REVIEW PERKEMBANGAN ALGORITMA OPTIMASI STOPE UNTUK TAMBANG BAWAH TANAH

Danu Putra[1], Tri Karian[2], Budi Sulistianto[3]
[1-3] Program Studi Magister Rekayasa Pertambangan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung
e-mail: [1]danu.putra@students.itb.ac.id, [2]tri.karian@mining.itb.ac.id, [3]bst@mining.itb.ac.id

ABSTRAK

Proses optimasi stope merupakan salah satu tahapan penting pada perencanaan tambang bawah tanah dengan metode *stoping*. Kompleksitas dari parameter pada penambangan bawah tanah mengharuskan proses optimasi dilakukan dengan sistematis dan komprehensif sehingga menghasilkan suatu rancangan yang optimum dimana dihasilkan nilai keuntungan yang maksimum. Penggunaan algoritma optimasi stope saat ini menjadi solusi yang banyak diterapkan untuk dapat melakukan optimasi secara cepat dan efisien. Namun demikian, algoritma optimasi stope yang telah dikembangkan hingga saat ini masih berfokus pada parameter ekonomi. Parameter geomekanika sebagai salah satu parameter penting dalam desain tambang bawah tanah seringkali disederhanakan pada saat proses optimasi stope. Penyederhanaan ini dilakukan dengan memberikan sebuah dimensi tetap untuk stope pada proses optimasi. Pada tambang bawah tanah, desain stope sangat dipengaruhi oleh kekuatan massa batuan yang dapat secara signifikan berbeda dari satu tempat ke tempat lainnya. Oleh karena itu, penyederhanaan dimensi secara tidak langsung akan memberikan kondisi yang tidak optimal pada berbagai algoritma optimasi yang sudah dikembangkan saat ini. Penelitian ini mengulas cara kerja berbagai algoritma optimasi stope yang telah dikembangkan dan menekankan pentingnya peran parameter geomekanika dalam algoritma optimasi sehingga hasil optimasi akan semakin mendekati kondisi optimal.

Kata-kata kunci*: optimasi stope, penambangan bawah tanah, algoritma, geomekanika, desain penambangan.*

PENDAHULUAN

Proses optimasi dalam penambangan bawah tanah dapat diartikan dengan memaksimalkan nilai keuntungan atau meminimumkan biaya yang berperan dalam penambangan. Optimasi dalam penambangan bawah tanah dapat dilakukan diantaranya dengan pemilihan metode, desain, dan tahapan penambangan yang tepat. Semua tahapan ini pada akhirnya akan berpengaruh pada *Net Present Value* (NPV) dari keseluruhan proyek penambangan bawah tanah. Pada tahap perencanaan tambang, proses optimasi sering dilakukan dengan menggunakan model matematika pada batasan tertentu. Model matematika dapat digunakan untuk menyederhanakan masalah yang sangat kompleks pada optimasi. Model matematika ini kemudian diterapkan pada suatu algoritma sehingga dapat berjalan sistematis sesuai dengan pentahapan optimasi yang benar.

Penggunaan algoritma pada tahapan optimasi penambangan saat ini mulai berkembang pesat. Algoritma dapat dengan cepat menyelesaikan problem optimasi di lapangan dengan cepat dan efisien jika dibandingkan dengan pentahapan konvensional [1]. Adapun proses optimasi pada tambang bawah tanah dan tambang terbuka berbeda cukup signifikan. Pada tambang terbuka, optimasi dapat dilakukan dengan memaksimalkan nilai *cut-off grade*. Batasan dari nilai *cut-off grade* kemudian akan digunakan sebagai batasan bukaan penambangan yang umumnya berbentuk *pit* [2], [3], [4]. Penjadwalan kemudian bisa dilakukan dengan berbagai parameter baik secara statis ataupun dinamis setelah bentuk *pit* ditetapkan pada tahap sebelumnya [5], [6]. Algoritma dapat dibentuk secara terpisah pada setiap tahap perencanaan tambang terbuka. Sementara pada tambang bawah tanah, optimasi harus dilakukan secara keseluruhan karena setiap parameter optimasi sangat tergantung satu sama lain. Selain itu, desain pada penambangan bawah tanah sangat variatif disebabkan persebaran *grade* dan kemungkinan penambangan secara selektif. Kondisi ini menyebabkan optimasi pada tambang bawah tanah perlu dilakukan secara komperhensif [1], [7].

Selain dari tahapan pada kegiatan optimasi, salah satu tahapan lain yang perlu dipertimbangkan adalah desain penambangan. Desain penambangan pada tambang terbuka sering dibatasi dengan sudut maksimum, tinggi dan jumlah jenjang pada *pit.* Pengambilan keputusan maksimum dimensi ini juga disetarakan sesuai dengan kondisi massa batuan terlemah yang ditemukan pada area *pit.* Kondisi lebih optimis dapat dilakukan dengan membagi area dinding *pit* menjadi lebih kecil sesuai dengan kondisi massa batuan tersebut. Namun, area yang dibentuk pada optimasi ini juga tidak bisa terlalu ekstrem dikarenakan batasan operasional. Kondisi ini menyebabkan algoritma dalam optimasi desain penambangan tambang terbuka berjalan dengan lebih sederhana. Pada penambangan bawah tanah, penyederhanaan ini tidak bisa dilakukan karena parameter yang mempengaruhi desain penambangan juga sangat berpengaruh pada batasan penambangan tersebut. Pada penambangan dengan sistem *stoping* misalnya, sudut pada dinding sangat dipengaruhi bentuk model bijih, kekuatan massa batuan pada dinding *stope* serta batasan dimensi antar dinding yang berpengaruh pada kegiatan operasional. Hal-hal tersebut menjadikan proses desain penambangan bawah tanah menjadi sangat kompleks dikarenakan setiap pembentukan *stope* pada lokasi berbeda akan menghasilkan desain dan optimasi yang berbeda [8]–[10]. Hal ini juga menekankan sulitnya melakukan optimasi yang komprehensif pada penambangan bawah tanah. Namun demikian, kehadiran suatu algoritma optimasi untuk perencanaan tambang bawah tanah sangatlah penting untuk membantu mempercepat proses pengambilan keputusan serta memaksimalkan keuntungan tambang. Penelitian ini akan mengulas perkembangan penelitian algoritma optimasi penambangan bawah tanah beserta masukan-masukan untuk dapat menyempurnakan algoritma optimasi terutama dikaitkan dengan karakteristik tambang bawah tanah yang banyak berbeda dengan tambang terbuka.

METODOLOGI PENELITIAN

Algoritma Optimasi Stope

Algoritma optimasi pada penambangan bawah tanah sudah berkembang sejak tahun 1977. Namun, pada penelitian ini hanya dijelaskan algoritma *stope* yang sudah melibatkan pembentukan dimensi *stope* secara mandiri dengan melibatkan masukan dimensi dalam algoritma optimasi.

Floating Stope Algorithm

Algoritma ini [15] menghasilkan batasan *stope* yang layak untuk ditambang. Prinsip yang digunakan mengadopsi konsep *floating cone* pada tambang terbuka dan dibatasi pada model blok ekonomi. Algoritma asesmen pada *stope* diiterasi mengikuti indeks dalam model blok dengan batasan bentuk *stope* yang sudah ditetapkan diawal. Pada saat iterasi, area *stope* dengan nilai positif ditandai. Area ini diakumulasi sehingga menghasilkan batasan luar dan batasan dalam (Gambar-1). Batasan luar ini merupakan batasan *stope* yang pesimis diambil sementara batasan dalam merupakan kemungkinan *stope* bernilai tinggi yang akan diambil pada saat penambangan. Algoritma ini tidak mempertimbangkan batasan geomekanika dan operasi. Kondisi ini ditunjukkan dengan kondisi tumpang tindih antar *stope* sehingga dibutuhkan penyesuaian kembali saat dilakukan desain penambangan bawah tanah.

Multiple Pass Stope Process

Multiple Pass Floating Stope Process merupakan pengembangan dari *Floating Stope*. Beberapa parameter tambahan digunakan dalam algoritma ini untuk mengatasi kelemahan dari algoritma *Floating Stope.* Beberapa parameter tambahan ini adalah *head grade, cut-off grade,* maksimum material samping terambil. Penambahan parameter ini menambah tingkat kelayakan batasan *stope* hasil optimasi namun tetap tidak menghasilkan bentuk desain *stope* penambangan secara detil.

Tahapan yang dilakukan dalam algoritma ini meliputi penentuan parameter optimasi (*head grade, cut-off grade,* dan maksimum material pengotor), pembentukan batasan *stope* optimal kemudian konversi file output menjadi file berbasis tabulasi dalam excel.

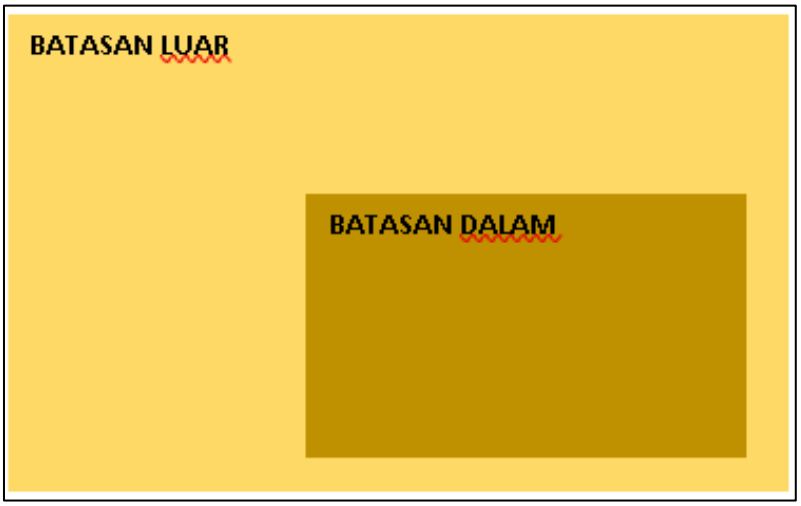
Maximum Neighborhood Value

Algoritma ini dikembangkan oleh Ataee-Pour [16] dengan pendekatan heuristik. Proses iterasi yang sama dengan *floating stope* digunakan dalam algoritma. Iterasi berjalan sesuai dengan indeks blokmodel dibatasi oleh dimensi *stope* yang sudah ditetapkan sebelumnya (ukuran *stope* minimum dan tinggi *stope*). Perbedaan terletak pada akumulasi nilai ekonomi dihitung pada setiap tahap iterasi dimana *stope* tersebut berdiri. Kemudian nilai keekonomian suatu *stope* dibandingkan dengan nilai keekonomian *stope* lain yang berdekatan. Nilai maksimum kemudian diambil dari nilai tertinggi *stope* yang berdekatan. Blok model yang sudah terpilih pada iterasi sebelumnya akan dieleminasi karena sudah terambil. Tahapan ini memastikan bahwa kondisi tumpang-tindih tidak ada dalam konsep iterasi. Pada algoritma ini, konsep perubahan biaya akibat bentuk *stope* tidak dipertimbangkan. Selain itu, bentuk blok dibatasi oleh bentuk kotak tanpa mempertimbangkan kemungkinan *stope* miring.

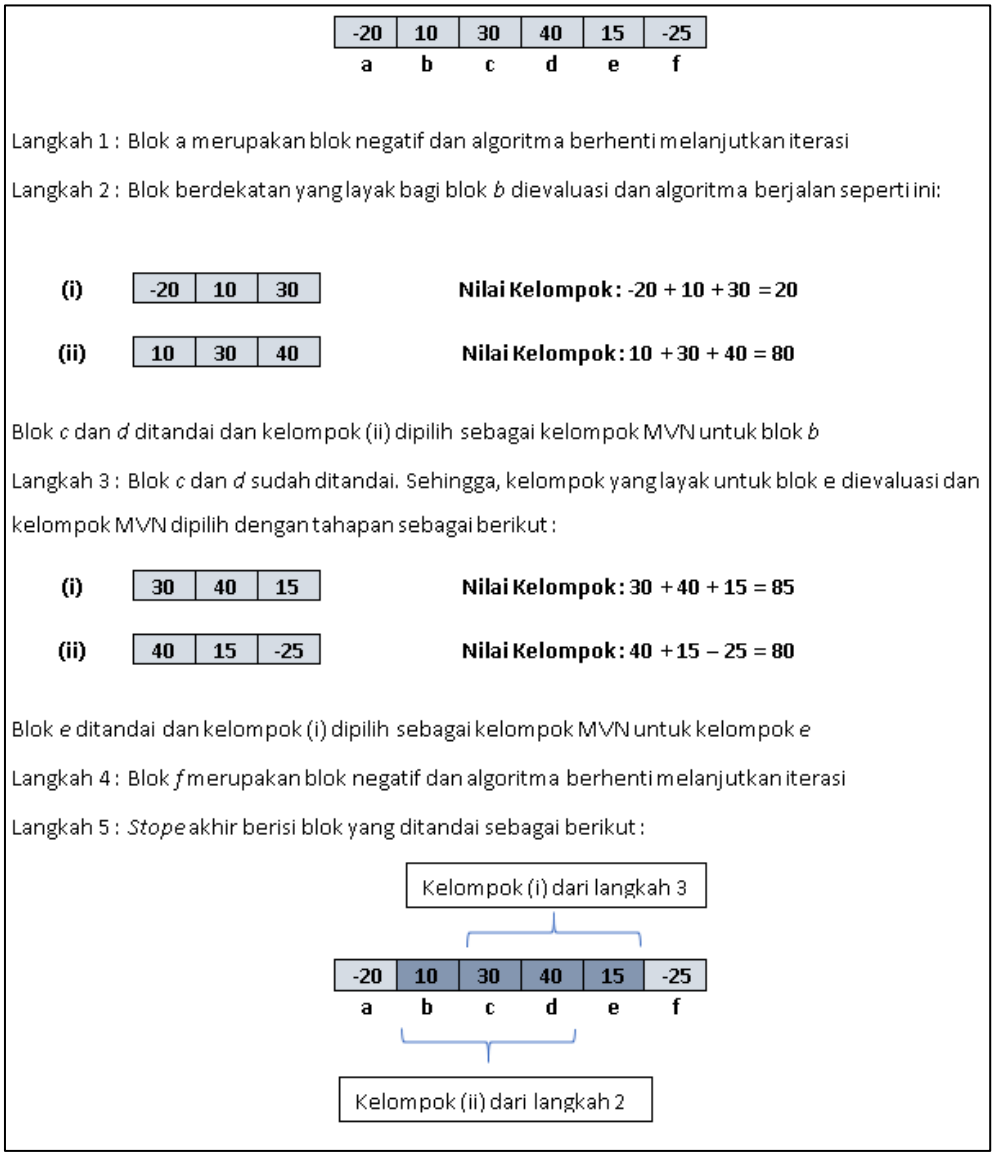
Algoritma Heuristik Topal dan Sens

Sens dan Topal [11] menggunakan algoritma heuristik dalam optimasi stope dengan tahapan yang lebih komprehensif. Tahapan dalam algoritma ini adalah sebagai berikut :

- Pembentukan batasan *stope* optimum dengan batasan dimensi secara *fix*
- Penetapan *range* dimensi *stope* sebagai dasar pembentukan area optimum *stope*
- Penentuan bentuk desain *stope* optimum
- Pembentukan desain *stope* berdasarkan desain *stope* optimum
- Menghasilkan *stope* dimulai dari *stope* dengan nilai keekonomian tertinggi



Gambar- 1. Batasan luar dan dalam [15]



Gambar- 2. Tahapan algoritma maximum neighborhood value [16]

Algoritma ini juga dapat bekerja dalam kondisi 3-dimensi sehingga kondisi optimal semakin mungkin didapatkan. Penggunaan algoritma secara 3-dimensi juga mengurangi kemungkinan kondisi *stope* bertumpuk lebih besar. Namun, algoritma ini memiliki kelemahan dikarenakan iterasi mengikuti kaidah iterasi menurun. Potensi *stope* dengan nilai lebih tinggi memiliki kemungkinan tereliminasi dikarenakan sistematika iterasi ini.

Algoritma Heuristik Sandanayake

Sandanayake [8] juga menggunakan algoritma heuristik dalam optimasi *stope*. Tahapan dalam algoritma ini sebagai berikut:

- Penyeragaman bentuk model blok
- Penetapan jumlah blok yang diijinkan dalam *stope* (arah x, y dan z)
- Iterasi bentuk *stope* dalam model blok
- Penentuan *stope* bernilai positif
- Penentuan *stope* optimum.

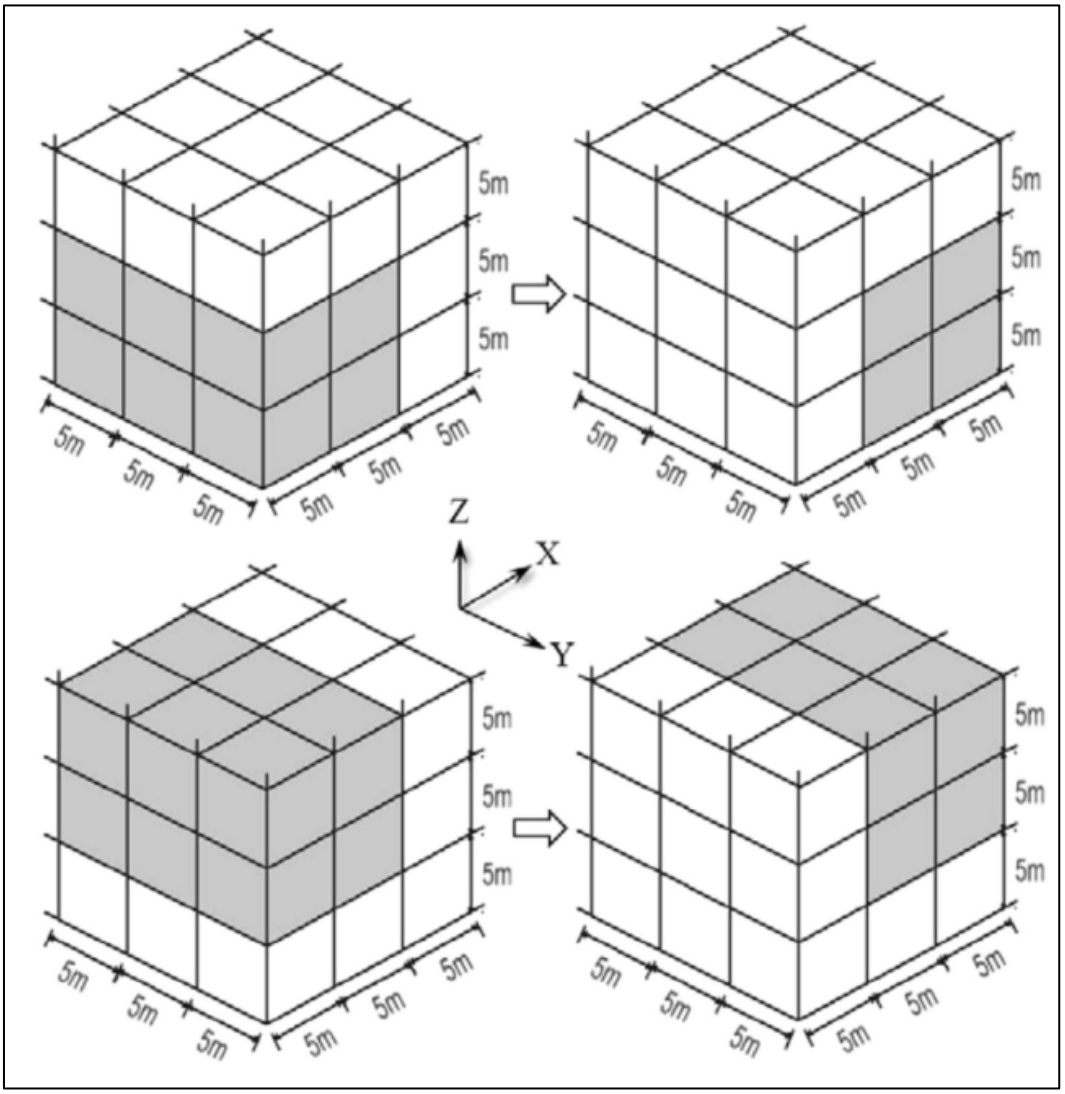
Kelemahan dari algoritma optimasi *stope* ini terletak dari penggunaan nilai keekonomian yang bersifat tetap. Model pembiayaan di lapangan yang sangat sensitif terhadap parameter penambangan belum digunakan dalam algoritma ini. Oleh karena itu, penilaian *stope* dapat tidak optimal dikarenakan bias dalam penilaian kelayakan *stope.*

Algoritma ini juga menggunakan dimensi *stope* tetap dengan dasar jumlah blok yang diijinkan dalam *stope.* Selain itu, kondisi ini dapat memberikan kondisi sub-optimal karena bentuk *stope* tidak memiliki variasi.

HASIL DAN DISKUSI

Ulasan Kritis Terhadap Algoritma Optimasi Stope Yang Telah Dikembangkan

Perkembangan penelitian algoritma optimasi penambangan bawah tanah ditekankan pada algoritma pemilihan bentuk batasan *stope* yang dapat menghasilkan nilai yang optimum. Hal ini dilakukan dengan merubah dan memperbarui konsep iterasi pada saat pemilihan *stope* yang bernilai positif secara ekonomi [8], [11], [12], [13]. Pada berbagai algoritma yang sudah dikembangkan hingga saat ini, dimensi *stope* ditetapkan sebagai sebuah angka deterministik, sehingga dimensi *stope* akan tetap sama sepanjang iterasi. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa algoritma optimasi yang telah dikembangkan hingga saat ini dititikberatkan pada parameter ekonomi yang berperan dalam pembentukan nilai keekonomian dalam *stope.*



Gambar- 3 Tahap pembentukan stope [8]

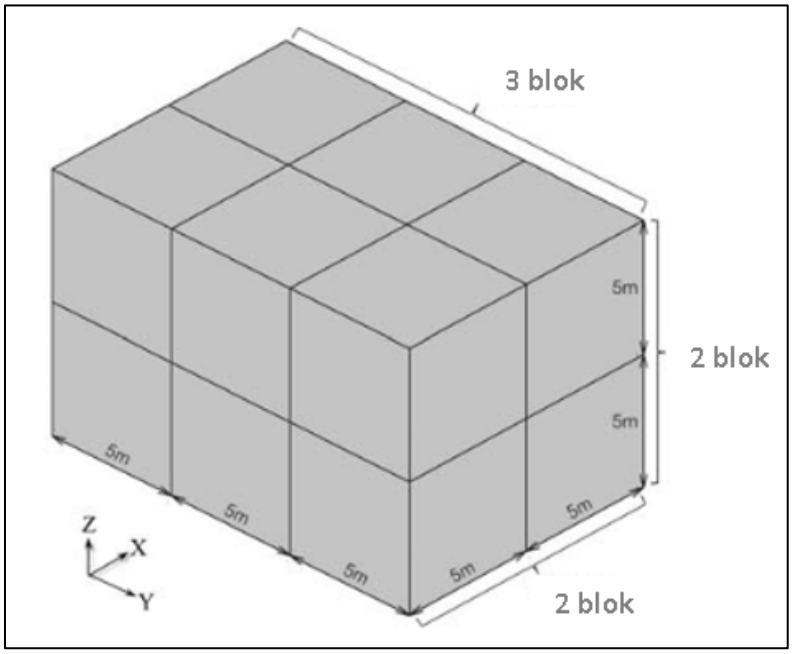
Pada tambang bawah tanah, kondisi massa batuan dapat berbeda secara signifikan dari satu lokasi ke lokasi lainnya. Hal ini akan berimplikasi pada dimensi dari suatu stope dimana dimensi stope harus menyesuaikan dengan kondisi dari massa batuan dimana stope tersebut dibentuk. Oleh karena itu, parameter geomekanika menjadi parameter yang tidak bisa diabaikan dan dipisahkan pada suatu proses optimasi desain stope pada tambang bawah tanah.

Dari keseluruhan algoritma optimasi stope yang telah dikembangkan hingga saat ini, algoritma optimasi yang melibatkan parameter geomekanika sebagai parameter dalam optimasi belum banyak berkembang. Integrasi parameter geomekanika masih minim dalam perkembangan kemajuan algoritma optimasi *stope.* Beberapa pengembangan awal algoritma optimasi *stope* masih belum mempertimbangkan dimensi *stope* dalam hasil akhir optimasi. Hal ini ditunjukkan oleh algoritma *floating stope, multiple pass process,* dan *maximum neighborhood value* dimana hasil akhir optimasi hanya berupa rekomendasi area dimana *stope* layak untuk ditambang. Walaupun dimensi merupakan salah satu masukan dalam algoritma, bentuk ini tidak dipertahankan hingga akhir tahapan optimasi. Algoritma ini juga berjalan pada 2-dimensi sehingga desain akhir *stope* tidak dapat dijadikan solusi akhir hasil optimasi.

Dimensi *stope* mulai dikembangkan dan digunakan pada solusi akhir hasil optimasi *stope* dalam algoritma *Sens dan Topal* serta *Sandanayake.* Dimensi *stope* diberikan dalam batasan jumlah blok yang diijinkan dalam desain akhir *stope.* Dimensi dalam model blok memberikan dimensi akhir pada *stope*. Kondisi ini memberikan kondisi yang lebih optimal dibandingkan algoritma sebelumnya karena sudah mempertimbangkan dimensi *stope.* Beberapa batasan dalam algoritma ini adalah bentuk *stope* dibatasi oleh dimensi blok. Hal ini menyebabkan dimensi *stope* yang dihasilkan terbatas pada kelipatan dari dimensi blok. Kondisi ini dijelaskan pada Gambar- 4, apabila blok dengan ukuran 5x5x5 meter digunakan, maka dimensi *stope* yang mungkin terjadi adalah kelipatan dimensi blok tersebut. Selain itu, variasi dimensi saat optimasi dilakukan didasarkan pada kelayakan *stope*. Hal ini membuat solusi yang dihasilkan algoritma memberikan nilai keekonomian yang baik.

Kondisi operasional yang dimaksud adalah dimensi *stope* yang seringkali mengikuti kekuatan massa batuan di lapangan. Dimensi *stope* ini diturunkan dari kekuatan massa batuan serta kondisi penyangga yang digunakan dalam *stope* tersebut.

Keseluruhan algoritma yang telah beredar saat ini menggunakan masukan dari pengguna sebagai batasan dimensi yang diijinkan pada saat proses optimasi dilaksanakan. Hal ini menjadikan kondisi optimal sulit tercapai secara operasional.



Gambar- 4 Model blok dan ukuran stope [8]

Konsep Pengembangan Algoritma Optimasi Stope Yang Mempertimbangkan Parameter Geomekanika

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, parameter geomekanika merupakan parameter yang penting dalam desain stope tambang bawah tanah. Oleh karena itu, penting untuk dapat mengembangkan suatu algoritma optimasi yang melibatkan parameter geomekanika dalam proses iterasinya. Algoritma yang dimaksud adalah dengan melibatkan metode analisis kestabilan *stope* yang sudah banyak berkembang saat ini baik metode empirik, numerik maupun analitik. Salah satu metode yang praktis untuk digunakan menganalisis kestabilan stope adalah grafik kestabilan Mathews dengan integrasi Q-system dimana klasifikasi massa batuan dengan nilai Q' (disesuaikan) dan tiga faktor utama, yaitu faktor A, faktor B dan Faktor C digunakan sebagai dasar untuk menentukan dimensi *stope* [14] yang aman sesuai dengan kondisi massa batuan dimana stope tersebut dibuat. Berikut ini dijabarkan konsep pengaplikasian parameter geomekanika dalam algoritma optimasi *stope*.

Model Blok

Model blok bijih merupakan hal esensial yang diperlukan dalam optimasi penambangan bawah tanah. Model blok bijih ini diturunkan dari data pengeboran eksplorasi yang sebelumnya telah dikorelasi secara grafis sehingga menghasilkan triangulasi model badan bijih pada area penambangan. Interpolasi dan ekstrapolasi kemudian dilakukan pada data pemboran yang umumnya berupa kadar mineral serta densitas material sehingga didapatkan persebaran kadar mineral dan densitas. Kedua atribut ini umumnya dibatasi oleh model badan bijih sehingga terdapat pemisah yang jelas antara badan bijih dan material tak berharga (country rock). Hasil interpolasi ini menghasilkan model berbentuk kotak (model blok) yang tersebar pada area penambangan. Model blok dengan berbagai atribut ini kemudian digunakan sebagai penentuan cadangan pada penambangan.

Untuk dapat melibatkan parameter geomekanika dalam algoritma optimasi stope, model blok tidak hanya cukup diterapkan pada atribut kadar dan densitas saja. Parameter geomekanika yang didapatkan dari pemboran geoteknik dapat dimodelkan juga dalam model blok sehingga menghasilkan model blok geomekanika. Model blok geomekanika ini meliputi klasfikasi massa batuan serta parameter yang berperan pada klasfikasi tersebut. Beberapa sistem klasifikasi massa batuan yang umumnya diadopsi dalam model blok ini adalah Q-System dan RMR. Kedua sistem klasifikasi massa batuan ini sering digunakan dalam penambangan bawah tanah karena memiliki kapabilitas untuk memberikan suatu rekomendasi desain *stope* pada penambangan bawah tanah. Persebaran nilai klasifikasi massa batuan ini dijadikan dasar perekayasa saat mendesain bukaan *stope* pada penambangan bawah tanah.

Parameter Ekonomi

Kadar mineral merupakan atribut dalam model blok yang berperan langsung dalam keekonomian. Pada awal perkembangan optimasi penambangan bawah tanah, model blok kadar dengan variasi warna digunakan sebagai dasari optimasi. Ini dilakukan dengan memberikan suatu batasan kadar atau yang lebih umum disebut *cut-off grade.* Warna digunakan sebagai batasan pada saat tahapn desain penambangan dilakukan. Blok dengan warna dibawah *cut-off* tidak diambil untuk menghindari kondisi tidak layak pada penambangan.

Seiring dengan perkembangan teknologi, beberapa metode optimasi pemilihan blok diperkenalkan, salah satunya *cut-off value*. Metode ini memperkenalkan penggunaan nilai uang pada penliaian kelayakan blok. Penggunaan nilai uang dapat menyeragamkan kondisi penambangan dengan multi mineral menjadi satu angka kelayakan yang komprehensif. Selain itu, prinsip uang terhadap waktu dapat diterapkan pada model blok sehingga blok-blok yang akan ditambang pada awal waktu dapat diberikan pembebanan (*discount*) yang berbeda dengan blok-blok yang ditambang diakhir waktu penambangan. Hal ini mengintegrasikan konsep penjadwalan dalam pemilihan blok penambangan sehingga desain penambangan lebih optimal.

Kedua konsep ini kemudian diadopsi dalam algoritma optimasi *stope.* Sehingga perhitungan kelayakan

sebuah *stope* didasarkan pada nilai uang dalam model blok. Nilai uang ini kemudian disebut nilai *stope.*

Parameter Geomekanika

Potensi yang sama dapat diterapkan dengan parameter geomekanika. Perkembangan penggunaan parameter geomekanika dalam model blok membuka potensi optimasi *stope* berdasarkan atribut ini.

Q-system sebagai salah satu parameter geomekanika sudah umum dimodelkan dalam model blok. Model ini didapatkan dari data pemboran yang diinterpolasi kedalam model blok. Persebaran nilai Q ini digunakan sebagai dasar pembuatan desain penambangan bawah tanah, salah satunya saat pembuatan *stope.* Grafik kestabilan Mathews digunakan saat desain penambangan bawah tanah dilakukan dengan menambahkan tiga faktor tambahan berupa faktor A, faktor B dan faktor C.

Faktor A merupakan perbandingan antara tegangan *uniaxial compressive strength* dengan tegangan terinduksi yang paralel terhadap dinding penggalian. Faktor B merupakan pembebanan yang disebabkan oleh ketidakmenerusan yang berpotongan dengan dinding penggalian, sementara faktor C merupakan pembebanan berdasarkan orientasi dinding penggalian terhadap gravitasi. Ketiga faktor ini juga umum dimodelkan dalam model blok.

Grafik Kestabilan Mathews

Metode yang ditawarkan Mathews didasarkan pada perhitungan 2 faktor utama, yaitu nilai stabilitas Mathews (N) dan *Shape Factor* (S). Nilai N merepresentasikan kekuatan massa batuan terhadap kondisi tegangan yang diterima pada massa batuan tersebut. Faktor kedua adalah *shape factor, S.* Pada metode Mathews, *shape factor* dijelaskan dalam *hydraulic radius* yang mana mendefinisikan geometri dari suatu permukaan.

Metode Mathews menggunakan pendekatan nilai Q setelah dimodifikasi Norwegian Geotechnical Institute's (NGI) sebagai pendekatan kualitas massa batuan. Nilai Q didapatkan dari pemetaan struktur pada lokasi penelitian atau berdasarkan hasil *core logging* pada massa batuan dengan menggunakan klasifikasi *Q System* tapi dengan asumsi nilai *stress reduction factor* dan *joint reduction factor* bernilai sama (sama dengan 1).

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} x \frac{J_r}{J_a} \qquad (1)$$

Dimana RQD merupakan *Rock Quality Designation Index ,* Jn adalah *Joint Set Number,* Jr adalah *Joint Roughness, dan* Ja adalah *Joint Alteration.*

Angka kestabilan Mathews ditentukan dengan mengalikan Nilai Q dengan faktor tegangan terinduksi, faktor orientasi struktur, dan orientasi permukaan penggalian. Nilai kestabilan dihitung berdasarkan persamaan (2).

$$N = Q' x\, A\, x\, B\, x\, C \qquad (2)$$

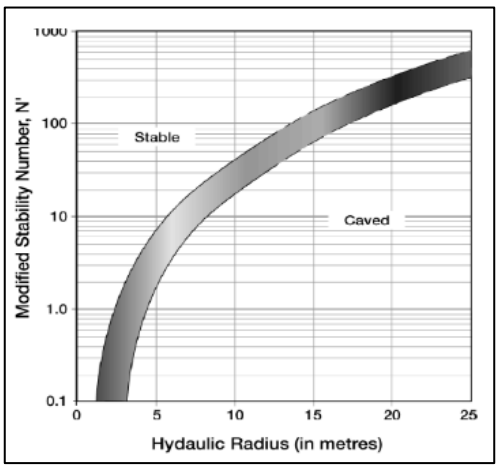
Dimana : Q' adalah Nilai Q setelah dimodifikasi NGI, A adalah Faktor tegangan batuan, B adalah Faktor orientasi *joint,* dan C ialah Faktor orientasi permukaan penggalian.

Kestabilan dan ketidakstabilan ditentukan secara empiris berdasarkan hubungan antara *hydraulic radius* dan Nilai N. Grafik dibentuk berdasarkan *case histories* yang ditemukan oleh Mathews. Grafik ini kemudian sudah dimodifikasi oleh Potvin dengan menambahkan 175 kasus baru. Grafik Mathews (setelah potvin) terbagi kedalam 3 zona, yaitu zona stabil, runtuh dan transisi (Gambar- 5).

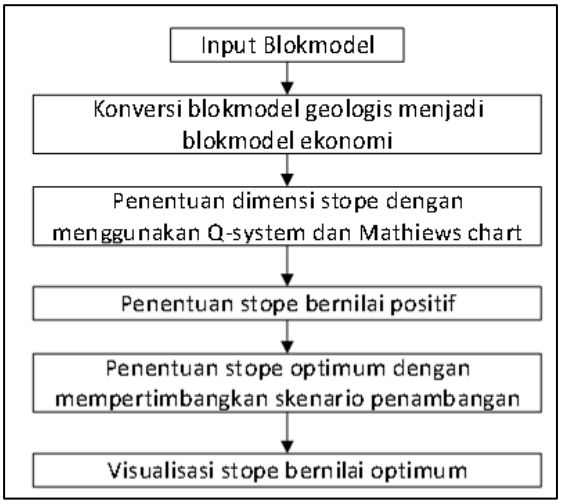
Berdasarkan kondisi pada grafik di Gambar-5, dapat diketahui kestabilan bukaan dinding *stope* yang diijinkan pada suatu lokasi penambangan. Secara algoritma, parameter ini dapat dijadikan masukan berupa dimensi yang diijinkan untuk ditambang pada suatu lokasi penambangan.

Integrasi Grafik Kestabilan Mathews dalam algoritma optimasi

Iterasi merupakan hal yang umum digunakan pada algoritma optimasi. Dengan menggunakan konsep iterasi, nilai *hydraulic radius* pada masing-masing lokasi *stope* dapat dianalisis. Tahapan analisis grafik kestabilan Mathews ini dapat diintegrasikan ke dalam keseluruhan tahapan optimasi *stope* (Gambar- 6). Penentuan dimensi s*tope* berdasarkan grafik kestabilan Mathews dapat digunakan dalam keseluruhan algoritma optimasi *stope*, sehingga dimensi *stope* saat optimasi dilakukan sudah mempertimbangkan kondisi geomekanika dan operasional penambangan



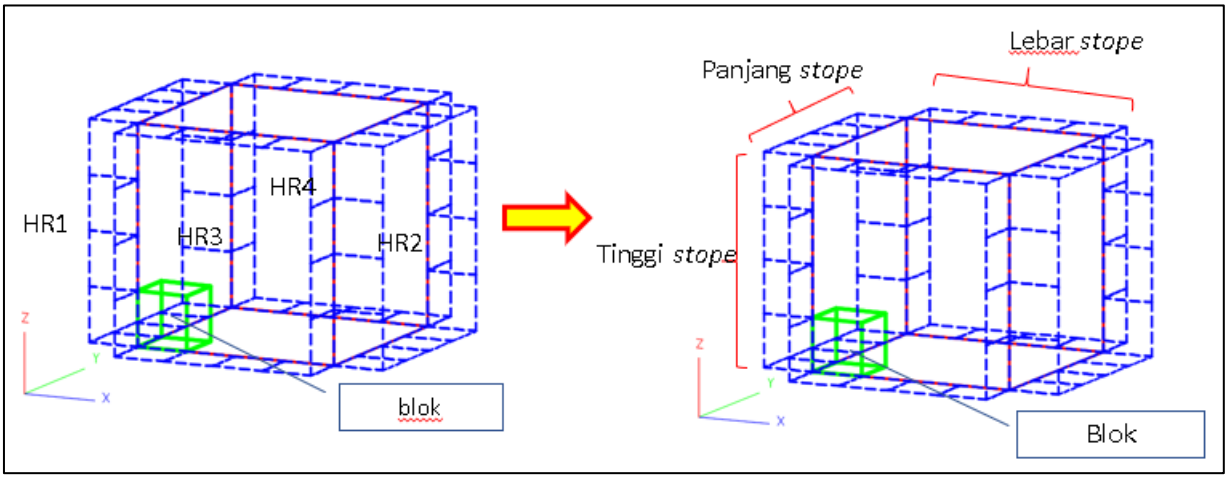
Gambar- 5 Grafik Kestabilan Mathews setelah dimodifikasi Potvin [17]



Gambar- 6 Konsep tahapan umum optimasi stope dengan mempertimbangkan parameter geomekanika

Gambar-7 menunjukkan proses 1 tahap iterasi, dimana blok berwarna hijau merupakan blok yang dianalisis sementara garis berwarna biru merupakan area pada dinding *stope* yang dianalisis. Pada tahap iterasi ini, nilai *hydraulic radius* akan dianalisis sehingga menghasilkan rekomendasi dimensi *stope* pada setiap lokasi penambangan. Nilai *hydraulic radius* ini didapatkan dari perhitungan data masukan model blok berupa nilai Q' beserta ketiga faktor terkait pada grafik kestabilan Mathews.

Modul algoritma ini kemudian dapat digunakan pada berbagai algoritma optimisi sehingga dimensi *stope* sudah mempertimbangkan data kekuatan batuan untuk kemudian menentukan dimensi stope yang stabil menggunakan metode empirik.



Gambar- 7 Ilustrasi analisis dinding stope pada algoritma optimasi

KESIMPULAN

Pengembangan algoritma optimasi *stope* saat ini membuat pekerjaan optimasi pada penambangan bawah tanah berjalan dengan lebih efisien. Hal ini dapat dilakukan dengan perkembangan prinsip iterasi dalam algoritma serta aplikasi algoritma dalam 3-dimensi. Namun demikian, integrasi parameter geomekanika masih sangat kurang dikarenakan algoritma optimasi yang telah dikembangkan saat ini hanya berfokus pada parameter ekonomi. Suatu konsep penerapan parameter goemakanika dalam algoritma optimasi stope melalui integrasi grafik kestabilan Mathews diusulkan untuk dapat mengembangkan algoritma stope yang lebih lengkap dan komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

[1] J. Little, E. Topal, and P. Knights, "Simultaneous optimisation of stope layouts and long term production schedules," *Min. Technol.*, vol. 120, no. 3, pp. 129–136, Sep. 2011.

[2] M. R. Ahmadi and R. S. Shahabi, "Cutoff grade optimization in open pit mines using genetic algorithm," *Resour. Policy*, vol. 55, pp. 184–191, Mar. 2018.

[3] "Ultimate pit optimization with ecological cost for open pit metal mines," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 24, no. 5, pp. 1531–1537, May 2014.

[4] M. R. Ahmadi, "Cutoff grade optimization based on maximizing net present value using a computer model," *J. Sustain. Min.*, vol. 17, no. 2, pp. 68–75, Jan. 2018.

[5] M. Samavati, D. Essam, M. Nehring, and R. Sarker, "A new methodology for the open-pit mine production scheduling problem," *Omega*, vol. 81, pp. 169–182, Dec. 2018.

[6] A. Khan and C. Niemann-Delius, "Production Scheduling of Open Pit Mines Using Particle Swarm Optimization Algorithm," *Adv. Oper. Res.*, vol. 2014, pp. 1–9, 2014.

[7] Y. A. Sari and M. Kumral, "Sublevel stope layout planning through a greedy heuristic approach based on dynamic programming," *J. Oper. Res. Soc.*, pp. 1–10, Jan. 2020.

[8] D. S. S. Sandanayake, "Stope Boundary Optimisation in Underground Mining Based on a Heuristic Approach," Western Australian School of Mines Stope, 2014.

[9] Y. A. Sari and M. Kumral, "A planning approach for polymetallic mines using a sublevel stoping technique with pillars and ultimate stope limits," *Eng. Optim.*, pp. 1–13, Jul. 2019.

[10] D. S. S. Sandanayake, E. Topal, and M. W. A. Asad, "Designing an optimal stope layout for underground mining based on a heuristic algorithm," *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 25, no. 5, pp. 767–772, Sep. 2015.

[11] E. Topal and J. Sens, "A new algorithm for stope boundary optimization," *J. Coal Sci. Eng.*, vol. 16, no. 2, pp. 113–119, Jun. 2010.

[12] M. Ataee-Pour, "A critical survey of the existing stope layout optimization techniques," *J. Min. Sci.*, vol. 41, no. 5, pp. 447–466, Sep. 2005.

[13] A. Nhleko, T. Tholana, and P. Neingo, "A review

of underground stope boundary optimization algorithms," *Resour. Policy*, vol. 56, pp. 59–69, Jun. 2018.

[14] Mathews, K. E. Hoek, D. C. Wyllie, and S. B. V. Stewart, "Mathews, K. E. Hoek, D. C. Wyllie and S. B. V. Stewart, 'Prediction Of Stable Excavation Spans for Mining at Depths below 1000 Metres in Hard Rock,' Report to Canada Centre for Mining and Energy Tehnology, 1980. - References - Scientific Research Publishing," 1981.

[15] C. Alford, B. H.-P. of P. E. Conference, and undefined 2009, "Stope optimisation tools for selection of optimum cut-off grade in underground mine design."

[16] M. Ataee-Pour, "Optimisation of stope limits using a heuristic approach," *Inst. Min. Metall. Trans. Sect. A Min. Technol.*, vol. 113, no. 2, 2004.

[17] Y. Potvin, "Empirical open stope design in Canada," University of British Columbia, 1988.