

PENENTUAN TEGANGAN TERINDUKSI DAN PENILAIAN RISIKO KERUNTUHAN ATAP PADA TAMBANG BATUBARA BAWAH TANAH METODE *ROOM AND PILLAR*

Sari Melati

*Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat
sarimelati.22112006@gmail.com*

ABSTRACT

Coal mining operations are performed continuously to supply energy resources. Up to now, surface coal mining system is preferred because it is easier and lower cost than underground coal mining system. It will be uneconomic after reach the certain depth. In consequence of that fact, underground mining system will be needed for mining the deeper coal reserves absolutely.

Room and pillar method has being applied widely. In this method, roof fall were occurred when coal pillar unable to provide support the stress due to the load of overlying strata. Therefore, the estimation of induced stress effected by underground coal mine openings and the assesment of roof fall risk are very important in order to avoid injuries on miners, equipment breakdowns, stoppages in mining operations, and inefficient recovery of coal reserves.

This paper shows literature study toward recently researchs about induced stress and roof fall risk in underground coal mining. Underground miners, especially rock mechanic engineers, can figure out of the challenges and opportunities in strive for room and pillar underground coal mining stability by studying of methodology and result of these researchs.

Keywords: *coal mine, induced stress, roof fall risk, room and pillar, underground mining*

ABSTRAK

Operasi produksi batubara terus dilakukan dalam rangka memenuhi kebutuhan sumber energi. Sampai saat ini, sebagian besar tambang batubara menerapkan sistem tambang terbuka karena lebih mudah dan murah dibandingkan tambang bawah tanah. Sistem tambang terbuka menjadi tidak ekonomis lagi untuk diterapkan setelah mencapai batas kedalaman tertentu sehingga untuk menambang batubara yang lebih dalam perlu diterapkan sistem tambang bawah tanah.

Salah satu metode tambang batubara bawah yang umum digunakan adalah *room and pillar*. Pada metode *room and pillar*, keruntuhan atap terjadi ketika pilar batubara tidak mampu menahan tegangan dari beban batuan di atasnya (*overburden*). Oleh karena itu perubahan kondisi tegangan akibat penggalian tambang batubara bawah tanah dan risiko keruntuhan atap sangat penting untuk diestimasi dan dinilai dalam rangka menjaga keselamatan pekerja tambang, menghindari kerusakan pada peralatan tambang, dan mencegah tercampurnya batubara dengan material pengotor dari *overburden*.

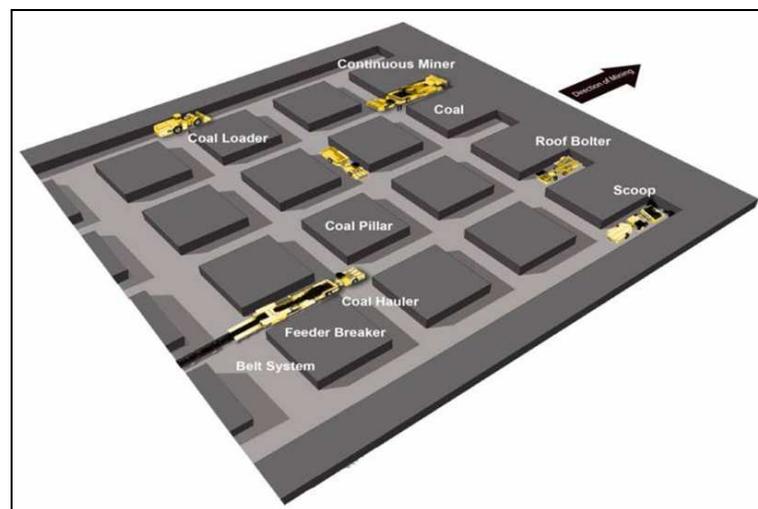
Tulisan ini merupakan hasil studi literatur terhadap penelitian terkini mengenai tegangan terinduksi dan risiko keruntuhan atap pada tambang batubara bawah tanah. Penelaahan terhadap metode dan hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran bagi para praktisi tambang bawah tanah, khususnya *engineer* mekanika batuan, bagaimana tantangan dan peluang yang harus dihadapi dalam mengupayakan kestabilan tambang batubara bawah tanah *room and pillar* di lokasi tambang yang baru.

Kata Kunci : risiko keruntuhan atap, *room and pillar*, tambang batubara, tambang bawah tanah, tegangan terinduksi

PENDAHULUAN

Operasi produksi batubara terus dilakukan dalam rangka memenuhi kebutuhan sumber energi. Sampai saat ini, sebagian besar tambang batubara menerapkan sistem tambang terbuka karena lebih mudah dan murah dibandingkan tambang bawah tanah. Sistem tambang terbuka menjadi tidak ekonomis lagi untuk diterapkan setelah mencapai batas kedalaman tertentu sehingga untuk menambang batubara yang lebih dalam perlu diterapkan sistem tambang bawah tanah.

Salah satu metode tambang batubara bawah yang umum digunakan adalah *room and pillar*. Sesuai nama metodenya, penambangan cadangan batubara dilakukan dengan menyisakan pilar-pilar (lihat Gambar 1.) untuk mencegah keruntuhan atap dan subsidens (penurunan permukaan tanah). Pengembangan metode ini yaitu dengan melakukan penambangan sebagian pilar batubara pada area yang sudah selesai ditambang dengan arah kemajuan sebaliknya, disebut dengan istilah *retreat mining*. Penerapan metode ini memberikan tingkat perolehan batubara yang lebih tinggi, namun dapat menyebabkan subsidens. Kelebihan metode *room and pillar* yaitu : fleksibel untuk menambang bentuk geometri endapan yang rumit, biaya investasi untuk peralatan terbilang murah, dan memungkinkan banyak area kerja aktif di waktu bersamaan sehingga kemajuan tambang bisa lebih cepat. Keterbatasannya antara lain : hanya cocok untuk kemiringan endapan terbatas (maksimal 12° , biasanya sampai 8°), membutuhkan kondisi atap dan lantai yang baik, dan laju produksi relatif rendah jika dibandingkan dengan metode penambangan batubara longwall (Paschedag, 2016).



Gambar 1. Ilustrasi Metode Penambangan Bawah Tanah *Room and Pillar*

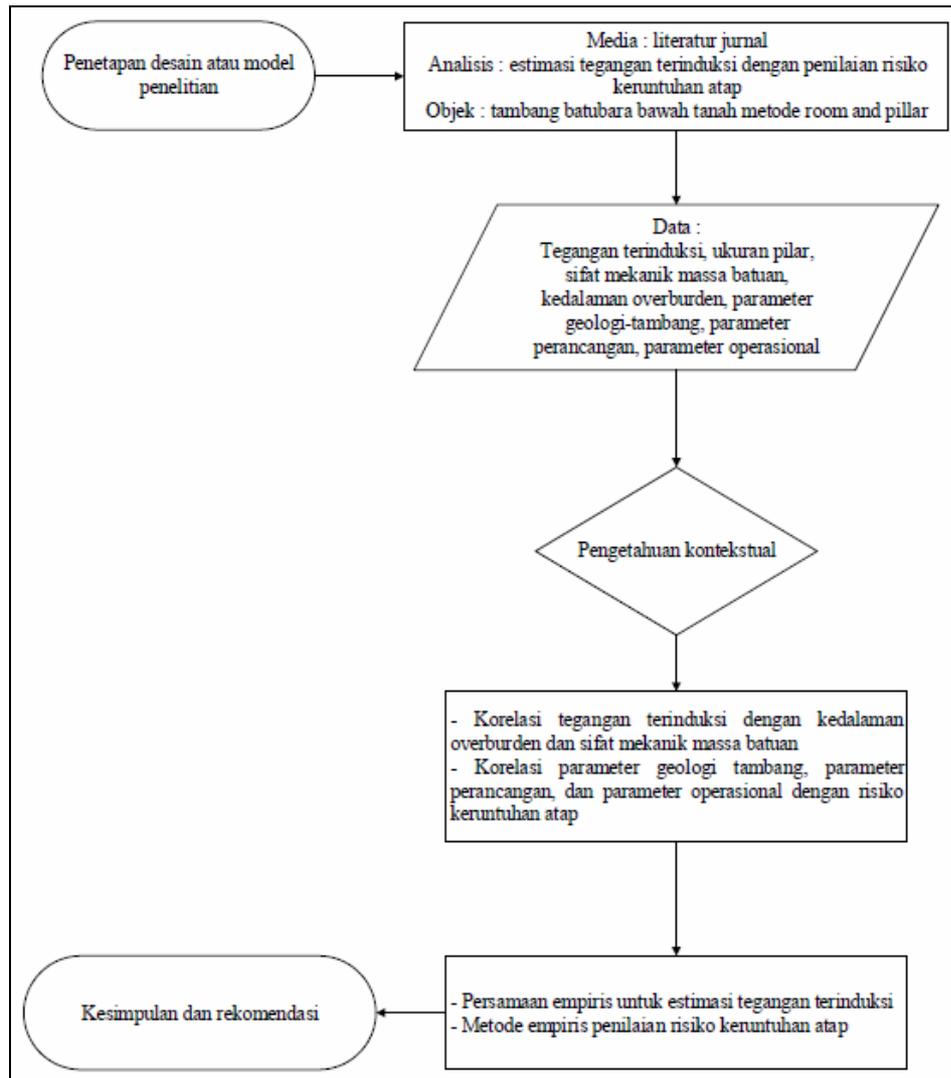
Pada metode *room and pillar*, keruntuhan atap terjadi ketika pilar batubara tidak mampu menahan tegangan dari beban *overburden*. Oleh karena itu perubahan kondisi tegangan akibat penggalian tambang batubara bawah tanah dan risiko keruntuhan atap sangat penting untuk diestimasi dan dinilai dalam rangka menjaga keselamatan pekerja tambang, menghindari kerusakan pada peralatan tambang, dan mencegah tercampurnya batubara dengan material pengotor dari *overburden*.

Pendekatan teoritis untuk menentukan perubahan tegangan akibat penggalian tambang bawah tanah telah lama diusulkan dan digunakan secara luas dalam merancang ukuran pilar batubara. Di antaranya, tegangan terinduksi berdasarkan kondisi tegangan insitu (Sheorey, 1994) atau tegangan yang harus ditahan pilar batubara yang dihitung dari densitas dan kedalaman batuan di atas lapisan batubara (Pariseau, 1982). Akan tetapi pendekatan teoritis ini hanya berlaku pada batuan yang homogen dan linier-isotrop. Sedangkan massa batuan, apalagi batuan sedimen, bersifat heterogen dan unlinier-anisotrop. Selain itu, di dekat permukaan bumi, perbandingan nilai tegangan horizontal dan tegangan vertikal lebih bervariasi dibandingkan di dalam permukaan bumi. Sehingga pendekatan berdasarkan data empiris dari hasil pengukuran tegangan terinduksi di lapangan sangat diperlukan sebagai pembanding yang lebih relevan. Berbagai penelitian untuk memprediksi keruntuhan atap juga telah dilakukan secara luas, di antaranya oleh Molinda dkk (2000) yang menjelaskan aturan penurunan kualitas batuan secara geologi terhadap terjadinya keruntuhan atap dan Duzgun dan Einstein (2004) yang mengusulkan metodologi analisis risiko dan pengambilan keputusan untuk menilai dan manajemen risiko keruntuhan atap pada tambang batubara bawah tanah. Penelitian-penelitian tersebut dilakukan di sejumlah lokasi tambang dan memerlukan waktu yang cukup lama sehingga perlu disusun metodologi semikuantitatif untuk menilai risiko keruntuhan atap dengan mempertimbangkan parameter-parameter yang mempengaruhinya berdasarkan hasil penelitian terdahulu.

Hasil penelitian yang ditelaah dalam paper ini bertujuan untuk memperoleh persamaan matematis yang dapat digunakan untuk mengestimasi nilai tegangan terinduksi dan memberikan metode praktis dalam menilai risiko keruntuhan atap sebagai acuan dalam memberikan rekomendasi teknis pada penambangan menggunakan metode *room and pillar* sub-metode *retreat mining*.

METODE PENELITIAN

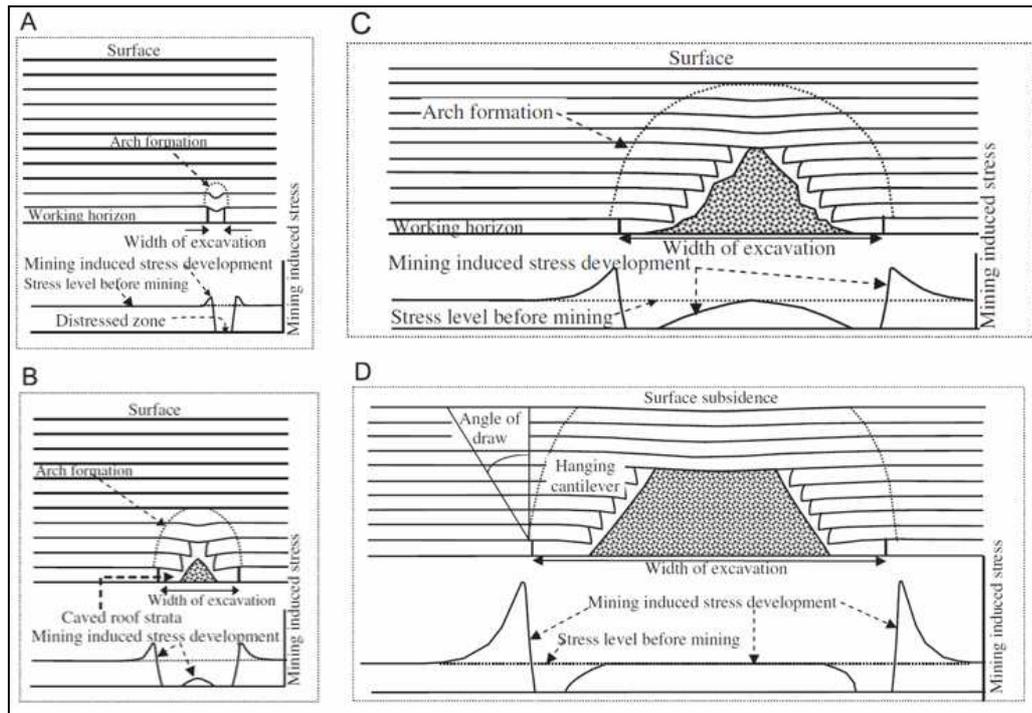
Tulisan ini merupakan hasil penelitian literatur. Sumber literatur yang digunakan literatur primer berupa jurnal-jurnal yang memenuhi 3 kriteria dalam pedoman pemilihan sumber untuk penelitian literatur, yaitu : relevansi, kemutakhiran dan adekuasi. Relevansi dijamin dari pemilihan jurnal yang sesuai bidang mekanika batuan, yakni *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, yang terbit dalam 10 tahun terakhir untuk memastikan kemutakhirannya. Adekuasi merupakan keterkaitan permasalahan yang dibahas dalam jurnal dengan masalah yang sedang diteliti sehingga jurnal yang dipilih hanya jurnal yang membahas tentang estimasi tegangan terinduksi dan penilaian risiko keruntuhan atap pada metode penambangan batubara bawah tanah *room and pillar*. Jenis analisis yang diterapkan ialah penelitian analisis isi. Gambar 2. menggambarkan tahapan langkah-langkah strategis yang diambil dalam melakukan penelitian literatur jenis analisis isi untuk judul ini.



Gambar 2. Diagram Penelitian Penentuan Tegangan Terinduksi dan Penilaian Risiko Keruntuhan Atap pada Tambang Batubara Bawah Tanah Metode *Room and Pillar*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Keseimbangan kondisi tegangan alami di sekitar lapisan batubara terganggu oleh lubang bukaan untuk penggalian tambang bawah tanah di sebagian lapisan batubara (*seam*). Beban lapisan batuan *overburden* yang semula ditanggung oleh batubara, berpindah dari bagian tengah atap ke sekitar pilar. Penambahan luas bukaan tambang umumnya meningkatkan nilai tegangan terinduksi dan jangkauan daerah pengaruhnya di sekitar pilar hingga dapat menjatuhkan lapisan batuan di atasnya. Sebelum runtuh, sejumlah beban *overburden* yang terpindahkan akibat bukaan tambang nilainya terutama tergantung pada luas dan kedalaman batuan di atas *seam*. Pada umumnya, batuan di sekitar pilar mengalami sejumlah tegangan terinduksi maksimum sebelum terjadi keruntuhan atap. Gambar 3. menunjukkan pengaruh perubahan tegangan terinduksi vertikal terhadap mekanisme keruntuhan atap dan subsidens.



Gambar3. Model Konseptual Tegangan Vertikal Terinduksi pada Luas Bukaian Tambang Batubara Bawah Tanah yang Berbeda Menurut Singh dkk (2011) : (A) Bukaian Tambang Sempit tanpa Keruntuhan Atap, (B) Bukaian Tambang Luas Menyebabkan Keruntuhan Atap, (C) Bukaian Tambang yang Lebih Luas Menyebabkan Semakin Banyak *Overburden* di Atap yang Jatuh, Namun Tanpa Subsidence di Permukaan Tanah, (D) Bukaian Tambang yang Sangat Luas di Bawah Tanah Memicu Terjadinya Subsidence di Permukaan Tanah.

Singh dkk (2011) menentukan tegangan terinduksi di atas pilar batubara berdasarkan data yang diambil dari 17 lokasi tambang batubara bawah tanah di India. Persamaan untuk memperkirakan tegangan terinduksi (S_u) di atas pilar batubara dari hasil penelitian sebelumnya yang telah dilakukan pada tahun 1996 divalidasi dengan hasil pengukuran tegangan terinduksi di lapangan. Tegangan terinduksi merupakan fungsi dari kedalaman *overburden* di atas pilar (H) dan karakteristik mekaniknya yang dinyatakan dengan *caveability index* (I).

$$S_u = 0.0033I + 0.059H - 9.85 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$I = \frac{\sigma^n t^{0.5}}{5} \quad (2)$$

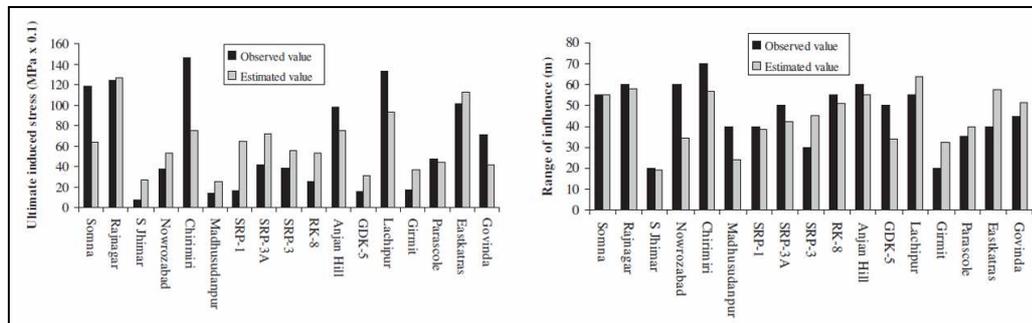
σ merupakan kuat tekan uniaksial dalam kg/cm^2 , l adalah rata-rata panjang core dalam cm, t adalah ketebalan batuan kuat dalam m. Faktor n memiliki nilai 1.2 untuk batuan masif dengan rata-rata *Rock Quality Designation*(RQD) 80% atau lebih, jika kurang dari itu nilai $n = 1$. Sedangkan rentang pengaruh (R) perubahan tegangan akibat penggalan di sekitar pilar diestimasi menggunakan persamaan :

$$R = 0.106I + 0.1H - 12.45 \text{ m} \quad (3)$$

Dari data hasil pengukuran, dibuat model matematika (persamaan 4 dan persamaan 5) yang lebih tepat untuk memprediksi tegangan terinduksi pada kedalaman *overburden* $H < 200$ m. Gambar 4 menunjukkan bahwa estimasi tegangan terinduksi menggunakan persamaan ini cukup mendekati nilai tegangan terinduksi sebenarnya.

$$S_u = 0.025I + 8.646 \times 10^{-4} H^{0.5} \text{ MPa (untuk } H < 200 \text{ m)} \quad (4)$$

$$R = 0.16H + 9.63 \times 10^{-3} I \text{ m (untuk } H < 200 \text{ m)} \quad (5)$$



Gambar 4. Perbandingan Nilai Hasil Estimasi dan Hasil Pengukuran :
 (Kiri) Tegangan Terinduksi, (Kanan) Jarak Pengaruh

Estimasi nilai tegangan terinduksi sangat diperlukan dalam merancang ukuran pilar yang mampu menahan nilai tegangan terinduksi tersebut, baik saat tahap studi kelayakan maupun untuk diterapkan sebagai desain awal. *Engineer* berpeluang untuk memperoleh rancangan ukuran pilar yang optimum menggunakan persamaan yang diperoleh dari penelitian tersebut. Desain pilar akan disesuaikan setelah proses penambangan dimulai dan data-data yang diperoleh dari eksplorasi geoteknik telah divalidasi dengan data-data yang diambil secara langsung di lokasi penambangan. Pemantauan kestabilan pilar dan lubang bukaan tambang juga harus terus dilaksanakan sampai tahapan penambangan berakhir.

Jika peralatan dan dana memungkinkan, sebaiknya dilakukan pengukuran tegangan terinduksi atau pendekatannya berdasarkan hasil analisis data pemantauan pergerakan batuan di atas lapisan batubara. Data hasil pengukuran selanjutnya sangat bermanfaat untuk mengoreksi persamaan ini dan memberikan peluang bagi *engineer* untuk menemukan faktor lain yang bersifat lokal dan mempengaruhi nilai tegangan terinduksi. Terlepas dari faktor-faktor lain yang tidak teridentifikasi, menurut persamaan ini, nilai dan jarak pengaruh tegangan terinduksi sangat dipengaruhi oleh kedalaman *overburden* dan sifat mekanik massa batubaranya. Sebagai konsekuensinya, pendekatan yang digunakan dalam memodelkan endapan batubara, topografi permukaan, dan lapisan-lapisan *overburden* juga memberikan andil dalam menyediakan model yang representatif. Hal ini merupakan tantangan tersendiri bagi *engineer* geologi-tambang.

Selain itu, sangat dibutuhkan komitmen dari pihak manajemen perusahaan dalam memastikan pelaksanaan eksplorasi telah mencakup perolehan data-data untuk analisis kestabilan geoteknik. Pemboran inti mutlak dilakukan untuk mendapatkan data litologi (jenis batuan dan ketebalan) dan RQD. Setelah penyelidikan lapangan, sampel inti bor selanjutnya dibawa ke laboratorium untuk diuji kuat tekan uniaksialnya. Kuat tekan uniaksial batubara merupakan parameter yang sangat menentukan *bearing capacity* (kapasitas beban yang mampu ditahan) ketika berperan sebagai pilar. *Bearing capacity* sendiri merupakan fungsi dari sifat mekanik batubara dan ukuran pilar (tinggi, lebar dan panjangnya). Akhirnya, ukuran pilar optimum pada kriteria faktor keselamatan (FK) tertentu – untuk tambang bawah tanah biasanya nilai FK yang diterima antara 2 sampai 3 – bisa dirancang menggunakan data-data yang tersedia.

Sebagaimana dijelaskan di bagian pendahuluan, perolehan batubara akan lebih tinggi jika diterapkan pengembangan metode *room and pillar retreat mining*. Keruntuhan atap merupakan satu masalah keselamatan yang paling menantang selama proses penambangan mundur berlangsung pada metode ini. Keruntuhan atap tidak hanya menyebabkan kecelakaan fatal dan non-fatal pada penambang, berhentinya operasi penambangan dan kerusakan alat, tapi juga menghasilkan perolehan cadangan bijih yang tidak efisien.

Ghasemi dkk (2012) mengusulkan sebuah metode praktis untuk menilai potensi runtuh atap berdasarkan 3 parameter utama dan 15 parameter minor yang tercantum pada Tabel 1., Tabel 2., dan Tabel 3. Metode ini dibentuk untuk menilai dan mengendalikan risiko keruntuhan atap menggunakan teknik semikuantitatif. Hasil akhir berupa tingkat risiko keruntuhan atap yang terdiri atas 4 kategori berdasarkan rating risiko keruntuhan atap R_{rf} (lihat Tabel 4).

Studi kasus telah dilakukan di panel utama Tambang Tabas Central, di daerah timur tengah Iran. Kondisi setiap parameter tercantum pada Tabel 5. Tiga parameter operasional terakhir belum ditentukan dan metode penilaian ini dipakai untuk memilih parameter yang lebih aman. Sebagai dasar dalam memberikan rekomendasi, dilakukan penilaian terhadap 12 alternatif skenario penambangan dengan variasi jenis penyangga tambahan, tahapan penambangan, dan sisa pilar akhir (final stump/last lift/pushout atau stook).

Berdasarkan hasil simulasi pada Tabel 6., tiga alternatif pertama memiliki risiko menengah dan lebih aman untuk *retreat mining* dibanding alternatif lainnya. Skenario kedua merupakan alternatif terbaik dibanding skenario pertama karena tahapan penambangan *outside lift* tidak memungkinkan penambangan pilar. Pada skenario pertama, lebar pilar 15.5 m lebih dari 10 m yang disarankan untuk tahapan penambangan *outside lift*. Berdasarkan kondisi panel utama dan kategori risiko beberapa skenario tersebut, diberikan solusi kepada manajer dan *engineer* di Tambang Tabas Central untuk penerapan *retreat mining* yang aman, yaitu : (1) Penggunaan mobile roof support sebagai penyangga tambahan selama penambangan mundur, (2) Penambangan pilar menggunakan metode left-right, (3) Menyisakan ukuran sisa pilar akhir yang memadai dengan mempertimbangkan atap batuan lemah dan lebar panel super-kritis serta jarak minimum penggalian ke sudut sekitar 3 m, (4) Pemasangan baut atap (roof bolt) yang baru diutamakan pada penambangan mundur khususnya di persimpangan karena umur panel yang sudah lama berakibat pada berkurangnya kekuatan atap dan *roof bolt* yang terpasang.

Metode penilaian risiko yang diusulkan ini merupakan pendekatan sistematis yang disusun berdasarkan penilaian keteknikan yang diperoleh dari pengalaman di banyak tambang batubara bawah tanah dan pengujian terhadap literatur terkait, sehingga dapat dikatakan bahwa ini adalah metode terbaik dalam mengestimasi risiko keruntuhan atap. Di lokasi tambang baru yang *engineer* tambangnya tidak terbiasa dengan *retreat mining* dan belum mampu menilai risiko berdasarkan pengalaman mereka, metode ini memberikan mereka pengalaman internasional untuk menilai risiko keruntuhan atap. Hasil akhir metode ini berupa angka 0 sampai 100, di mana 0 menunjukkan risiko rendah dan 100 menunjukkan kemungkinan keruntuhan atap yang sangat tinggi. Berdasarkan hasil akhir ini, risiko keruntuhan atap terbagi menjadi 4 kategori : rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi.

Tabel 1. Parameter Geologi

	Parameter	Faktor Kemungkinan	Bobot
1.	Kedalaman batuan penutup (m)		9
	< 40	4	
	40 - 200	1	
	200 - 400	2	
	400 - 600	3	
	> 600	4	
2.	Kualitas batuan atap (CMRR)		10
	< 45	4	
	45 - 55	3	
	55 - 65	2	
	65 - 85	1	
	> 85	0	
3.	Kualitas batuan lantai		4
	Lemah	3	
	Menengah	2	
	Kuat	1	
4.	Kondisi air tanah		2
	Atap kering	0	
	Atap basah	1	
	Menetes	3	
	Mengalir	4	
5.	Lapisan masif di atas batubara		5
	Tidak ada	0	
	Ada : < 20 m	3	
	Ada : > 20 m	1	
6.	Tebal interburden (> 1 seam)		7
	Tidak ada	0	
	Ada : < 10h	4	
	Ada : 10h – 24h	3	
	Ada : 24h – 60h	2	
	Ada : > 60h	1	

Keterangan : CMRR = Coal Mine Roof Rating, D = jarak dari seam, h = ketebalan batubara yang ditambang

Tabel 2. Parameter Perancangan

	Parameter	Faktor Kemungkinan	Bobot
1.	Lebar panel		3
	Sub-kritis	1	
	Kritis	2	
	Super-kritis	3	
2.	Keseragaman panel		1
	Seragam	1	
	Sebagian seragam	2	
	Tidak seragam	3	
3.	Lebar entry		8
	> 5	1	
	5 - 7	2	
	> 7	3	
4.	Rancangan pilar		6

	Sesuai	1	
	Tidak sesuai	4	
5.	Pembautan batuan		7
	Densitas baut < 1	3	
	Densitas baut 1 – 1.5	2	
	Densitas baut > 1.5	1	

Keterangan : densitas baut = banyak baut per luas atap (m^2), panel = tempat penambangan, entry = jalan masuk menuju panel

Tabel 3. Parameter Operasional Penambangan

Parameter		Faktor Kemungkinan	Bobot
1.	Umur panel (tahun)		2
	< 1	1	
	1 - 2	2	
	> 2	3	
2.	Penyangga tambahan		7
	Mobile roof support	1	
	Timber post	4	
3.	Tahapan penambangan		6
	Outside lift	1	
	Left- right	2	
	Tahapan lain	3	
4.	Sisa pilar akhir		8
	Memadai	1	
	Tidak memadai	4	

Metode ini mudah digunakan dan tidak memerlukan pelatihan khusus. Kelebihan utama metode ini adalah telah mempertimbangkan semua parameter yang berpengaruh pada keruntuhan atap. Pembagian setiap parameter ke dalam sub kategori dapat membantu manajer dan *engineer* tambang waspada terhadap kondisi bahaya dan sangat berguna sebagai panduan dalam merancang tambang batubara *room and pillar* dengan risiko keruntuhan atap minimum. Parameter geologi tidak dapat diubah atau dikendalikan dan hanya dapat dilakukan pengukuran yang bersifat pencegahan untuk mengurangi risiko. Sedangkan parameter operasional dan perancangan dapat diubah dan dikendalikan sehingga dengan memilih rancangan dan tahapan penambangan terbaik, risiko keruntuhan atap dapat dikurangi hingga mencapai kategori yang diinginkan. Keuntungan lainnya, metode ini tetap dapat diterapkan pada lokasi tambang baru walaupun pengalaman dan data yang tersedia masih terbatas.

Tabel 4. Klasifikasi Risiko Keruntuhan Atap Pada Metode *Retreat Mining*

Kategori risiko	Nilai R_{rf}	Kemungkinan keruntuhan atap	Tingkat risiko keruntuhan atap
Rendah	0 - 28	Tidak mungkin	Diterima
Menengah	28 - 48	Mungkin	Diterima dengan pemeriksaan, pemantauan, dan audit
Tinggi	48 - 70	Mungkin	Tidak diinginkan dan memerlukan tindakan pengendalian
Sangat tinggi	70 - 100	Sangat mungkin	Tidak dapat diterima

Tabel 5. Parameter dan Subkategori Kondisi Panel Utama Tambang Tabas Central, Iran

No.	Parameter	Subkategori
1.	Kedalaman batuan penutup (m)	40 - 200
2.	Kualitas batuan atap (CMRR)	< 45
3.	Kualitas batuan lantai	Menengah
4.	Kondisi air tanah	Atap basah
5.	Lapisan masif di atas batubara	Tidak ada
6.	Tebal interburden (> 1 seam)	Tidak ada
7.	Lebar panel	Super-kritis
8.	Keseragaman panel	Seragam
9.	Lebar entry	> 5
10.	Rancangan pilar	Sesuai
11.	Pembautan batuan	Densitas baut 1 – 1.5
12.	Umur panel (tahun)	> 2
13.	Penyangga tambahan	Belum ditentukan
14.	Tahapan penambangan	Belum ditentukan
15.	Sisa pilar akhir	Belum ditentukan

Tabel 6. Alternatif Skenario *Retreat Mining* di Panel Utama Tambang Tabas Central, Iran

No.	Penyangga tambahan	Tahapan penambangan	Sisa pilar akhir	R_{rf}	Kategori risiko
1.	Mobile roof support	Outside lift	Memadai	41	Menengah
2.	Mobile roof support	Left-right	Memadai	43	Menengah
3.	Mobile roof support	Tahapan lain	Memadai	45	Menengah
4.	Mobile roof support	Outside lift	Tidak memadai	49	Tinggi
5.	Mobile roof support	Left-right	Tidak memadai	51	Tinggi
6.	Mobile roof support	Tahapan lain	Tidak memadai	53	Tinggi
7.	Timber post	Outside lift	Memadai	48	Tinggi
8.	Timber post	Left-right	Memadai	50	Tinggi
9.	Timber post	Tahapan lain	Memadai	52	Tinggi
10.	Timber post	Outside lift	Tidak memadai	56	Tinggi
11.	Timber post	Left-right	Tidak memadai	58	Tinggi
12.	Timber post	Tahapan lain	Tidak memadai	60	Tinggi

KESIMPULAN

Besar tegangan terinduksi di atas atap tambang batubara bawah tanah *room and pillar* dapat diestimasi menggunakan persamaan $S_u = 0.025I + 8.646 \times 10^{-4}H^{0.5}$ MPa (untuk $H < 200$ m) yang merupakan fungsi dari kedalaman (H) dan sifat mekanik massa batuan *overburden* (I). Nilai estimasi ini bermanfaat untuk perancangan ukuran pilar batubara optimum pada tahap studi kelayakan. Penerapan *retreat mining* memungkinkan perolehan batubara lebih tinggi namun berisiko mengalami keruntuhan atap. Risiko keruntuhan atap dinilai berdasarkan parameter geologi, parameter perancangan, dan parameter operasional. Metode praktis penilaian risiko keruntuhan atap dan estimasi nilai tegangan tereduksi ini sangat bermanfaat pada pembukaan lokasi tambang batubara bawah tanah yang baru. Para penambang berpeluang merancang ukuran pilar yang optimum serta memilih parameter perancangan dan operasional yang lebih aman. Tantangan ada pada saat eksplorasi untuk memperoleh data geoteknik yang mewakili kondisi massa batuan dan lapisan batubara di lokasi penambangan serta pemantauan kestabilan lubang bukaan tambang dan pilar secara terus-menerus selama penambangan berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Duzgun H. S. B. dan Einstein, H. H., 2004, *Assessment and management of rock fall risks in underground coal mines*, Safety Sci, Vol. 42, 23-41.
- Ghasemi, E.M.,Ataei, M., Kourosh, S., Sereshki, F., Jalali, S. E., Ramazanzadeh, A., 2011,*Assessment of roof fall risk during retreat mining in room and pillar coal mines*,International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 54, 80-89.
- Molinda, G. M, Mark C., Dolinar, D., 2000, *Assessing coal mine roof stability through roof fall analysis*, Proceedings of the new technology for coal mine roof support, U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention.National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH Publication No. 9453, 53-72
- Pariseau, W.G., 1982,*Shear stability of mine pillars in dipping seams*, Proceeding 23rd U.S. Symposium Rock Mechanics SME/AIME, New York, 1077–101090.
- Paschedag, U., 2016,*Room and pillar Solutions*, Advanced Mining Solutions, Caterpillar Global Mining.
- Sheorey, P.R., 1994, *A theory fo in situ stress in isotropic and transversely isotropic rock*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 31, 23-34.
- Singh, A. K., Singh, R., Maiti, J., Kumar, R., Mandal, P.K.,2011,*Assessment of mining induced stress development over coal pillars during depillaring*,International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 48, 805-818.