Institut Teknologi Bandung*

**Reviewer:**

Prof. Dr. Ir. Ridho Kresna Wattimena, M.T., Institut Teknologi Bandung  
Dr. Eman Widijanto, S.T., M.ASc., PT Freeport Indonesia  
Dr.Eng. Ganda Marihot Simangunsong, S.T., M.T., Institut Teknologi Bandung  
Dr. Ir. Barlian Dwinagara, M.T., *Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta*  
Drs. Raimon Kopa, M.T., Universitas Negeri Padang  
Dr.Eng. Purwanto, S.T., M.T., Universitas Hasanuddin  
Prof. Dr. Ir. Made Astawa Rai, DEA., Institut Teknologi Bandung  
Dr. Pantjanita Novi Hartami, S.T., M.T., Universitas Trisakti  
Dr.Eng. Ginting Jalu Kusuma, S.T., M.T., Institut Teknologi Bandung  
Dr. Ir. Muhammad Ramli, M.T., Universitas Hasanuddin  
Prof. Dr. Ir. Irwandy Arif, M.Sc., Institut Teknologi Bandung  
Simon Heru Prasetyo, S.T., M.Sc., Ph.D, Institut Teknologi Bandung  
Dr. Ir. Suseno Kramadibrata, M.Sc., PT Bumi Resources Minerals Tbk.  
Dr. Masagus Ahmad Azizi, S.T., M.T., Universitas Trisakti  
Drs. Bambang Heriyadi, M.T., Universitas Negeri Padang  
Dr.Eng. Hendra Pachri, S.T., M.Eng., Universitas Hasanuddin  
Prof. Dr. Ir. Budi Sulistianto, M.T., Institut Teknologi Bandung  
Dr.Eng. Tri Karian, S.T., M.T., Institut Teknologi Bandung  
Dr.Eng. Nuhindro Priagung Widodo, S.T., M.T., Institut Teknologi Bandung  
Dr. Singgih Saptono, *Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta*  
Rachmat Hamid Musa, S.T., M.T., IPM., Groundprobe  
Dr. Yan Adriansyah, S.T., M.T., PT Berau Coal

**Editor:**

Dr. Sufriadin, S.T., M.T.  
Dr.Eng Purwanto, S.T., M.T.  
Dr. Ir. Muhammad Ramli, M.T.  
Nirmana Fiqra Qaidahiyani, S.T., M.T.  
Amelia Yustin  
Ainul Yaqin  
Muh. Safaruddin Ikbal

**Penerbit:**

Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin

**Alamat Redaksi:**

Departemen Teknik Pertambangan  
Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin  
Gedung Geologi, Lt.2 Jl. Proos Malino, KM.6  
Gowa, 92171, Sulawesi Selatan  
E-mail : [tambang.s1@unhas.ac.id](mailto:tambang.s1@unhas.ac.id)

## DAFTAR ISI

Kode Paper	Judul Paper & Penulis	Halaman
<b><u>Properti Batuan dan Karakterisasi Massa Batuan</u></b>		
KMB 01	Estimasi Nilai Kuat Tekan Uniaksial Menggunakan Data Uji Kecepatan Ultrasonik, Studi Kasus Batupasir Dlingo, Kabupaten Bantul, D.I Yogyakarta  Finanti P. Dwikasih, Agustina E. Ridha, dan S. Koesnaryo	1
KMB 02	Analisis Pengaruh Komposisi Mineral Terhadap Kuat Tekan Batuan Pada Batuan Trakit di Desa Malauwe, Enrekang, Sulawesi Selatan  Dedy Kurniawan, Djameluddin, Nirmana F Qaidahiyan, dan Purwanto	9
KMB 03	Rancangan Geometri Peledakan Untuk Mencapai Target Fragmentasi Ideal Berdasarkan Nilai Blastability Index Pada Tambang Terbuka PT. Allied Indo Coal Jaya Kota Sawahlunto  Syarif Hidayattullah dan Bambang Heriyadi	17
KMB 04	Pengaruh Kadar Air Terhadap Kuat Tekan Uniaksial dan Indeks Kekerasan Schmidt Hammer pada Batuan Diorit  Riska Savitri, Purwanto, Djameluddin, dan Dedi Eka Wahyuwibowo	26
KMB 05	Block Punch Index (BPI) dan Point Load Index (PLI) Untuk Prediksi Uniaxial Compressive Strength (UCS)  Refky Adi Nata, Alfi Sabri, dan Widya Juniantari	33

---

KMB	06	Pengaruh Orientasi Urat Kalsit Terhadap Kuat Tekan Uniaksial Pada Batu Marmer	45
-----	----	---	----

Dedi Eka Wahyuwibowo, Purwanto, Djameluddin, dan Riska Savitri

KMB	07	Studi Hubungan Kuat Tekan Dan Derajat Pelapukan Batuan Andesit Pada Daerah Parangloe, Gowa	52
-----	----	--	----

Hendra Pachri, M. Aburizal B, dan Jamal Rauf Husain

KMB	08	Aspek Mineralogi Terhadap Kerentanan Tanah Longsor Pada Pelapukan Batuan Vulkanik di Kabupaten Bone Bolango, Provinsi Gorontalo	60
-----	----	---	----

Sufriadin, Purwanto, Muhammad Ikhsan Nasrullah, dan Afif Muslim

### **Rock Dynamics**

RD	01	Analisis Kestabilan Lereng Studi Kasus Kelongsoran Ruas Jalan Mandeh – Sungai Nyalo Kecamatan Koto XI Tarusan, Kabupaten Pesisir Selatan	66
----	----	--	----

Sahmijar dan Bambang Heriyadi

RD	02	Metode Pemberian Tekanan Peledakan dalam Simulasi Dinamik	74
----	----	---	----

Ganda M. Simangunsong dan Simon H. Prasetyo

### **Rekayasa Pertambangan**

RP	01	Rekayasa Geomekanika untuk Menunjang Keselamatan Kerja Kegiatan Optimasi Batubara B2SR Pit Inul East Panel 2B, PT Kaltim Prima Coal	83
----	----	---	----

Wahyu Asmoro Nursandi, Arif Drajat Hermawan, dan Didin Septiadin

RP	02	Strategi dan Verifikasi Pengolaan Lumpur Untuk Kestabilan In Pit Dump di PT.Berau Coal	98
----	----	--	----

Arif Mahendra, Christian Natanael Simamora, dan Ichsan Sebastian

---

---

**Underground Geotechnics**

- UG 01 Rock Quality Analysis Using Rmr And Q-System Methods For Determination Of Supporting Headrace Tunnel In Hydroelectric Power Plant Tana Toraja In South Sulawesi 106  
Abd.Rahim, Busthan Azikin, dan Ratna Husain
- UG 02 Simulasi Penyanggaan untuk Mencapai Kestabilan Terowongan pada Decline Cikoneng PT. Cibaliung Sumberdaya 116  
Annisa Hanim D. dan Bambang Heriyadi
- UG 03 Analisis Kestabilan Lubang Bukaan Pada Tambang Batubara Bawah Tanah Pt. Aicj Sawahlunto 121  
Bambang Heriyadi dan Raimon Kopa
- UG 04 The analysis of optimum stope stability in Avoca longhole stoping method- Case Study; Arinem Project PT ANTAM Tbk 130  
Okta C Situmorang, Ahmad Raymond T, Novi Ferry R.D, Anshori, dan Sri Nangkung Riva
- UG 05 Studi Numerik Dan Matematis Pada Pilar Batubara Dengan Metode Pendekatan Analisis Elastis 136  
Oktarian W. Lusantono, Barlian Dwinagara, dan Prasodo D. Prabandaru
- UG 06 Analisis Interaksi Double Tunnel dengan Finite Element Method: Pengaruh Posisi Terowongan dan Tahapan Penggalian 143  
Muhammad Rahman Yulianto dan Singgih Saptono
- UG 07 Desain Sistem Penyanggaan Terowongan Dengan Menggunakan Metode Empiris, Observasi, Dan Numerik 155  
Lusitania, Irwandy Arif, dan Simon Heru Prasetyo



---

---

### **Hidrogeologi**

- HG 01 Studi Pengaruh Keberadaan Lapisan Ignimbrite Terhadap Kestabilan Lereng Highwall Tambang Batubara 163

Jioni Santo Frans

- HG 02 Analisis Efek Rembesan Air Sungai Lawai terhadap Kestabilan Rencana Lereng pada Low Wall Tambang Air Laya Barat PT. Bukit Asam Tbk. 170

Triliani Utami dan Raimon Kopa

### **Pemodelan Numerik**

- PN 01 Analisis Pengaruh Ukuran Butir Batupasir Terhadap Kekuatan Jangka Panjang, Bukit Dlingo, Kabupaten Bantul D.I. Yogyakarta 178

Agustina E. Ridha dan Singgih Saptono

- PN 02 Perancangan Batas Penambangan dan Tahapan Penambangan Bijih Nikel Pada Blok Jessika PT. CNI Wolo Provinsi Sulawesi Tenggara 186

Sahrul dan Raksanjani

- PN 03 The calculation comparison of induced stress between numerical and analytical methods in a circular tunnel at certain depths 196

Paulus Perangin-angin dan Rio Nikher Kilikily

- PN 04 Visualisasi Penjalaran Retakan Pada Massa Batuan Terkekarkan: Metode Eksperimen vs Metode Numerik 201

Mohammad Suriyaidulman Rianse, Singgih Saptono, dan Sayahdin Alfat

- PN 05 Mesh Dependency Pada Perhitungan Faktor Keamanan Lereng Batuan Elastoplastis Sempurna Dan Strain Softening 208

Hanif Muslim Amari dan Ridho K. Wattimena



---

PN	06	Perbandingan tegangan tangensial dan konsentrasi tegangan antara metode numerik dan analitik pada empat bentuk terowongan yang berbeda	214
----	----	--	-----

Paulus Perangin-angin dan Rio Nikher Kilikily

**Impak terhadap Lingkungan dan Risk Assessment dalam Rekayasa Batuan**

IRA	01	Penyesuaian Metode Peledakan Berdasarkan Data Schmidt Hammer Test	219
-----	----	---	-----

D. Tebay, P. Siburian, R. Gautama, E. Widijanto

IRA	02	Metodologi Pengukuran Tingkat Risiko Kestabilan Lereng Tambang Terbuka	224
-----	----	--	-----

Masagus Ahmad Azizi, Irfan Marwanza, M Kemal Ghifari, Rizky A Dwialfawan, dan Afiat Anugrahadi

IRA	03	Analisis Stabilitas Lereng Tambang Terbuka Nikel Menggunakan Metode Probabilistik	232
-----	----	---	-----

Razak Karim dan Masagus Ahmad Azizi

**Peran Geomekanika dalam Mitigasi Bencana**

GMB	01	Empirical Approach of SSR Alarm Threshold Validation Based on Failure Back Analysis at Lowwall Area PT. Arutmin Indonesia Site Asam Asam	240
-----	----	--	-----

Azhary Rahim, Andreas F P, Endang Wawan, dan Muhamad Zainal Kahfi

GMB	02	Mitigasi Batu Runtuhan (Rock Fall) di Dinding Jalan Pit Boboka, Studi Kasus Tambang Nikel Tanjung Buli - PT ANTAM Tbk	251
-----	----	---	-----

Febri E. Prihastoa\*, Eko Adityab, Pherto Rimosc, Riva N. Thoriqd, Bronto Sutopoe, dan Ronal Affan

GMB	03	Kajian Mekanisme Longsoran Lereng Tanah Dengan Pengujian Laboratorium Serta Validasi Longsor Susulan Di Lapangan Berdasarkan Pendekatan Cracks Soil	257
-----	----	---	-----

Stephanus Aleksander dan Fahrul Indrajaya

---

GMB	04	Probabilistik Stabilitas Lereng High-Wall Tambang Batubara Pt. Abc Di Kabupaten Tapin Provinsi Kalimantan Selatan	269
			Iswandaru dan Prof. Dr. Ir. R. Febri Hirnawan

### **Site Investigation and Monitoring**

SIM	01	Aplikasi Radar (Synthetic Aperture Radar) Dalam Kegiatan Pemantauan Lereng Tambang	276
			Suryando Sagala, Muhammad Taufik Akbar, Danang Kurniawan, dan Mufrod Feriyanto
SIM	02	Evaluasi Pengaruh Struktur Geologi Terhadap Kestabilan Lereng Tambang Nikel Pulau Pakal-Pt Antam Tbk	285
			Emeralda Saentya, Nikita Rahma, Febri Estiadi Prihasto, Patar Marlundu, Tafia Sulistyani Prasojo, dan Pherto Rimos
SIM	03	Pengaruh Kualitas Massa Batuan Terhadap Deformasi Lereng Di Area Penambangan Fase 6 dan Fase 7 Pit Batu Hijau, PT Amman Mineral Nusa Tenggara	291
			Fariz A. Nefansa, Pantjanita N.Hartami, Bani Nugroho dan Fransiskus C. Kusnantaka
SIM	04	Analisis Kelongsoran Geoteknik In-Pit Waste Dump Menggunakan Back Analysis Di Tambang Batubara Pt. Marunda Grahaminerals (Sem Pit), Kalimantan Tengah	300
			Novandri Kusuma Wardana

### **Teknologi dalam Pertambangan dan Rekayasa Batuan**

TRB	01	Peran Audit Lereng dalam Meningkatkan Kestabilan Lereng Akhir Tambang	307
			F. Apriadi, M. Lalang, P. Siburian, R. Gautama, dan E. Widijanto
TRB	02	Analisis FEM pada Perkuatan Tanah Lunak Lignit menggunakan Metode DSM dan Geocell untuk Penimbunan Lapisan Tanah Penutup	314
			Vega Vergiagara dan Singgih Saptono

---

TRB	03	Tantangan Sementasi Pra-Kemajuan dan Evaluasi : Studi Kasus dari Proyek Terowongan Tujuh Bukit di Banyuwangi, Indonesia	323
-----	----	---	-----

Doandy Y. Wibisono, Okky C. Perdana, Gustus Tricahyo, Rhicuh Romandsyah, Lilik E. Saputro, Firman Zakaria, dan M. Hafid Rahadi

### **Special Rock Engineering Projects and Case Studies**

SRP	01	Pembuatan Lubang Bukaak Vertikal dengan Metode Shaft Sinking PTNHM	331
-----	----	--	-----

Abdi Wahyudi Samad

SRP	02	Pengaruh Metode Penggalian NATM Terhadap Kestabilan Terowongan Ganda Cilenyi-Sumedang-Dawuan Kabupaten Sumedang Provinsi Jawa Barat	337
-----	----	---	-----

Dika Pandu Atmaja dan Singgih Saptono

SRP	03	Analisa Pengaruh Gempa Palu Terhadap Kestabilan Lereng Tambang Nikel Tapunopaka-Pt Antam Tbk	344
-----	----	--	-----

Niki R. Rizkita, Tafia S. Prasajo, Febri E. Prihasto, Bronto Sutopo, Arnazt P. Adryanto, Pherto Rimos, dan Tri Hartono

SRP	04	Pengaruh Tinggi Genangan Air Pada Bottom Pit Terhadap Kestabilan Lereng Di Pit Everest Pomalaa Pt.Antam Tbk	351
-----	----	---	-----

Mutiara Andini, Pherto Rimos, Arif Hindarto, Aldino Yulianto, Bronto Sutopo, dan Tri Hartono

SRP	05	Analisis Kestabilan Terowongan Notog Menggunakan Metode Convergence-Confinement dan Diagram Kapasitas Penyangga	357
-----	----	---	-----

Simon H. Prassettyo, Ridho K. Wattimena, Made A. Rai, Budi Sulistianto, Ganda M. Simangunsong, Nuhindro Priagung Widodo, Yofi Okatrisza, dan Eko Septiyanto

## Studi Numerik dan Matematis Pada Pilar Batubara Dengan Metode Pendekatan Analisis Elastis

Oktarian W. Lusantono<sup>a\*</sup>, Barlian Dwinagara<sup>a</sup>, dan Prasodo D. Prabandaru<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta

<sup>b</sup>PT. Studio Mineral Batubara

\*[oktarian.lusantono@upnyk.ac.id](mailto:oktarian.lusantono@upnyk.ac.id)

### Abstrak

Stabilitas metode pertambangan bawah tanah batubara bergantung pada kestabilan pilar yang berinteraksi dengan lapisan disekelilingnya. Pada berbagai kasus, pilar dan lapisan disekeliling lubang bukaan tambang diasumsikan sebagai material elastis. Pada studi ini adopsi metode persamaan matematis sederhana dengan asumsi analogi pegas dan metode numerik dalam penentuan perpindahan total pada scenario bukaan tambang bawah tanah. Ada beberapa scenario dalam perbandingan kedua metode tersebut yaitu: (1) rasio lebar-tinggi pilar, (2) lebar *span*, (3) rasio modulus elastisitas, dan (4) kedalaman. Dari hasil analisis pada skenario rasio lebar-tinggi pilar, lebar *span*, dan kedalaman menunjukkan adanya perbedaan hasil perpindahan total dari kedua metode sebesar 0,06 – 16,9%. Sedangkan pada parameter rasio modulus elastisitas pilar dan material disekelilingnya, perbedaan kedua metode dapat mencapai 115%. Hasil penelitian ini menyatakan bahwa metode matematis sederhana dapat digunakan untuk perhitungan perpindahan total hanya pada kondisi-kondisi tertentu. Hal ini dapat membuka peluang dalam pengembangan metode matematis ini sebagai dasar untuk penelitian selanjutnya.

**Kata kunci:** Tambang bawah tanah, Pilar, Metode matematis, Metode numerik

### 1. Pendahuluan

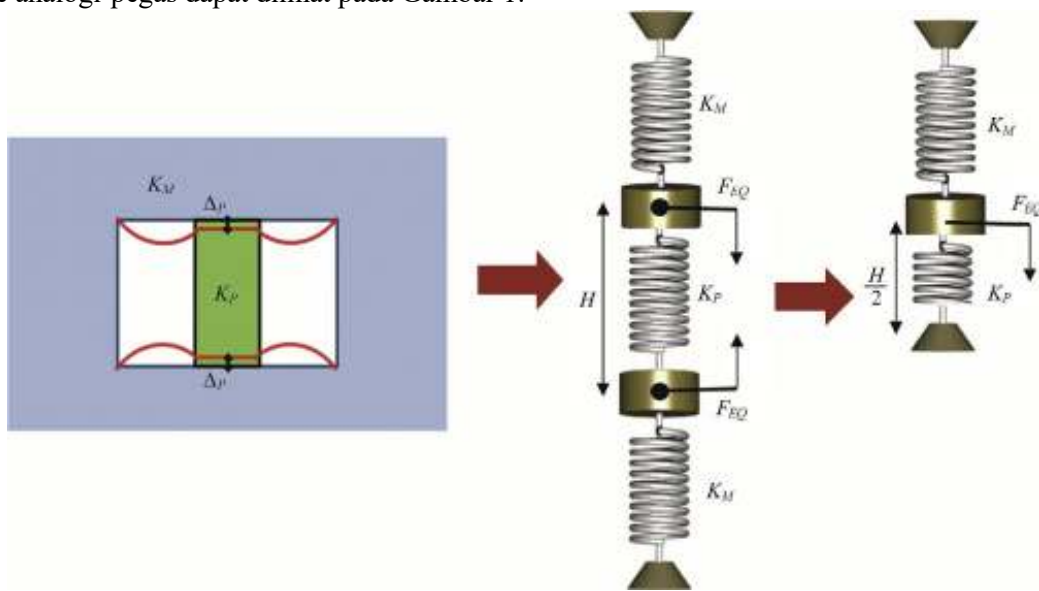
Pertambangan batubara masih merupakan komoditas utama pertambangan di Indonesia. Metode penambangan batubara di Indonesia saat ini didominasi dengan metode tambang terbuka (*surface mining methods*). Dalam perkembangannya, kondisi deposit batubara akan semakin dalam sehingga akan menjadikan perubahan yang signifikan dalam metode penambangan. Berdasarkan premis tersebut, metode penambangan batubara akan dapat berubah menjadi metode penambangan bawah tanah (*underground mining methods*).

Dalam perkembangan metode penambangan bawah tanah, stabilitas menjadi isu utama yang perlu diperhatikan untuk menjamin kondisi kerja yang aman. Salah satu metode untuk menjaga stabilitas adalah pilar. Kestabilan tambang batubara sangat dipengaruhi oleh integritas pilar terhadap lapisan-lapisan di sekelilingnya (Wagner, 1980). Sebagai simplifikasi, pilar dapat diasumsikan sebagai material elastis yang dapat menahan massa batuan disekelilingnya (Oravesz, 1977; Esterhuizen, Mark, & Murphy, 2010). Dalam studi ini, metode yang akan dianalisis adalah membandingkan metode perhitungan sederhana dengan asumsi analogi pegas (*spring-analogue*) dengan hasil dari pemodelan numerik menggunakan metode elemen hingga.

## 2. Metodologi

### 2.1. Teori

Metode analogi-pegas diinisiasi oleh Orasvesz (1977) dan terus dikembangkan sebagai penyerdehanaan pada berbagai aplikasi pilar (Wagner, 1980; van der Merwe, 2003; Galvin, 2015; Mitelman, Elmo, & Stead, 2018). Dalam metode ini pilar batubara dianggap sebagai suatu material elastis yang berfungsi sebagai penahan beban kekuatan massa batuan di sekeliling pilar tersebut. Dalam metode ini, ada beberapa asumsi dasar yang digunakan yaitu: (a) material disekiling pilar merupakan material homogen, (b) model persamaan dilakukan dan dikembangkan pada lapisan batubara (*seam*) horizontal, (c) material pilar dan massa batuan disekelilingnya dianggap material yang isotropis. Oleh karena itu, metode ini disebut sebagai fungsi harmonis sederhana (*single degree of freedom*). Ilustrasi mengenai gambaran pilar dengan metode analogi-pegas dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi Metode Analogi Pegas (Mitelman, Elmo, & Stead, 2018).

### 2.2. Persamaan Analogi-Pegas

Berdasarkan Gambar 1, asumsi sederhana untuk penggalian pada area kerja menggunakan model persegi akan dilakukan pada kedalaman  $D$  di bawah permukaan dimana material memiliki bobot isi  $\gamma$ . Oleh karena itu tekanan vertikal sebelum penambangan di bagian atas area kerja dinyatakan dalam:

$$P_0 = \gamma \times D \quad (1)$$

Metode ini juga menggunakan asumsi kondisi perbandingan tegangan (*stress ratio*) secara vertikal dan horizontal ( $k$ ) kurang dari 1. Sehingga gaya efektif yang bekerja di permukaan kerja adalah sebuah fungsi dari lebar permukaan kerja ( $L$ , *span*) dan lebar pilar ( $w_p$ ). Sehingga tekanan efektif ( $F_{eq}$ ) dapat dinyatakan dalam:

$$F_{eq} = \frac{L}{w} \times P_0 \quad (2)$$

Dalam penelitian ini, sebagai pembanding digunakan parameter deformasi baik dari pilar ( $K_p$ ) maupun dari lapisan batuan disekelilingnya ( $K_M$ ). Deformasi dalam suatu massa batuan dapat dihubungkan dengan modulus elastisitas (*Young's modulus*), dimana modulus elastisitas pillar dinyatakan dengan  $E_p$  dan

modulus elastisitas lapisan batuan disekeliling dinyatakan dengan  $E_m$ . Dengan menggunakan asumsi kondisi tegangan konstan maka deformasi tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$K = \frac{F_{eq}}{x} E \quad (3)$$

$$K = \frac{M}{L \times P_0} \times E \quad (4)$$

Dimana  $w$  adalah lebar pilar dan  $H$  adalah tinggi pilar. Berdasarkan Gambar 1, kondisi pilar adalah material elastis yang mengacu pada dua pegas secara seri. Oleh karena itu, persamaan deformasi dapat disederhanakan menjadi persamaan ideal dalam fungsi harmonis sederhana (*single degree of freedom*) sebagai berikut:

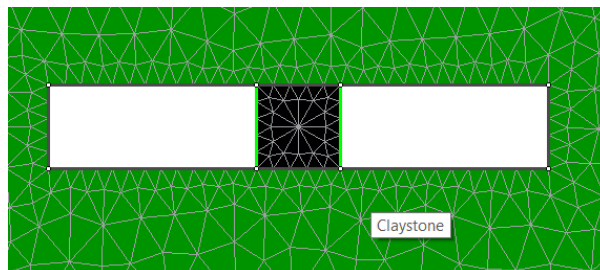
$$\Delta_P = \frac{F_{eq}}{(K_M + 2K_P)} \quad (5)$$

### 2.3. Pemodelan Numerik

Pemodelan numerik dilakukan dengan metode elemen hingga (*finite element methods*) menggunakan perangkat lunak Rocscience *Phase2 (RS2) ver. 8.005*. Pemodelan dilakukan secara dua dimensi (2D) sehingga menggunakan pendekatan *plane-strain*. Batas model (*model boundary*) dibuat sebesar 4 (empat) kali dari lebar span ( $L$ ). Pemodelan dilakukan dengan menggunakan beberapa variasi untuk mengidentifikasi pengaruh parameter seperti lebar span ( $L$ ), ratio lebar pilar dan tinggi pilar ( $w:h$ ), modulus elastisitas ( $E$ ), dan kedalaman (*depth*). Parameter seperti modulus elastisitas dibuat berdasarkan dari *database* pengujian laboratorium mekanika batuan di Laboratorium Mekanika Batuan UPN “Veterana” Yogyakarta dari sampel yang diambil dilapangan berdasarkan formasi geologi yang serupa. Parameter pemodelan dan ilustrasi gambar pemodelan dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 2.

Tabel 1. Parameter Pemodelan

<i>Parameter</i>	<i>Nilai</i>
Stress Ratio ( $H:V$ )	1:3
Kedalaman ( <i>depth</i> , m)	200, 250, 300, 350, 400, 450, 500
Lebar span ( $L$ , m)	24, 28, 32, 36, 40, 48
Lebar pilar ( $w_p$ , m)	4, 8, 12, 16, 20
Tinggi pilar ( $H$ , m)	4
Modulus elastisitas pilar ( $E_p$ , MPa)	500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000
Modulus elastisitas batuan sekeliling ( $E_m$ , MPa)	4000

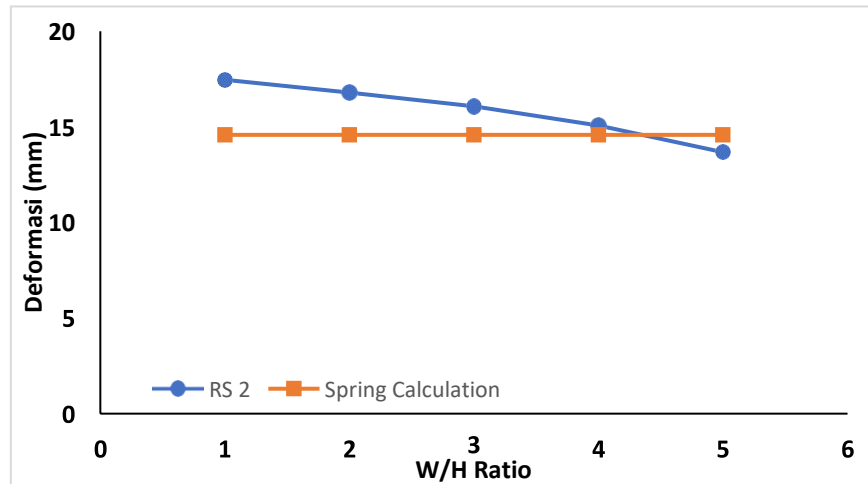


Gambar 2. Ilustrasi Pemodelan Numerik

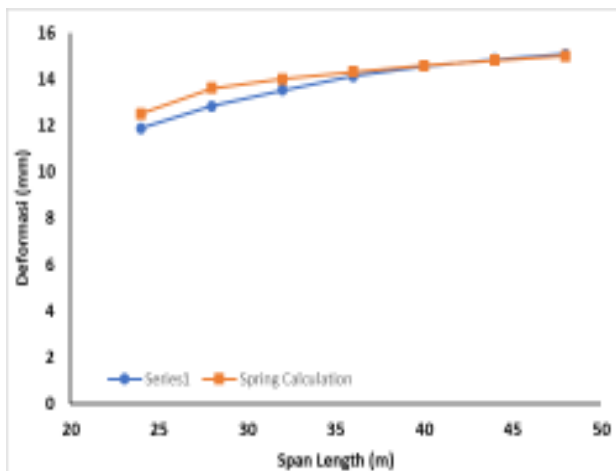
### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Hasil

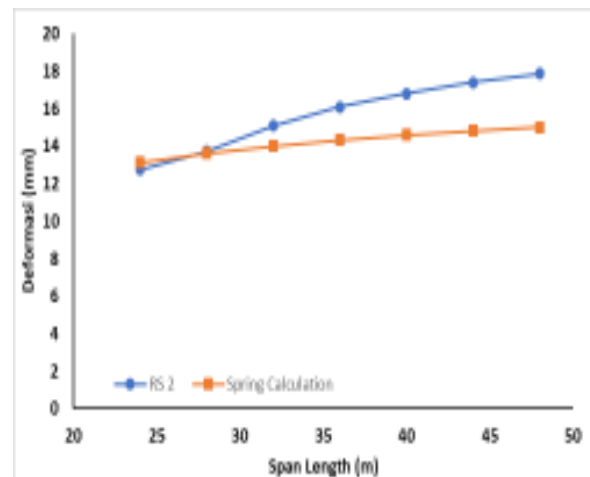
Perhitungan dengan metode analogi-pegas dan pemodelan numerik dilakukan pada berbagai macam kondisi yaitu: (1) Rasio W:H 1 – 5 dengan lebar span 40 m, (2) Variasi lebar span 24 – 48 pada rasio W:H 1 dan 2, (3) Rasio modulus elastisitas ( $E_m : E_p$ ) 0,8 – 1 pada rasio W:H 1 dan 2, dan (4) Kedalaman 200 – 500 m pada rasio W:H 1 dan 2. Hasil perbandingan dinyatakan dalam grafik seperti pada gambar Gambar 3, Gambar 4, Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Hasil Kondisi 1



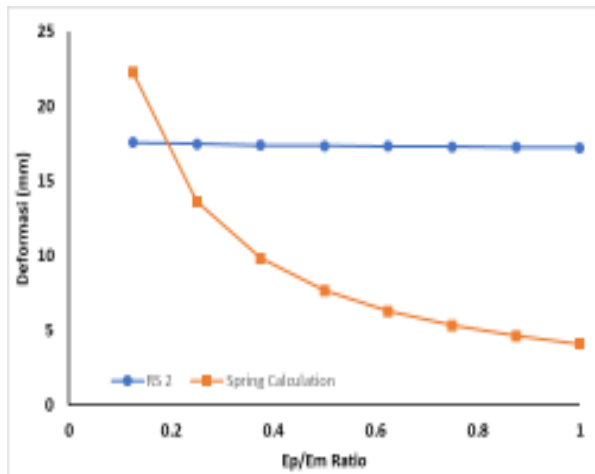
(a) Rasio W:H 1



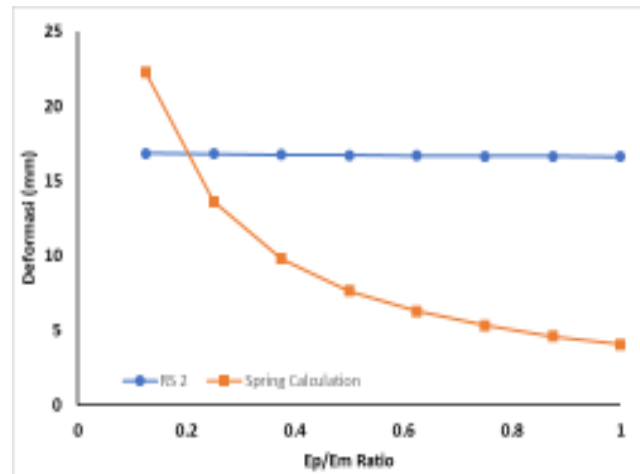
(b) Rasio W:H 2

Gambar 4. Grafik Perbandingan Hasil Kondisi 2



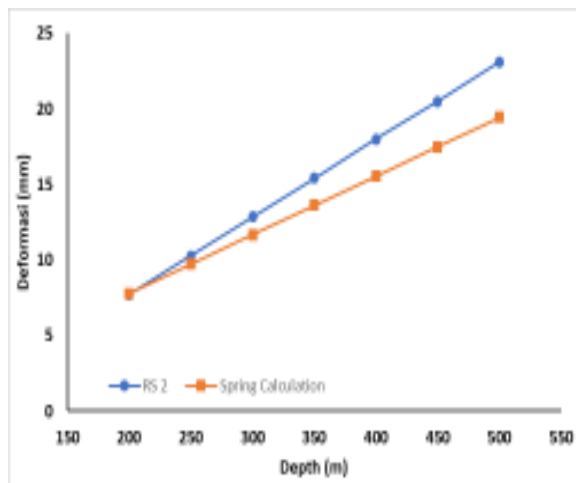


(a) Rasio W:H 1

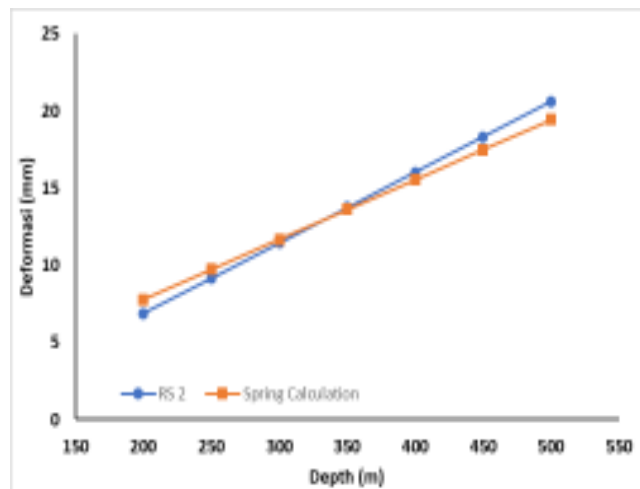


(b) Rasio W:H 2

Gambar 5. Grafik Hasil Perbandingan Kondisi 3



(a) Rasio W:H 1



(b) Rasio W:H 2

Gambar 6. Grafik Hasil Perbandingan Kondisi 4



### 3.2 Pembahasan

Pada kondisi 1, hasil perhitungan menggunakan pendekatan analogi-pegas menghasilkan nilai yang relatif konstan pada setiap rasio W:H. Sedangkan dari hasil pemodelan numerik, besarnya deformasi mengalami penurunan seiring dengan besarnya rasio W:H. Sehingga hasil perbandingan kedua metode, dinyatakan memiliki perbedaan sekitar 6 – 16%. Hal ini terjadi karena penyederhanaan persamaan dalam metode analogi-pegas terkait dengan tegangan efektif yang merupakan fungsi dari lebar span dan lebar pillar.

Pada kondisi 2, hasil perhitungan menggunakan pendekatan analogi-pegas dan pemodelan numerik memiliki *trend* yang relatif sama pada rasio W:H 1. Hasil tersebut mencapai titik pertemuan pada nilai span 40 m. Kedua metode tersebut tidak memiliki perbedaan yang signifikan (0,1 – 6,1%). Pada rasio W:H 2, perbandingan kedua metode memiliki *trend* yang berbeda. Dimana *trend* pada hasil perhitungan analogi-pegas relatif datar, sedangkan dari hasil pemodelan numerik memiliki penunjaman yang tinggi. Perbedaan dari kedua metode pada rasio W:H 2 berkisar antara 0,9 – 15,97%.

Pada kondisi 3 baik pada rasio W:H 1 dan W:H 2, hasil perhitungan menggunakan pendekatan analogi-pegas mengalami perubahan *trend* secara eksponensial. Hal ini dimungkinkan karena penggunaan penyederhanaan persamaan (3) – (5) secara linear. Perbedaan hasil perbandingan kedua metode pada rasio W:H 1 sebesar 22,05 – 76,31%. Sedangkan pada rasio W:H 2 perbedaannya berkisar antara 82,84 – 115,45%.

Pada kondisi 4, hasil perhitungan menggunakan pendekatan analogi-pegas dan pemodelan numerik memiliki *trend* yang relatif sama. Pada rasio W:H 1, kedua metode memiliki perbedaan sebesar 0,06 – 3,69% seiring dengan bertambahnya parameter kedalaman. Pada rasio W:H 2, kedua metode memiliki perbedaan sebesar 0,13 – 1,17%, dengan hasil yang relatif sama.

### 4. Kesimpulan

Dari hasil perbandingan diatas dapat disimpulkan bahwa metode analogi pegas memiliki kemampuan untuk memprediksi deformasi pilar secara terbatas. Dengan menggunakan pendekatan material elastis, metode tersebut hanya mampu melakukan perhitungan pada kondisi-kondisi tertentu seperti perbedaan lebar span, perbedaan rasio W:H, dan perbedaan kedalaman. Penentuan pendekatan tersebut berdasarkan nilai perbedaan hasil perbandingan kedua metode. Pada penelitian ini perbedaan di bawah 20% masih dianggap sebagai kriteria yang diijinkan. Oleh karena itu, penggunaan metode analogi-pegas dalam kondisi praktis harus dapat memperhatikan keterbatasan-keterbatasan tersebut.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis utama dalam penelitian ini mengucapkan terima kasih kepada PT. Studio Mineral Batubara atas penggunaan lisensi perangkat lunak Phase2 *ver. 8.005* dengan nomor lisensi 6557A yang digunakan dalam penelitian ini.

### Referensi

- Bertuzzi, R., Douglas, K., & Mostyn, G. (2016). An Approach to Model the Strength of Coal Pillars. *International of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 89, 165-175.
- Brady, B. H., & Brown, E. T. (2005). *Rock Mechanics for Underground Mining* (3rd ed.). Dodrecht: Springer.
- Esterhuizen, E., Mark, C., & Murphy, M. M. (2010). The Ground Response Curve, Pillar Loading and Pillar Failure in Coal Mines. *Proceedings of the 29th international conference on ground control in mining* (pp. 19-27). Morgantown: ICGCM.
- Galvin, J. M. (2015). *Ground Engineering - Principles and Practices for Underground Coal Mining*. Manly: Springer.
- Jawed, M., Sinha, R. K., & Sengupta, S. (2013). Chronological development in coal pillar design bord and



- pillar workings: A critical appraisal. *Journal of Geology and Mining Research*, 5(1), 1-11.
- Mitelman, A., Elmo, D., & Stead, D. (2018). Development of spring analogue approach for the study of pillars. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28, 267-274.
- Oravesz, K. I. (1977). Analogue Modelling of Stresses and Displacement in Bord and Pillar Workings of Coal Mines. *International Journal of Rock Mechanic Mining Science & Geomechanics*, 14, 7-23.
- Salamon, M. D. (1970). Stability, Instability and Design of Pillar Workings. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 7, 613-631.
- Unlu, T. (2001). Critical Dimension Concept in Pillar Stability. *17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey* (pp. 341-347). IMCET.
- van der Merwe, J. N. (2003). New pillar strength formula for South African Coal. *The Journal of South African Mining and Metallurgy*, 281-292.
- Wagner, H. (1980). Pillar design in coal mines. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 37-45.