



Tinjauan Komprehensif Evaluasi Potensi Penerapan *Enhanced Geothermal System* Lanjutan: *Fracking* dan *Hydroshearing*

Adam Dwi Putra ^{1*}, Putri Rizkika Ramadhanti Pedraza ¹⁾ Riska Laksmi Sari ¹⁾

¹⁾ Teknik Perminyakan, Universitas Jember

* corresponding email: adam.ardop@gmail.com

ABSTRACT

Indonesia is a country with great geothermal potential, with the position of the country located in the volcanic ring being a country that has many geothermal sources. Geothermal sources are renewable energy that can be managed into electrical energy, but in the production process, there are still many challenges and obstacles in the development of geothermal energy. In its development, an effective method is needed to deal with existing problems and optimize geothermal energy production. This research is intended to discuss and review one of the methods of increasing geothermal energy production, namely the enhanced geothermal system (EGS) method. The EGS stimulation method can overcome several obstacles such as small permeability and can produce geothermal energy in hot dry rock (HDR). The effects of temperature, water cooling shock, injection rate, hydraulic transmissivity, fault density, well spacing, and flow characteristics are all investigated in this study. It also provides insight into some of the largest global EGS projects. The study also shows Indonesia's potential to implement EGS. These discoveries enhance the understanding and creation of sustainable and effective geothermal energy extraction methods, advancing EGS technology.

Keywords: *Enhanced Geothermal System, EGS, Fracking, Hydroshearing*

I. PENDAHULUAN

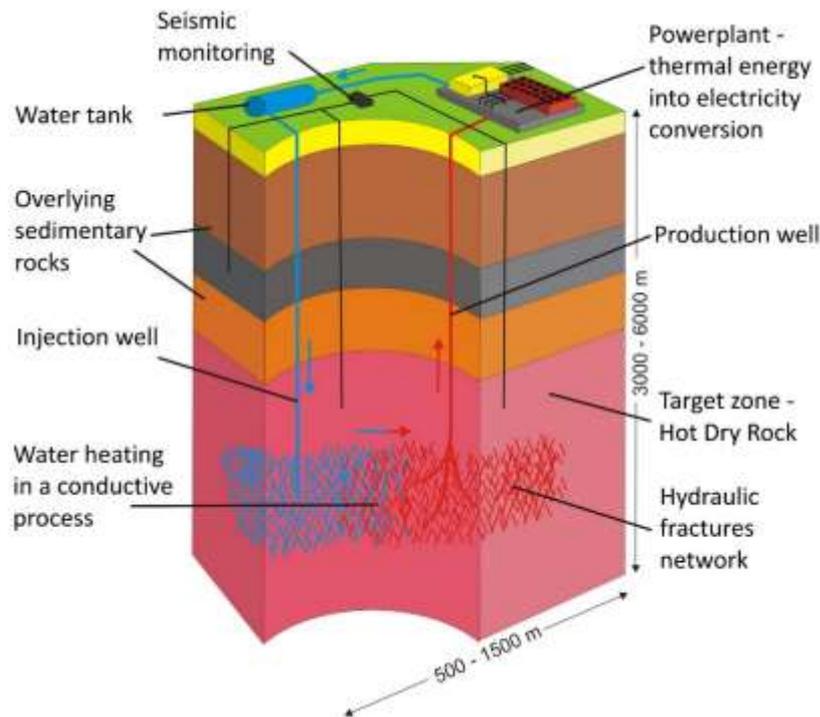
Pengembangan energi panas bumi memerlukan metode untuk mengambil panas dari batuan dan membawanya ke permukaan agar dapat digunakan. Pada reservoir panas bumi basah terdapat fluida panas yang dapat dihasilkan, biasanya tanpa memerlukan metode stimulasi sumur. Hal ini dikarenakan massa batuan cukup permeabel (pori-pori dan rekahan alami) untuk menarik fluida, menghilangkan energi panas di permukaan, dan menginjeksikan kembali fluida di lubang sumur yang berbeda. Tetapi pada pengembangan panas bumi dengan batuan kering panas, terdapat sedikit porositas dan permeabilitas yang tidak memadai untuk memungkinkan sirkulasi fluida dengan laju yang ekonomis, sehingga massa batuan harus distimulasi. Proses stimulasi ini merupakan langkah dilakukannya *enhanced geothermal systems* (EGS) [1].

Letak Indonesia yang berada diantara gunung-gunung api dan tumbukan lempeng tektonik serta garis khatulistiwa menjadikannya negara yang memiliki potensi energi terbarukan panas bumi yang besar. Dengan memanfaatkan panas bumi, banyak keuntungan yang akan didapatkan dibandingkan penggunaan bahan bakar fosil, panas bumi dapat dijadikan sebagai alternatif energi terbarukan yang keberadaannya selalu tetap dan tidak bergantung pada cuaca serta musim. Sumber energi panas atau geothermal hampir menyebar secara merata di Indonesia, berdasarkan pada catatan yang ada terdapat lebih dari 300 titik sumber panas bumi atau geothermal yang tersebar dari Sabang sampai Merauke [2]. Energi geothermal dapat dimanfaatkan untuk pengganti sumber-sumber energi tak terbarukan seperti bahan bakar dari fosil untuk pembangkit listrik dan transportasi. Adanya pemanfaatan energi geothermal secara nyata akan mengurangi dan membantu terpenuhinya energi listrik yang saat ini masih menjadi masalah yang belum juga sudah diselesaikan oleh Pemerintah Indonesia.

Indonesia termasuk di daerah ring of fire dunia yang ditandai dengan banyaknya gunung api yang tersebar, yaitu sebanyak 127 gunungapi [3]. Indonesia adalah negara dengan potensi cadangan sumber daya panas bumi mencapai 30000 MWe atau sekitar 30% – 40% potensi panas bumi dunia [4]. Namun sumber panas bumi yang telah dimanfaatkan hanya sebesar 1.341 MW atau kurang dari 5 persen [5]. Hal ini disebabkan karena tidak semua prospek energi panas bumi dapat diproduksi. Penyebab utamanya ialah kurangnya permeabilitas dan kandungan air pada titik panas tersebut, serta terdapat faktor suhu yang rendah. *Enhanced Geothermal System* (EGS) merupakan metode non-konvensional dalam hal pengekstraksian sumber energi panas bumi. Metode ini merupakan rekayasa reservoir yang dilakukan pada batuan panas dengan permeabilitas rendah atau kejenuhan fluida rendah yang dimiliki batuan disekitarnya. Metode EGS ini dilakukan dengan menginjeksi fluida yang bertekanan tinggi sehingga terbentuk permeabilitas tambahan dan panas dapat terangkut ke permukaan.

1.1 Enhanced Geothermal System (EGS)

Pengembangan listrik menggunakan sistem geothermal yang ditingkatkan (*enhanced geothermal systems/EGS*) memiliki potensi besar untuk mengurangi emisi. EGS melibatkan pembentukan konduktivitas buatan di dalam reservoir dengan menggunakan stimulasi termal, kimia, atau hidraulik untuk mengambil energi termal dari batuan panas yang tidak permeabel. Fluida proses dipanaskan di bawah tanah dan mengalir antara sumur injeksi dan produksi sebelum dilepaskan untuk menggerakkan turbin. Fluida proses biasanya berupa air tawar dengan tambahan bahan kimia untuk menghindari reaksi yang tidak diinginkan. Penutupan rekahan dapat dihindari dengan menggunakan fluida berbasis polimer dan bahan *proppant* [6].



Gambar 1. Prinsip Operasi Doublet Enhanced Geothermal System [7]

Menganalisis faktor petrofisika, petrografi, mekanik, hidrogeologi, dan tektonik diperlukan untuk merancang operasi stimulasi EGS, seperti *hydraulic fracturing*. Sejak tahun 1970-an, efisiensi ekstraksi panas telah ditingkatkan melalui upaya penelitian yang telah mengarah pada pengembangan teknologi EGS. Sistem jaringan listrik yang dulunya hanya proyek sekarang sudah digunakan. Kapasitas dari pembangkit listrik EGS diprediksi akan mencapai 70 GWe pada tahun 2050, sejajar dengan sistem hidrotermal [2]

Untuk mencapai netralitas karbon, energi geothermal menjadi sumber energi terbarukan yang penting. Dengan rentang suhu 150-650°C, batuan panas kering (*hot dry rock/HDR*) adalah media penyimpanan energi termal yang terdapat pada kedalaman 2-6 km di bawah permukaan. Sistem geothermal yang ditingkatkan (*enhanced geothermal systems/EGS*) menggunakan *hydraulic fracturing* untuk membuat jaringan rekahan buatan guna mengekstraksi panas internal dari HDR. Jaringan rekahan planar yang dibuat dengan pengeboran pada sumur produksi dan injeksi memanaskan fluida kerja yang dipompa ke dalam sumur. Selanjutnya, fluida yang dipanaskan diambil dari sumur produksi untuk digunakan dalam pemanasan dan pembangkitan listrik. Amerika Utara, Eropa, Australia, dan Jepang semuanya telah mengadopsi teknologi EGS. Energi geothermal diekstraksi dari HDR melalui keterkaitan antara suhu, tekanan, dan gerakan massa – *thermal, hydraulic, mechanical* (THM) serta proses fisik seperti migrasi fluida, deformasi formasi, dan pertukaran panas antara air dan batuan [3]. Studi [4] mengoptimalkan jarak dan jumlah rekahan dengan memodelkan *hydraulic fracturing* sebagai jaringan rekahan diskrit dan menggunakan model THM. Penyejukan air berdampak pada efisiensi produksi panas EGS, menurut penelitian terbaru [5]. Dalam eksperimen lapangan EGS, ditemukan bahwa rekahan fluida kriogenik meningkatkan permeabilitas HDR dan efektivitas transfer panas. Menurut studi, stimulasi termal menyebabkan beberapa rekahan awal terbentuk di dekat lubang bor, menurunkan tekanan inisiasi rekahan. Peningkatan suhu memiliki dampak signifikan pada karakteristik mekanik batuan dan menyebabkan kerusakan pada batuan. Zhang et al. meneliti pengembangan inisiasi dan propagasi rekahan batuan yang diinduksi oleh tekanan termal pada suhu rendah. Tomac dan Gutierrez mengeksplorasi mekanisme efek suhu pada propagasi rekahan saat mensimulasikan hidraulik fraktur di reservoir geothermal menggunakan model partikel terikat. Studi sifat mekanik batuan pada suhu tinggi diperlukan untuk



menciptakan reservoir geothermal HDR. Injeksi air kriogenik mempercepat propagasi rekahan dan tekanan termal selama *hydraulic fracturing*. Modulus elastisitas dan kekuatan tarik granit pada suhu tinggi menurun karena efek penyejukan air. Koefisien perpindahan panas konvektif meningkat dengan pendinginan nitrogen cair, menyebabkan terjadinya retakan pada batuan. Penggunaan teknologi *hydraulic fracturing* dengan cepat menurunkan suhu batuan di sekitarnya dan mengubah karakteristik mekaniknya sehingga lebih mudah diberi rekahan.

Untuk memahami karakteristik aliran massa batuan, penelitian eksperimental sangat penting. Shale, batuan ultramafik, dan granit hanyalah beberapa contoh dari berbagai jenis batuan yang permeabilitas rekahnya telah diteliti. Meskipun metodologi telah dibuat untuk memperkirakan permeabilitas rekah dari data tekanan injeksi dan untuk memperhatikan efek proses terkait pada celah rekahan dan permeabilitas, namun masih sedikit penelitian yang telah memeriksa permeabilitas rekahan setelah *hydraulic fracturing*. Kekuatan tarik dan hukum kubik diukur menggunakan eksperimen *Brazilian splitting* dan rekahan plat paralel, untuk masing-masing [6]. Namun, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami bagaimana mekanisme kimia dan mekanik dalam *Enhanced Geothermal System* mengurangi permeabilitas rekahan. Untuk ekstraksi energi termal dalam EGS, transfer panas konveksi fluida dalam celah batuan sangat penting. Efek laju aliran massa, suhu awal batuan, dan kekasaran permukaan pada transfer panas konveksi dalam rekahan plat-paralel telah diselidiki melalui penelitian eksperimental dan komputer. Untuk pemahaman yang lebih baik tentang aliran air dan transfer panas dalam rekahan yang disebabkan oleh *hydraulic fracturing*, penelitian yang lebih besar tentang bentuk permukaan rekahan yang dibuat oleh pendekatan yang berbeda (*hydraulic fracturing* vs. *Brazilian-type loading*) diperlukan.

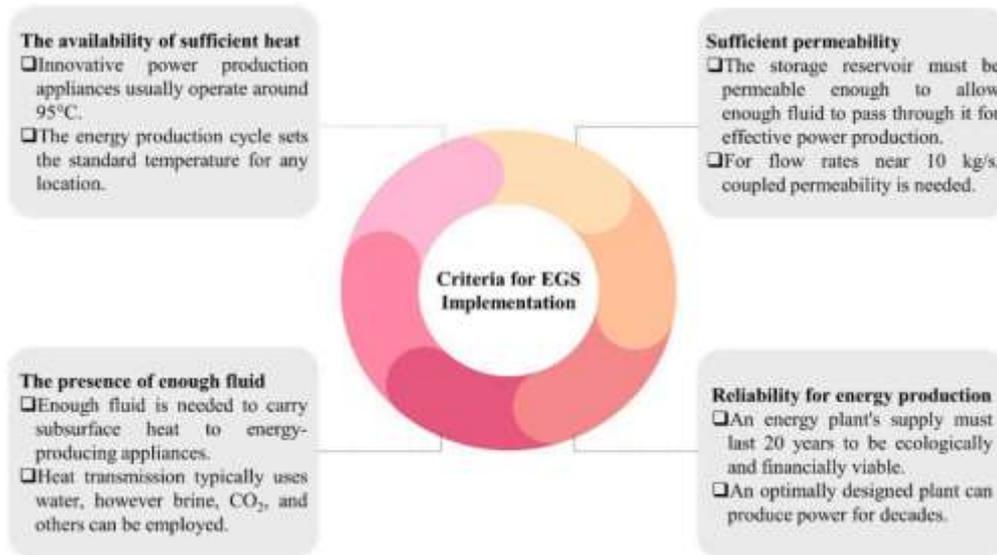
Sebagian besar proyek EGS sekarang menggunakan sumur vertikal dengan *openhole completion* dan *single-stage fracturing* karena kondisi medan yang sulit dan biaya yang tinggi untuk pengeboran secara horizontal di batuan keras. Namun, metode ini memiliki kekurangan seperti efisiensi sapuan panas yang buruk dan komunikasi yang terbatas. Metode alternatif, seperti perforasi casing, pengeboran horizontal, dan stimulasi multistage, telah digunakan dalam beberapa proyek. Metode ini dapat meningkatkan SRV (*Stimulated Reservoir Volume*), koneksi lubang sumur, laju sirkulasi, dan efisiensi sapuan panas. Manfaat potensial dari menggabungkan *multistage fracturing* dengan pengeboran horizontal termasuk mencegah korsleting termal dan meningkatkan jumlah fraktur termal. Simulasi numerik adalah cara yang paling efektif untuk melakukan analisis kopling hidro-termal yang tepat untuk *Enhanced Geothermal Systems* (EGS) [7]. Berbagai tata letak sumur dan rekahan, serta fluida yang mengalir, telah digunakan dalam perancangan, pemodelan, dan evaluasi berbagai model konseptual EGS. Namun, banyak model mengasumsikan kesetimbangan termal lokal yang segera terjadi, tetapi perbedaan suhu yang signifikan atau transportasi panas yang cepat lebih cocok untuk teori ketidakseimbangan termal lokal. Dalam model hidrotermal yang sepenuhnya terhubung, dampak variasi suhu pada tekanan pori dan karakteristik fluida juga harus diperhitungkan.

Studi ini mengevaluasi karakteristik geologi, tektonik, dan mekanik dari beberapa sistem EGS di seluruh dunia dengan penekanan khusus pada stimulasi hidrolik HDR (*Hot Dry Rocks*). Mereka mempertimbangkan efek dari tekanan tektonik dan karakteristik batuan terhadap ukuran rekahan dan tekanan rekah. Untuk memeriksa proses *hydraulic fracturing* dan evolusi kerusakan dalam HDR, [8] memperkenalkan model kopling THM (*thermal-hydraulic-mechanical*) untuk mempelajari efek rekah dari guncangan pendinginan air. Mereka menyelidiki bagaimana morfologi rekahan dipengaruhi oleh suhu batuan awal, tegangan in-situ, dan koefisien transfer panas. Desain untuk fraktur EGS didasarkan pada penelitian Yi Xue, *et al.*

Rekahan kasar *Brazilian-style* atau rekahan halus mekanis digunakan dalam sebagian besar investigasi eksperimental tentang aliran fluida dan transmisi panas dalam rekahan batuan, yang dapat mengakibatkan kesalahan besar dalam memprediksi produksi termal. Meskipun populer dalam meningkatkan permeabilitas reservoir geotermal, penelitian tentang permeabilitas dan transfer panas fluida yang mengalir melalui retakan yang disebabkan oleh *hydraulic fracturing* masih sedikit. Oleh karena itu, pada penelitian ini juga dipaparkan *eksperimental setting* untuk meneliti sifat aliran air dan transfer panas konvektif dalam rekahan batuan yang diinduksi secara hidrolik pada suhu tinggi. Hasil memberikan informasi tentang sifat-sifat ini dan dapat meningkatkan pemahaman tentang rekahan yang disebabkan oleh *hydraulic fracturing*. Dalam penelitian ini, tiga sumur horizontal - satu sumur injeksi dengan *multistage fracture* dan dua sumur produksi dengan *openhole completion*- digunakan untuk menganalisis kinerja ekstraksi panas dari EGS baru. Untuk menemukan metode terbaik untuk meningkatkan kinerja, studi ini mencakup analisis sensitivitas efek faktor desain terhadap kinerja ekstraksi panas.

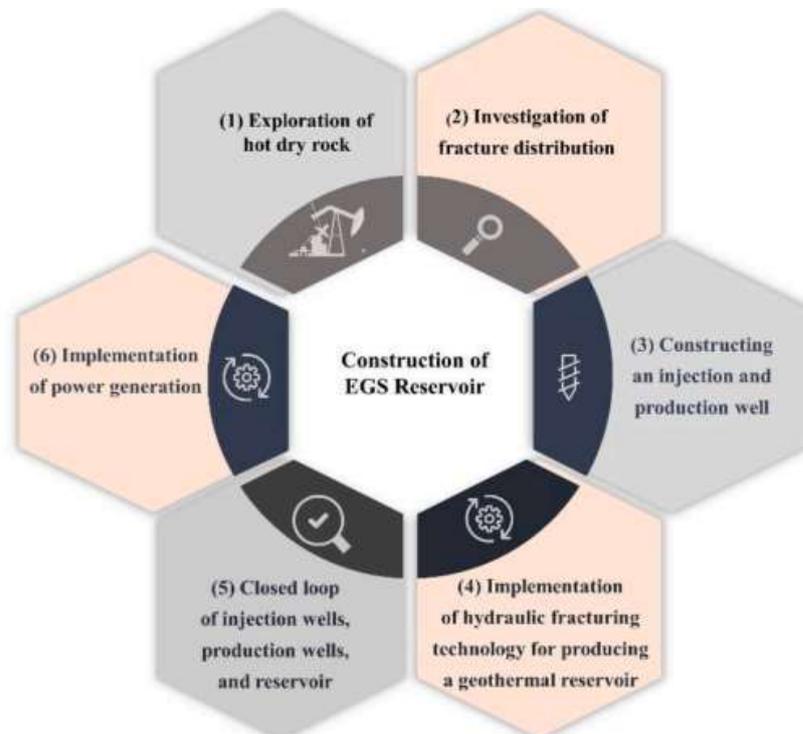
1.2 Kriteria untuk Implementasi EGS

Pada penerapan dan implementasi EGS pada lokasi tertentu dapat dilakukan, dibutuhkan kriteria tertentu agar metode berfungsi secara maksimal. Karena kendala teknologi dan tempat reservoir panas bumi yang berada jauh dibawah permukaan tanah sehingga membuat sulitnya proses produksi geothermal. Dengan dipenuhinya kriteria ini diharapkan kendala yang terjadi dilapangan dapat dicegah, atasi dan kendalikan. Berikut merupakan kriteria yang ada[9].



Gambar 2. Kriteria Implementasi EGS[9]

Selain kriteria lapangan geothermal yang perlu dipenuhi, langkah dalam penerapan EGS di suatu lapangan geothermal juga perlu di perhatikan. Setiap langkah dalam implementasi EGS ini sangat penting dan tidak dapat dilewati. Berikut langkah yang digunakan dalam penerapan EGS.



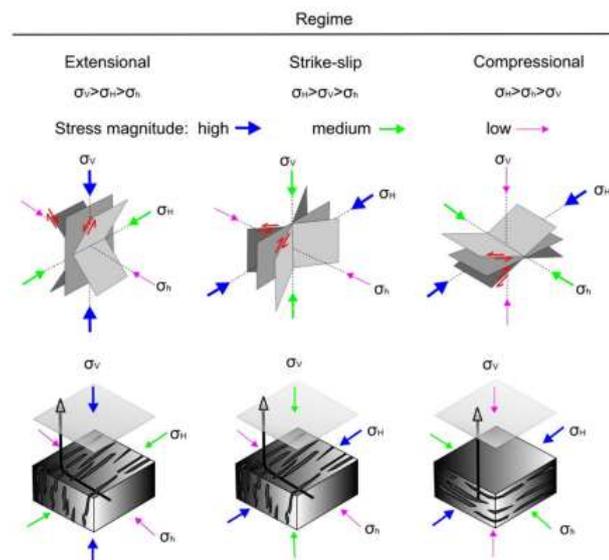
Gambar 3. Langkah Penerapan EGS[9]

1.3 Perekahan Buatan Untuk Reservoir HDR

Reservoir HDR dicirikan oleh kerapatan yang relatif tinggi dan permeabilitas yang sangat rendah. Untuk memastikan bahwa fluida yang diinjeksi dapat sepenuhnya mengalami pertukaran panas dengan batuan reservoir dan dipulihkan dengan sukses melalui recovery well, umumnya diperlukan untuk menghasilkan saluran aliran dengan konektivitas yang baik dan konduktivitas yang tinggi melalui stimulasi reservoir untuk meningkatkan permeabilitas reservoir. Namun dalam proses stimulasi reservoir, rekahan tunggal dengan permeabilitas tinggi dapat dihasilkan dan menghasilkan saluran singkat aliran fluida dan terobosan panas yang prematur lalu pada akhirnya dapat membahayakan pengembangan dan pemanfaatan EGS. Oleh karena itu, mendefinisikan mekanisme pembentukan jaringan rekahan buatan, memprediksi rekahan secara akurat, dan mengatur struktur jaringan rekahan secara efektif adalah dasar untuk menghasilkan jaringan rekahan buatan yang kompleks dan meningkatkan efisiensi pemulihan panas pada EGS. Pada penelitian dan tren pengembangan teknologi rekahan buatan reservoir HDR dirangkum dalam tiga aspek yaitu teknik stimulasi reservoir HDR, mekanisme pembentukan jaringan rekahan buatan, dan model prediksi rekahan [10].

1.4 Metode Hidrolik Stimulasi Reservoir Permeabilitas Rendah

Salah satu teknik stimulasi produksi untuk sumber daya hidrokarbon konvensional dan non-konvensional adalah *hydraulic fracturing* (HF). Dalam HF, rekahan dibuka atau dibuat di antara reservoir dan sumur bor untuk meningkatkan konduktivitas. Fluida rekahan bertekanan tinggi diinjeksikan ke dalam sumur bor untuk menyebabkan rekahan batuan dan meluaskan rekahan. Fluida kemudian membawa butiran proppant, yang ditinggalkan di dalam rekahan untuk mencegahnya tertutup. Untuk mengakses deposit HDR berkemampuan permeabilitas rendah dan suhu tinggi, diperlukan HF. Setidaknya dua sumur dibor dan dihubungkan oleh sistem rekahan untuk mendapatkan konduktivitas hidrolik dan mencegah *short-circuiting* termal. Masalah utama adalah memperkirakan geometri rekahan dan arah perambatannya agar ekstraksi panas maksimal dapat dicapai. Rekahan merambat secara vertikal pada sumur vertikal atau subvertikal karena lapangan EGS sering terletak di daerah keretakan ekstensif atau *strike-slip*. Model KGD (Kristianowich-Zheltoy, Geertsma-deKlerk) dan PKN (Perkins, Kern) menjelaskan geometri rekahan yang berbentuk elips di sisi dan diperhalus dengan parameter tambahan termasuk rheologi fluida, tekanan pompa, dan elastisitas batuan. Model-model ini sering digunakan dalam perangkat lunak komersial untuk perusahaan yang menyediakan layanan minyak dan gas. Tiga model konseptual – *hydraulic fracturing*, hidrolik *jacking*, dan hidrolik *shearing* - digunakan dalam pemodelan numerik untuk memeriksa propagasi rekahan selama stimulasi hidrolik. Berdasarkan pengukuran seismisitas yang diinduksi, hidrolik *shearing* adalah mekanisme utama peningkatan permeabilitas. Rekahan baru dan yang sudah ada diduga terlibat dalam saluran aliran kontinu. Rekahan baru yang merambat dapat berakhir pada retakan yang sudah ada, sesuai dengan mekanisme stimulasi campuran (MMS). Merancang operasi HF yang efisien dalam suatu reservoir memerlukan pemahaman tentang keadaan tektonik dan parameter petrofisika dari lapangan tersebut. Rekahan merambat tegak lurus dengan arah tekanan terkecil, yang ditentukan oleh magnitudo tekanan primer (σ_V , σ_H , dan σ_h) [11]. Sementara rekahan horizontal merambat di lingkungan keretakan reverse, rekahan vertikal dihasilkan dalam daerah rekahan normal dan *strike-slip*.

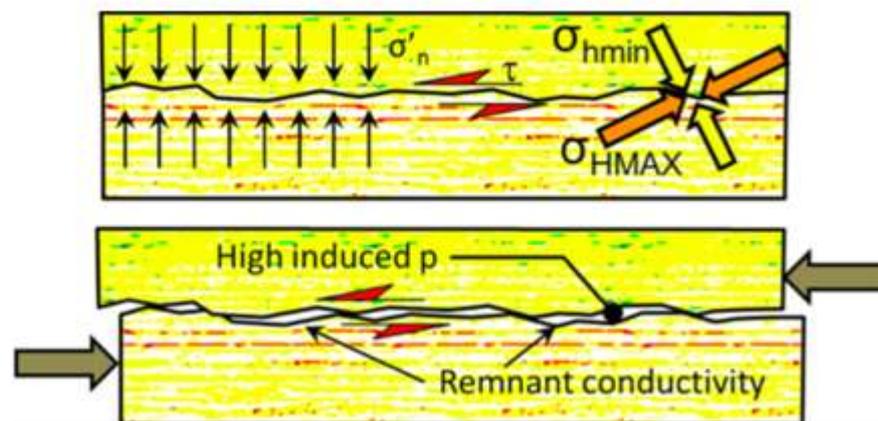


Gambar 4. Rezim Tektonik dan Aktivitas Tegangan[12]

Keadaan tegangan dapat berfluktuasi tergantung pada faktor geologi atau tektonik lokal, sehingga diperlukan pemeriksaan lapangan terhadap orientasi tegangan. Ukuran rekahan dan kerentanan batuan terhadap *fracking* ditentukan oleh modulus Young dan rasio Poisson, untuk masing-masing [13]. Batuan dengan modulus Young yang besar biasanya "keras" dan membutuhkan lebih banyak energi untuk bergerak, sehingga menghasilkan rekahan yang relatif sempit. Deformasi batuan di bawah tekanan dipengaruhi oleh rasio Poisson, dan nilai yang rendah menyebabkan fenomena *embedding*, yang menurunkan konduktivitas rekahan. Faktor-faktor ini berkontribusi pada perhitungan indeks kerapuhan, yang merupakan metrik kerentanan *fracking*.

1.5 Metode Hydroshearing

Tegangan utama yang ditunjukkan pada gambar 5 tidak berubah secara substansial, dan pada titik tertentu, karena tegangan berbeda dalam arah yang berbeda, sambungan yang berorientasi baik akan tergelincir. Ini karena peningkatan tekanan menetralkan tegangan tekan yang menahan sambungan dengan erat. Saat slip terjadi, permukaan batuan di sepanjang sambungan bergeser, biasanya satu milimeter atau kurang. Karena permukaan sambungannya kasar, selip ini juga membuka beberapa ruang tambahan yang tetap terbuka setelah injeksi dihentikan karena selip tidak dapat dibalik: seperti mendorong batu bata di sepanjang meja; saat Anda berhenti mendorong, batu bata tetap berada di tempatnya. Prosesnya ditunjukkan pada gambar di bawah ini, dan pembukaan ruang tambahan, berlabel konduktivitas sisa, disebut "dilatasi geser", yang merupakan mekanisme dominan dalam geseran air. Dengan mempertahankan tekanan injeksi pada tingkat yang sesuai, atau mungkin dengan meningkatkannya secara perlahan, zona hydroshearing akan tumbuh perlahan di sekitar titik injeksi, meningkatkan permeabilitas massa batuan di sekitar sumur. Namun, hydroshearing hanya membuka beberapa sambungan, dan peningkatan konduktivitas fluida mungkin terbatas dalam hal ukuran daerah yang terpengaruh di sekitar lubang sumur, dan jumlah pelebaran yang mungkin dialami sambungan. zona hydroshearing perlahan akan tumbuh di sekitar titik injeksi, meningkatkan permeabilitas massa batuan di sekitar sumur. Namun, hydroshearing hanya membuka beberapa sambungan, dan peningkatan konduktivitas fluida mungkin terbatas dalam hal ukuran daerah yang terpengaruh di sekitar lubang sumur, dan jumlah pelebaran yang mungkin dialami sambungan. zona hydroshearing perlahan akan tumbuh di sekitar titik injeksi, meningkatkan permeabilitas massa batuan di sekitar sumur. Namun, hydroshearing hanya membuka beberapa sambungan, dan peningkatan konduktivitas fluida mungkin terbatas dalam hal ukuran daerah yang terpengaruh di sekitar lubang sumur, dan jumlah pelebaran yang mungkin dialami sambungan [14].



Gambar 5. Skema Metode HydroShearing[14]

Tekanan injeksi yang dipertahankan selama hydroshearing dengan pemompaan terus menerus mendekati tegangan minimum di dalam tanah (biasanya σ_{hmin}), mungkin 95 hingga 99% dari nilainya – jadi $p_{inj} \approx \sigma_{hmin}$ bukan $p_{inj} \gg \sigma_{hmin}$. Selama hydroshearing, laju aliran dan tekanan dipantau dengan hati-hati untuk mempertahankan proses shearing dan memungkinkannya menyebar perlahan ke luar. Setiap peristiwa perpindahan geser yang ditunjukkan di atas bukanlah proses bertahap; itu terjadi sebagai peristiwa "stick-slip" yang disertai dengan emisi semburan kecil energi seismik, yang disebut mikroseisme, atau aktivitas mikroseismik. Ini seperti gempa bumi, tetapi karena umumnya tidak pernah terasa di permukaan, maka disebut "peristiwa mikroseismik". Penyebaran zona *hydrosheared* dapat dilacak saat bergerak keluar dengan merekam dan memetakan peristiwa mikroseismik ini, sehingga memungkinkan untuk mempelajari banyak hal tentang bagaimana massa batuan dalam bereaksi. Informasi ini diperoleh bersama dengan tekanan dan laju aliran dari waktu ke waktu[15].



Pada salah satu eksperimen injeksi di proyek Fenton Hill, dengan strategi injeksi serupa (*hydroshearing*). Model peningkatan permeabilitas yang diusulkan memperhitungkan ketergantungan-tegangan geser dan bukaan yang ditingkatkan sebagai fungsi dari regangan plastis karena pengaktifan kembali patch zona rekahan. Proses itu telah terbukti memberikan peningkatan permeabilitas yang diperlukan untuk peningkatan sirkulasi fluida panas bumi. Pada eksperimen ini juga melakukan penyelidikan sensitivitas model hydro shearing yang diusulkan sehubungan dengan beberapa parameter kritis seperti bukaan maksimum yang diizinkan pada reaktivasi geser, sudut pelebaran, serta mengevaluasi efek termasuk perubahan porositas dan zona fraktur yang lebih padat. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan yang lebih besar tidak selalu terkait dengan jumlah tambalan zona rekahan yang diaktifkan kembali (yaitu kejadian seismik/aseismik), tetapi sebagian besar tergantung karakteristik pada lokasi. Aliran balik tertinggi memang dicapai pada sistem yang sangat bersambungan dengan sejumlah besar tambalan yang diaktifkan kembali, meskipun dengan besaran kumulatif yang kecil sebagai akibat dari deformasi dan tekanan yang terbatas. Peningkatan porositas zona rekahan yang terkait dengan perubahan bukaan dan penyimpanan fluida yang sebenarnya dalam keseimbangan massa fluida memiliki dampak penting pada perluasan zona yang distimulasi untuk volume injeksi yang diberikan. Umumnya, patahan dapat menjadi kompleks dan bercabang dengan tambahan retakan mikro dan kerusakan di dekat permukaan patahan yang dapat menyediakan penyimpanan tambahan dan dengan demikian berdampak pada stimulasi yang dilakukan [15].

1.6 Modelling Of Multi-Stage Hydroshearing

Pada salah satu eksperimen dilakukan pemodelan hidromekanis gabungan dari perilaku hydroshearing dari stimulasi hidrolik EGS di reservoir yang retak secara alami. Simulasi dapat secara eksplisit memetakan distribusi slip rekahan yang disebabkan oleh injeksi fluida dan selanjutnya mencirikan peningkatan produktivitas dan kemungkinan besarnya momen maksimum dari kegempaan yang diinduksi [16]. Model ini diaplikasikan untuk mempelajari stimulasi hydroshearing multi-stage di EGS, sebagai pembanding dari stimulasi satu tahap konvensional. Pemodelan telah menunjukkan bahwa stimulasi hidrolik satu tahap simultan konvensional dengan menginjeksikan fluida pada seluruh bagian lubang terbuka umumnya menyebabkan konsentrasi slip pada rekahan dengan bukaan awal yang lebih tinggi sebagai jalur aliran yang lebih disukai. Konsentrasi zona slip pada jalur aliran dominan berpotensi menginduksi kejadian seismik bermagnitudo besar dan sirkulasi pendek untuk tahap produksi selanjutnya. Fenomena seperti itu sesuai dengan pengamatan beberapa tes stimulasi hidrolik EGS lapangan yang ada.

Pada stimulasi *multi-stage* dilakukan dengan menginjeksi fluida pada interval injeksi atau fraktur yang dipilih untuk setiap stage. Pada stimulasi multi-stage ini telah menunjukkan bahwa memungkinkan untuk mengembangkan zona slip pada fraktur multipel dan menghindari untuk menginduksi zona slip besar pada fraktur tertentu dengan bukaan awal yang tinggi. Dibandingkan dengan stimulasi satu tahap, hydroshearing multi-stage menghasilkan zona yang mengalami peningkatan permeabilitas pada beberapa fraktur dengan volume injeksi yang identik, yang dimaksudkan untuk membentuk sistem penular panas yang lebih homogen dan memperbesar ukurannya untuk produksi panas yang efektif dalam jangka panjang [16].

II. METODOLOGI PENELITIAN

Pada jurnal *review* ini bersifat kualitatif. Metode yang digunakan yaitu berupa pendekatan pada studi literatur. Studi dilakukan untuk memperoleh informasi yang dibutuhkan untuk menyelesaikan penyusunan artikel ini. Hasil studi literatur ini diperoleh melalui review pada beberapa artikel hasil penelitian yang sudah ada sebelumnya dan menyimpulkan beberapa informasi yang dibutuhkan. Berikut informasi yang dibutuhkan untuk penyusunan artikel ini yaitu *Enhanced Geothermal System* (EGS), metode *Hydraulic Fracturing* dan *Hydroshearing* pada EGS, potensi penerapan EGS di dunia dan di Indonesia. Pada penelitian ini dilakukan beberapa tahapan yang dilakukan yaitu pemilihan tema, pengumpulan artikel sesuai tema, studi literatur, *review* dan pengumpulan data, analisis hasil studi, pembahasan, serta kesimpulan. Dengan langkah yang dilakukan tersebut, penelitian dapat dilakukan dan diselesaikan sesuai dengan rencana. Proses inti paling penting pada penelitian ini yaitu pada pemilihan artikel yang sesuai tema sebagai bahan penelitian. Artikel yang digunakan harus relevan dengan tema yang digunakan dan berhubungan dengan tema tersebut sehingga data yang disajikan dapat sesuai dengan bahasan yang diangkat.

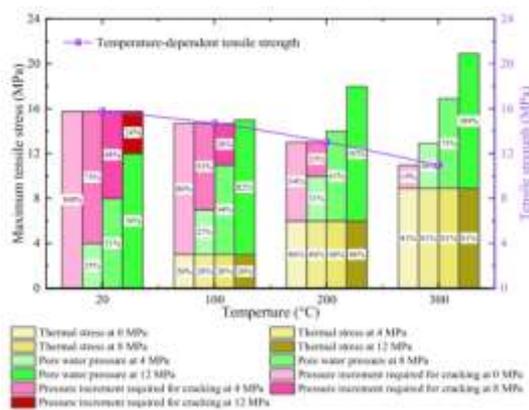
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Efek Temperatur pada Evolusi Rekahan

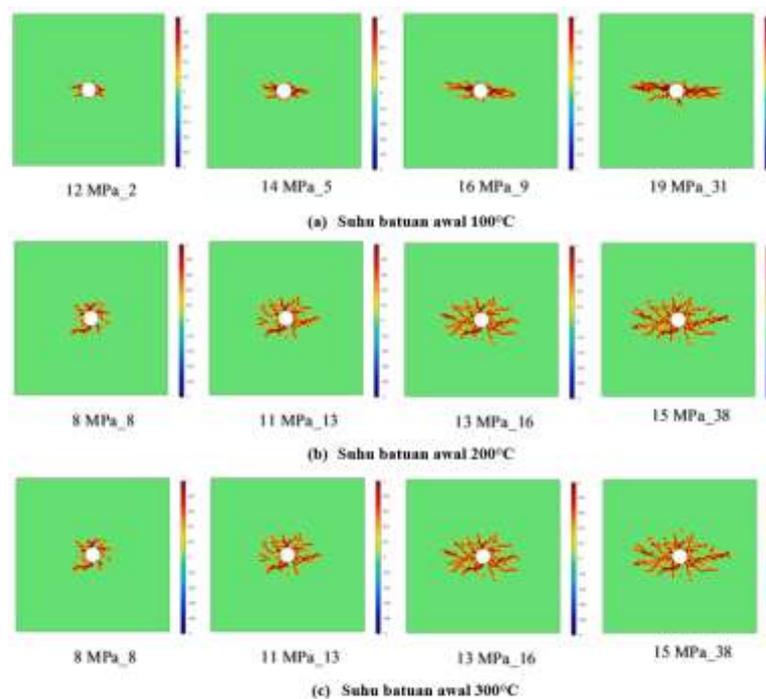
Hydraulic fracturing pada HDR sangat dipengaruhi oleh suhu. Ketika suhu tidak diperhitungkan, rekahan air bertekanan tinggi umumnya akan meluas ke satu arah, menyebabkan kerusakan rekahan tipe I. Namun, selama *hydraulic fracturing* pada HDR, percabangan rekahan kompleks terbentuk, dan penurunan suhu di dekat lubang bor mengurangi kekuatan tarik (*tensile*) dan modulus elastis material. Akibatnya, beberapa rekahan sekunder mulai terbentuk dan menyebar ke berbagai arah, menghasilkan distribusi rekahan yang kompleks. Memperhitungkan suhu meningkatkan efek *fracking* pada HDR meskipun terdapat batasan dalam pengaturan tegangan dan mempercepat pembentukan rekahan [17].

3.2 Efek *water-cooling shock* pada *hydraulic fracturing*

Injeksi air kriogenik dalam *hydraulic fracturing* pada HDR mengubah suhu dan tekanan batuan, menyebabkan tegangan termal dan tekanan air pori. Kekuatan tarik batuan berkurang dan ada kemungkinan kegagalan sebagai hasil dari efek gabungan tegangan termal dan *water-cooling shock*. Pada suhu yang semakin tinggi, tegangan termal menjadi lebih signifikan dan membantu dalam memulai rekahan. Pengaruh tegangan termal dan pengurangan kekuatan tarik yang disebabkan oleh *water-cooling shock* adalah penyebab utama rekahan.



Gambar 6. Kombinasi tegangan termal dan tekanan air pori terhadap inisiasi rekahan pada tekanan injeksi dan temperatur batuan awal yang berbeda [17]



Gambar 7. Evolusi Morfologi Rekahan dengan Suhu Batuan Awal [17]



Inisiasi dan propagasi rekahan hidrolis dipercepat oleh *water-cooling shock* dalam batuan suhu tinggi. Kekuatan tarik yang lebih rendah akibat tegangan termal dan penurunan suhu mengakibatkan tekanan inisiasi yang lebih rendah dan rekahanya yang lebih besar dan lebih parah. Dampak rekahan pada HDR ditingkatkan oleh penetrasi air kriogenik [18].

3.3 Hasil Simulasi dan Definisi Parameter Evaluasi

Parameter evaluasi menentukan prosedur yang panjang dan ekstraksi panas yang optimal. Parameter kumulatif harus dua kali lipat karena simetri. Temperatur setara (T_{eq}) dalam teori LTNE menggabungkan suhu dari fluida dan benda padat.

$$T_{eq} = \frac{(1 - \varphi_i)\rho_i C_{p,i} T_i + \varphi_i \rho_l C_{p,l} T_l}{(1 - \varphi_i)\rho_i C_{p,i} + \varphi_i \rho_l C_{p,l}} \quad (1)$$

Suhu produksi rata-rata adalah rata-rata garis suhu fluida sepanjang sumur produksi.

$$T_{av} = \frac{\int_{l_h} T_l(t) dl}{l_h} \quad (2)$$

Rasio ekstraksi panas lokal (η_l) didefinisikan untuk menentukan efisiensi transfer panas lokal pada EGS [19].

$$\eta_l = \frac{T_0 - T_m(t)}{T_0 - T_{inj}} \quad (3)$$

Rasio ekstraksi panas total (η_t) didefinisikan sebagai jumlah panas yang diekstraksi oleh transfer panas dibagi dengan total panas yang disimpan dalam EGS [20].

$$\eta_t = \frac{2 \int_{V_s} \rho_m C_{p,m} (T_0 - T_m(t)) dV}{2 \int_{V_s} \rho_m C_{p,m} (T_0 - T_{in}) dV} \quad (4)$$

Daya termal *output* P didefinisikan sebagai tingkat ekstraksi panas dari reservoir.

$$P = 2 \int_l Q_{out} C_{p,l} (T_l - T_{in}) dl \quad (5)$$

Daya termal keluaran kumulatif W adalah total panas yang diekstraksi dari reservoir selama waktu penggunaan EGS.

$$W = 2 \int_0^{t_s} \int_{l_h} Q_{out} C_{p,l} (T_l - T_{in}) dl dt \quad (6)$$

Suhu fluida produksi mulai menurun pada waktu t_b . Hingga fluida produksi mencapai suhu penghentian, t_s , operasi berlangsung. Kriteria suhu untuk penghentian berkisar antara penurunan 5% hingga 15% [19]. Untuk mengukur penurunan suhu produksi, Referensi [22] memberikan keterangan mengenai suhu tak berdimensi.

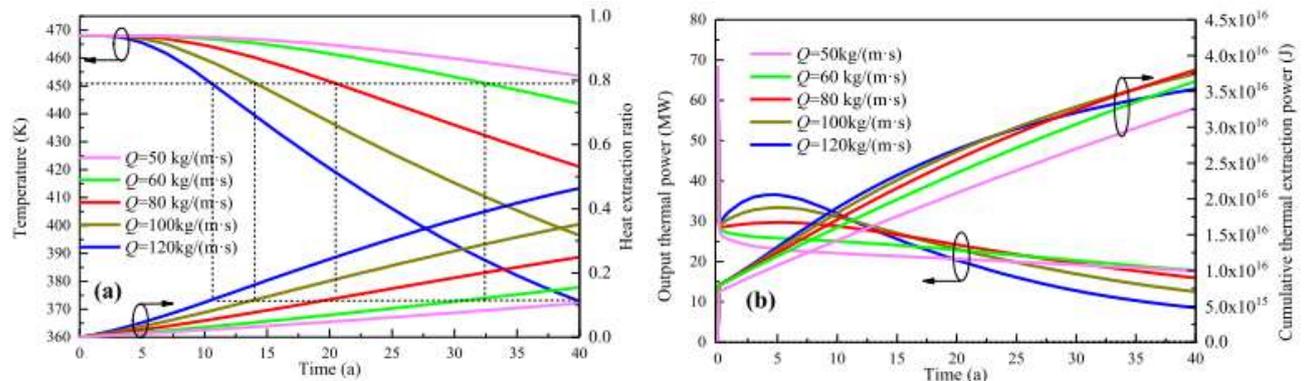
$$\theta(t) = \frac{T_{av,max} - T_{av}(t_s)}{T_{av,max} - T_{in}} \quad (7)$$

3.4 Optimisasi Efisiensi Ekstraksi Panas

3.4.1 Efek Laju Injeksi Pada Ekstraksi Panas

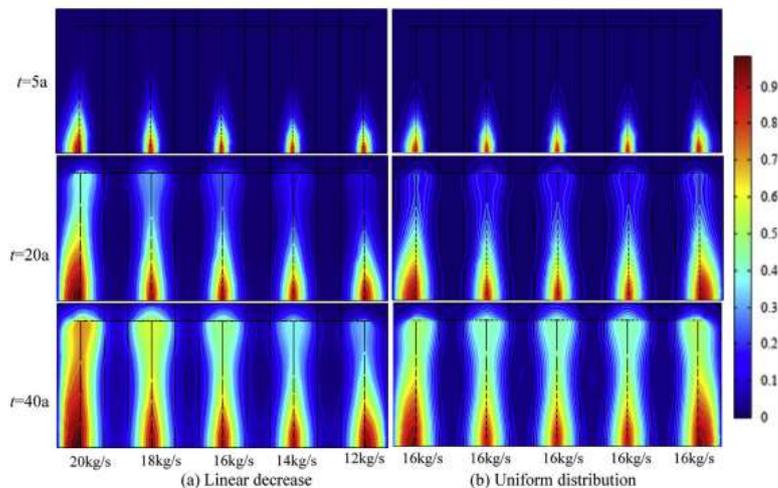
Perubahan suhu dan rasio ekstraksi panas seiring waktu pada berbagai tingkat injeksi ditunjukkan dalam Gambar 6(a). Tingkat injeksi yang lebih cepat menyebabkan terjadinya *breakthrough* termal lebih awal, penurunan suhu yang lebih cepat, dan waktu penggunaan yang lebih singkat. Terlepas dari tingkat injeksi, rasio ekstraksi panas saat ini sekitar 0,12. Mengubah tingkat injeksi tidak memiliki dampak positif pada ekstraksi panas secara

umum. Berdasarkan tingkat injeksi, Gambar 6(b) menunjukkan tiga tahap proses ekstraksi panas: penurunan dramatis dalam daya termal keluaran, peningkatan cepat dalam daya termal keluaran kumulatif, dan tahap produksi yang stabil atau naik [23].



Gambar 8. Efek laju injeksi pada ekstraksi panas. (a) Temperatur produksi dan rasio ekstraksi panas total, (b) Daya termal yang dihasilkan dan daya termal kumulatif yang dihasilkan [23]

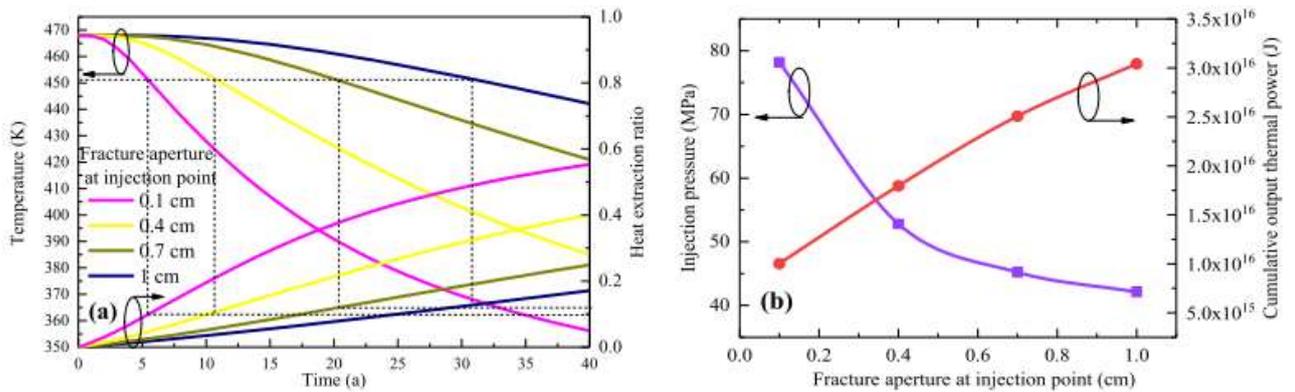
Efek distribusi tingkat injeksi pada ekstraksi panas terlihat pada Gambar 9. Rasio ekstraksi panas lokal bervariasi secara dramatis bahkan jika tingkat injeksi sama dengan 80 kg/s. Sementara tingkat *non-uniform* mengakibatkan terjadinya *breakthrough* termal lebih awal dan ekstraksi panas yang lebih sedikit (Gambar 9(a)), tingkat injeksi yang seragam mendinginkan massa batuan secara merata (Gambar 9(b)). Hambatan aliran di sumur menyebabkan lebih banyak fluida dialokasikan di bagian *shoe*, di mana terjadi *breakthrough* termal lebih awal. Aliran seragam di setiap tahap lebih disukai untuk meningkatkan efisiensi dan mencegah *short-circuiting*, yang dapat dicapai dengan menggunakan teknik "*limited entry completion*" dengan perforasi yang lebih kecil [24].



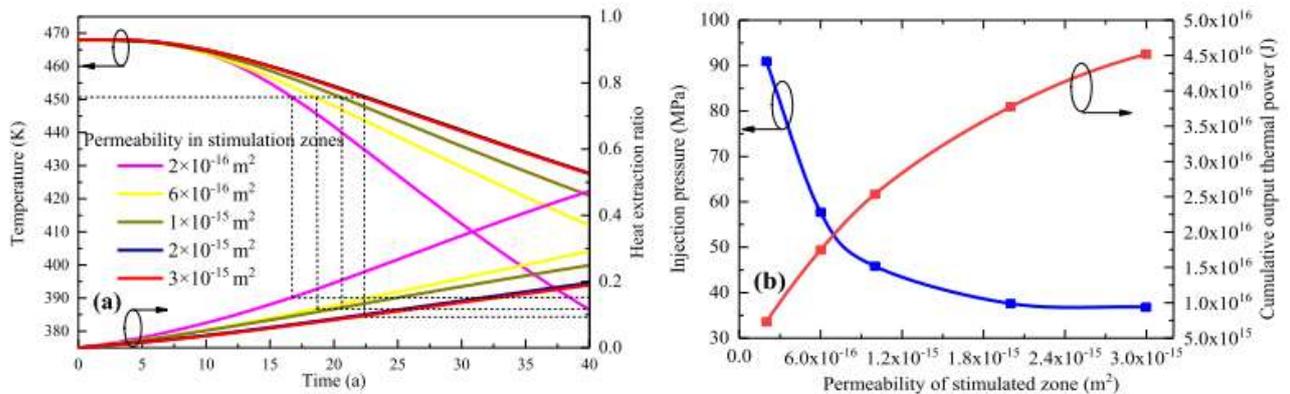
Gambar 9. Efek laju injeksi pada ekstraksi panas local. (a) Laju injeksi yang didistribusikan secara linear, (b) Laju injeksi yang didistribusikan seragam [24]

3.4.2 Pengaruh Transmisivitas Hidrolik Pada Ekstraksi Panas

Gambar 10(a) menggambarkan bagaimana suhu produksi dan rasio ekstraksi panas dipengaruhi oleh *aperture* rekahan maksimum. Tingkat ekstraksi panas meningkat dan penurunan suhu melambat dengan meningkatnya *aperture*. *Aperture* yang lebih besar menurunkan tekanan injeksi dan meningkatkan daya termal keluaran total, seperti yang terlihat pada Gambar 10(b). *Proppant* meningkatkan efisiensi ekstraksi panas. Resiko mengenai *self-propping* dan *thermal short-circuiting* dapat dikurangi. Dampak permeabilitas zona stimulasi terhadap suhu produksi dan rasio ekstraksi panas ditunjukkan dalam Gambar 11(a). Masa EGS meningkat dengan permeabilitas yang lebih tinggi. Permeabilitas rendah membutuhkan tekanan injeksi yang tinggi meskipun memiliki rasio ekstraksi panas yang agak lebih tinggi. Mungkin ada permeabilitas yang ideal. Tekanan injeksi yang lebih rendah dan daya termal keluaran kumulatif yang lebih tinggi adalah hasil dari peningkatan permeabilitas (Gambar 11(b)). Dalam desain rekahan beberapa tahapan, menempatkan fokus pada stimulasi *shear* meningkatkan permeabilitas reservoir.



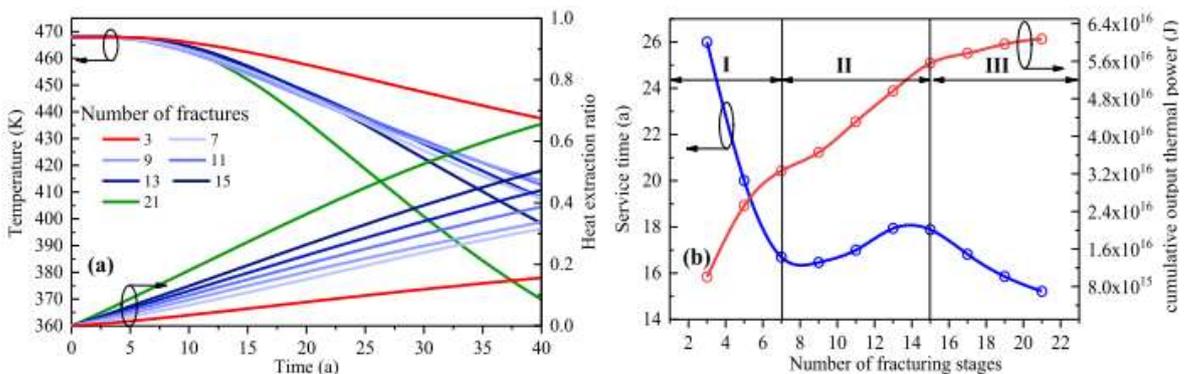
Gambar 10. Efek aperture rekahan pada ekstraksi panas. (a) Temperatur produksi dan rasio ekstraksi panas total, (b) Tekanan injeksi dan daya termal keluaran kumulatif [23]



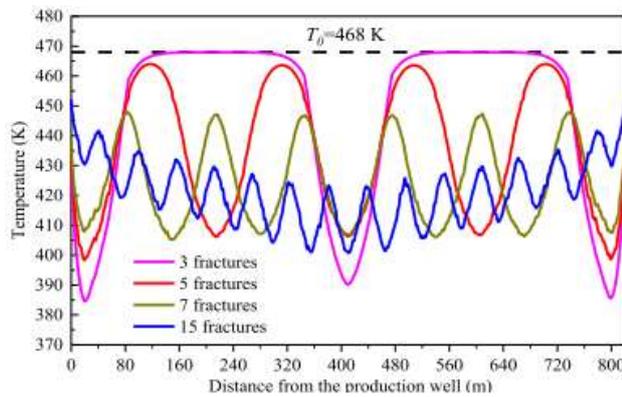
Gambar 11. Efek permeabilitas zona stimulasi pada ekstraksi panas. (a) Temperatur produksi dan rasio ekstraksi panas total, (b) Tekanan injeksi dan daya termal keluaran kumulatif [23]

3.4.3 Efek Jumlah Rekahan Pada Ekstraksi Panas

Ekstraksi panas sangat dipengaruhi oleh jumlah rekahan (N_f). Suhu produksi hampir tidak terpengaruh oleh peningkatan N_f antara 7 dan 15, tetapi rasio ekstraksi panas keseluruhan meningkat (Gambar 12(a)). Terdapat tiga wilayah yang berbeda yang diamati: stimulasi yang kurang memadai (N_f 7) memperpendek waktu penggunaan sambil meningkatkan daya termal keluaran total; stimulasi penuh (7 N_f 15) mempertahankan waktu penggunaan sambil secara bertahap meningkatkan daya termal keluaran; dan overstimulasi ($N_f > 15$) memperpendek waktu penggunaan sambil sedikit meningkatkan daya termal keluaran total. Pemecahan rekahan yang berlebihan meningkatkan biaya dan interferensi. Oleh karena itu, 15 adalah jumlah tahapan rekahan yang ideal. Distribusi suhu fluida sepanjang sumur produksi ditunjukkan dalam Gambar 13. *Fingering, breakthrough* termal yang terlalu dini, dan penurunan rasio ekstraksi panas semuanya merupakan efek dari rekahan yang kurang. Reservoir yang sepenuhnya distimulasi dan mendingin secara seragam dihasilkan dengan penambahan rekahan.



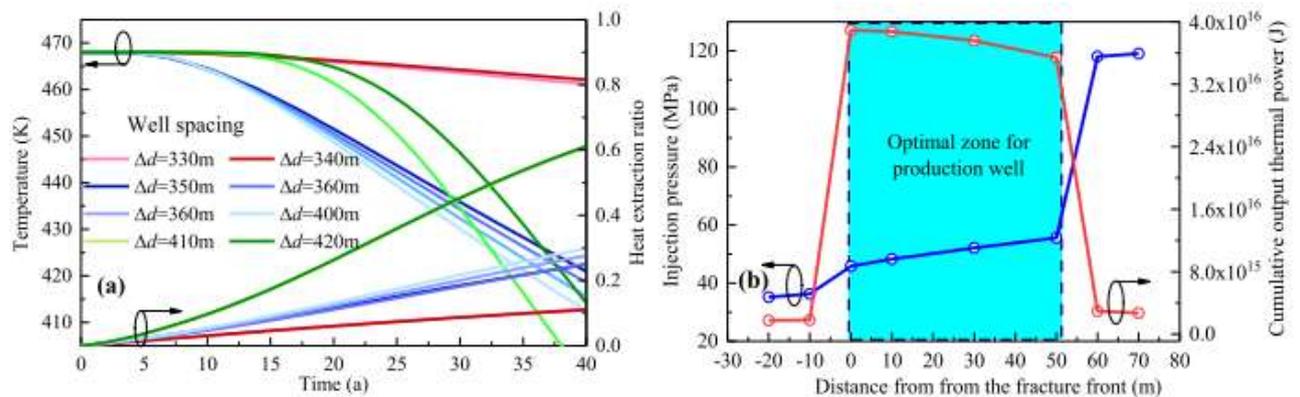
Gambar 12. Efek sejumlah tahapan perekahan pada ekstraksi panas. (a) Temperatur produksi dan rasio ekstraksi panas total, (b) Service time dan daya termal keluaran kumulatif [23]



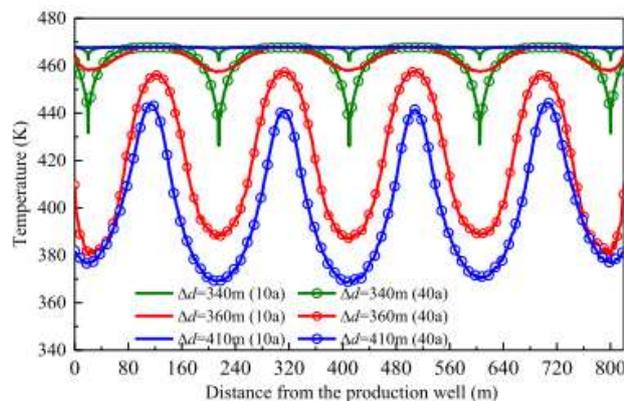
Gambar 13. Efek jumlah tahapan peretakan pada distribusi temperatur produksi [23]

3.4.4 Efek Jarak Sumur Terhadap Ekstraksi Panas

Dampak jarak sumur terhadap suhu produksi dan rasio ekstraksi panas total digambarkan dalam Gambar 14(a). Ketika sumur produksi ditempatkan di luar zona stimulasi (jarak > 400 m), waktu penggunaan maksimum tercapai. Rasio ekstraksi panas rendah terjadi pada jarak di bawah 350 m. Tekanan injeksi berkurang ketika sumur produksi memotong rekahan melintang, sesuai dengan Gambar 14(b). Ketika jarak antara sumur dan *front* rekahan adalah antara 0 m dan 50 m, daya termal keluaran kumulatif dapat diterima secara ekonomis. Seperti yang terlihat dalam Gambar 15, rasio ekstraksi panas berkurang ketika sumur memotong rekahan karena penurunan suhu terlokalisasi. Zona pendinginan yang lebih besar terjadi ketika sumur dijauhkan dari *front* rekahan. Zona yang tidak distimulasi mengalami tekanan injeksi yang lebih tinggi dan penurunan suhu yang cepat [23].



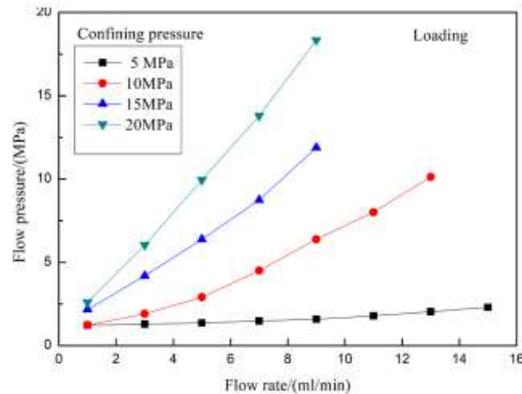
Gambar 14. Efek Jarak Sumur Pada Ekstraksi Panas. (a) Temperatur produksi dan rasio ekstraksi panas total, (b) Tekanan injeksi dan daya termal keluaran kumulatif setelah 40a [23]



Gambar 15. Efek jarak sumur pada distribusi temperatur produksi [23]

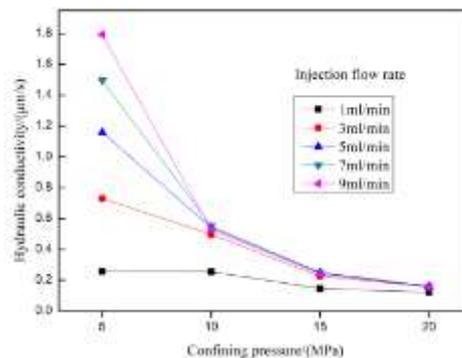
3.5 Karakteristik Aliran Selama Loading

Hubungan linear antara tekanan dan laju aliran di bawah berbagai *confining pressure settings* ditunjukkan dalam Gambar 14. Laju aliran yang lebih tinggi membutuhkan tekanan yang lebih tinggi, dan seiring dengan peningkatan *confining pressure*, rasio tekanan terhadap laju aliran juga meningkat. Tujuan dari hidrofraktur adalah untuk meningkatkan permeabilitas reservoir termal guna menghasilkan lebih banyak panas. Di bawah berbagai kondisi tekanan dan laju aliran, perubahan konduktivitas hidrolik dan *aperture* retakan diperiksa [25].

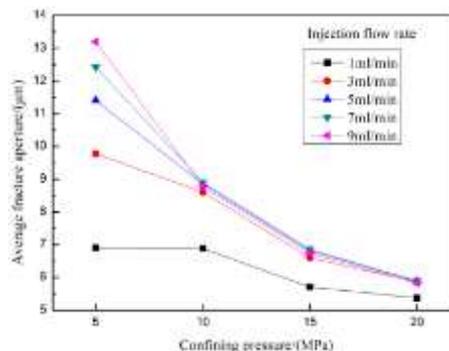


Gambar 16. Evolusi tekanan aliran dengan laju alir di bawah *confining pressure* yang berbeda [25]

Konduktivitas hidrolik dan *aperture* rekahan rata-rata pada rekahan granit dihitung. Kedua parameter ini mengalami penurunan seiring dengan peningkatan *confining pressure* pada berbagai laju aliran injeksi (Gambar 17 dan 18). Sumber utama penurunan ini adalah penyempitan *aperture* rekahan yang disebabkan oleh kontak yang lebih besar antara asperitas pada permukaan rekahan. Penurunan ini terjadi dengan cepat pada awalnya tetapi kemudian melambat seiring dengan peningkatan *confining pressure*. Terlepas dari laju injeksi, pola-pola ini tetap berlaku.



Gambar 17. Evolusi konduktivitas hidrolik yang diinduksi oleh *hydraulic fracturing* dengan *confining pressure* [25]



Gambar 18. Evolusi *aperture* rekahan rata-rata dari rekahan yang diinduksi oleh *hydraulic fracturing* dengan *confining pressure* di bawah [25]



Laju aliran yang lebih tinggi menghasilkan *aperture* rekahan rata-rata dan konduktivitas hidrolik yang lebih tinggi pada *confining pressure* 5 MPa. Namun, *aperture* rekahan rata-rata tetap stabil pada *confining pressure* yang lebih tinggi (10, 15, dan 20 MPa), terlepas dari laju aliran. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik aliran pada tingkat tekanan tinggi dan rendah berbeda. Uji Brazil menghasilkan *aperture* hidrolik yang jauh lebih besar daripada *aperture* hidrofraktur, menggambarkan karakteristik aliran yang berbeda antara kedua teknik tersebut [26].

3.6 Karakteristik Aliran Selama *Unloading*

Prosedur *unloading* termasuk studi transfer panas aliran untuk menguji reversibilitas *aperture* hidrolik rata-rata dan konduktivitas hidrolik. Temuan tersebut menunjukkan bahwa, pada laju aliran injeksi dan tingkat *confining pressure* yang sama, tekanan aliran yang lebih besar diperlukan selama pelepasan daripada selama *loading*. Hal ini menunjukkan bahwa selama *loading*, permukaan rekahan mengalami deformasi plastis yang ireversibel, yang mengurangi kapasitas aliran setelah *confining pressure* dilepaskan. Dengan penurunan selama *loading* dan pemulihan sebagian selama *unloading*, *aperture* rekahan rata-rata menunjukkan pemulihan yang tidak lengkap. Pengukuran *aperture* rekahan yang berkurang berkisar dari 0,21 hingga 4,25 m, menunjukkan pemulihan yang tidak lengkap akibat deformasi ireversibel yang terkait dengan *loading* [27].

3.7.1 Fenton Hill (USA)

Proyek pilot EGS pertama di dunia, proyek Fenton Hill di Valles Caldera, New Mexico, difokuskan pada ekstraksi energi dari lapisan granit dan metamorfik HDR. Uji statik 3-aksial digunakan untuk menentukan sifat elastis granodiorit. Sumur GT-2 dibor pada fase pertama hingga kedalaman 2930 m, dan sumur produksi EE-1 dibor pada fase kedua. Meskipun menghadapi beberapa kesulitan, uji sirkulasi mampu menghasilkan energi dalam siklus biner dengan daya termal 3–5 MWt. Untuk meningkatkan konektivitas hidrolik, dilakukan lebih banyak prosedur pengeboran dan hidrofraktur. Lebih dari 80% air yang disuntikkan berhasil dipulihkan selama uji aliran dalam siklus tertutup. Proyek Fenton Hill menunjukkan kelayakan dalam memproduksi listrik secara besar-besaran menggunakan batuan HDR dan memberikan wawasan berharga untuk upaya EGS di masa depan [14].

3.7.2 Rhine Graben EGS Projects

Sistem rekahan Cenozoik Eropa mencakup Rhine Graben di Eropa Barat (Swiss, Prancis, dan Jerman). Karena adanya konveksi dalam sistem rekahan yang disebabkan oleh sesar vertikal pada lapisan sedimen dari periode Cenozoik, Jurassic, dan Triasik serta dasar batuan kristalin Hertzian, wilayah ini memiliki kondisi suhu yang tepat untuk energi panas bumi. Sesar dominan di wilayah ini adalah sesar normal, meskipun ada juga beberapa aktivitas geser sejajar, termasuk geser murni hampir sempurna di reservoir yang lebih dalam [28].

3.7.3 Soultz-sous-Forêts (France)

Soultz-sous-Forêts, yang dimulai pada tahun 1990-an dan memiliki empat sumur, adalah proyek EGS pertama di wilayah Rhine Graben. Sistem ini terdiri dari satu sumur injeksi dan dua sumur produksi, yang akhirnya mencapai dasar batuan kristalin yang terdiri dari granit dua-mika dan granit porfiri MFK. Setiap sumur memiliki zona pecah alami yang permeabel di horison produktifnya. Batuan granit Karboniferous dicapai oleh sumur GPK-1, yang selesai dibor pada tahun 1992, pada kedalaman 3590 m dan suhu sekitar 160 °C. Sumur-sumur tambahan (GPK-2, 3, dan 4) mencapai dasar granit pada kedalaman 5060-5270 m dan suhu sekitar 200°C. Stimulasi hidrolik digunakan untuk meningkatkan produktivitas dengan memompa GPK-2 selama enam hari dengan laju tiga meter per menit. Stimulasi simultan GPK-2 dan GPK-3 meningkatkan kopling hidrolik. Dua HF di GPK-4 lebih produktif. Pembangkit listrik berkapasitas 1,5 MW sudah beroperasi, dan rencananya akan diperluas menjadi 3 MW [29].

3.7.4 Rittershoffen (France)

Sebuah proyek EGS kedua dimulai di Rittershoffen, sekitar 6 km di sebelah tenggara Soultz, sebagai hasil keberhasilan proyek Soultz. Kondisi geologi dan tektonik yang mirip dengan Soultz juga ada di sini, namun isoterm 150°C sedikit lebih dangkal. Proyek ini dimulai pada tahun 2004, dan sumur GRT-1 dibor pada tahun 2013 dan sumur GRT-2 selesai pada tahun 2014. Pada kedalaman sekitar 2200 meter, kedua sumur mendekati zona sesar Rittershoffen dan zona target kristalin. Stimulasi termal, kimia, dan hidrolik digunakan untuk mengaktifkan sumur GRT-1. Selama stimulasi hidrolik, terjadi peristiwa seismik dengan magnitudo 1,4 hingga 1,6. Sejak terhubung ke jaringan listrik sekitar pada tahun 2016, pasangan EGS Rittershoffen telah menghasilkan daya termal nominal sebesar 25 MWth [30].



3.7.5 Basel (Switzerland)

Proyek EGS lainnya di wilayah Rhine Graben adalah proyek Deep Heat Mining di Basel, Swiss. Di Basel, sumur BS-1 selesai dibor pada tahun 2006 dan mencapai zona target granit. Prosedur MHF dilakukan pada tahun yang sama, dengan menginjeksikan 12.000 m³ air pada tekanan 300 bar di kepala sumur. Perlakuan ini secara signifikan meningkatkan permeabilitas batuan. Namun, tidak lama setelahnya, aktivitas seismik dengan magnitudo hingga 3,4 terjadi, yang menyebabkan proyek EGS Basel dihentikan dan ditinggalkan [31].

3.8 Potensi Penerapan EGS di Indonesia

Indonesia merupakan negara dengan potensi geothermal yang cukup besar. Hampir setiap pulau besar memiliki sumber energi panas bumi ini. Dengan potensi tersebut, memungkinkan negara ini untuk memanfaatkan sumber energi terbarukan ini menjadi salah satu energi untuk mendukung perkembangan negara. Akan tetapi potensi geothermal yang cukup besar belum tentu dapat di manfaatkan secara keseluruhan. Proses pemanfaatan ini masih memiliki berbagai kendala seperti akses lokasi, biaya, teknologi atau bahkan faktor geologi. Salah satu masalah yang umum yaitu faktor ekonomi dimana produksi geothermal menjadi listrik kurang menguntungkan karena kurang maksimalnya produksi karena panas yang digunakan kurang maksimal. Hal tersebut dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti permeabilitas batuan yang kurang atau tidak adanya fluida panas bumi. Masalah tersebut dapat diatasi dengan solusi penerapan metode baru seperti EGS. Penggunaan *Enhanced Geothermal System* cocok digunakan pada sistem panas bumi yang memiliki sistem dominasi air berupa water dominated. Hal ini dikarenakan sistem water dominated berupa air yang mengisi rongga-rongga, saluran terbuka atau rekahan-rekahan, sehingga membuat tekanan dan temperatur tidak konstant terhadap kedalaman serta diperlukannya injeksi fluida yang memiliki tekanan tinggi untuk menaikkan panas kepermukaan sehingga produksi menjadi naik dari sebelumnya. Berikut beberapa daerah geothermal yang dilakukan pengujian untuk potensi penerapan EGS di Indonesia[32].

3.8.1 Panas Bumi Kamojang

Sumur Kamojang memproduksi uap, dengan entalpi fluida mencapai 2800 kJ/kg, tekanan 30 – 34 bar, dan temperatur sekitar 235-250 °C. Kapasitas sumur bervariasi dari 20 hingga 110 ton uap/jam. Permeabilitas-ketebalan produk (Kh) berkisar antara 500 hingga 140,000 milidarcy meter, dimana sumur produksi menunjukkan nilai lebih dari 4,900 milidarcy meter. Sumur produksi lapangan kamojang pada tahun 2016 tercatat memproduksi 235 megawatt (MW) listrik. Selain sumur produksi pada lapangan ini terdapat sumur reinjeksi, yaitu untuk meningkatkan efisiensi pendinginan di kondensor dan juga tingkat reinjeksi, maka air dari danau Cikaro di tengah lapangan dipompa ke menara pendingin, dan disuntikkan dengan uap terkondensasi. Berdasarkan data sekunder dari tahun 2010 hingga 2013, terdapat 8 sumur yang digunakan untuk pembuangan zat kondensat dari *power plant* [32].

Sistem panas bumi Kamojang dominasi uap, diperkirakan uap mengisi rongga - rongga, rekahan - rekahan, sedangkan air mengisi pori-pori batuan [29]. Karena jumlah air yang terkandung di dalam pori-pori relatif sedikit, maka saturasi air sama atau hanya sedikit lebih besar dari saturasi air konat (Swc) menyebabkan air terperangkap dalam pori-pori batuan. Kapasitas energi saat ini sebesar 200 MW dengan target akan bertambah setiap tahun. Kondisi uap yang sangat kering dan kelembabannya sangat rendah tersebut memungkinkan uap untuk langsung masuk ke turbin dan tidak perlu chemical treatment seperti EGS demi mendapatkan produksi uap yang optimal [32].

3.8.2 Panas Bumi Dieng

Pada sistem panas bumi Dieng, tipe reservoir ialah *water dominated system* [30]. Karena sumur-sumurnya menghasilkan fluida dua fasa berupa 60% air dan 40 % uap. Permeabilitas-ketebalan produk (Kh) sumur ditentukan dari pengujian sumur, dan nilai-nilainya berkisar antara 1.3 sampai 6.5 darcy-m. Densitas batuan berkisar 2500 kg/m³, porositas sekitar 0.1, konduktivitas batuan 2.5W/m/K dan panas spesifik 1000 J/kg /K. Selain itu kapasitas energi yang dihasilkan saat ini hanya sebesar 60 MW jauh dibawah kapasitas Kamojang. Sehingga untuk memenuhi target produksi dibutuhkan suatu metode *Enhanced Geothermal System* non konvensional untuk meningkatkan produksi uap [32].

Pengaplikasian *Enhanced Geothermal System* dibutuhkan 6.000-600.000 galon air dan zat-zat kimia yang diinjeksi ke bawah permukaan. Selain itu, sisa fluida yang diinjeksikan tidak dapat diangkat 100% ke permukaan sehingga ribuan galon air akan terbuang, serta dapat mencemari lingkungan. Hal tersebut merupakan suatu masalah produksi yang dapat merugikan secara ekonomi dan lingkungan. Dengan penggunaan zat kimia dapat merusak lingkungan berupa kontaminasi zat kimia di bawah tanah [32].

Riset dilakukan untuk mengatasi masalah diatasi dan diambil kesimpulan bahwa masalah dapat diatasi menggunakan PAA-CO₂ Fracturing Fluid. Fluida ini aktif saat bereaksi dengan karbon dioksida di bawah tanah dan mengembang hingga 150% selama reaksi. Dengan volume yang bisa bertambah hingga 1,5x di dalam tanah, dapat



mengurangi penggunaan ribuan galon air yang selama ini digunakan. Hal itu berarti dapat mengatasi biaya yang dibutuhkan perusahaan dalam mengembangkan produksi panas bumi di lapangan, sehingga lebih efektif. Selain itu, fluida ini dapat dibersihkan sepenuhnya dengan teknik *CO₂ Depressurization* dan diangkat ke permukaan. Fluida yang ditarik ke permukaan dapat digunakan kembali, diinjeksi kembali untuk menghasilkan permeabilitas batuan yang diinginkan sehingga lebih hemat dan ramah lingkungan, dapat pula mengatasi ketakutan warga akan pencemaran lingkungan dan air tanah di daerah sekitar. Hal itu dikarenakan adanya reaksi bolak-balik atau sistem tertutup dimana saat bereaksi dengan *CO₂*, fluida akan mengembang di bawah tanah. Namun saat konsentrasi *CO₂* dihilangkan, fluida akan menyusut dan naik kembali ke permukaan [32].

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini yaitu:

1. Batuan dengan suhu tinggi mengalami variasi dinamis dalam *tensile strength*, tekanan termal dari penyusutan yang dingin, dan tekanan air pori selama rekahan hidrolik HDR. Bersama-sama, elemen-elemen ini berkontribusi pada terjadinya kerusakan HDR. Dengan mengurangi kekuatan tarik, menciptakan tekanan termal, dan mengubah tekanan air pori, guncangan pendinginan air memainkan peran penting. Guncangan ini mengurangi tekanan yang diperlukan untuk memulai rekahan, mendorong inisiasi rekahan sekunder, dan menciptakan jaringan rekahan yang kompleks.
2. Tekanan injeksi yang dipertahankan selama hydroshearing dengan pemompaan terus menerus mendekati tegangan minimum di dalam tanah. Setelah tekanan tahanan batuan dicapai, akan terjadi *slip* pada batuan dan membuat terbukanya ruang permeabilitas di batuan.
3. Tegangan termal yang lebih tinggi dan penurunan *tensile strength* yang semakin buruk disebabkan oleh peningkatan suhu awal. Karena penurunan yang besar dalam tekanan inisiasi rekahan akibat penurunan *tensile strength* ini, cabang rekahan dapat terbentuk dengan lebih mudah. Selain itu, rekahan hidrolik terkena guncangan pendinginan air akibat penetrasi air kriogenik, yang menurunkan suhu dan *tensile strength* batuan. Hal ini mendorong penyebaran rekahan lebih jauh, meningkatkan area stimulasi. Sangat penting untuk memperhatikan degradasi karakteristik mekanik yang disebabkan oleh guncangan pendinginan air tersebut.
4. Rekahan cenderung memperluas ke arah tegangan in-situ maksimal ketika perbedaan tegangan in-situ meningkat, yang menghasilkan wilayah penyebaran yang lebih kecil untuk jaringan rekahan. Prediksi yang akurat terhadap tekanan inisiasi rekahan, area stimulasi, dan arah penyebaran rekahan di reservoir HDR sangat penting untuk pengembangan proyek EGS. Saat merancang rekahan hidrolik, prediksi ini menjadi sumber daya yang berguna yang mempertimbangkan berbagai faktor geologi.
5. Ketika menggunakan air untuk mendinginkan batuan panas, baik konveksi makroskopis maupun konduksi mikroskopis digunakan untuk transfer panas. Tingkat penurunan suhu ditentukan oleh koefisien transfer panas permukaan. Reservoir geotermal HDR dengan koefisien yang lebih tinggi memiliki kinerja pertukaran panas yang lebih baik, tekanan rekahan yang lebih rendah, dan permeabilitas reservoir yang jauh lebih tinggi.
6. Peningkatan laju injeksi menyebabkan terjadinya penembusan termal awal, namun tidak memiliki dampak nyata pada rasio ekstraksi panas atau total daya *output* termal selama masa EGS. Alih-alih distribusi yang tidak merata, laju injeksi yang identik untuk setiap segmen meningkatkan efektivitas pemindahan panas dan melindungi terhadap terjadinya pintasan termal lokal.
7. Dibandingkan dengan pengaruh lebar rekahan, peningkatan permeabilitas zona stimulasi lebih menguntungkan untuk menurunkan tekanan injeksi dan meningkatkan total daya *output* termal. Memprioritaskan stimulasi geser dalam desain fraktur *multistage* meningkatkan permeabilitas reservoir. Menemukan permeabilitas reservoir terbaik untuk lebar rekahan tertentu sangat penting.
8. Akibat ekstraksi panas terlokalisasi di sekitar rekahan lintang yang disebabkan oleh penempatan sumur produksi di luar ujung rekahan, rasio ekstraksi panas total dan daya *output* termal kumulatif rendah.
9. Dibandingkan dengan operasi *loading*, tekanan aliran secara signifikan meningkat selama operasi *unloading*. Apertur hidrolik tidak dapat sepenuhnya pulih dari deformasi pembebanan yang ireversibel selama pembongkaran.
10. Keberhasilan proyek EGS di Eropa Barat memicu debat mengenai apakah menginstal sistem EGS di Polandia akan menguntungkan. Batuan HDR Polandia telah mengalami penyelidikan awal untuk mengevaluasi potensi keseimbangan termal dari formasi geologi yang mungkin. Sejumlah wilayah menarik telah ditemukan menggunakan informasi tentang distribusi aliran panas Bumi, termasuk dasar kristalin Pegunungan Karkonosze, batuan vulkanik dari Blok Gorzów, dan endapan sedimen dari blok Szczecin, Mogilno, dan Upper Silesian.
11. Indonesia memiliki potensi besar energi panas bumi dan sudah mulai melakukan penelitian mengenai potensi penerapan EGS di lapangan panas bumi Indonesia.
12. Penggunaan Enhanced Geothermal System cocok digunakan pada sistem panas bumi yang memiliki sistem dominasi air (*water dominated system*). Pada sistem panas bumi Dieng memiliki sistem dominasi air (*water dominated system*). Kapasitas energi yang dihasilkan di panas bumi Dieng saat ini hanya sebesar 60 MW. Sehingga



- untuk memenuhi target produksi dibutuhkan suatu metode untuk menaikkan produksi uap. Dengan keterangan dan kondisi sistem panas bumi Dieng saat ini, penerapan EGS tepat diaplikasikan di sistem panas bumi Dieng.
13. Pada sistem panas bumi Kamojang sistem Geothermalnya termasuk *vapour dominated* dengan kondisi uap yang sangat kering dan kelembabannya sangat rendah. Sehingga memungkinkan uap untuk langsung masuk ke turbin dan tidak perlu *chemical treatment* seperti EGS demi mendapatkan produksi uap yang optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zhang, Y., Zhang, Y., Zhou, L., Lei, Z., Guo, L., & Zhou, J. (2022). Reservoir stimulation design and evaluation of heat exploitation of a two-horizontal-well enhanced geothermal system (EGS) in the Zhacang geothermal field, Northwest China. *Renewable Energy*, 183, 330-350.
- [2] Hakim, A. F., Krismadiana, K., Sholihah, F., Ismawati, R., & Dewantari, N. (2023). Potensi dan Pemanfaatan Energi Panas Bumi di Indonesia. *Indonesian Journal of Conservation*, 11(2), 71-77.
- [3] Tjandra, K. (2018). *Empat bencana geologi yang Paling Mematikan*. UGM PRESS.
- [4] Meilani, H., & Wuryandani, D. (2010). Potensi panas bumi sebagai energi alternatif pengganti bahan bakar fosil untuk pembangkit tenaga listrik di Indonesia. *Jurnal Ekonomi & Kebijakan Publik*, 1(1), 47-74.
- [5] Azhar, M., & Suhartoyo, S. (2015). Aspek Hukum Kebijakan Geothermal Di Indonesia. *Law Reform*, 11(1)
- [6] Tang, Q., Xue, G. H., Yang, S. J., Wang, K., & Cui, X. M. (2017). Study on the preparation of a free-sintered inorganic polymer-based proppant using the suspensions solidification method. *Journal of Cleaner Production*, 148, 276-282.
- [7] Moska, R.; Labus, K.; Kasza, P. Hydraulic Fracturing in Enhanced Geothermal Systems—Field, Tectonic and Rock Mechanics Conditions—A Review. *Energies* 2021, 14, 5725. <https://doi.org/10.3390/en14185725>
- [2] Karvounis, D. C., & Jenny, P. (2014). Numerical Studies of Combined Shallow and Deep Geothermal Systems. In *Proceedings of the 39th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.
- [3] Guo T, Tang S, Sun J, et al. A coupled thermal-hydraulic-mechanical modeling and evaluation of geothermal extraction in the enhanced geothermal system based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation. *Appl Energy* 2020; 258:113981.
- [4] Zhao YS, Feng ZJ, Feng ZC, et al. THM (Thermo-hydro-mechanical) coupled mathematical model of fractured media and numerical simulation of a 3D enhanced geothermal system at 573 K and buried depth 6000–7000 M. *Energy* 2015;82:193–205.
- [5] Zheng J, Li P, Dou B, et al. Impact research of well layout schemes and fracture parameters on heat production performance of enhanced geothermal system considering water cooling effect. *Energy* 2022;255:124496.
- [6] Yu, W., Jin, L., Du, X., & Chen, F. (2022). Coupling influence of low strain rate and structural size on splitting-failure of concrete: Tests and Mechanism analysis. *Construction and Building Materials*, 323, 126641.
- [7] Ma, Y., Li, S., Zhang, L., Liu, S., Liu, Z., Li, H., ... & Zhang, H. (2020). Numerical simulation study on the heat extraction performance of multi-well injection enhanced geothermal system. *Renewable Energy*, 151, 782-795.
- [8] Xue Y, Liu J, Liang X, et al. Influence mechanism of brine-gas two-phase flow on sealing property of anisotropic caprock for hydrogen and carbon energy underground storage. *Int J Hydrogen Energ* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.173>.
- [9] Sharmin, T. *et al.* (2023) 'A State-of-the-Art Review on Geothermal Energy Extraction , Utilization , and Improvement Strategies : Conventional , Hybridized , and Enhanced Geothermal Systems', 18(March).
- [10] Gong, L., Han, D., Chen, Z., Wang, D., Jiao, K., Zhang, X., & Yu, B. (2023). Research status and development trend of key technologies for enhanced geothermal systems. *Natural Gas Industry B*, 10(2), 140-164.



- [11] White, M. D., Fu, P., Ghassemi, A., Huang, H., Rutqvist, J., & Johnston, B. (2018, February). Numerical simulation applications in the design of EGS Collab Experiment 1. In *PROCEEDINGS, 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.
- [12] Zimmermann, G.; Moeck, I.; Blöcher, G. Cyclic waterfrac stimulation to develop an enhanced geothermal system (EGS): Conceptual design and experimental results. *Geothermics* **2010**, 39, 59–69. [CrossRef]
- [13] Li, N., Zhang, S., Ma, X., Zou, Y., Li, S., & Zhang, Z. (2020). Thermal effect on the evolution of hydraulic fracture conductivity: an experimental study of enhanced geothermal system. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 187, 106814.
- [14] Rinaldi, A.P. and Rutqvist, J. (2019) ‘Geothermics Joint opening or hydroshearing? Analyzing a fracture zone stimulation at Fenton Hill’, *Geothermics*, 77(August 2018), pp. 83–98. doi:10.1016/j.geothermics.2018.08.006.
- [15] Papachristos, E. (2017). *A 3D hydro-mechanical discrete element model for hydraulic fracturing in naturally fractured rock* (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes).
- [16] Majer, E. L., Baria, R., Stark, M., Oates, S., Bommer, J., Smith, B., & Asanuma, H. (2007). Induced seismicity associated with enhanced geothermal systems. *Geothermics*, 36(3), 185-222.
- [17] Xue, Y., Liu, S., Chai, J., Liu, J., Ranjith, P., Cai, C., Gao, F., & Bai, X. (2023). Effect of Water-Cooling Shock on Fracture Initiation and Morphology of High-Temperature Granite: Application of Hydraulic Fracturing to Enhanced Geothermal Systems. *Applied Energy*, 337, 120858.
- [18] Xue Y, Ranjith PG, Chen Y, et al. Nonlinear mechanical characteristics and damage constitutive model of coal under CO₂ adsorption during geological sequestration. *Fuel* 2023;331:125690.
- [19] S. Han, Y. Cheng, Q. Gao, C. Yan, Z. Han, J. Zhang, Investigation on heat extraction characteristics in randomly fractured geothermal reservoirs considering thermo-poroelastic effects, *Energy Sci Eng* 00 (2019) 1e22.
- [20] X. Song, Y. Shi, G. Li, R. Yang, G. Wang, R. Zheng, J. Li, Z. Lyu, Numerical simulation of heat extraction performance in enhanced geothermal system with multilateral wells, *Appl. Energy* 218 (2018) 325e337.
- [21] W.B. Huang, W.J. Cao, F.M. Jiang, Heat extraction performance of EGS with heterogeneous reservoir: a numerical evaluation, *Int. J. Heat Mass Transf.* 108 (2017) 645e657.
- [22] F. Jiang, J. Chen, W. Huang, L. Luo, A three-dimensional transient model for EGS subsurface thermo-hydraulic process, *Energy* 72 (2014) 300e310.
- [23] Han, S., Cheng, Y., Gao, Q., Yan, C., & Zhang, J. (2020). Numerical Study Study on Heat Extraction Performance of Multistage Fracturing Enhanced Geothermal System. *Renewable Energy*, 149, 1214-1226.
- [24] B. Lecampion, J. Desroches, Robustness to formation geological heterogeneities of the limited entry technique for multi-stage fracturing of horizontal wells, *Rock Mech. Rock Eng.* 48 (6) (2015) 2637e2644.
- [25] Yueqiang,dkk. (2019). Experimental Study on Flow and Heat Transfer Characteristics of Water Flowing Through A Rock Fracture Induced By Hydraulic Fracturing For An Enhanced Geothermal System. *Journal of Applied Thermal Engineering*, 154: 433-441.
- [26] Tester, J.; Anderson, B.; Batchelor, A.; Blackwell, D.; DiPippo, R.; Drake, M.; Garnish, J.; Livesay, B.; Moore, M.; Nichols, K.; et al. *The Future of Geothermal Energy—Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*; Massachusetts Institute of Technology: Cambridge, MA, USA; Idaho National Laboratory: Idaho Falls, ID, USA, 2006.
- [27] Cuenot, N.; Charlety, J.; Dorbath, L.; Hasser, H. Faulting mechanisms and stress tensor at the European HDR site of Soultz-Sous-Forêts. In *Proceedings of the Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, CA, USA, 31 January–2 February 2005.
- [28] BESTEC GmbH. Available online: <https://www.bestec-for-nature.com/index.php/projects-en> (accessed on 19 March 2021).
- [29] ES Geothermie. Available online: <https://geothermie.es.fr/en/> (accessed on 13 July 2021).
- [30] Ladner, F.; Häring, M. Hydraulic characteristics of the Basel-1 enhanced geothermal system. *GRC Trans.* 2009, 33, 199–204.



- [31] Basuki, U. J. (2015). Unjuk Kerja Turbin Uap Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Dalam Pandangan Pendidikan Islam. *SIMETRIS*, 9(1), 28-33.
- [31] Nurrochim, W. F., & Harmoko, U. (2021). Analisa Optimalisasi “Abandoned Well Production” Menggunakan “Downhole Heat Exchanger (DHE)” Sebagai Sumber Energi Baru di Lapangan Panas Bumi Dieng. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 2(1), 14-26.
- [32] Elicia, R. *et al.* (2017) ‘Potensi egs (enhanced geothermal system) di indonesia; perbandingan aplikasi egs di lapangan kamojang dan dieng’, (September), pp. 1533–1544.