

Artikel

Review Pengembangan Model Geometrik Massa Batuan Rekah (*Fractured Hard Rock*) Pada Metode Penambangan Dengan *In situ Recovery* (ISR)

Ericson^{1*}, Setia Pambudi², Yudi Arista Yulanda³, dan Muhammad El Hakim⁴

^{1,3,4}Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Jambi, Indonesia

²Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral, UPN Veteran Yogyakarta, Indonesia

*Corr Author : ericson@unja.ac.id

Abstrak: Metode *In situ Recovery* (ISR) umumnya digunakan untuk mengekstrak mineral dari batuan sedimen (medium berpori). Metode ini banyak digunakan contohnya pada tambang uranium. Kekar pada massa batuan adalah jalur utama aliran fluida karena permeabilitas matriksnya sangat kecil bahkan tidak ada pada sebagian besar batuan. Metode ISR khususnya pada batuan beku rekah saat ini mengalami beberapa tantangan. Dalam penelitian ini, tinjauan komprehensif tentang pendekatan yang dikembangkan untuk pemetaan, pemrosesan data, dan karakterisasi kekar (rekahan) pada masa batuan untuk membuat geometri kekar dan simulasi aliran fluida, serta kelarutan mineral. Pemodelan aliran fluida dalam massa batuan rekah adalah masalah utama, dan menjadi perhatian dalam penelitian ini. Ada berbagai metode untuk melakukan pemodelan ini. ISR pada batuan keras rekah berpotensi untuk dikembangkan. Namun, pemodelan memberikan indikasi perlunya keakuratan dan keandalan dalam pemodelan aliran fluida dalam rekahan batuan. Penelitian ini memberikan penjelasan mengenai perkembangan ISR melalui studi literatur sistematis serta gambaran dan ilustrasi metode yang digunakan untuk pemetaan, pengolahan, dan karakterisasi rekahan di bawah permukaan untuk menghasilkan model geometri massa batuan rekah, simulasi aliran fluida dalam massa batuan, dan kelarutan mineral. Parameter-input disediakan seperti karakteristik bidang dikontinuitas (kekar) dari interval kedalaman yang diteliti dan atribut hidrogeologi yang tersedia. Informasi ini diproses melalui beberapa tahapan, meliputi analisis kekar, generasi kekar dan model, serta analisis statis. Konsep di balik generasi kekar adalah penerapan beberapa fungsi distribusi probabilitas dan discrete fracture network (DFN).

Katakunci: *In situ Recovery* (ISR), Batuan Beku Rekah, Discrete Fracture Network

Abstract: In-Situ Recovery (ISR) method is commonly used to extract minerals from sedimentary rocks (porous medium). This method is widely employed, for example, in uranium mining. Fractures in the rock mass serve as the main pathways for fluid flow since the matrix permeability is very small and absent in most rocks. The ISR method, especially in fractured hard rocks, currently faces some challenges. In this study, a comprehensive review is provided on the developed approaches for mapping, data processing, and characterization of fractures (joints) in the rock mass to create fracture geometry and fluid flow simulation, as well as mineral solution. Modeling fluid flow in fractured rock mass is a major issue and is a focus of this research. There are various methods for conducting this modeling. ISR in fractured hard rocks has the potential for development. However, modeling indicates the need for accuracy and reliability in modeling fluid flow in rock fractures. This study provides an explanation of the development of ISR through a systematic literature review, as well as an overview and illustration of the methods used for mapping, processing, and characterizing subsurface fractures to generate a model of fractured rock mass geometry, fluid flow simulation in rock mass, and mineral solubility. Input parameters are provided, such as the characteristics of discontinuity planes (joint planes) from the investigated depth intervals and available hydrogeological attributes. This information is processed through several stages, involving fracture analysis, fracture and model generation, and static analysis. The concept behind fracture generation involves the application of some probability distribution functions and discrete fracture network (DFN).

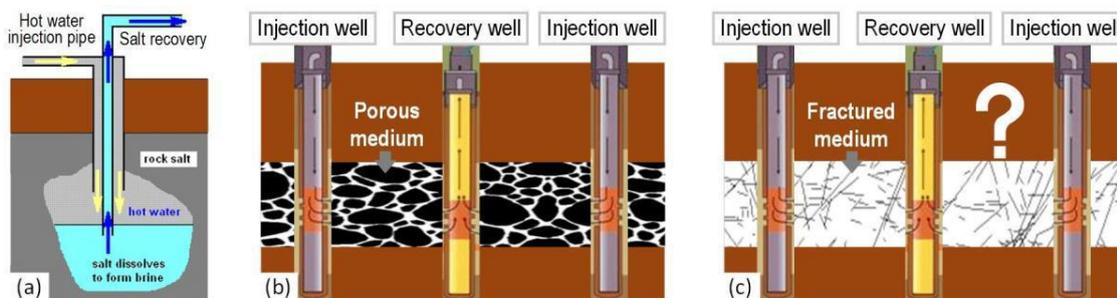
Keywords: *In situ Recovery* (ISR), Fractured Hard Rock, Discrete Fracture Network

PENDAHULUAN

Pertambangan di masa mendatang akan menjadi semakin sulit karena penurunan kadar bijih (*ore grade*). Hal ini terkait dengan sistem tambang bawah tanah dan distribusi mineral dalam tubuh bijih yang heterogen, serta asosiasi mineral kompleks dengan bijih tidak ekonomis, seringkali berada di lokasi yang sulit atau berisiko untuk diakses. Kadar bijih hampir turun setengahnya selama 30 tahun terakhir, membuat pengolahan mineral sebagian besar tidak ekonomis untuk mineral-mineral tersebut. Dalam kondisi ini, inovasi metode ISR bisa menjadi alternatif yang sesuai untuk mengekstraksi mineral berharga.

ISR bukanlah inovasi baru dalam industri pertambangan; telah digunakan dalam penambangan uranium selama lima puluh tahun terakhir, menyumbang 48% dari uranium yang ditambang di seluruh dunia. Selain uranium, mineral lain yang dapat diekstrak termasuk perak, tembaga, dan terkadang emas.

Gagasan tentang ISR pertama kali diterapkan pada *solution mining* untuk mengambil garam, potas, atau mineral lainnya seperti yang ditunjukkan dalam **Gambar 1(a)**. Kemudian, metode dikembangkan untuk ISR pada medium berpori seperti tanah dan batuan sedimen atau massa batuan seperti yang diilustrasikan dalam **Gambar 1(b)**. ISR pada media berpori telah berkembang pesat selama beberapa dekade terakhir, berkat adanya studi *void* batuan dan konektivitasnya, yang menghasilkan aliran fluida dari sumur injeksi (*injection well*) ke sumur ekstraksi (*production well*). ISR pada berbagai mineral/unsur dari massa batuan beku merupakan tantangan, karena kurangnya pengetahuan tentang kondisi kekar, konektivitasnya, dan akibatnya konduktivitas massa batuan dan kemampuan *recovery* logam target, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1(c)



Gambar 1. Tren Perkembangan Metode ISR (a) *solution mining*, (b) *porous medium leaching* saat ini, dan (c) masa mendatang ISR dari batuan keras dan rekah. (Sharifzadeh et.al., 2018)

Pada beberapa tambang uranium dan media berpori lainnya, metode *In situ Recovery* (ISR) adalah metode yang umum dan menguntungkan. Sejak awal tahun 1950-an, metode ini telah dipelajari di Amerika Serikat dan Uni Soviet sebagai alternatif atau mungkin pengganti pertambangan konvensional, terutama untuk menambang bijih yang kualitasnya rendah dan tidak ekonomis. Terlepas dari fakta bahwa teknik ini digunakan pada tambang uranium (batuan berpori), tujuan pengembangan metode ini adalah untuk menerapkannya pada deposit dalam batuan beku rekah yang mengandung logam berharga. Metode ISR juga diharapkan akan menjadi lebih berpotensi di masa mendatang dikarenakan faktor teknis, ekonomis dan lingkungan jika dibandingkan dengan metode tambang konvensional yang ada saat ini.



Gambar 2. Perbandingan *Insitu Recovery (ISR) Mining* dengan Metode Tambang Umum

Pertambangan dengan menggunakan metode ISR dapat diterapkan pada berbagai deposit logam seperti tembaga, uranium, dan emas. Namun, aplikasi yang sudah ada, ISR sebagian besar terbatas pada deposit uranium pada batuan lunak (*soft rock*) dan beberapa deposit tembaga terutama di Amerika Serikat [2]. Selain itu, telah terjadi kemajuan baru-baru ini mengenai ISR dari deposit emas dan tembaga yang lebih lanjut menyoroti potensi penambangan dengan *insitu leaching* (ISL) pada batuan keras (*hard rock*) terkait penggabungan elektrokinetika (EK) dan metode ISR[14]. Hal ini mampu menunjukkan kemungkinan aplikasi elektrokinetika, elektroda, dan arus tegangan rendah pada medium berpermeabilitas rendah (batuan utuh). Selain itu metode ISR semakin banyak digunakan secara global, dan dapat memberikan manfaat ekonomi lebih karena dapat dikombinasikan dengan pemanfaatan mikroorganisme[14].

Bagaimanapun, metode ISR memiliki sejumlah masalah. Salah satu masalah utama adalah pemodelan dan penilaian permeabilitas aliran dalam batuan beku rekah. Permeabilitas massa batuan adalah salah satu faktor utama awal untuk menentukan kelayakan proyek ISR. Sebenarnya, beberapa deposit tidak cocok secara alami menggunakan metode ekstraksi ini; misalnya batuan memiliki permeabilitas rendah, dan kondisi ini akan mempengaruhi keberhasilan metode ISR. Oleh karena itu, masalah ini harus diatasi melalui pemodelan dan penilaian permeabilitas massa batuan.

METODE PENELITIAN

ISR pada deposit batuan beku (*hard rock*) mengalami banyak tantangan sehingga masih belum luas digunakan di dunia pertambangan. Metode pembuatan rekahan (ISR) pada batuan ini memiliki tantangan, terutama pada tubuh bijih batuan keras pada kedalaman di mana permeabilitas awalnya tidak ada, dan isu seputar injeksi larutan kimia yang melewati mineral yang ditargetkan turut menjadi masalah. Permeabilitas atau konduktivitas hidrolis deposit menjadi hal yang penting dalam *leaching in situ* batuan beku rekah. Namun, dalam batuan keras yang rekah, kekar biasanya tertutup rapat, sehingga menghasilkan konduktivitas hidrolis yang sangat rendah karena *aperture* kekar ada pada skala mikron. Masalah ini terutama disebabkan oleh permeabilitas massa batuan. Syarat ISR akan berhasil jika terdapat permeabilitas yang memadai atau konduktivitas hidrolis yang memadai dalam tubuh bijih. Oleh karena itu, sangat dibutuhkan kondisi rekahan batuan dan penilaian potensi permeabilitas massa batuan. Ketika permeabilitas rendah, untuk meningkatkannya diperlukan adanya kekar (rekahan) dalam massa batuan. Rekahan ini berfungsi sebagai jalur bagi larutan *leaching* untuk mengekstraksi mineral yang dituju. Selain itu, aliran fluida melalui rekahan harus disimulasikan guna melihat kelayakan dari proses ISR pada masa batuan.

Metodologi penelitian ini berdasarkan *systematic review* dari berbagai sumber dalam periode 2000-2023. Terdapat berbagai sumber rujukan primer dari pengindeks *scopus* yang membahas mengenai perkembangan penelitian di bidang ISR dan studi kekar (*joint*) pada massa batuan dan beberapa informasi dari laporan penelitian seputar ISR. Review literatur difokuskan dengan kata kunci *in-situ leaching* dan *in-situ recovery*. Sumber tersebut dikelompokkan ke dalam jenis artikel penelitian, artikel ulasan, *book chapter* dan makalah konferensi ilmiah (*proceeding*). Literatur juga dianalisis berdasarkan negara penelitian yang berkaitan dengan kepentingan nasional negara dengan keterdapatannya penggunaan metode ISR.

Literatur yang didapatkan dikombinasikan dengan beberapa hasil simulasi komputer dengan menggunakan program komputer FracMan® milik Golder Associates. Program komputer ini mampu melakukan pemodelan rekahan massa batuan dengan parameter input yang disesuaikan. Parameter berasal dari penelitian terdahulu dan rujukan terkait ataupun asumsi umum yang dimisalkan. Perangkat lunak ini akan memberikan hasil berupa model rekahan massa batuan beku (keras) disertai dengan model aliran fluida yang dapat divisualisasikan. Dalam hal ini analisis yang dilakukan dalam kondisi statis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perkembangan dan Tren Penelitian di Bidang ISR

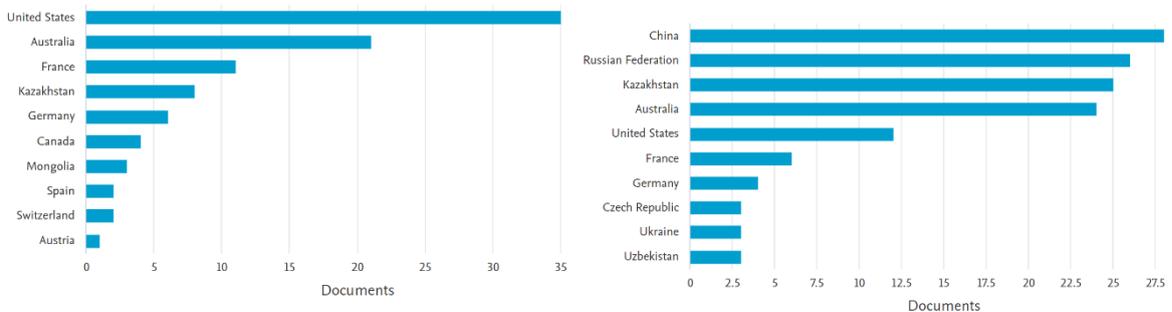
Istilah *insitu recovery* (ISR) dan *insitu leaching* (ISL) merupakan dua terminologi yang sama dan merujuk pada mekanisme penambangan yang serupa. Kedua kata kunci ini menjadi pokok dalam mengidentifikasi penelitian dan publikasi di bidang ISR. Berdasarkan basis data yang dimiliki oleh institusi pengindeks Scopus.com kedua kata kunci tersebut dapat ditelusuri. Hal ini memungkinkan untuk melihat kecenderungan dan perkembangan penelitian di bidang ISR dalam kurun waktu tertentu. Di samping itu pula, banyak atribut lainnya seperti peneliti dan jumlah publikasinya, negara tempat penelitian, jenis dokumen, subyek ilmu terkait hingga sponsor penelitian.

Parameter pertama yang didiskusikan adalah periode penelitian dan publikasi di bidang ISR. Beberapa karya ilmiah terkait ISR sebenarnya telah teridentifikasi di scopus.com sejak 1980 dengan frekuensi yang minimal. Tren penelitian diamati dari tahun 2000 hingga 2023. Hal ini dikarenakan di awal tahun 2000an terdapat lonjakan penelitian di bidang ISR yang cukup signifikan dibandingkan dengan era 2000an ke bawah. Penelitian ISR khususnya di media berpori dengan komoditas Uranium semakin meningkat. Hal ini sejalan dengan berkembang dan meningkatnya teknologi dan informasi, metode penambangan alternatif ramah lingkungan), peralihan ke revolusi industry 4.0 serta permintaan akan energi bersih yang berasal dari zat radioaktif [25] [4]. Tren penelitian ISR baik dengan menggunakan kata kunci ISR ataupun ISL mulai meningkat dari tahun 2017 ke atas dengan kecenderungan yang fluktuatif. Grafik penelitian di bidang ISR dapat dilihat di **gambar 3** di bawah.



Gambar 3. Tren Penelitian di Bidang ISR 2000-2023 dengan Kata Kunci “ISL” (atas) dan “ISR” (bawah) di pengindeks Scopus

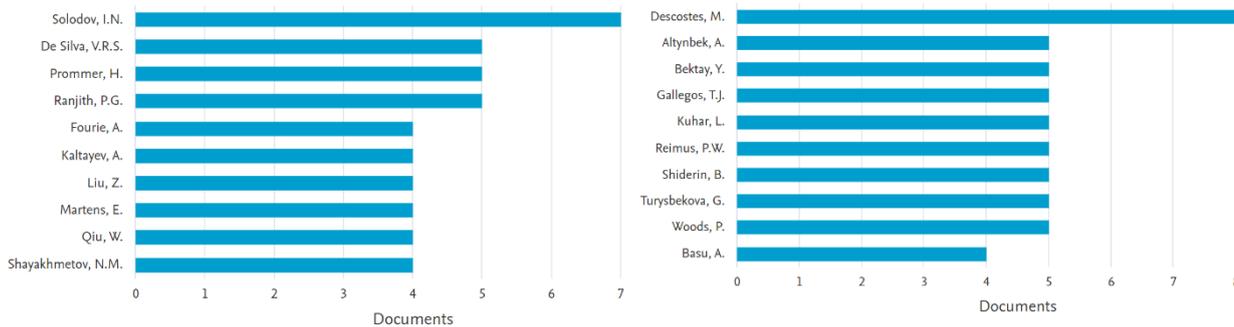
Perkembangan penelitian di bidang ISR didominasi oleh Amerika Serikat, Australia, Rusia, Kazakhstan dan Cina. Mayoritas pekerjaan penelitian yang dikerjakan di Amerika Serikat menggunakan istilah ISL sedangkan penelitian di Cina memakai terminology ISR. Perkembangan ISR di negeri-negara tersebut didukung dengan beragamnya publikasi di bidang ISR dalam kurun waktu 2000-2023. Amerika Serikat mendominasi dengan 35 publikasi di bidang ISR sedangkan Cina dengan 28 Publikasi. Australia juga mengembangkan metode ISR dengan publikasi di atas 20 dokumen di bidang ISR, jumlah ini dapat lebih besar dibanding Cina dan Amerika Serikat dikarenakan penelitian di Australia menggunakan dua istilah berbeda. Dari sisi kepenulisan artikel, penulis Solodov dan Descostes sama-sama mendominasi dalam penelitian ISR. Keduanya lebih konsisten menggunakan istilah ISR atau ISL saja dalam penelitiannya. Perbandingan negara penelitian dan penulis karya ilmiah di bidang ISR dalam dilihat pada **gambar 4 dan 5**.



Gambar 4. Negara Penelitian di bidang ISR terpublikasi di Scopus rentang 2000-2023 dengan Kata Kunci “ISL”

Documents by author

Compare the document counts for up to 15 authors.



(kanan) dan “ISR” (kiri)

Gambar 5. Peneliti/penulis di bidang ISR terpublikasi di Scopus rentang 2000-2023 dengan Kata Kunci “ISL”

(kanan) dan “ISR” (kiri)

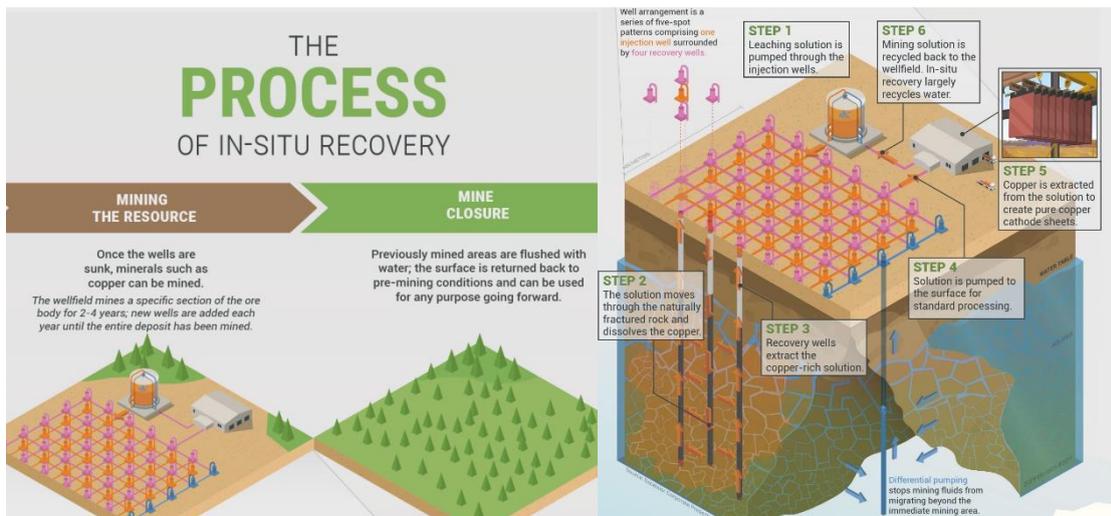
Proses Penambangan dengan Metode ISR

Penambangan konvensional mengeluarkan bijih atau mineral dari dalam batuan kemudian memecahkannya, dan memprosesnya untuk mengekstrak mineral yang diinginkan. Di Amerika Utara, *insitu leaching* (ISL) juga dikenal sebagai *solution mining*, atau metode *insitu recovery* (ISR), mengambil mineral bijih dari tempat di dalam batuan dan mengekstraksi mineral dari bijih dengan melarutkannya dan memompanya ke permukaan. Akibatnya, tidak ada gangguan permukaan (*landscape*) yang terjadi, dan tidak ada limbah atau batuan sisa (*waste*) yang dihasilkan. Tubuh bijih (*orebody*) harus dapat ditembus oleh cairan kimia (*lixiviant*) yang digunakan dan tidak mencemari air tanah di luar tubuh bijih.

Dikarenakan kondisi geologi yang harus tepat, ISR tidak banyak digunakan. Sedikit tempat di seluruh dunia memenuhi syarat-syarat berikut:

- Tubuh bijih yang sangat permeabel: Untuk tembaga, tubuh bijih harus secara alami terkekarkan, rekah dan permeabel.
- Ditambang. Mineral yang dituju harus dapat larut dalam fluida yang tepat—biasanya asam lemah—untuk digunakan.
- Ore di bawah *water table*: Deposit mineral harus berada di bawah *water table* sehingga fluida dapat bergerak di seluruh tubuh bijih.

Penambang uranium ISR menggunakan air tanah yang terkandung di dalam tubuh bijih yang diperkaya dengan zat kimia dan biasanya oksidan. Penambangan dapat dimulai setelah kondisi tersebut dipenuhi dan lubang bor ditambang ke dalam tubuh bijih. Sumur injeksi digunakan untuk memompa larutan pelarut (*solvent*). Kemudian, larutan ini diinjeksikan melalui tubuh bijih dalam massa batuan. Larutan bergerak melalui rekahan massa batuan dan melarutkan mineral. Setelahnya larutan kaya mineral (*pregnant solution*) dialirkan ke permukaan melalui sumur produksi (*recovery well*), mineral logam dapat diekstraksi. Larutan yang kaya mineral diekstrak dari sumur produksi, dan kemudian dipompa ke permukaan untuk diproses. Setelah suatu area ditambang, sumur dibilas (*flushing*) dengan air untuk membersihkan sisa *solvent* dari sumur. Setelah itu, permukaan dapat digunakan kembali selanjutnya.



Gambar 6. Proses Penambangan dengan Metode *ISR Mining*
(Excelsior Mining Corp, 2019)

Tahapan Pemodelan Massa Batuan dan Aliran Fluida Pengumpulan Data *Subsurface*

Data kondisi batuan di bawah permukaan merupakan aspek penting dalam memberikan gambaran kondisi batuan sebagai media alir fluida dalam penerapan metode *ISR*. *Data collection* menentukan tingkat keberhasilan dalam pemodelan massa batuan. Berbagai penelitian telah menyebutkan pentingnya tahapan ini dan sebagai permulaan dalam kegiatan penambangan metode *ISR*.

Pada kondisi batuan yang dalam-sangat dalam, rekahan berfungsi sebagai jalur utama aliran fluida. Jumlah rekahan yang memadai dan terhubung ke tubuh bijih berhubungan dengan peningkatan kelarutan. Hal ini sangat penting untuk mendapatkan performa *ISR* yang memuaskan. Di samping itu untuk mencegah bocornya aliran fluida, *host rock* juga harus dalam kondisi impermeabel. Oleh karena itu, karakterisasi rekahan bawah permukaan yang realistis dan akurat menjadi sangat penting untuk mengukur kinerja *ISR*. Kegiatan pendeteksian, pemetaan, serta prediksi kemunculan kekar dan sumbernya di bawah permukaan adalah langkah penting dalam mengevaluasi jaringan kekar dan pemodelan aliran fluida untuk berbagai aplikasi [18].

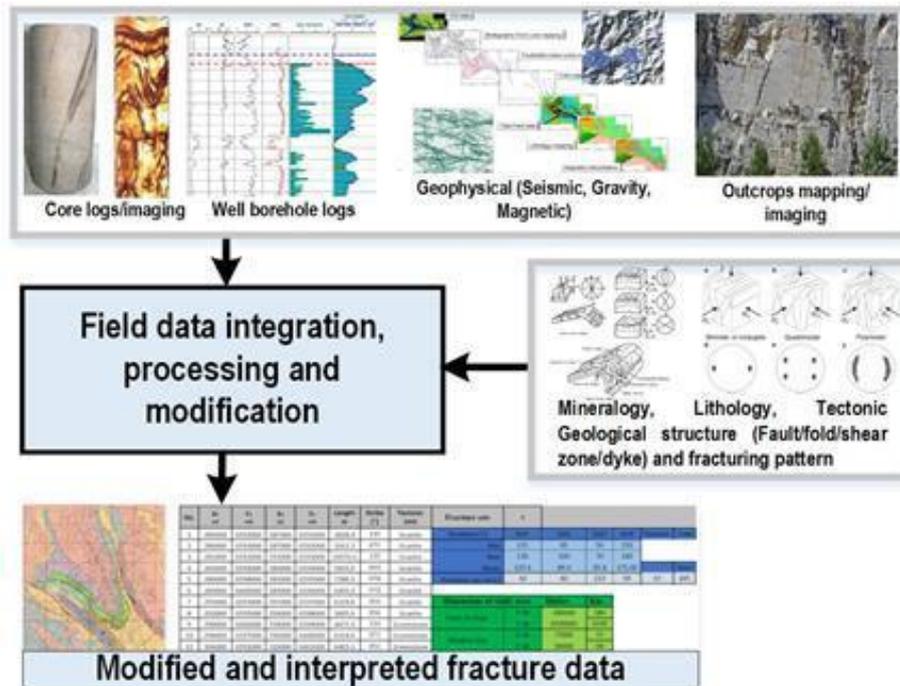
Beberapa metode untuk memeriksa dan mengestimasi kondisi bawah permukaan (*subsurface*) telah banyak diaplikasikan. Metode-metode tersebut dapat berupa pendekatan geofisika dan geologi yaitu:

- Pemetaan dan pencitraan singkapan dan *core logging* menggunakan pendekatan survei satu dimensi ataupun pemetaan udara (*aerial mapping*) survey dua dimensi dengan jumlah parameter yang terbatas adalah dua contoh metode pemetaan langsung dan tidak langsung secara tradisional yang sering digunakan [29] [28].
- Well-borehole logs* dan gambar/profile yang juga memberikan informasi terbatas tentang karakteristik rekahan bawah permukaan [21].
- Pendekatan geofisika seperti seismik, magnetik, dan gravitasi hanya menunjukkan struktur utama dalam distribusi spasial [16].

Banyak kegagalan yang dihadapi pada sumur *recovery* dikarenakan aplikasi karakteristik kekar yang diukur secara langsung. Data yang diukur dapat memiliki efek positif atau negatif pada aliran fluida jika diinterpretasikan dengan benar dengan mempertimbangkan informasi mineralogi, litologi, dan tektonik global, serta struktur rekahan pada massa batuan.

Selanjutnya data rekahan (kekar) dikombinasikan dengan data lain yang terkumpul. Hal

ini dapat dilakukan dengan teknik pemetaan yang memanfaatkan peta medan aeromagnetik. Selain itu, peta seismik dan gravitasi juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi atribut/sifat kekar pada skala yang lebih besar. Inisiasi kekar, propagasi, dan pola rekahan dapat diestimasi pada skala yang lebih besar dengan pengujian laboratorium pada specimen batuan, seperti uji uniaxial dan tiga-aksial. Semua data yang terkumpul kemudian dimasukkan ke dalam database, dan kemudian dapat dilakukan analisis bias pada data tersebut dengan menggunakan bantuan program komputer.



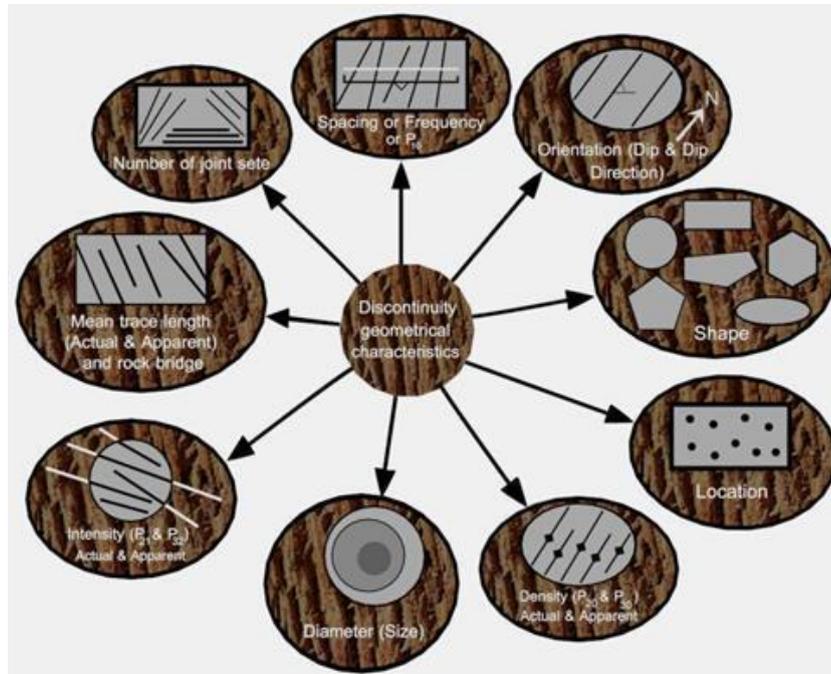
Gambar 7. Prosedur Pengumpulan dan Pemrosesan Data *Subsurface*.

Analisis Data Kekar

Semua karakteristik atau atribut kekar yang meliputi orientasi (*joint orientation*), bentuk, ukuran, panjang (*persistency*), bukaan (*aperture*), jumlah keluarga kekar (*joint set*), densitas, intensitas, ukuran blok, bentuk, dan volume, akan dianalisis. Data ini menjadi data yang dapat diandalkan dari tahapan sebelumnya. Namun, karakterisasi rekahan (kekar) belum banyak diteliti. Secara umum, sebagian besar penelitian berfokus pada data kekar yang dipetakan langsung dari di daerah singkapan (*outcrop*) [20], hal ini tentunya tidak bisa dijadikan pegangan seutuhnya dalam memberikan gambaran kondisi kekar pada kedalaman tertentu. Di samping itu juga, terdapat *core logging*, ataupun penggunaan metode karakterisasi *subsurface* tidak langsung (geofisika) seperti magnetik, gravitasi, seismik [16]. Tantangan yang sebenarnya adalah banyak karakteristik kekar lainnya, seperti pola kekar, panjang, bentuk, dan ukuran, tidak dipetakan [5]. Meskipun karakteristik kekar sangat penting, sampai saat ini belum ada metode sistematis untuk karakterisasi rekahan yang melibatkan kombinasi kondisi geologi riil pada kedalaman tertentu dengan data yang dipetakan. Dengan memberikan data input yang dapat diandalkan untuk pemodelan, serta dengan memahami distribusi dan konektivitas kekar dalam massa batuan rekah maka ada potensi besar untuk perbaikan dalam simulasi aliran fluida metode ISR.

Saat ini, sebagian besar penelitian tentang karakteristik kekar menggunakan metode statistik, geostatistik, atau Artificial Intelligence (AI). Sangat penting untuk diingat bahwa dalam kondisi kekar tertentu, seperti gaya tektonik atau pendinginan, batuan yang berbeda menunjukkan mode rekahan yang berbeda dan distribusi yang berbeda (**Gambar 8**). Sebagai contoh, distribusi Fisher [10] digunakan untuk menentukan orientasi rekahan; distribusi eksponensial dan lognormal lognormal [3] dan distribusi gamma [12] digunakan untuk distribusi panjang jejak kekar (*trace*

length). Tim peneliti berusaha untuk mengkonseptualisasikan dan mengklasifikasikan hubungan antara jenis batuan, regim tektonik, dan metode yang paling cocok untuk menunjukkan karakteristik rekahan dan distribusinya.



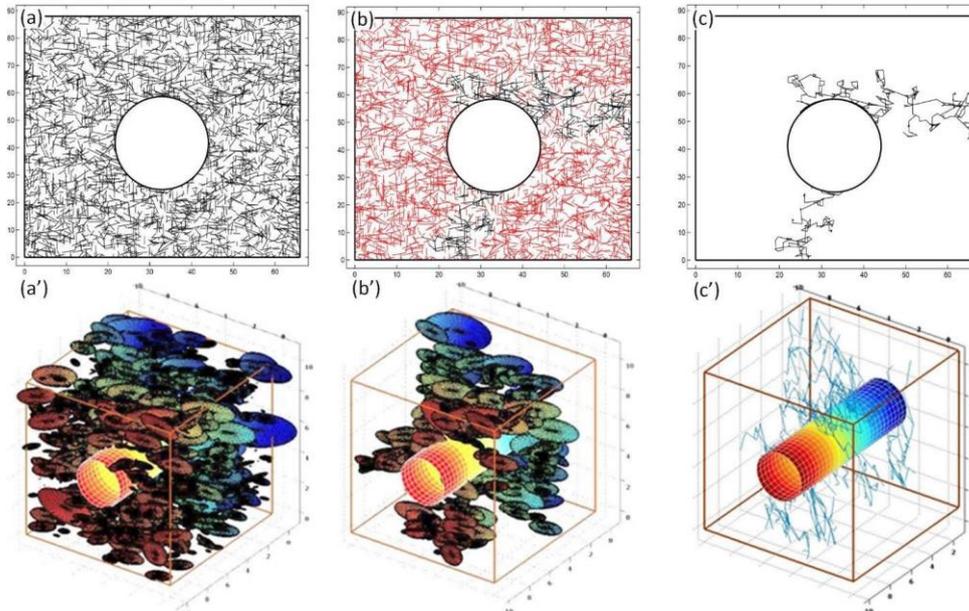
Gambar 8. Karakteristik Geometri Kekar (Kamali et al. 2017).

Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 8**, penentuan sumber tegangan (*stress*) yang menyebabkan rekahan mampu meningkatkan presisi interpretasi struktural pada semua skala. Sebelum melakukan analisis data sistem rekahan (statistik, geostatistik, dan jaringan neural), dengan berpatokan pada asal dan kehadiran rekahan dapat membantu menghilangkan data yang tidak normal (*outlier*) atau memberikan bobot yang sesuai dalam analisis data. Metode analisis data ini memiliki makna statistik yang lebih besar dan konsisten dengan bukti tekanan tektonik dan regional. Dalam modul 2, pemodelan geometris, sifat rekahan (kekar) yang dapat diandalkan (terutama orientasi rekahan, panjang kekar, dan bukaan) yang diperoleh dari langkah ini akan digunakan sebagai input. Oleh karena itu, temuan ini sangat penting; metode teknis dan eksperimental yang canggih, serta pengalaman dan penilaian rekayasa sangat dibutuhkan.

Model Geometrikal Massa Batuan

Sangat penting untuk membuat model geometris yang dapat diandalkan dari media retak yang didasarkan pada pengukuran dan realisme geologi, menemukan konektivitas rekahan, dan memperkirakan volume aliran fluida dengan mengintegrasikan data yang diukur, diuji, dan dikumpulkan. Pemodelan aliran fluida dengan metode numerik, stokastik, dan empiris telah dilakukan dengan sukses [6] [24]. Salah satu pendekatan utama untuk mensimulasikan jaringan rekahan adalah pemodelan *Discrete Fracture Network* (DFN). Upaya untuk memodelkan DFN tiga dimensi

dan kode komputasi dua dimensi yang dikenal sebagai "FNETF" telah diaplikasikan saat ini [9] [24] Kode DFN dikembangkan menggunakan pendekatan Monte Carlo untuk menghasilkan realisasi DFN dua dimensi berdasarkan parameter statistik dari sifat geometris rekahan.



Gambar 9. Representasi skematis pembentukan dan regulasi model DFN: (a, a') wilayah pembentukan dan penggalian (ekskavasi), (b, b') menemukan rekahan yang tidak aktif secara hidrolik, (c, c') menghapus rekahan yang tidak aktif secara hidrolik dan "buntu" (Dimodifikasi dari Sharifzadeh dan Javadi, 2011, Karimzade et al., 2017).

Gambar 9 menunjukkan ilustrasi dari proses yang terlibat dalam pembuatan dan pengaturan model DFN. Kedua model menempatkan jaringan rekahan di wilayah yang dikenal sebagai "wilayah pembuatan". Fitur linear menunjukkan rekahan. Lokasi mereka di wilayah pembuatan, orientasi sumbu koordinat yang terkait, dan panjang yang ditentukan oleh fungsi densitas probabilitas kumulatif menentukan sifat geometris mereka. Setelah semua rekahan dibuat, sebuah domain aliran dipilih untuk menganalisis aliran fluida yang terletak sepenuhnya di dalam area pembuatan. Pada tahap selanjutnya, batas pekerjaan, seperti terowongan dan sumur, dibuat melalui domain aliran (**Gambar 9-a-a'**). Selanjutnya, rekahan hidrolik yang tidak aktif (ditunjukkan oleh rekahan berwarna merah pada **Gambar 9b-b'**), dan "ujung mati (buntu)" rekahan yang saling terhubung dihapus dari domain aliran (**Gambar 9-c-c'**).

Setelah regularisasi, simulasi aliran digunakan untuk mengevaluasi *recovery*. Gambar 9-b-b' menunjukkan bahwa sebagian besar rekahan hidrolik tidak aktif, dan sebagian besar fluida mengalir dari beberapa persen diskontinuitas. Ini adalah langkah awal dalam pemodelan aliran fluida rekahan diskrit. Pada saat ini, baik model geometris maupun model jaringan dikembangkan menggunakan atribut rekahan realistis seperti panjang rekahan, bukaan, dan jumlah set kekar, yang belum sepenuhnya dipertimbangkan sebelumnya baik dalam multi-skala dan tiga dimensi. Intensitas linear, areal, dan volumetrik dari tiga keluarga kekar bersama yang diukur di lubang (ekskavasi) menggunakan teknik *window sampling* lingkaran dan persegi panjang jarang digunakan untuk memvalidasi model DFN. Kode jaringan rekahan 3D dapat memperhitungkan sifat rekahan seperti panjang, jarak, jumlah set, dan bukaan dalam insitu recovery (ISR).

Model Pendekatan Aliran Fluida dalam Batuan Rekah

Proses aliran fluida dalam jaringan rekahan sangat rumit. Fluida sering mengalir melalui sebagian kecil rekahan, dan mayoritas rekahan tetap tidak aktif secara hidrolika. Berbagai model telah diusulkan berdasarkan kondisi massa batuan dan proporsinya terhadap skala zona pemodelan. **Gambar 10** memberikan gambaran singkat tentang metode pemodelan hidrolik. Dalam simulasi aliran fluida skala kecil, aliran dapat dianggap sebagai aliran rekahan tunggal atau media berpori. Dalam simulasi aliran fluida skala besar, metode pemodelan kontinu dan diskontinu dapat digunakan. Salah satu perbedaan utama antara metode pemodelan kontinu dan diskontinu dalam hal perilaku hidrolik batuan rekah adalah bagaimana rekahan berkontribusi pada aliran fluida. Dalam metode kontinu, massa batuan rekahan digambarkan sebagai medium berpori homogen

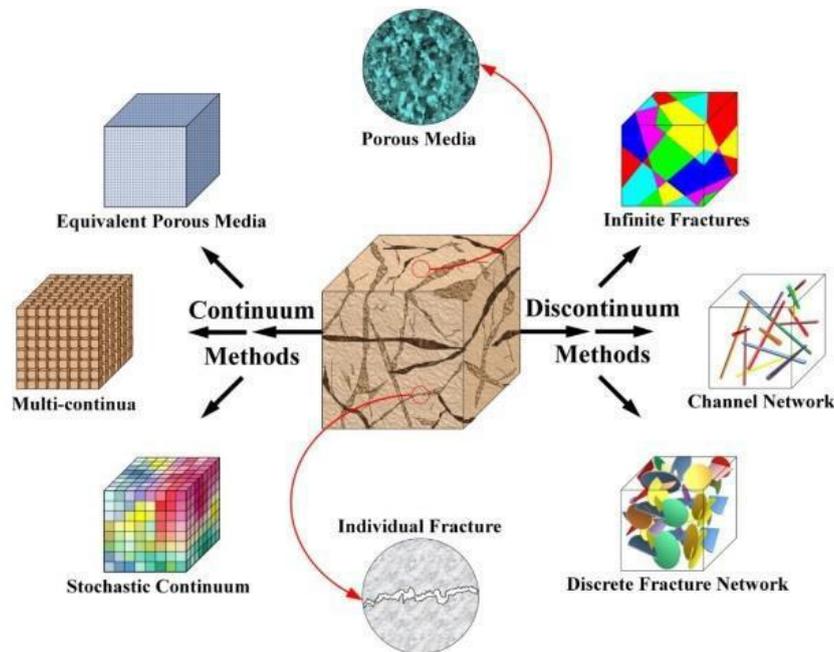


Figure 10. Berbagai Proses Hidrolik Dalam Media Rekah dengan Klasifikasi Metode Pemodelan (Sharifzadeh et al. 2012).

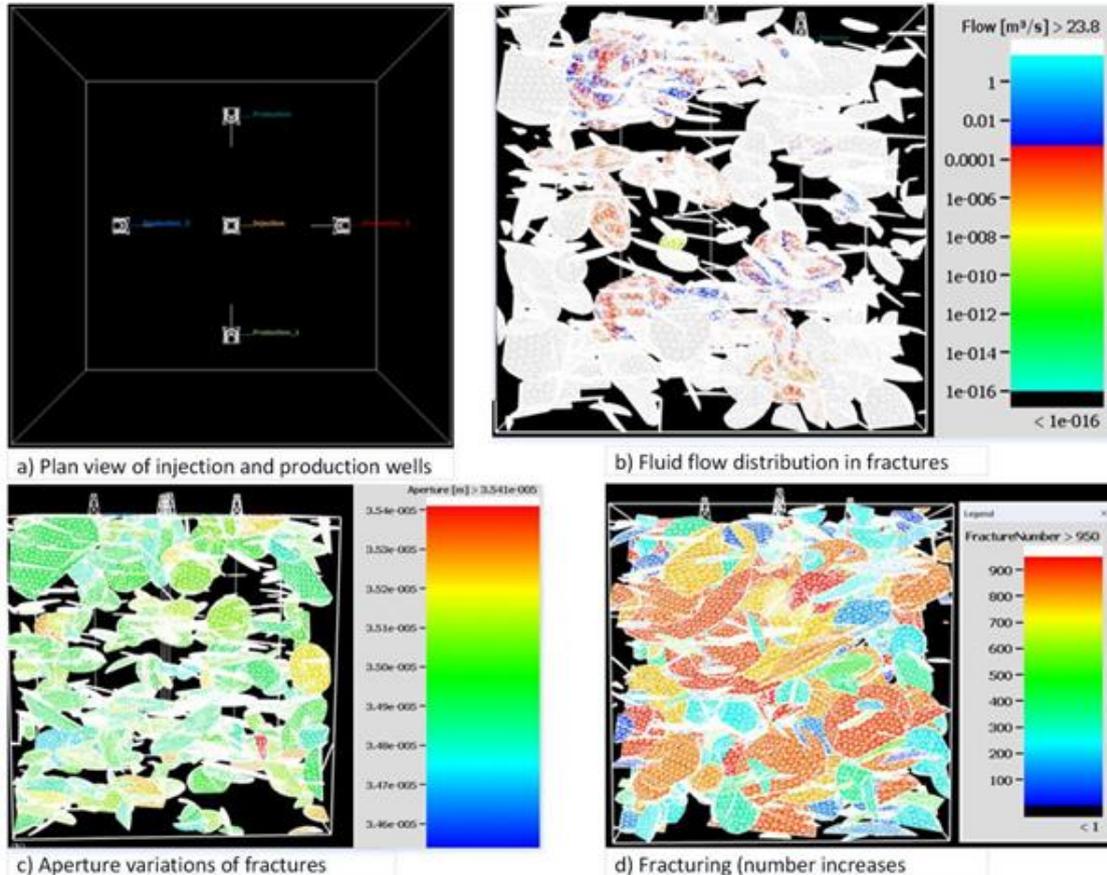
dengan properti hidrogeologi yang juga homogen, tetapi dalam metode diskontinu, massa batuan ditunjukkan secara eksplisit sebagai fitur hidrolik yang didefinisikan secara geometris sebagai rekahan diskrit individual.

Di sini disajikan contoh simulasi aliran fluida dalam batuan rekahan untuk tambang di Australia Barat. Data rekahan tambang diperoleh dari sumur bor pada kedalaman antara 1500m dan 2000m. Untuk melakukan simulasi aliran fluida, ini juga didukung dengan informasi hidrogeologi tambahan. Jaringan rekahan diskrit yang digunakan dalam paket perangkat lunak FracMan® digunakan untuk mensimulasikan kondisi alami (**Gambar 11**). **Gambar 11-a** menunjukkan model awal yang mencakup domain penelitian, lokasi produksi, dan sumur injeksi. Selanjutnya, massa batuan rekahan alami dimodelkan untuk mempelajari kinerja ISR (**Gambar 11-b**).

Selanjutnya, variasi pada faktor-faktor penting seperti orientasi set rekahan, aperture, intensitas rekahan, peningkatan jumlah rekahan, dan rekahan lainnya disimulasikan (**Gambar 11-d**). Sangat jelas bahwa lebih banyak rekahan memiliki konektivitas dan pemotongan dengan dinding produksi yang lebih besar, yang menghasilkan kinerja ISR yang lebih baik. Hasil menunjukkan bahwa, karena aperture yang lebih besar meningkatkan laju aliran, pola sumur injeksi dan produksi harus dirancang dengan mempertimbangkan orientasi rekahan. Konduktivitas hidrolik dapat digunakan pada formasi batuan yang padat untuk mengoptimalkan aliran. Disarankan juga

bahwa jarak antara sumur injeksi dan produksi harus disesuaikan dengan lokasi rekahan.

Gambar 11. Pemodelan aliran fluida dalam jaringan rekahan diskrit (DFN) untuk mensimulasi ISR pada



batuan keras rekah (Dimodifikasi dari Waheed, 2017).

Pola Mineralisasi dan Kemampulindian (*Leachability*) Mineral Target

Jenis mineralisasi dan distribusi ore juga penting karena berdampak besar pada kelebihan leaching. Mineral di dalam mineral inert atau batuan dengan tingkat absorpsi yang tinggi tidak diinginkan. Mineral berada di dalam pori terbuka, rekahan, dan batuan yang sangat teralterasi. Kelebihan leachability senyawa target juga merupakan komponen penting dalam penambangan ISL. Komponen berbahaya yang meleleh dapat menjadi masalah besar dalam ISR, jadi sangat penting untuk memilih lixiviant yang tepat dan melakukan kalibrasi dan asidifikasi untuk dinamika yang terlibat dalam leaching dan ekstraksi [22].

KESIMPULAN

ISR mining memiliki banyak manfaat dibandingkan dengan mining konvensional. Yang paling penting adalah bahwa penambangan dengan metode ISR tidak memerlukan open pits, waste dumps, atau tailings, yang berarti bahwa terjadi lebih sedikit kerusakan pada lahan daripada metode penambangan konvensional yang menggunakan open cut atau underground mining. Permeabilitas diidentifikasi sebagai faktor utama yang mengatur ISR dalam deposit batuan yang keras. Akibatnya, karakterisasi dan pemrosesan data retakan dengan akurat dapat secara signifikan menjamin keberhasilan metode ISR. Secara buatan menciptakan rekahan bisa menjadi cara alternatif untuk membuka jalur bagi fluida agar mengalir dari sumur injeksi ke sumur produksi dari perspektif metalurgi, distribusi dan gaya mineralisasi, serta pemilihan pelarut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didasarkan dari ide yang dikembangkan dan bantuan dari Dr. Mostafa Sharifzadeh, Prof. Chris Aldrich dan *Mining Education Australia* (MEA). Ucapan terima kasih kepada pihak

yang terlibat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bahamondez, C. & Arancibia, E. & Castro, Raul & Vargas, T.. (2016). In situ mining through leaching: Experimental methodology for evaluating its implementation and economic considerations. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 116. 689-698. 10.17159/2411-9717/2016/v116n7a11.
- [2] Dershiwitz, B. (2011). Discrete fracture network modelling in support of in situ leach mining. *Mining Engineering Magazine*.
- [3] Gumede H, Stacey TR (2007) Measurement of typical joint characteristics in South African gold mines and the use of these characteristics in the prediction of rock falls. *J S Afr I Min Metall* 107:335–344.
- [4] Haque, N., & Norgate, T. (2014). The greenhouse gas footprint of in-situ leaching of uranium, gold and copper in Australia. *Journal of Cleaner Production*, 84, 382–390. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.033>
- [5] Holland, M., N. Saxena, and J. L. Urai, 2009, Evolution of fractures in a highly dynamic thermal-hydraulic, and mechanical system: (II) Remote sensing fracture analysis, *Jabal Shams, Oman Mountains: GeoArabia*, v. 14, p. 163– 194.
- [6] Javadi M, Sharifzadeh M, Shahriar K (2016). “Uncertainty analysis of groundwater inflow into underground excavations by the stochastic discontinuum method: Case study of Siah Bisheh pumped storage project, Iran” *Tunnelling and Underground Space Technology* 51 (2016) 424–438, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2015.09.003>.
- [7] Jere P. (2016). The geological structure framework and its implication on the local rock mass fracturing of eastern goldfields superterrane, Yilgarn Craton, Western Australia, Master Thesis, Curtin University.
- [8] Kamali Bandpey A., Shahriar K., Sharifzadeh M., Marefvand, P. (2017) Comparison of methods for calculating geometrical characteristics of discontinuities in a cavern of the Rudbar Lorestan power plant, *Bull Eng Geol Environ*, DOI 10.1007/s10064-017-1145-x.
- [9] Karimzade E., Sharifzadeh M., Zarei H.R., Shahriar K. and Cheraghi Seifabad M. (2017) Prediction of water inflow into underground excavations in fractured rocks using a 3D discrete fracture network (DFN) model, *Arab J Geosci* (2017) 10: 206 DOI 10.1007/s12517-017-2987-z
- [10] Kemeny, J., Post, R., 2003. Estimating three-dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces. *Computer & Geosciences* 29, 65–77. PII: S0098-3004(02)00106-1. Sari M, Karpuz C, Ayday C (2010) Estimating rock mass properties using Monte Carlo simulation:
- [11] Kondwani B. (2016). The Applicability of In Situ Leach Mining to Hard Rock Metal Deposits – Numerical Modelling of Fluid flow in Fractures. Bachelor thesis, Western Australia, Master Thesis, Curtin University.
- [12] Kulatilake PHSW, Um J, Wang M, Escandon RF, Narvaiz J (2003) Stochastic fracture geometry modelling in 3-D including validations for a part of Arrowhead East Tunnel, California, USA. *Eng Geol* 70:131–155.
- [13] Li Z, Zhang Y, Luo T, Xia P, Mu H, Sun P, Wang X, Wang J. In-Situ Leaching Mining Technique for Deep Bauxite Extraction and the Countermeasures for Water Pollution Prevention: An Example in the Ordos Basin, China. *Water*. 2023; 15(13):2381. <https://doi.org/10.3390/w15132381>
- [14] Martens, E., Prommer, H., Dai, X., Breuer, P. and Fourie, A. (2018) 'Testing The Feasibility of Electrokinetic In Situ Leaching'. ALTA 2018 In Situ Recovery (ISR) Symposium
- [15] Mauldon, M., Rohrbaugh Jr., M.B., Dunne, W.M., Lawdermilk, W., 1999. Fracture intensity estimates using circular scanlines. In: 37th U.S. Symposium on Rock Mechanics
- [16] Mauldon, Dunne, and Rohrbaugh Jr., 2001, Circular scanlines and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces: *Journal of Structural Geology*, v. 23, p. 247–258, doi:10.1016/S0191-8141(00)00094-8.
- [17] Mudd, G. (1998). *An Environmental Critique of In Situ Leach Mining: The Case Against Uranium Solution Mining*. Melbourne: Uranium Information Centre.
- [18] Nelson R.A. 2001, *Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs*. Gulf Professional Publishing, ISBN 0-88415-317-7. P350.
- [19] (USRMS), Amadei, Kranz, Scott & Smeallie (Ed), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 052 3.
- [20] Priest, S.D., 1993. *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. Chapman and Hall Press, London, UK, 473 pp.
- [21] Rohrbaugh Jr., M.B., Dunne, W.M., Mauldon, M., 2002. Estimating fracture trace intensity, density and mean length using circular scanlines and windows. In: *The American Association of Petroleum Geologists. AAPG Bulletin* 86 (12), 2089-2104. doi:10.1306/61EEDE0E-173E-11D7-8645000102C1865D.
- [22] Sereckin, M., Zabolotsky, A., & Jeffress, G. (2016). In situ recovery, an alternative to conventional mining methods of mining: Exploration, resource estimation, environmental issues, project evaluation and economics. *Ore Geology Reviews*, 2016(79), 500 - 514.
- [23] Sharifzadeh, M., Javadi, M. & Zarei, H.R. (2012) The Role of Geological Structures to Tunnel In-flow, Modelling Strategies and Predictions. In: Phienweij, N., Boonyatee, T., (eds): *Tunnelling and Underground Space for a Global Society: Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress, WTC 2012, 21-23 May 2012, Bangkok, Thailand*. Eng. Institute of Thailand (EIT) (THA). pp 483-484.
- [24] Sharifzadeh M, Javadi M. 2011. Near-field application of aperture back calibrated distinct fracture network. Paper published at 12th International Congress on Rock Mechanics (ISRM), Beijing, China. Pages: 1361-1365.
- [25] Sinclair, Laura & Thompson, John. (2015). In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*.

157. 10.1016/j.hydromet.2015.08.022.
- [26] Waheed U. (2017). Fracture Characterisation and Discrete Fracture Networks, Kalgoorlie Terrane, Yilgarn Craton, Master Thesis, Western Australian School of Mines, 2017.
- [27] Zammit, C. M., Brugger, J., Southam, G. and Reith, F. (2014) 'In situ recovery of uranium — the microbial influence', *Hydrometallurgy*, 150, pp. 236-244
- [28] Zeeb Conny, Enrique Gomez-Rivas, Paul D. Bons, and Philipp Blum. 2013. "Evaluation of sampling methods for fracture network characterization using outcrop" *AAPG (The American Association of Petroleum Geologists) Bulletin*, v. 97, no. 9 (September 2013), pp. 1545 – 1566.
- [29] Zhang L., Einstein H.H., 1998. Estimating the mean trace length of rock discontinuities. *International Rock Mechanics and Rock Engineering* 31, 217–235.doi: 10.1007/s006030050022.