

EFEK PERBANDINGAN TINGGI DAN DIAMETER TERHADAP KEKUATAN PILAR PADA PENGUJIAN KUAT TEKAN UNIAKSIAL DAN PEMODELAN NUMERIK

The Effect of Height and Diameter Ratio on the Strength of Pillars in Uniaxial Compressive Strength Testing and Numerical Modeling

LA ODE DZAKIR

Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Sembilanbelas November Kolaka
Perumahan Dosen USN, Anaiwoi, Kecamatan Tanggetada, Kabupaten Kolaka, Sulawesi Tenggara
Korespondensi e-mail: laodedzakir@usn.ac.id

ABSTRAK

Pilar merupakan bagian dari endapan bahan galian yang ditinggalkan (tidak ditambang) untuk menyangga beban batuan yang ada di atasnya. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh rasio perbandingan tinggi dan diameter terhadap kekuatan pilar yang diperoleh dari pengujian kuat tekan uniaksial dan pemodelan numerik. Hasil pengujian laboratorium menunjukkan bahwa pilar dengan rasio H/D 1,5 tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kekuatan pilar, dibuktikan dengan kenaikan nilai kuat tekan uniaksial pilar yang hanya mencapai 1,83%. Sedangkan pilar dengan rasio H/D 1 memberikan pengaruh peningkatan kekuatan yang lebih signifikan, dibuktikan dengan nilai kuat tekan uniaksial pilar yang mencapai 32,99%. Simulasi pemodelan numerik menggunakan *software RS2 9.0* menunjukkan hal yang sama dengan hasil uji laboratorium, dibuktikan dengan nilai *strength factor* untuk pilar dengan rasio H/D 1,5, 2 dan 1 menunjukkan nilai ≤ 1 pada tekanan yang sama dengan hasil uji laboratorium. Karena itu, desain pilar yang tepat digunakan pada penambangan bawah tanah dengan metode *room and pillars* adalah pilar dengan rasio H/D = 1.

Kata kunci: pilar, rasio, peningkatan kekuatan, pemodelan numerik.

ABSTRACT

Pillar is a part of the deposition of excavated material that is left behind to sustain the rock weight above it. The aim of this study was to determine the effect of height and diameter ratio on the strength of the pillar obtained from uniaxial compressive strength testing and numerical modeling. Laboratory test results showed that pillars with a ratio of 1.5 H/D did not show an increase in strength of 1.83%, while pillars with a ratio of 1 H/D gave a more significant increase in strength, which was 32.99%. The numerical modeling simulation with RS2 9.0 software showed that the strength factor values for pillars with an H/D ratio of 1.5, 2 and 1 having values below 1 at the same pressure as laboratory test results. Therefore, the most appropriate pillar design used in underground mining using the room and pillars method was a pillar with a ratio of H/D = 1.

Keywords: pillar, ratio, increased strength, numerical modeling.

PENDAHULUAN

Cadangan batubara permukaan saat ini semakin sedikit akibat penambangan yang terus meningkat untuk memenuhi kebutuhan energi nasional maupun ekspor. Seiring dengan berjalannya waktu, penambangan dengan metode *surface mining* akan mulai ditinggalkan dan beralih ke bawah tanah. Salah satu metode penambangan bawah tanah yang biasa diaplikasikan untuk batubara yang relatif tebal dan datar adalah *room and pillars* (Dzakir, 2018; Rahman dan Heriyadi, 2019; Ramadani dkk., 2019). Sebagian batubara ditinggalkan sebagai pilar untuk penyangga bukaan tambang (Maleki, 2017; Nengsih dan Koppa, 2021; Sinha dan Walton, 2021; Wang dan Cai, 2021). Sebagai penyangga alami pada lubang bukaan bawah tanah, dibutuhkan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui desain pilar yang tepat agar kondisi lubang bukaan tetap stabil (Putra, Saptono dan Rosadi, 2015; Dzakir, 2018; Purwanto, 2020; Putri dan Pradani, 2020).

Beberapa penelitian mengenai kekuatan pilar telah dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu seperti penyemprotan pelapis pada dinding pilar untuk meningkatkan kekuatan pilar dengan pengujian laboratorium (Ozturk dan Guner, 2017), pemasangan cincin pada permukaan dinding pilar (Rai, 1981), pemasangan berbagai jenis perkuatan pada pilar kecil di laboratorium (Wojtkowiak, Rai dan Bonvallet, 1985) serta pemasangan *rock bolt* pada pilar (Ringwald dan Brawner, 1989; Dzakir, 2018; Dzakir, Rai dan Widodo, 2021; Jufrizal dan Kopa, 2021). Selain itu, telah dilakukan pula penelitian efek ukuran pilar terhadap kestabilan bukaan tambang (Greenwald, Howart dan Hartmann, 1941). Menurut Greenwald, Howart dan Hartmann (1941) kekuatan batuan pada uji laboratorium adalah ± 7 kali lebih besar dibandingkan dengan kekuatan batuan insitu (Van Heerden, 1975). Berdasarkan penelitian sebelumnya, maka perlu dilakukan penelitian pengaruh perbandingan tinggi dan diameter terhadap kekuatan pilar.

METODE

Penelitian ini diawali dengan melakukan studi literatur, kemudian dibuat sebuah hipotesis atau dugaan sementara terhadap hasil yang

akan diperoleh dari pengujian laboratorium dan permodelan numerik. Kegiatan pengujian dilakukan di laboratorium untuk memperoleh data primer berupa kuat tekan uniaksial (σ_c), modulus Young (E), nisbah Poisson (ν), kohesi (c) dan sudut gesek dalam (ϕ) dari material pilar yang digunakan dalam penelitian ini. Data tersebut dianalisis untuk melihat pengaruh rasio perbandingan tinggi dan diameter (H/D) terhadap peningkatan kekuatan pilar. Selain itu dilakukan pula pemodelan numerik dengan perangkat lunak RS2 9.0 untuk mencocokkan hasil pengujian laboratorium dengan pemodelan numerik.

Prosedur Percobaan

Pengujian dilakukan menggunakan sampel pilar berbentuk silinder yang terbuat dari campuran semen, pasir dan air dengan perbandingan volume 1:3:1,3. Sampel dibuat dengan tiga rasio perbandingan H/D (tinggi/diameter) yang berbeda, yaitu 2, 1,5 dan 1 seperti terlihat pada Gambar 1, 2 dan 3.



Gambar 1. Sampel dengan rasio H/D 2



Gambar 2. Sampel dengan rasio H/D 1,5



Gambar 3. Sampel dengan rasio H/D 1

Tabel 1. Dimensi sampel

Pilar (H/D)	Satuan	Diameter (D)	Tinggi (H)
2	mm	80	160
1,5	mm	80	120
1	mm	80	80

Prosedur percobaan yang dilakukan meliputi:

- 1) Pembuatan dan preparasi sampel
- 2) Pengujian sifat fisik material
- 3) Pengujian kuat tekan uniaksial
- 4) Pengujian triaksial

Pembuatan dan Preparasi Sampel

Sampel terdiri dari campuran semen, pasir dan air dengan perbandingan volume 1:3:1,3 (Dzakir, Rai dan Widodo, 2021). Campuran tersebut dimasukan ke dalam cetakan berbentuk silinder. Selanjutnya sampel dikeluarkan dari cetakan dan dikeringkan. Pengeringan dilakukan selama 28 hari karena beton akan mencapai kekuatan maksimal setelah dikeringkan selama 28 hari (Rai, Kramadibrata dan Wattimena, 2014). Setelah itu sampel dipotong sesuai dengan ukuran yang telah ditentukan sebelumnya (Rai, Kramadibrata dan Wattimena, 2014).

Selanjutnya dilakukan preparasi sampel dengan cara meratakan permukaan atas dan bawah sampel menggunakan ampelas. Untuk memastikan permukaan sampel yang telah rata adalah dengan cara meletakkan sampel pada permukaan yang datar, dan pada bagian permukaan atas sampel diukur menggunakan *waterpass*. Setelah permukaan atas dan bawah sampel rata, dilakukan pengukuran dimensi sampel menggunakan jangka sorong untuk

mendapatkan hasil pengukuran yang lebih teliti dan akurat. Dimensi yang diukur adalah diameter dan tinggi sampel.

Pengujian Sifat Fisik Material

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui sifat fisik material menggunakan timbangan, desikator dan oven. Timbangan berfungsi untuk menimbang berat dari masing-masing material pilar yang diuji dalam kondisi alami, kondisi jenuh, digantung dan dalam kondisi kering.

Desikator berfungsi untuk menjenuhkan material pilar yang akan diuji dengan cara sampel dimasukkan ke dalam tabung desikator yang berisi air, kemudian udara yang ada di dalam desikator dikeluarkan menggunakan pompa penghisap udara, hingga udara yang berada di dalam desikator benar-benar berkurang. Sampel tersebut didiamkan selama ± 24 jam agar kondisi sampel benar-benar dalam keadaan jenuh. Setelah ± 24 jam, sampel tersebut dikeluarkan dan dilakukan penimbangan dalam kondisi jenuh dan kondisi digantung dalam air (Rai, Kramadibrata dan Wattimena, 2014).

Sedangkan oven sendiri berfungsi untuk melakukan pengeringan sampel yang sebelumnya telah dijenuhkan. Pengeringan dilakukan selama ± 24 jam agar sampel benar-benar kering. Setelah ± 24 jam, barulah penimbangan sampel dalam kondisi kering dapat dilakukan.

Pengujian Kuat Tekan Uniaksial

Pengujian kuat tekan uniaksial dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari material yang diuji berupa kuat tekan *uniaxial* (σ_c), *modulus young* (E) dan nisbah *poisson* (ν). Pengujian ini dilakukan menggunakan mesin tekan (*compression machine*) dengan mengikuti standar *International Society Rock Mechanics* (ISRM, 1981) (Gambar 4).

Pengujian Triaksial

Pengujian triaksial dilakukan untuk memperoreh nilai kohesi (c) dan sudut gesek dalam (ϕ) (Rai, Kramadibrata dan Wattimena, 2014) (Gambar 5). Nilai-nilai tersebut merupakan bagian dari parameter kekuatan

pilar yang digunakan dalam penelitian ini (Rai, Kramadibrata dan Wattimena, 2014).



Gambar 4. Mesin tekan hidrolik servo-controlled Hung-Ta Seri HT-8391



Gambar 5. Kegiatan pengujian triaksial

Pengujian triaksial dilakukan dengan cara memberikan tekanan pemampatan (σ_3) dengan besar yang berbeda-beda pada tiga material pilar yang diuji (Rai, Kramadibrata dan Wattimena, 2014). Tekanan pemampatan (σ_3) diperoleh dari fluida bertekanan yang dimasukkan ke dalam sel triaksial yang di dalamnya berisi material pilar yang diuji (Rai, Kramadibrata dan Wattimena, 2014).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat Fisik Material

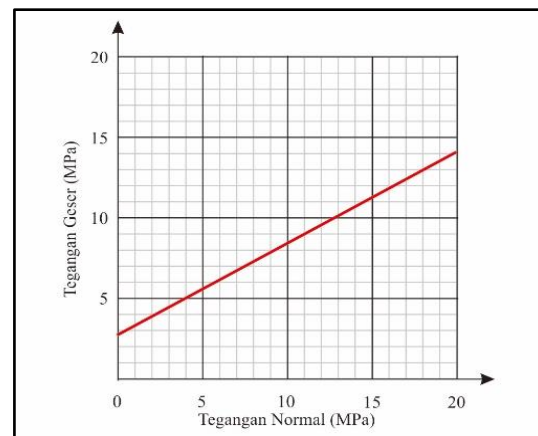
Hasil pengujian sifat fisik material disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Sifat fisik material sampel

Natural density (pn)	g/cm³	1,66
Dry density (pd)	g/cm³	1,58
Saturated density (ps)	g/cm³	1,92
Natural water content (W)	%	5,14
Degree of saturation (S)	%	24,48
Porosity (n)	%	33,35
Void Ratio (e)		-1,03

Kohesi dan Sudut Gesek Dalam

Berdasarkan hasil pengujian triaksial yang dilakukan di Laboratorium Geomekanika dan Peralatan Tambang Institut Teknologi Bandung, diperoleh nilai kohesi (c) sebesar 2,7 MPa dan sudut gesek dalam (ϕ) sebesar 29,6° seperti ditunjukkan pada Tabel 3 dan Gambar 6. Penelitian ini hanya menggunakan satu nilai kohesi (c) dan sudut gesek dalam (ϕ) saja. Hal ini karena material yang digunakan untuk ketiga jenis sampel pengujian tersebut (H/D 2, H/D 1,5 dan H/D 1) adalah sama.



Gambar 6. Kurva Mohr Coulomb (Ringwald dan Brawner, 1989; Das dan Sobhan, 2014) hasil pengujian sampel

Tabel 3. Nilai kohesi (c) dan sudut gesek dalam (ϕ) sampel dengan campuran semen, pasir dan air dengan perbandingan volume 1:3:1,3.

Pilar (Semen:Pasir:Air)	c (MPa)	ϕ (...°)
1:3:1,3	2,7	29,6

Peningkatan Kekuatan pada Sampel

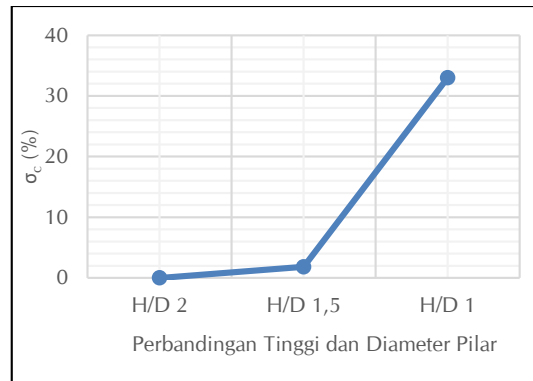
Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan uniaksial pada masing-masing sampel dengan rasio 2 (4 sampel); 1,5 (4 sampel) dan 1 (4 sampel) diperoleh bahwa sampel dengan rasio H/D 1 menunjukkan peningkatan kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel yang memiliki rasio H/D 2 dan 1,5 seperti ditunjukkan oleh hasil rata-rata nilai kuat tekan uniaksial pada Tabel 4.

Tabel 4. Rata-rata hasil uji kuat tekan uniaksial sampel

Pilar (H/D)	σ_c (MPa)	Kenaikan Kekuatan (%)	E (MPa)	μ
2	9,28	0	1950,89	0,21
1,5	9,45	1,83	2314,07	0,22
1	12,62	32,99	2402,39	0,25

Sampel dengan rasio H/D 1 menunjukkan peningkatan nilai kuat tekan lebih signifikan sebesar 12,62 MPa, dengan persentase kenaikan sebesar 32,99%. Sedangkan sampel dengan rasio H/D 1,5, hanya mengalami kenaikan sebesar 1,83% dari nilai kuat tekan uniaksial pilar dengan rasio H/D 2.

Grafik persentase peningkatan kuat tekan uniaksial pada Gambar 7 menunjukkan bahwa perubahan rasio H/D 2 ke H/D 1,5 tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada peningkatan nilai kuat tekan tekan uniaksial, yang ditunjukkan dengan garis yang cenderung datar.



Gambar 7. Grafik persentase peningkatan kuat tekan uniaksial sampel

Bentuk Pecahan Sampel

Sampel yang diuji dengan kuat tekan uniaksial menunjukkan bentuk pecahan yang khas, yaitu berbentuk kerucut. Hal ini disebabkan arah tegangan di dekat plat penekan baik di atas maupun di bawah tidak searah dengan gaya yang dibebankan pada sampel, karena ada pengaruh plat penekan dari mesin kuat tekan uniaksial yang menghimpit sampel tersebut. Karena itu bentuk pecahan tidak berbentuk bidang pecah yang searah dengan gaya melainkan berbentuk kerucut (Gambar 8, 9 dan 10).



Gambar 8. Sampel dengan rasio H/D 2



Gambar 9. Sampel dengan rasio H/D 1,5



Gambar 10. Sampel dengan rasio H/D 1

Pemodelan Numerik

Pemodelan numerik yang dilakukan dalam penelitian bertujuan untuk mencocokkan hasil pengujian fisik (laboratorium) dengan data yang diperoleh dari pemodelan numerik, bukan untuk membandingkan hasil pengujian laboratorium dengan kekuatan batuan pada kondisi insitu sebagaimana yang dikemukakan

oleh Greenwald, Howart dan Hartmann (1941). Salah satu cara yang biasa dilakukan adalah dengan melihat nilai *strength factor* yang diperoleh pada pemodelan numerik. Apabila sebagian besar elemen dari sampel menunjukkan angka ≤ 1 , maka sampel tersebut dinyatakan pecah atau *failure*.

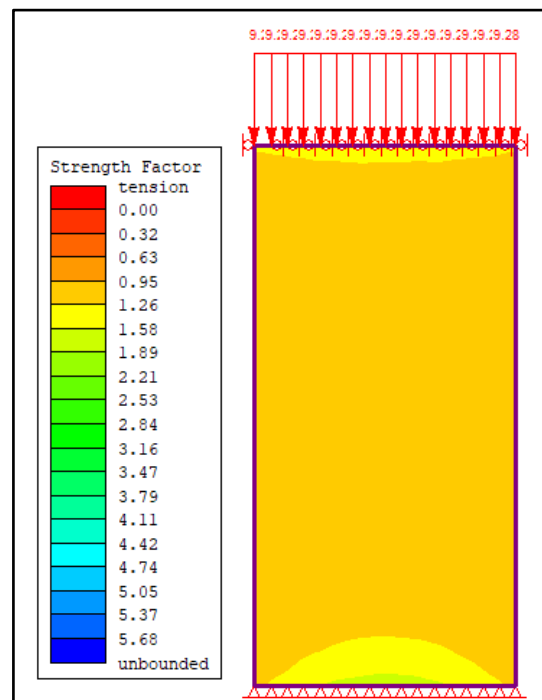
Dalam pemodelan ini digunakan parameter sebagai berikut:

1. Tipe analisis: regangan bidang
2. Tipe pemecahan masalah: eliminasi Gauss
3. Satuan: meter, tegangan dalam MPa

Hasil pemodelan numerik yang diperoleh dari masing-masing sampel dengan rasio H/D yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 11, 12 dan 13.

1. Sampel H/D 2

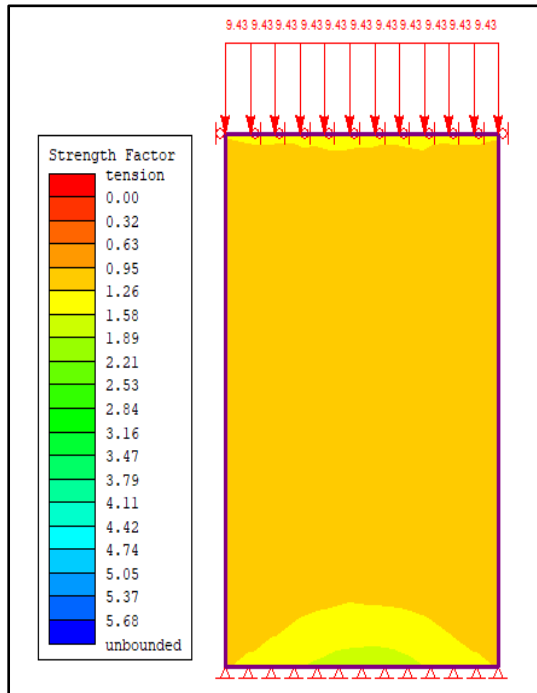
Hasil pemodelan numerik yang dilakukan pada sampel dengan rasio H/D 2 menunjukkan sampel pecah pada tegangan yang sama dengan tegangan yang diperoleh pada pengujian laboratorium, yaitu pada tegangan sebesar 9,28 MPa. Hal ini dibuktikan dengan nilai *strength factor* yang menunjukkan angka ≤ 1 pada sebagian besar elemen dari sampel.



Gambar 11. *Strength factor* sampel dengan rasio H/D 2 (H = 160 mm dan D = 80 mm)

2. Sampel H/D 1,5

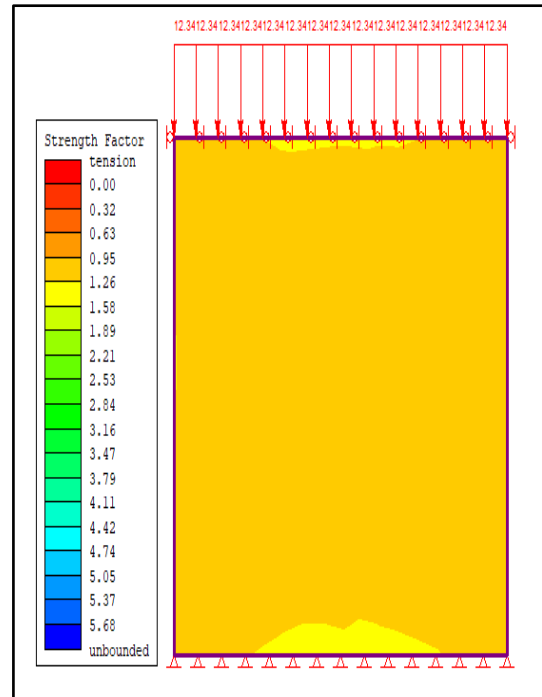
Hasil pemodelan numerik pada sampel dengan rasio H/D 2 menunjukkan sampel pecah pada tegangan 9,43 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa hasil pemodelan numerik dapat merepresentasikan pengujian laboratorium, karena hasil yang diperoleh dari pemodelan numerik mendekati hasil pengujian laboratorium.



Gambar 12. *Strength factor* sampel dengan H/D 1,5 (H = 120 mm dan D = 80 mm)

3. Sampel H/D 1

Sama seperti pada dua sampel sebelumnya, hasil pemodelan numerik pada sampel dengan rasio H/D 1, menunjukkan bahwa sampel pecah pada tegangan 12,34 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa hasil pemodelan numerik dapat merepresentasikan pengujian laboratorium, karena hasil yang diperoleh dari pemodelan numerik mendekati hasil pengujian laboratorium.



Gambar 13. *Strength factor* sampel dengan H/D 1 (H = 80 mm dan D = 80 mm)

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa desain pilar yang tepat digunakan pada penambangan bawah tanah dengan metode *room and pillars* adalah pilar dengan rasio H/D = 1.

Saran

1. Untuk melihat pengaruh perbandingan tinggi dan diameter terhadap pilar sebaiknya dilakukan penambahan kekar pada model pilar untuk melihat pengaruh dari kekar itu sendiri terhadap kekuatan pilar.
2. Perlu dilakukan pemodelan numerik dengan perangkat lunak tiga dimensi untuk melihat pengaruh perbandingan tinggi dan diameter pada pilar secara tiga dimensi.
3. Untuk penelitian selanjutnya sebaiknya dilakukan penguatan pada pilar agar terjadi peningkatan kekuatan pada pilar tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada teknisi Laboratorium Geomekanika dan Peralatan Tambang Institut Teknologi Bandung yang telah membantu penulis dalam melakukan kegiatan pengujian laboratorium sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Das, B.M. dan Sobhan, K. (2014) *Principles of geotechnical engineering*. 8th Ed. Stamford: Cengage Learning.
- Dzakir, L.O. (2018) *Analisis pengaruh sistem penguatan (rock bolt dan shotcrete) terhadap kekuatan pilar di tambang bawah tanah dengan pengujian model fisik di laboratorium*. Institut Teknologi Bandung.
- Dzakir, L.O., Rai, M.A. dan Widodo, N.P. (2021) "Analysis of reinforcement system (rock bolt and shotcrete) effect on the pillars strength in underground mining using physical models testing in laboratory," *Jurnal Geomine*, 9(1), hal. 73–87. Tersedia pada: <https://doi.org/10.33536/jg.v9i1.801>.
- Greenwald, H.P., Howart, H.C. dan Hartmann, I. (1941) *Progress report: experiments on strength of small pillars of coal in the Pittsburgh bed*. Amerika Serikat.
- Van Heerden, W.L. (1975) "In situ complete stress-strain characteristics of large coal specimens," *Journal of The Southern African of Mining and Metallurgy*, 75(8), hal. 207–217.
- ISRM (1981) *Rock Characterization Testing and Monitoring*, isrm.net. Diedit oleh E. Brown. Oxford: Pergamon Press.
- Jufrizal dan Kopa, R. (2021) "Analisis pengaruh penguatan rockbolt terhadap kekuatan pilar persegi di tambang bawah tanah dengan pengujian skala laboratorium," *Jurnal Bina Tambang*, 6(5), hal. 77–86.
- Maleki, H. (2017) "Coal pillar mechanics of violent failure in U.S. Mines," *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(3), hal. 387–392. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.03.001>.
- Nengsih, N. dan Koppa, R. (2021) "Analisa kestabilan lubang bukaan ditambang bawah tanah berdasarkan pengklasifikasikan geomekanika (RMR-System) pada penambangan galena di PT. Berkat Bhinneka Perkasa (BBP) Pangkalan Lima Puluh Kota, Sumatera Barat," *Jurnal Bina Tambang*, 6(3), hal. 159–165.
- Ozturk, H. dan Guner, D. (2017) "Failure analysis of thin spray-on liner coated rock cores," *Engineering Failure Analysis*, 79, hal. 25–33. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.03.024>.
- Purwanto (2020) "Peningkatan kestabilan pilar tambang bawah tanah marmer di PT Gunung Marmer Raya," *JURNAL TEPAT: Applied Technology Journal for Community Engagement and Services*, 3(1), hal. 27–38. Tersedia pada: https://doi.org/10.25042/jurnal_tepat.v3i1.79.
- Putra, F.A., Saptono, S. dan Rosadi, P.E. (2015) "Kajian geoteknik terhadap rancangan penambangan batubara bawah tanah metode shortwall di CV. Artha Pratama Jaya, Kecamatan Muara Jawa, Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur," *Jurnal Teknologi Pertambangan*, 1(1), hal. 37–45.
- Putri, R.H.K. dan Pradani, D.I. (2020) "Penentuan desain chain pillar pada tambang batubara shortwall mining," *Indonesian Mining Professionals Journal*, 2(1), hal. 43–50. Tersedia pada: <https://doi.org/10.36986/impj.v2i1.21>.
- Rahman, A. dan Heriyadi, B. (2019) "Analisis kestabilan lubang bukaan dan pillar saat proses mining blok development pada penambangan bawah tanah metoda room and pillar PT. Allied Indo Coal (AIC) Jaya," *Jurnal Bina Tambang*, 4(1), hal. 333–343.
- Rai, M.A., Kramadibrata, S. dan Wattimena, R.K. (2014) *Mekanika batuan*. Diedit oleh R.-R. Sundari. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Ramadani, R.N., Iswandar, Wattimena, R.K. dan Rai, M.A. (2019) "Studi pengaruh bentuk dan kemiringan permukaan pilar terhadap kekuatan dan faktor keamanan pilar," *Promine Journal*, 7(1), hal. 08–14.
- Ringwald, J.P. dan Brawner, C.O. (1989) "Reinforcing concrete model pillars with grouted rock bolts," *Mining Science and Technology*, 8(1), hal. 31–47. Tersedia pada: [https://doi.org/10.1016/S0167-9031\(89\)90891-8](https://doi.org/10.1016/S0167-9031(89)90891-8).
- Sinha, S. dan Walton, G. (2021) "Investigation of pillar damage mechanisms and rock-support interaction using Bonded Block Models," *International Journal of Rock Mechanics and*

- Mining Sciences*, 138, hal. 104652. Tersedia pada:
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104652>.
- Wang, M. dan Cai, M. (2021) "Numerical modeling of time-dependent spalling of rock pillars," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 141, hal. 104725. Tersedia pada:
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104725>.
- Wojtkowiak, F., Rai, M.A. dan Bonvallet, J. (1985) "Études expérimentales en laboratoire de différentes méthodes de renforcement des petits piliers de mine," *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 32(1), hal. 131–138. Tersedia pada:
<https://doi.org/10.1007/BF02594776>.

