



Pengembangan Teknologi *Supercritical Geothermal*: Potensi dan Strategi untuk Energi Bersih dan Berkelanjutan

Permata Dian Pertiwi ¹⁾, Fauji Islami Phasya ²⁾ Riska Laksmi Sari ^{3*)}

¹⁾ Teknik Perminyakan, Universitas Jember

²⁾ Teknik Perminyakan, Universitas Jember

³⁾ Teknik Perminyakan, Universitas Jember

* corresponding email: riskalaksmi@unej.ac.id

ABSTRACT

Development of supercritical geothermal technology is a complex and challenging process that requires significant investment in research, technology development, and collaboration. However, the potential benefits of this technology include low carbon footprint, high efficiency, and the potential to provide reliable electricity, making it an important focus area for the future of clean energy production. This study is qualitative and uses literature study methods involving data collection and analysis from various literature sources, including scientific journals, books, and reports. The literature study was conducted by searching and collecting several relevant and accurate sources such as scientific journals, books, and official publications on the topic. Data collection was carried out by analyzing the content of each available source. The supercritical geothermal well drilling method can generate electricity of 3-5 MW per well. Several successful energy development projects include exploration well drilling in Mexico, Italy, Iceland, USA, Kenya, and Japan. Supercritical energy development technology is also continuously being developed, such as closed-loop and CO₂ utilization. The development of supercritical geothermal technology is a complex and challenging process that requires significant investment in research, technology development, and collaboration. However, the potential benefits of this technology include low carbon footprint, high efficiency, and the potential to provide reliable electricity, making it an important focus area for the future of clean energy production.

Keywords: *development; efficiency; energy; geothermal; supercritical; technology*

I. PENDAHULUAN

Energi panas bumi adalah energi panas alami dari dalam bumi yang ditransfer ke permukaan bumi secara konduksi dan konveksi. Pendapat lain menyatakan bahwa energi panas bumi merupakan energi panas yang keluar dari dalam bumi yang terkandung dalam batuan dan fluida yang mengisi rekahan dan pori batuan pada kerak bumi. Energi panas bumi merupakan sumber energi alternatif yang penting dan menjanjikan yang dapat terus berkembang. Sumber daya panas bumi ini dikaitkan dengan daerah vulkanik. Energi panas bumi (*geothermal*) merupakan sumber energi terbarukan, berupa energi panas yang tersimpan dalam bentuk air panas atau uap pada kondisi geologi tertentu pada kedalaman beberapa kilometer di dalam kerak bumi. Saat ini energi panas bumi mulai menjadi perhatian dunia, dengan meningkatnya kebutuhan akan energi serta meningkatnya harga minyak, telah memacu negara-negara lain untuk mengurangi ketergantungan mereka pada minyak dengan cara memanfaatkan energi panas bumi baik pemanfaatan langsung maupun tidak langsung [1]. Sistem *geothermal* vulkanik berkaitan erat dengan intrusi magmatik di bagian atas kerak bumi. Hal ini terlihat dari peningkatan suhu, entalpi fluida spesifik, dan konveksi air tanah. Biasanya, pemanfaatan konvensional fluida *geothermal* dari sistem tersebut menghasilkan sekitar 3-5 MW daya listrik per sumur.

Pada tahun 2018, total eksploitasi energi *geothermal* dunia sekitar 14,4 GW. Baru-baru ini, telah dikembangkan model terbaru yang menunjukkan bahwa fluida superkritis dengan suhu dan entalpi yang lebih tinggi mungkin muncul di batas antara sistem *geothermal* dan sumber panas magmatik. Dengan menggunakan fluida *geothermal* superkritis, daya listrik yang dihasilkan dari satu sumur dapat ditingkatkan hingga 30-50 MW, sepuluh kali lebih banyak dari sumur *geothermal* konvensional [2]. Fluida *geothermal* superkritis biasanya diklasifikasikan berdasarkan suhu dan tekanan kritis air murni. Namun, istilah "*supercritical*" mungkin tidak sepenuhnya menggambarkan sifat fasa fluida untuk fluida air-garam biner. Istilah superkritis didefinisikan sebagai uap fasa tunggal dengan suhu di atas suhu kritis. Fluida superkritis ini mungkin terbentuk oleh sirkulasi air tanah dekat intrusi, dengan atau tanpa *input* gas magmatik. Lebih dari 25 sumur *geothermal* di seluruh dunia telah mencapai kedalaman di bawah 3 km untuk memanfaatkan fluida *geothermal* ini. Teknologi



supercritical geothermal merupakan jenis teknologi pembangkit listrik *geothermal* yang menggunakan fluida *geothermal* dengan tekanan dan suhu yang sangat tinggi untuk menghasilkan listrik. Pengembangan teknologi ini melibatkan beberapa langkah dan pertimbangan. Secara keseluruhan, pengembangan teknologi *supercritical geothermal* adalah proses yang kompleks dan menantang yang memerlukan investasi yang signifikan dalam penelitian, pengembangan teknologi, dan kerja sama. Namun, manfaat potensial dari teknologi ini termasuk jejak karbon yang rendah, efisiensi tinggi, dan potensi untuk menyediakan listrik yang dapat diandalkan juga menjadikannya area fokus yang penting untuk masa depan produksi energi bersih [3].

Pengembangan teknologi *supercritical geothermal* masih termasuk ke dalam kategori teknologi yang baru. Indonesia berpotensi besar dalam mengembangkan teknologi *supercritical geothermal*, karena memiliki jumlah gunung berapi aktif terbanyak di dunia. Kurang optimalnya pemanfaatan sumber daya *geothermal* yang ada, menjadikan sebuah tantangan tersendiri bagi masyarakat Indonesia. Menurut data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Indonesia memiliki potensi *geothermal* mencapai kisaran angka 28.996 MW. Penggunaan teknologi *supercritical geothermal* di Indonesia diharapkan nantinya dapat memberikan manfaat yang signifikan dalam menyediakan pasokan energi yang bersih dan berkelanjutan serta mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil. Selain itu, pengembangan teknologi ini juga dapat mampu membuka lapangan kerja baru dan meningkatkan jumlah pendapatan negara. Namun, beberapa kendala seperti regulasi dan perizinan yang cukup rumit serta memakan waktu lama menjadi hambatan untuk pengembangan energi ini di Indonesia. Sumber daya manusia yang terampil dan IPTEK juga menjadi kendala dalam pengembangan teknologi ini di Indonesia. Meskipun demikian, upaya untuk mengembangkan teknologi *supercritical geothermal* di wilayah Indonesia sudah mulai dilakukan. Pengembangan teknologi ini diawali dalam bentuk kerja sama dengan mitra asing dan investasi dari perusahaan swasta. Beberapa negara yang memiliki sumber daya *geothermal* yang besar seperti Islandia, Amerika Serikat, Italia, dan Jepang telah melakukan penelitian dan pengembangan teknologi ini. Terdapat wilayah di Indonesia yang berpotensi menjadi daerah pengembangan teknologi *geothermal critical* antara lain, Gunung Merapi di Jawa Tengah, Daerah Baturaden di Jawa Tengah, Kawasan Sibayak di Sumatera Utara, Kawasan Dieng di Jawa Tengah, Kawasan Gunung Salak di Jawa Barat, Kawasan Gunung Rajabasa di Lampung, dan Kawasan Gunung Talang di Sumatera Barat.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini bersifat kualitatif dengan menggunakan metode studi literatur yang melibatkan pengumpulan dan analisis data dari berbagai sumber literatur, termasuk jurnal ilmiah, buku, laporan, dan publikasi pemerintah. Studi literatur dilakukan dengan mencari dan mengumpulkan beberapa sumber seperti jurnal ilmiah, buku, maupun publikasi resmi yang relevan dan akurat dengan topik. Pengambilan data dilakukan dengan menganalisis isi dari setiap sumber yang ada

Langkah-langkah utama yang dilakukan dalam studi literatur ini adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi topik penelitian yang akan diulas. Dalam penulisan ini, topik penelitian yang diangkat adalah pengembangan teknologi *supercritical geothermal* dan penerapannya.
2. Pencarian dan pengumpulan literatur seperti jurnal ilmiah, buku, laporan, artikel resmi, dan publikasi pemerintah yang terkait dengan *supercritical geothermal*.
3. Penyeleksian sumber literatur dan pengevaluasian yang detail dengan topik penelitian, yaitu pengembangan teknologi *supercritical geothermal*. Sumber literatur untuk penelitian ini dapat diseleksi dengan memperhatikan segi kualitas sumber, relevan dengan topik penelitian, dan bukan terbitan terdahulu.
4. Pengumpulan data dari literatur yang relevan. Dalam tahap ini penulis akan mencari sumber-sumber literatur yang dapat memberikan informasi tentang *supercritical geothermal*, seperti definisi dan konsepnya, potensi pengembangannya, teknologi yang digunakan, tantangan yang dihadapi, dan manfaatnya.
5. Analisis data untuk mengambil informasi yang diperlukan. Tujuannya untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif tentang *supercritical geothermal* dan menerapkannya pada penelitian ini.
6. Penulisan hasil studi literatur yang mencakup analisis dan gagasan menarik terkait potensi dan tantangan pengembangan teknologi *supercritical geothermal*. Semua hasil penelitian akan ditulis secara sistematis dan jelas, dengan menggunakan bahasa yang mudah dipahami
7. Evaluasi dan verifikasi terhadap sumber literatur yang digunakan dilakukan untuk memastikan keakuratan dan keaslian data yang dikumpulkan. Tahap ini dilakukan dengan memeriksa referensi yang digunakan dan memverifikasi informasi yang diperoleh dari sumber literatur. Tujuan dari evaluasi dan verifikasi ini adalah untuk memastikan bahwa semua data yang digunakan dalam penelitian adalah akurat dan dapat dipercaya.

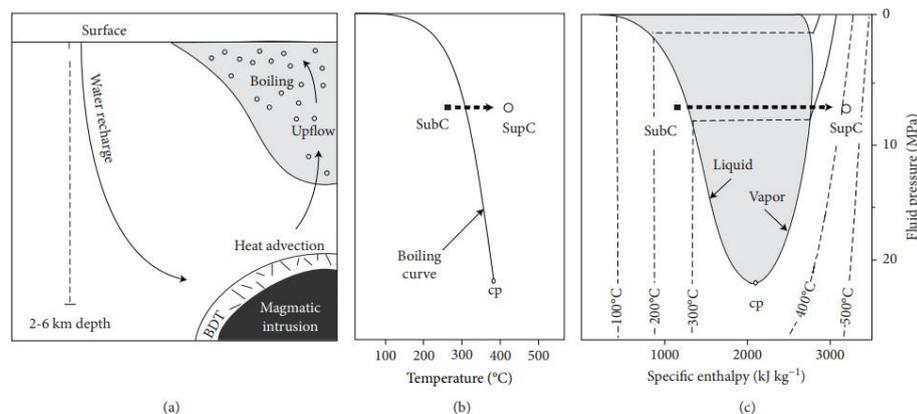
Dalam proses penelitian studi literatur ini, penting untuk memperhatikan kualitas dan keaslian sumber literatur yang digunakan. Oleh karena itu, peneliti perlu melakukan evaluasi dan verifikasi terhadap sumber-sumber literatur yang digunakan untuk memastikan keakuratan dan keandalannya.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. *Supercritical Geothermal Fluids*

Sistem *geothermal* vulkanik sangat berkaitan dengan adanya magma atau material panas yang dapat menembus lapisan atas kerak bumi. Hal ini menyebabkan terjadinya peningkatan suhu, entalpi dari fluida *geothermal*, dan konveksi air tanah. Sistem ini umumnya dikategorikan sebagai sistem high-enthalpy, yaitu sistem yang memiliki entalpi fluida yang relatif tinggi. Dalam eksploitasi konvensional fluida *geothermal* dari sistem ini, biasanya digunakan teknologi dengan metode pemboran sumur *geothermal* untuk dapat menghasilkan listrik. Rata-rata, satu sumur *geothermal* konvensional mampu menghasilkan listrik sebesar 3-5 MW. Namun, pada tahun 2018, total eksploitasi energi *geothermal* di seluruh dunia mencapai 14,4 GW [2]. Konsep dari sistem ini adalah panas yang berasal dari kandungan magma menyebar melalui konduksi ke air tanah di sekitarnya pada bagian bawah sistem *geothermal* yang berada di bawah sumur *geothermal* konvensional. Hasil studi dan analisis terbaru yang dilakukan para peneliti menunjukkan bahwa adanya indikasi keberadaan fluida *supercritical geothermal* yang berada pada perbatasan antara sistem *geothermal* dan sumber panas magma. Fluida *supercritical geothermal* diperkirakan memiliki suhu dan entalpi yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan fluida *geothermal* konvensional, yaitu bernilai lebih dari 400°C dan 3000 kJ/kg. Dari panas yang dihasilkan tersebut, fluida ini memiliki potensi untuk menghasilkan hingga mencapai 30-50 MW listrik dari satu sumur *geothermal* atau sekitar sepuluh kali lebih banyak daripada sumur *geothermal* konvensional.

Fluida superkritis terbentuk dari sirkulasi air tanah yang berada di dekat intrusi magma dengan atau tanpa adanya penyerapan dari gas magma. Fluida *geothermal* superkritis umumnya diklasifikasikan berdasarkan suhu kritis $T_c = 373\text{-}976^\circ\text{C}$ dan tekanan kritis $P_c = 22,01\text{ Mpa}$ air murni (H_2O) [4]. Kepadatan fluida superkritis cenderung menjadi lebih rendah saat suhunya meningkat, namun tetap jauh lebih tinggi daripada kepadatan air cair atau uap. Viskositas fluida superkritis sangat rendah, yang berarti bahwa fluida tersebut sangat mudah mengalir dan memberikan efisiensi yang lebih baik dalam transfer panas dan energi. Konduktivitas termal fluida superkritis juga sangat tinggi, yang membuatnya menjadi media yang sangat baik untuk mentransfer panas dan energi ke turbin listrik atau sistem pemanas lainnya. Selain itu, fluida *geothermal* superkritis juga memiliki sifat yang sangat reaktif karena kondisi ekstrimnya, seperti reaktivitas kimia yang tinggi, korosif, dan memiliki kemampuan untuk melarutkan mineral. Oleh karena itu, fluida superkritis harus ditangani dengan hati-hati dan perlindungan khusus saat diproduksi dan digunakan. Pengembangan teknologi untuk mengeksplorasi fluida *geothermal* superkritis ini diharapkan dapat memberikan potensi besar dalam menghasilkan Listrik dari sumber energi terbarukan. Namun, masih diperlukannya penelitian dan pengembangan lebih lanjut untuk memastikan potensi eksploitasi fluida *geothermal* superkritis ini dan memastikan teknologi yang aman dan efektif untuk eksploitasi.



Gambar 1. Karakteristik Utama dari Sistem *Geothermal* Vulkanik. (a) Model Konseptual yang Menunjukkan Jalur Aliran Fluida, Transisi *Brittle Ductile* (BDT) antara Sumber Panas Magma dan Fluida *Geothermal* yang Beredar, dan Penguapan Penurunan Tekanan Dekat Permukaan. (b) Kurva Penguapan Air. (c) Diagram Fase Air yang Menunjukkan Hubungan Tekanan, Entalpi Spesifik, dan Suhu. Juga Ditunjukkan Kondisi Subkritis (SubC) hingga Superkritis (SupC) [2].

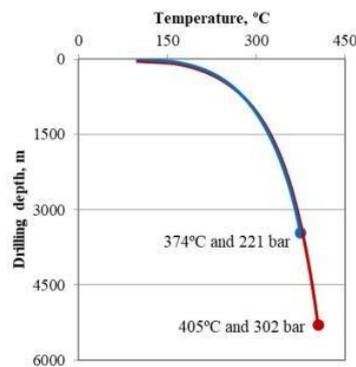
Pada bagian atas kerak bumi, terdapat intrusi magmatik yang dapat melepaskan cairan magmatik pada tekanan yang hampir sama dengan tekanan litostatik. Hal ini menyebabkan pecahnya batuan di sekitarnya dan pergerakan cairan magmatik. Di sekitar intrusi magmatik, adanya penambahan panas konduktif pada sistem air tanah di sekitarnya juga dapat membentuk cairan superkritis dengan suhu yang sangat tinggi. Namun, pada transisi dari keadaan rapuh menjadi keadaan duktil dapat menyebabkan penurunan permeabilitas. Hal ini mungkin membatasi pembentukan cairan superkritis pada litologi dengan suhu transisi kaca basalt di atas 400-450°C. Fluida yang berasal dari magma *degassing* kaya akan CO_2 , SO_2 , HCl , dan HF . Sebaliknya, fluida superkritis yang terbentuk dari perebusan air *geothermal* subkritis asal meteorik atau air laut dianggap



menampilkan konsentrasi unsur-unsur volatil yang serupa (CO_2 , H_2S , H_2 , dan B) seperti air asli, jauh lebih rendah dari konsentrasi gas magmatik yang sesuai, tetapi konsentrasi unsur *non-volatil* yang diabaikan (Si, Na, K, Ca, dan Mg). Pembentukan fluida superkritis juga dapat menghasilkan deposit silika di sekitar intrusi magmatik.

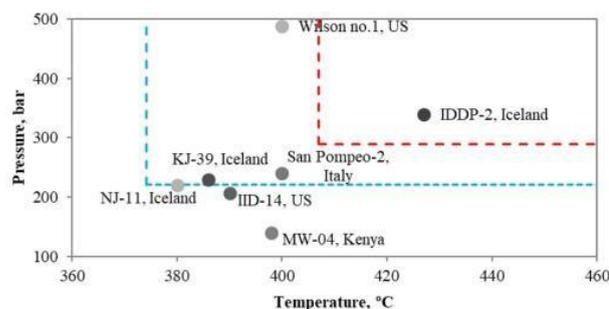
3.2. Drilling of Supercritical Geothermal System

Pengeboran *supercritical geothermal* system dilakukan bertujuan untuk mengakses fluida superkritis pada sistem *geothermal*. Teknik ini umumnya dilakukan di sekitar daerah intrusi magmatik, di mana adanya penambahan panas konduktif dari magma dapat menghasilkan fluida superkritis dengan suhu yang sangat tinggi. Proses pengeboran dimulai dengan pengeboran lubang bor yang dilakukan melalui berbagai jenis batuan yang mengelilingi daerah intrusi magmatik. Pemantauan suhu dan tekanan perlu dilakukan selama proses pengeboran agar dapat mengidentifikasi adanya fluida superkritis yang muncul dari lubang bor. Jika ditemukan fluida superkritis, maka dilakukan pemisahan dari fluida yang lebih ringan dan lebih berat untuk kemudian diambil dan diolah. Setelah fluida berhasil diambil, langkah selanjutnya adalah pengolahan dan penggunaannya. Salah satu aplikasi utama dari fluida superkritis adalah dalam pembangkitan energi listrik. Fluida superkritis digunakan untuk menggerakkan turbin, yang selanjutnya menghasilkan energi listrik. Selain itu, fluida superkritis juga dapat digunakan untuk keperluan industri seperti pemanasan dan pendinginan. Pengeboran sistem *geothermal* superkritis memiliki beberapa keuntungan. Selain energi yang dihasilkan dari pengeboran *supercritical geothermal* system bersifat bersih dan ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca dan limbah yang berbahaya, sistem ini juga dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Selain itu, penggunaan fluida superkritis juga dapat meningkatkan efisiensi sistem pembangkit listrik, karena dapat menghasilkan lebih banyak energi dari jumlah bahan bakar yang sama. Sayangnya, penggunaan teknik ini juga memiliki beberapa risiko. Misalnya, kemungkinan terjadinya kerusakan lingkungan akibat pengambilan fluida dari sumber *geothermal*, resiko geologi yang tinggi, biaya yang tinggi, dan masalah pengelolaan limbah. Oleh karena itu, perlu dilakukan pemantauan yang ketat dan pengelolaan yang baik untuk meminimalkan dampak negatifnya.



Gambar 2. Titik Suhu dan Tekanan Kritis untuk Air Murni (Garis Biru) dan Air Garam (Garis Merah) [5].

Pengeboran pada sumber daya superkritis perlu mempertimbangkan komposisi kimia dari fluida *reservoir* yang ada, titik kritis, dan tekanan. Titik kritis air murni berkisar pada nilai 374 °C dan 221 bar apabila diukur dari permukaan sumur yang memiliki kedalamannya sekitar 3500 m, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Titik kritis air laut, yaitu 3,5% NaCl pada suhu 405 °C dan 302 bar dan kedalamannya sekitar 5300 m apabila diukur dari permukaan sumur. Pada *reservoir geothermal* dengan permeabilitas vertikal yang rendah atau tidak ada, kondisi tekanan ditentukan oleh tekanan hidrostatik dari kolom air dingin atau oleh tekanan litostatik, sehingga tekanan kritis fluida akan dicapai pada kedalaman sekitar 2300 m atau 3000 m dengan asumsi salinitas air laut. Fenomena ini didukung dengan adanya *black smokers* (yaitu cerobong hidrotermal) di zona *rift* di dasar laut yang memancarkan fluida dengan suhu lebih dari 400 °C tanpa kondisi penguapan [5].



Gambar 3. Suhu dan Tekanan *Reservoir* Maksimum yang Diukur dalam Sumur *Geothermal*, Di Mana Kondisi Superkritis Ditemukan (Garis Biru - Titik Kritis Air Bersih, Garis Merah - Titik Kritis Air Laut) [6].



Sumur-sumur *geothermal* dapat dikategorikan berdasarkan suhu *ambient* sumur, menjadi suhu rendah dengan kurang dari 150 °C pada kedalaman 1000 m, suhu menengah antara 150 dan 200 °C pada kedalaman 1000 m, dan suhu tinggi dengan kondisi sama atau lebih tinggi dari 200 °C pada kedalaman 1000 m. Namun, jumlah sumur bor yang terus meningkat, menghasilkan kondisi yang jauh melebihi kategori ini, dengan beberapa sumur mencapai sumber daya dengan suhu mendekati atau melebihi suhu kritis air murni. Gambar 3 menggambarkan hubungan antara tekanan dan suhu *reservoir* dari sumur-sumur *geothermal* terpilih dari lokasi *high-enthalpy* yang berbeda di seluruh dunia, yang dekat atau melebihi kondisi *supercritical* air murni (garis biru) atau air laut (garis merah). Dapat dilihat bahwa hanya beberapa sumur yang secara simultan melebihi suhu dan tekanan kritis. Perlu dicatat bahwa teknik pengukuran suhu yang berbeda diterapkan tergantung pada kondisi *reservoir* dan, pada saat itu, peralatan dan metode logging yang tersedia. Misalnya, suhu dalam sumur IDDP-2 di lapangan *geothermal* Reykjanes (Islandia) diukur menggunakan teknologi *wire-line* dekat bagian bawah sumur, sedangkan di sumur IDDP-1 di lapangan *geothermal* Krafla (Islandia), suhu diukur selama operasi pembuangan sumur di permukaan dan di sumur WD-1A di lapangan *geothermal* Kakkonda (Jepang), suhu diukur antara metode lainnya menggunakan titik leleh logam tellurium murni yang diturunkan ke dalam sumur.

3.3. Eksplorasi Sumber Daya *Supercritical Geothermal*

Eksplorasi sumber daya *supercritical geothermal* adalah upaya untuk mencari, mengevaluasi, dan memahami sumber daya panas bumi yang terdapat pada *reservoir* dengan suhu dan tekanan yang sangat tinggi, melebihi kondisi kritis air murni. Pada kondisi ini, air berada dalam bentuk *supercritical* yang memiliki sifat unik dan dapat menghasilkan energi termal yang lebih besar dibandingkan dengan *reservoir geothermal* konvensional. Eksplorasi ini melibatkan pengumpulan data dan informasi geologi, geofisika, dan geokimia untuk menentukan karakteristik dan potensi *reservoir*, serta pemboran sumur-sumur *geothermal* untuk menguji dan memvalidasi data yang telah dikumpulkan. Eksplorasi sumber daya *supercritical geothermal* dapat membuka peluang baru untuk pengembangan energi terbarukan yang bersih dan dapat diandalkan, namun juga memiliki tantangan teknis dan lingkungan yang berbeda dari *reservoir geothermal* konvensional, sehingga memerlukan penelitian yang lebih cermat dan inovatif.

Eksplorasi sumber daya *supercritical geothermal* dilakukan pada banyak wilayah di seluruh dunia melalui program-program internasional. Program-program ini bertujuan untuk mempelajari kondisi *reservoir* superkritis, teknologi pengeboran, serta memahami kondisi kimia dan termo-fisikanya. Beberapa proyek eksplorasi yang sedang berlangsung mencakup pengeboran sumur-sumur eksplorasi di Meksiko, Italia, Islandia, dan Jepang. Melalui pengeboran dan eksplorasi ini diharapkan akan tercipta peluang kolaborasi internasional yang lebih besar dalam memanfaatkan sumber daya *supercritical geothermal* secara efektif dan aman. Sumber daya *geothermal* superkritis saat ini sedang diteliti di banyak wilayah di seluruh dunia melalui program gabungan internasional. Deskripsi singkat tentang program-program tersebut disajikan di bawah ini [5]:

- Proyek GEMex adalah kolaborasi antara konsorsium Eropa dan Meksiko dengan tujuan utama untuk mempromosikan potensi pemanfaatan sumber daya *geothermal* tidak konvensional seperti *Enhanced (EGS)* dan *Super-hot Geothermal Systems (SHGS)* di Meksiko. Sumber daya *geothermal* super-panas sedang diselidiki di bawah *reservoir* produksi saat ini dari ladang *geothermal* Los Humeros dengan sumur-sumur terpanas mengalami suhu *ambient* sumur 395 °C dan menghasilkan fluida *reservoir* yang sangat korosif. Konsep EGS sedang dijelajahi di kompleks vulkanik Acoculco, di mana dua sumur eksplorasi kering ditembakkan hingga kedalaman total 2000 m dengan suhu tinggi sekitar 300 °C.
- Proyek *Descramble* adalah proyek pengeboran internasional yang bertujuan untuk menyelidiki sumber daya superkritis di lapangan *geothermal* Larderello di selatan Tuscany (Italia). Tujuan utama dari proyek ini adalah untuk mengebor ke sumber daya *geothermal* superkritis, menguji dan mendemonstrasikan teknik pengeboran baru, mengontrol emisi gas, suhu dan tekanan tinggi yang diharapkan dari *reservoir geothermal* dalam, serta untuk mengkarakterisasi kondisi kimia dan termo-fisikanya.
- Proyek DEEPEGS3 adalah proyek pengeboran internasional yang bertujuan untuk menunjukkan kelayakan EGS untuk memberikan energi dari sumber daya terbarukan di Eropa. Pemboran sumur IDDP-2 di barat daya Islandia adalah langkah pertama untuk menyelidiki sumber daya tidak konvensional tersebut. Sumur IDDP-2 dapat melampaui tekanan dan suhu kritis dari air *geothermal* asin di *reservoir* Reykjanes dan mencapai suhu 427 °C pada kedalaman sekitar 4600 m dan melakukan semen balik primer terdalam di Islandia dan salah satu yang terdalam di dunia pada kedalaman sekitar 3000 m. Sumur IDDP-2 saat ini adalah sumur terdalam dan terpanas di Islandia. Uji produksi dijadwalkan untuk kuartal pertama 2019.
- Proyek Jepang *Beyond Brittle (JBBP)* adalah proyek internasional yang bertujuan untuk menunjukkan peningkatan ekstraksi energi *geothermal* melalui pemahaman ilmiah tentang berbagai fenomena dalam transisi rapuh-duktil. Penelitian ini didahului oleh pengeboran dalam yang dalam dari sumur *geothermal* WD-1A yang dilakukan di lapangan *geothermal* Kakkonda antara 1994 dan 1995, yang telah terbukti memiliki permeabilitas yang cukup baik.



3.4. Pengembangan Sumber Daya *Supercritical Geothermal* di Berbagai Negara

Pemanfaatan energi *geothermal* menjadi salah satu alternatif energi terbarukan yang semakin populer di berbagai negara. Namun, pengembangan teknologi dan pengeboran untuk mengakses sumber daya *geothermal* yang lebih dalam dan panas semakin sulit dan kompleks. Salah satu solusi yang sedang dikembangkan adalah pemanfaatan sumber daya *supercritical geothermal*, yaitu sumber daya *geothermal* yang memiliki suhu dan tekanan di atas titik kritis air. Beberapa negara seperti Islandia, Jepang, Meksiko, Kenya, USA, dan Italy telah melakukan berbagai program penelitian dan pengeboran untuk mengembangkan sumber daya *supercritical geothermal*. Keberhasilan pengembangan teknologi dan eksploitasi sumber daya *supercritical geothermal* diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam mencapai target pengurangan emisi karbon dan meningkatkan ketersediaan energi terbarukan di masa depan. Berikut ini adalah penjelasan dari pengembangan *geothermal* yang telah dilakukan di berbagai negara:

a. Pengembangan *Supercritical Geothermal* di Italy



Gambar 4. Lokasi Pengujian merupakan Sumur Kering yang Sudah Ada Di Larderello, Italia, yang Sudah Ditembus hingga Kedalaman 2,2 KM Dan Suhu 350 °C, kemudian Diperdalam hingga Kedalaman 2,9 KM Dan Mencapai Kondisi Superkritis [14].

Italy telah mengembangkan teknologi pengeboran baru untuk pengujian konsep mencapai sumber daya *geothermal* superkritis yang dalam, dikenal dengan "*Drilling in Deep, Super-Critical Ambient of Continental Europe*" (DESCRAMBLE), yang berlangsung dari Mei 2015 hingga April 2018. Proyek ini mengebor dan menguji kondisi kerak benua untuk mendemonstrasikan teknik pengeboran baru, kontrol emisi gas, dan kondisi suhu atau tekanan tinggi yang diharapkan dari fluida dalam yang dalam. Proyek ini juga telah berhasil untuk meningkatkan pengetahuan tentang kondisi fisik-kimia dalam yang dalam untuk memprediksi dan mengontrol kondisi pengeboran di masa depan. Lubang bor intrakontinental pertama di dunia di kondisi suhu sangat tinggi telah dilakukan di situs pengujian ini, menggunakan sumur kering yang sudah ada di Larderello, Italia, yang telah dibor hingga kedalaman 2,2 km dan suhu 350 °C, yang kemudian diperdalam hingga kedalaman 3 km. Larderello merupakan tempat asalnya produksi listrik *geothermal* dan telah banyak dieksplorasi serta diselidiki selama beberapa dekade terakhir.

Pada tahun 1980, pengeboran eksplorasi di sumur Te Sasso-22 di Larderello telah berakhir dan gagal disebabkan karena adanya retakan dan rongga besar yang tidak dapat diisi dengan sealant. Formasi batuan sangat keras dan tidak homogen, membuat pengeboran sulit dilakukan. Kehilangan sirkulasi terjadi di atas kedalaman 608 m, dan tim pengeboran terpaksa menggunakan air dengan sekat kental untuk mencegah penyumbatan bit. Masalah utama terjadi di bawah 3000 m, termasuk patahnya pipa bor baja dan kesulitan dalam operasi semen primer pada *casing* produksi 9 5/8". Suhu sumur yang sangat tinggi mencapai sekitar 380 °C pada kedalaman 3970 m, dan penggunaan bahan peledak atau alat pemancing hidrolik tidak dapat dilakukan. Penyelewengan dengan sekat semen telah dicoba untuk melanjutkan pengeboran, tetapi *casing* produksi dalam kondisi sangat buruk. Analisis menunjukkan bahwa korosi tegangan bahan *casing* diperparah dengan kondensat uap dari pembangkit listrik *geothermal* sebagai cairan pengeboran. Akhirnya, keputusan diambil untuk meninggalkan sumur tersebut [5]. Data survei seismik 2D dan 3D menyoroti penanda seismik dalam yang dalam yang penting bernama "Horizon K" yang mencapai puncak di bawah *reservoir* dominan uap yang sedang dieksploitasi saat ini dan dikenali di seluruh Tuscany selatan. Impedansi seismik tinggi dari penanda seismik ini, bahkan menyerupai titik terang di beberapa area, diinterpretasikan sebagai fluida magmatik/metamorfik, mungkin dalam kondisi superkritis. Bukti yang memperkuat interpretasi ini diberikan oleh sumur eksplorasi San Pompeo 2, yang dibor pada tahun 1979 untuk menyeberangi Horizon K.

Pada tahun 1979, dilakukan pengeboran sumur eksplorasi San Pompeo 2 untuk mengidentifikasi zona produksi dalam hingga mencapai reflektor pada kedalaman 3000 m. Operasi dilakukan dengan total kehilangan sirkulasi mulai dari kedalaman 836 m hingga dasar sumur. Setiap upaya untuk menambal retakan formasi batuan untuk menghentikan kehilangan sirkulasi selama pengeboran terbukti tidak berhasil. Beberapa kegagalan batang bor terjadi saat pengeboran, terutama karena korosi dari hidrogen yang dikeluarkan dari *reservoir*. Selama pengeboran pada kedalaman 2930 m, terjadi ledakan gas hidrogen yang dahsyat. Setelah terjadi ledakan, sumur runtuh dan hanya 2560 m dari kedalaman sumur yang dapat diakses untuk pengujian lebih lanjut karena puing-puing batuan yang tertinggal di dasar sumur. Sumur San Pompeo 2 mengalami insiden ledakan yang serupa setelah operasi pengeboran dimulai kembali. Sampel dari fluida *geothermal* dalam

yang dalam membuktikan adanya gas yang bersifat korosif dan lingkungan yang sangat korosif. Kondisi suhu dan tekanan membuktikan adanya sumber daya *geothermal* yang sangat panas, yaitu 394 °C dan 212 bar pada kedalaman 2560 m. Bahan dan prosedur pengeboran serta produksi yang tersedia pada saat pengeboran dianggap tidak cocok untuk kondisi lubang sumur yang keras dan San Pompeo 2 akhirnya ditinggalkan [6].

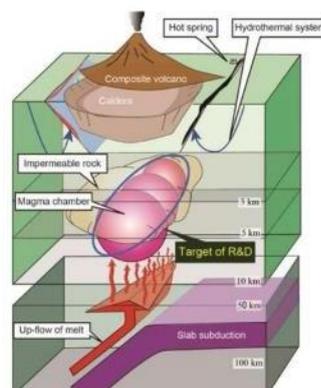
Pada tahun 1980 dilakukan pengeboran Sumur Te San Vito-1 tanpa mengalami tantangan besar hingga kedalaman 2000 m karena pengalaman yang sudah diperoleh dari tiga proyek pengeboran suhu tinggi lainnya di ladang Mofete. Pekerjaan *fishing* pertama pada kedalaman 2330 m menghasilkan beberapa bagian peralatan yang tertinggal di dalam lubang sumur. Sumur kemudian dibuat *side-track* tepat di bawah *casing* produksi 9 5/8". Pada kedalaman 2488 m, pengentalan dan penggumpalan lumpur terjadi. Upaya untuk melepaskan *string bor* dengan bahan peledak gagal karena suhu yang tinggi menyebabkan bahan peledak terdekomposisi. Upaya lain untuk *side-track* sumur dengan *coil tubing* juga gagal. Prosedur *back-off fishing* terbukti berhasil pada kedalaman 2013 m namun, sekitar 400 m *string bor* tertinggal di dasar sumur. Pengeboran kemudian dilanjutkan hingga kedalaman 3045 m dan diselesaikan pada kedalaman yang sama dengan pipa *liner* berlubang. Pada kedalaman 2500 m, hanya peledakan sampel yang berhasil merekam suhu sumur sekitar 419 °C. Uji produksi telah dicoba namun, sumur menunjukkan peningkatan suhu yang cepat pada kepala sumur, yang tidak dapat menahan suhu lebih dari 300 °C. Akhirnya, sumur Te San Vito-1 ditutup [7].

b. Pengembangan *Supercritical Geothermal* di Jepang



Gambar 5. Kakkonda Geothermal Power Plant, Iwate, Japan [14].

Pada tahun 1994-1995, pengeboran sumur eksplorasi ilmiah dilakukan di lapangan *geothermal* Kakkonda di Jepang sebagai bagian dari Survei Sumber Daya *Geothermal* dalam, yang dipimpin oleh NEDO. Proyek pengeboran eksplorasi WD-1A di ladang *geothermal* Kakkonda di Jepang pada tahun 1994 direncanakan mencapai kedalaman sumur 4000 m. Sumur ini, WD-1A, dibor hingga kedalaman 3729 m, dan menembus sistem hidrotermal bagian atas ke dalam *pluton granitik* suhu tinggi dengan gradien suhu konduktif dan suhu dasar lubang mencapai 500 °C. Pengeboran mengalami adanya permasalahan penurunan kualitas fluida pengeboran yang disebabkan oleh peningkatan gradien suhu yang cepat. Perubahan profil suhu di sumur pada sekitar 380 °C tampaknya menunjukkan batas rapuh-dutil untuk sistem ini tidak ada masukan fluida yang permeabel yang diamati di bawah transisi ini, dan kepadatan retakan lebih rendah diamati di bagian konduktif sumur. Meskipun sumur ini tidak menghasilkan fluida superkritikal, sumur ini menunjukkan kemungkinan pengeboran pada suhu yang sangat tinggi menggunakan teknik pendinginan sumur bor, dan mengkonfirmasi bahwa *pluton* di bawah lapangan *geothermal* Kakkonda memiliki suhu yang lebih tinggi. Studi ini mengarah pada penelitian tentang kemungkinan pemanfaatan sumber daya tersebut untuk pembangkit listrik *geothermal*. Sumur akhirnya diselesaikan hingga kedalaman 2546 m dengan 1183 m bagian lubang terbuka. Suhu maksimum yang diukur menggunakan paduan lelehan sekitar 500 °C pada kedalaman di bawah 3500 m. Skema *logging* lengkap dilakukan, setelah itu sumur ditutup pada kedalaman 2400 m dengan rencana untuk pengeboran ulang dan *side-track* di masa depan [5].

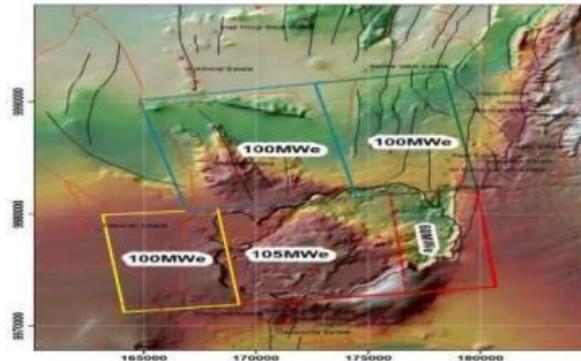


Gambar 6. Model Konseptual untuk Sistem *Geothermal* Superkritikal di Utara Honshu, Jepang [14].



Proyek *Beyond Brittle* Jepang dimulai untuk menyelidiki kemungkinan menciptakan sistem *geothermal* yang ditingkatkan di zona transisi rapuh-dutil. Studi ini tumbuh dari pekerjaan pengeboran dalam awal yang dilakukan di Kakkonda [8]. Beberapa keuntungan yang diharapkan dari sistem tersebut meliputi potensi sumber daya energi *geothermal* yang sangat besar yang dapat menghasilkan ekstraksi energi ekonomis, desain dan pengendalian *reservoir* yang lebih sederhana, hilangnya fluida parasit yang berkurang, dan efek gempa yang diinduksi yang berkurang. Area Tohoku di utara Honshu di Jepang telah diidentifikasi sebagai target yang menjanjikan untuk upaya ini, karena data dari survei geofisika di wilayah ini telah mengidentifikasi anomali kecepatan dan konduktivitas di bawah kaldera Miosen dan lebih muda di wilayah ini, yang menunjukkan adanya kamar magma dangkal yang akan menyediakan sumber panas yang luas.

c. Pengembangan *Supercritical Geothermal* di Kenya



Gambar 7. Menengai Development Blocks [14].

Sumur-sumur MW-04 dan MW-06 di lapangan *geothermal* Menengai dibor ke dalam magma, menghasilkan serpihan kaca segar yang *terquenched* pada kedalaman 2080 dan 2172 m, masing-masing, yang menunjukkan keberadaan sumber panas intrusif dangkal di bawah puncak kaldera. Selama pengujian produksi MW-04, terlihat adanya masuknya fluida dari lapisan di atasnya dan suhu 390 °C terukur setelah 11 hari pengujian aliran dan sekitar 1 bulan setelah pengeboran selesai. Tekanan hingga sekitar 140 bar diamati selama penghentian. Pada kondisi aliran, tekanan lubang dasar teramati sekitar 20 bar. Tidak ditemukan data yang cukup mengenai kegagalan sumur pada sumur *geothermal* di lapangan Menengai *geothermal*. Tantangan utama yang dihadapi selama pengeboran sumur suhu tinggi di daerah tersebut adalah kejadian pipa yang macet antara kedalaman sumur 2100 m dan 2200 m, di mana magma dijumpai. Pengeboran sumur MW-01 dilakukan dengan kehilangan sirkulasi parsial dan total. Alat pengeboran mengalami macet pada akhir pengeboran di kedalaman 2206 m. Selama pengeboran sumur MW-03, situasi serupa terjadi pada kedalaman 1187 dan 2112 m. Sumur MW-04 menghasilkan potongan kaca vulkanik baru saja terdapat pada kedalaman 2080 m. Pengeboran yang dekat dengan magma mengakibatkan masalah seperti pipa yang macet pada kedalaman 2117 m dan kerusakan pada alat bor, karena suhu yang sangat tinggi. Setelah operasi pengeboran yang tidak berhasil, sekitar 20 m dari susunan lubang bawah, terdiri dari mata bor, sub, pengstabil, dan dua *collar* bor, ditinggalkan di dalam sumur. Pengembangan lapangan *geothermal* Menengai saat ini tertunda karena masalah pengeboran. Masalah tali bor yang terjebak menyumbang 12% dari total waktu pengeboran di lapangan ini dan sering disebabkan oleh hilangnya sirkulasi di zona-zona yang permeabel dan menunggu air pengeboran yang lama. Pengeboran ke dalam magma cair mendorong tali bor ke atas, mengakibatkan penurunan bebantungan. Secara bersamaan, sirkulasi terhalang. Pengeboran pada suhu tinggi ini sering menyebabkan kelelahan logam. Program manajemen risiko tali bor diusulkan untuk memantau setiap kecacatan [4].

d. Pengembangan *Supercritical Geothermal* di USA



Gambar 8. Geysers Geothermal Power, USA [14].



Sumur bersuhu tinggi telah dibor di lapangan panas bumi *The Geysers* dan sekitarnya. Sumur Wilson No. 1 dibor pada tahun 1981 di luar lapangan utama di lereng Gunung Hannah dengan kedalaman mencapai 3672 m. Meskipun suhu maksimum yang diukur (belum setabil) untuk sumur ini adalah 325 °C, inklusi fluida yang ditemukan dalam potongan batuan menunjukkan suhu dasar sumur hingga 400 °C. Zona tekanan tinggi ditemukan di dekat dasar sumur, dan masuknya uap diamati pada kedalaman total. Keruntuhan casing menyebabkan sumur itu ditinggalkan. Suhu tertinggi yang pernah ditemukan di *The Geysers* diukur di sumur yang diperdalam pada tahun 2010 sebagai bagian dari proyek demonstrasi lapangan EGS yang didanai oleh Departemen Energi AS di daerah resapan ber-suhu tinggi NW *Geysers*. Masuknya uap diamati pada sumur Prati-32 yang diperdalam pada kedalaman 3352 m dengan suhu terukur mencapai 400 °C. Kesulitan pengeboran yang disebabkan oleh suhu yang tinggi (sumur ini dibor dengan udara) menyebabkan tingkat laju pengeboran rendah (ROP, 3 m/jam) dan keausan bit yang ekstrem (*roller cone bit* terakhir hanya bertahan selama 30m) oleh karena itu sumur ini diselesaikan pada kedalaman 3396 m. Sumur ini digunakan sebagai sumur injeksi untuk pemasangan sumur produksi-injeksi EGS untuk proyek ini [4].

Suhu yang sangat tinggi juga ditemukan di sumur KS-2 dan KS-13 di lapangan panas bumi Puna di Hawaii. Sumur KS- 2 dibor pada tahun 1982 dengan kedalaman mencapai 2440 m [4]. Kesulitan hilangnya fluida terjadi pada interval teratas dan sulit untuk mengebor dengan baik. Pemantauan suhu dan tekanan tidak mungkin dilakukan hingga kedalaman total karena adanya hambatan di dalam sumur. Ekstrapolasi kondisi suhu dan tekanan di sumur KS-2 menunjukkan kondisi superkritis pada kedalaman total. Zona permeabel diduga ada di bagian bawah sumur. Kondisi sumur yang buruk menyebabkan beberapa obstruksi selama pengujian aliran. Sumur KS-13 dibor sebagai sumur injeksi pada tahun 2005 dan menemukan magma dakisitik pada kedalaman 2488 m setelah menemukan intrusi diorit. Suhu lelehan tidak diukur secara langsung di sumur. Masalah pengeboran mengakibatkan sebagian dari alat pengeboran terjebak dan sumur diselesaikan pada kedalaman 2124 m. Studi petrologi terhadap kaca dakisitik yang ditemukan menunjukkan bahwa suhu lelehan mencapai ≈ 1050 °C. Suhu yang mendekati kondisi superkritis dilaporkan untuk sumur Lanipuna 1 yang dibor hingga kedalaman 2557 m pada tahun 1981 di dekat Paulina Crater di Hawaii. Selama pengeboran, tidak ditemukan zona kehilangan sirkulasi, namun, zona permeabel diinterpretasikan dari profil suhu antara 1700 m dan 1830 m. Log suhu dijalankan sekitar 32 jam setelah akhir sirkulasi, menunjukkan gradien konduktif dari 1830 m hingga kedalaman total.

e. Pengembangan *Supercritical Geothermal* di Meksiko

Di lapangan *geothermal* Los Humeros di Meksiko, terdapat setidaknya tujuh sumur dalam dengan suhu stabil yang diperkirakan lebih dari 380°C dan sebagian besar sumur tersebut berada di atas kurva kedalaman titik didih. Ada juga dua sumur yang tampaknya telah mengalami intrusi muda di kedalaman tertentu. Batuan *reservoir* dalam di lapangan ini relatif rendah permeabilitasnya, sehingga bisa menjadi target potensial untuk EGS (Sistem *Geothermal* Ditingkatkan). Sekarang sedang dilakukan penelitian mengenai bagian superkritis di lapangan ini sebagai bagian dari proyek GEMex. Proyek ini merupakan proyek penelitian *geothermal* bersama antara Eropa dan Meksiko yang bertujuan untuk mengevaluasi sumber daya di dua situs *geothermal* yang tidak biasa di Meksiko, yaitu pengembangan EGS di Acoculco dan sumber daya super-panas di Los Humeros [4]. Proyek ini menggunakan teknik dan pendekatan inovatif dalam karakterisasi *reservoir*, pemodelan numerik, dan eksperimen laboratorium, sehingga bisa membuat sumber energi terbarukan ini menjadi lebih efektif dan terjangkau dalam produksi listrik dan panas. Proyek ini menggabungkan pengetahuan Meksiko yang luas dalam menemukan, mengembangkan, dan mengeksploitasi sistem energi *geothermal* dengan keahlian Eropa dari sistem energi *geothermal* serupa di Italia, Islandia, dan tempat lain. Selain itu, proyek ini juga melaporkan hasil utama dari kegiatan-kegiatannya, seperti model geologi 3D awal dari lapangan *geothermal* Los Humeros dan Acoculco. Topik-topik lainnya termasuk pemahaman dari sistem *geothermal* fosil yang terkelupas, geologi struktur yang cocok untuk pengembangan EGS, karakterisasi geo-kimia dan asal fluida dingin dan panas, survei geofisika di lapangan *geothermal*, studi karakterisasi *reservoir* yang sedang berlangsung, dampak sosial dan keterlibatan publik pada sistem *geothermal* yang ditingkatkan dan super-panas, penelitian terbaru tentang pengeboran dan penyelesaian dalam sistem super-panas, serta pemantauan dampak lingkungan.



Gambar 9. Kepala sumur dari sumur H-43 yang ditinggalkan di lapangan *geothermal* Los Humeros [5].



Sumur H-43 adalah sumur asam dan sangat dipanaskan, yang dibor antara tahun 2007 dan 2008, di bagian utara lapangan *geothermal* Los Humeros yang terletak di tepi timur sabuk vulkanik Trans-Meksiko. Sumur ini dibor dengan cairan bor bentonit pada semua waktu, yang menyembunyikan zona yang berpotensi permeabel. Setelah operasi pencucian, permeabilitas diamati pada kedalaman 1890 m. Suhu maksimum sumur *ambient* yang diukur menggunakan *wire-line* di sumur tersebut mencapai sekitar 395 °C. Sumur H-43 memproduksi uap super panas yang bermasalah bagi infrastruktur mekanik dengan adanya HCl gas dan H₃BO₃. Suhu sukembrantrampur mencapai 285 °C dan tekanan sumur sekitar 40 bar. Untuk memungkinkan produksi cairan yang aman, sumur ini dicoba untuk diproduksi dalam kondisi super panas, sehingga HCl akan tetap dalam kondisi kering, mencegah korosi pada peralatan sumur dan permukaan. Tantangan lain termasuk erosi dari uap super panas yang kuat dan presipitasi yang luas. Kondisi serupa seperti pada sumur H-43 ditemukan pada setidaknya tujuh sumur yang dibor di lapangan pada tahun 1980-an, yang akhirnya ditinggalkan karena korosi konstruksi mekanik sumur yang dihasilkan dari air *geothermal* yang bermasalah dengan adanya HCl gas. Pengembangan teknologi untuk penggunaan sumber daya *geothermal* nonkonvensional dari lapangan *geothermal* Los Humeros di bawah *reservoir* produksi saat ini sedang dipelajari dalam proyek GEMex [5].

f. Pengembangan *Supercritical Geothermal* di Iceland

Sumur NJ-11 di lapangan *geothermal* Nesjavellir di bor pada tahun 1985 hingga kedalaman akhir 2265 m. Selama operasi pengeboran, beberapa zona umpan yang terlalu tekanan ditemukan yang kemudian menyebabkan peningkatan tekanan sirkulasi dan tekanan kepala sumur naik 5-6 bar setelah sirkulasi berhenti. Kerugian fluida pertama dan zona umpan utama ditemukan pada kedalaman 1226 m [5]. Segera setelah pengeboran, fluida *geothermal* dengan laju aliran 35 l/s mengalir melalui celah antara *casing* dan *drill string*. Insiden yang cukup tidak terduga ini harus dipadamkan dengan air dingin. Setelah survei suhu, yang disertai dengan memompa 44 l/s air dingin ke dalam sumur, aliran antar zona dan kondisi ledakan bawah tanah yang mungkin terjadi. Diamati bahwa fluida yang potensial superkritis, dengan tekanan di atas 220 bar dan suhu lebih dari 380 °C, memasuki zona umpan utama pada kedalaman 1226 m. Suhu tinggi merusak katup apung di *drill string* dan kebocoran fluida diamati di atas pelumas pada perakitan kepala sumur. Pengendalian sumur setelah operasi pengeboran dengan air dingin terbukti sangat sulit dan tidak berhasil. Sumur NJ-11 sebagian ditinggalkan dengan memasukkan sumbat 200 m yang terbuat dari kerikil dan sumur akhirnya diselesaikan dengan *slotted liner* hingga mencapai bagian atas sumbat kerikil. Sumur kemudian diproduksi dari akuifer atas. Pengalaman yang diperoleh dari sumur NJ-11 mengarah pada pembuatan Proyek Bor Dalam Islandia (IDDP) untuk lebih menyelidiki fluida *geothermal* superkritis. Lokasi sumur NJ-11 saat ini sedang dipertimbangkan sebagai prospek untuk kampanye bor dalam IDDP ketiga.



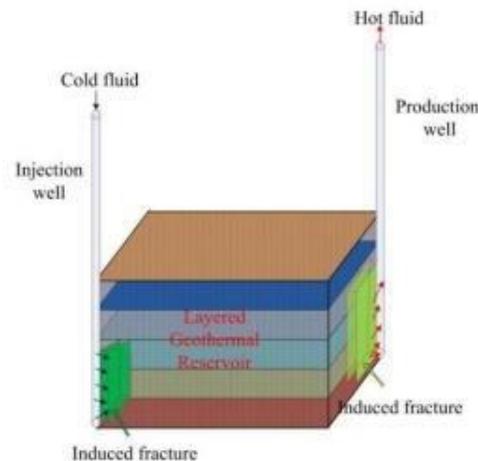
Gambar 10. Korosi berat pada pipa liner di sumur KJ-39 [5].

Sumur KJ-39 dibor secara *directional* hingga kedalaman akhir 2865 m di lapangan panas bumi Krafa di utara Islandia pada tahun 2008. Pemulihan potongan bor mencapai 100% dari kedalaman bor hingga 1400 m dan menjadi sebagian di antara kedalaman 1400 dan 2650 m. Pada bagian sumur yang lebih dalam, total kehilangan sirkulasi terjadi. Setelah mencapai kedalaman target, *string* bor terjebak selama seminggu dan harus dibebaskan dengan menggunakan bahan peledak. Begitu *string* bor diambil dari sumur, unit dasar dari *bottom hole assembly* terdiri dari hingga 30% kaca yang baru dipadamkan, menunjukkan pengeboran ke dalam magma. Suhu *ambient* sumur sekitar 386 °C diukur menggunakan alat *logging wire-line* pada kedalaman 2822 m, menunjukkan suhu *supercritical*. Akhirnya, bagian bawah sumur KJ-39 disegel dengan semen, karena kemungkinan ancaman dari zona bawah yang sangat asam, menyebabkan potensi kerusakan sumur. Setelah mengambil bagian pipa *liner* dari sumur, korosi berat diamati, konstruksi sumur KJ-39 terbukti tidak mampu menahan kondisi yang diantisipasi dari akuifer yang lebih dalam dan jauh lebih kuat. Pengukuran tekanan dari bagian sumur yang lebih dalam tidak tersedia. Pada Agustus 2013, sumur KJ-39 diubah menjadi sumur injeksi di lapangan panas bumi Krafa.

3.5. Teknologi Pengembangan *Supercritical Geothermal*

a. Pemanfaatan Teknologi CO₂

Dalam teknologi superkritikal *geothermal*, air panas bumi diumpungkan ke dalam sebuah boiler yang bertekanan tinggi dan suhu di atas titik kritisnya, yaitu 374°C dan 22,1 MPa. Dalam kondisi tersebut, air menjadi superkritikal, yaitu beradadi antara keadaan gas dan cair. Uap yang dihasilkan kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan listrik. Studi ini secara numerik mensimulasikan aliran CO₂ dan perpindahan panas dalam sistem 3D CO₂-EGS dengan *reservoir* dengan rekahan selama periode 25 tahun. Menurut hasil yang ada, laju injeksi CO₂ adalah 20 kg/detik. Temperatur injeksi CO₂ yang mengalir di *reservoir* adalah 70 [9]. penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh non-kesetimbangan termal lokal pada ekstraksi panas dan umur *reservoir* CO₂-EGS tertentu. Efek non-kesetimbangan termal lokal menjadi signifikan. Selain itu, keseragaman koefisien perpindahan panas volumetrik memiliki sedikit pengaruh pada waktu tembus termal, tetapi perbedaan suhu menjadi lebih jelas dengan waktu setelah tembus termal. Waktu terobosan termal berkurang dan efek non-kesetimbangan termal lokal menjadi signifikan. Prediksi akurat dari koefisien perpindahan panas volumetrik sangat diperlukan untuk memprediksi laju ekstraksi panas dan unur operasi *reservoir* CO₂-EGS tertentu [10].



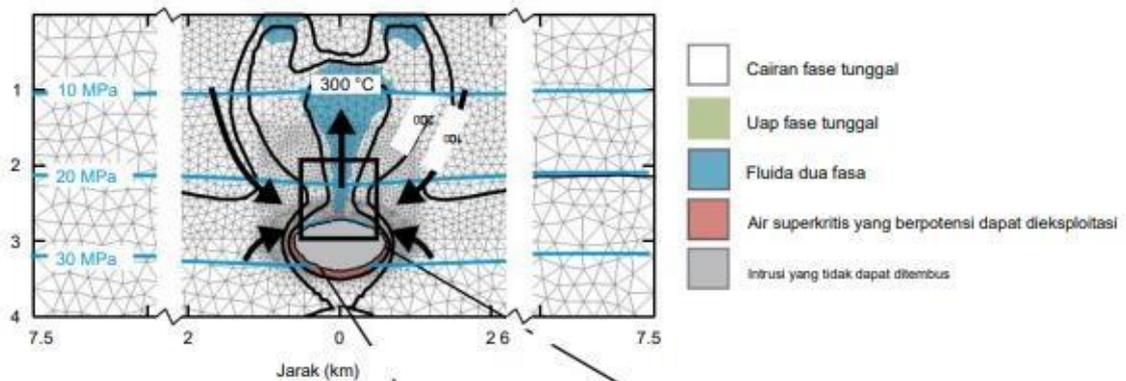
Gambar 11. Diagram Skematik *Doublet* CO₂-EGS [9].

CO₂ juga dapat dimanfaatkan sebagai medium pendingin pada siklus *closed loop* panas bumi superkritikal, di mana fluida panas bumi digunakan untuk menghasilkan uap yang akan menggerakkan turbin listrik. Dalam siklus ini, CO₂ digunakan sebagai alternatif dari pendingin berbasis air, karena memiliki sifat termodinamika yang dapat meningkatkan efisiensi sistem. Selain manfaatnya sebagai fluida pengangkat dan pendingin, CO₂ juga dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi yang terbarukan. Teknologi penangkapan CO₂ dan penyimpanan (CCS) dapat digunakan untuk menangkap gas CO₂ dari sumber-sumber industri dan memasukkannya ke dalam *reservoir* panas bumi superkritikal. CO₂ ini kemudian dapat dimanfaatkan untuk mempercepat produksi energi panas bumi atau untuk tujuan lain yang menguntungkan. Penggunaan CO₂ dalam pengambilan energi panas bumi juga dapat mempercepat produksi energi panas bumi dengan meningkatkan permeabilitas batuan *reservoir*. Penggunaan CO₂ dalam pengambilan energi panas bumi dapat meningkatkan sifat fisik batuan dan memperbaiki sifat permeabilitasnya, sehingga memungkinkan fluida panas bumi dapat mengalir lebih bebas ke sumur bor produksi [11].

b. *Closed Loop Supercritical Geothermal*

Closed loop panas bumi superkritikal adalah salah satu jenis sistem pengambilan energi panas bumi yang menggunakan fluida panas bumi untuk menghasilkan listrik. Sistem ini menggunakan dua sumbu bor, yaitu sumbu bor produksi dan sumbu bor injeksi, untuk mengekstrak dan memasukkan fluida panas bumi ke dalam sistem [12]. Pada *closed loop* panas bumi superkritikal, fluida panas bumi dari sumbu bor produksi dipompa ke permukaan dan melewati penukar panas untuk memanaskan air yang berada di dalam sirkuit tertutup. Air yang dipanaskan oleh fluida panas bumi kemudian menghasilkan uap yang digunakan untuk menggerakkan turbin listrik dan menghasilkan listrik. Setelah melewati penukar panas, fluida panas bumi yang sudah dingin kemudian disuntikkan kembali ke dalam sumbu bor injeksi. Sumbu bor injeksi berfungsi sebagai tempat untuk membuang kembali fluida panas bumi yang sudah digunakan, serta mempertahankan tekanan di dalam *reservoir* panas bumi. Sistem *closed loop* panas bumi superkritikal memiliki keuntungan dibandingkan dengan sistem *open loop*, karena tidak memerlukan sumber air tambahan untuk menghasilkan listrik. Selain itu, *closed loop* panas bumi superkritikal juga lebih ramah lingkungan, karena tidak membuang limbah cairan ke lingkungan. Namun, sistem *closed loop* panas bumi superkritikal juga memiliki beberapa kekurangan, seperti biaya yang lebih tinggi untuk pengadaan dan instalasi, serta risiko kebocoran fluida panas bumi yang dapat merusak lingkungan dan kesehatan manusia. Oleh karena itu, pemilihan jenis sistem pengambilan energi panas bumi harus mempertimbangkan faktor-faktor seperti lokasi geografis, ketersediaan sumber daya, dan dampak lingkungan [1].

3.6. Pengembangan *Reservoir Supercritical Geothermal*



Gambar 12. Pembentukan Sumber Daya Air Superkritik Tergantung Pada Kontrol Geologis [13].

Reservoir panas bumi superkritikal terbentuk di daerah-daerah dengan aktivitas vulkanik atau tektonik yang kuat. Di dalam *reservoir* ini, air dan gas terkompresi dalam kondisi superkritikal yang memungkinkan keduanya menjadi cairan yang homogen. Hal ini menghasilkan fluida yang sangat padat dan dapat menyimpan energi panas dalam jumlah yang besar. Pemanfaatan *reservoir* panas bumi superkritikal untuk pembangkit listrik tenaga panas bumi dapat dilakukan dengan menggunakan teknologi *Cycle Supercritical Organic Rankine (SCOR)*, yang merupakan teknologi yang dapat menghasilkan listrik dengan efisiensi yang tinggi. Teknologi ini menggunakan fluida organik dengan titik didih yang lebih rendah dari air, sehingga dapat menghasilkan uap dalam suhu yang lebih rendah. Hal ini memungkinkan penggunaan energi panas bumi yang lebih efisien dan lebih ramah lingkungan. Meskipun *reservoir* panas bumi superkritikal memiliki potensi energi yang besar, namun pengambilan energi panas bumi yang berlebihan dapat menyebabkan penurunan suhu dan tekanan di dalam *reservoir*. Oleh karena itu, pengelolaan *reservoir* panas bumi superkritikal harus dilakukan dengan hati-hati agar kelestariannya dapat terjaga [13]. Pengembangan *reservoir geothermal* superkritikal masih dalam tahap awal, karena teknologi pengambilan energi panas bumi dari *reservoir* superkritikal masih dalam tahap pengembangan dan pengujian. Namun, beberapa langkah yang dilakukan untuk mengembangkan *reservoir geothermal* superkritikal antara lain:

- Studi geologi dan geofisika: Studi geologi dan geofisika diperlukan untuk memahami karakteristik geologi dan potensi panas bumi di wilayah yang dituju. Langkah ini penting untuk menentukan lokasi *reservoir* superkritikal dan memahami sifat fisik dan kimia dari *reservoir* tersebut.
- Pengembangan teknologi: Teknologi pengambilan energi panas bumi dari *reservoir* superkritikal masih dalam tahap pengembangan dan pengujian. Oleh karena itu, pengembangan teknologi yang tepat dan efisien diperlukan untuk memungkinkan pengambilan energi panas bumi dari *reservoir* superkritikal secara efektif.
- Pengujian dan pemantauan: Pengujian dan pemantauan secara terus-menerus diperlukan untuk memastikan keamanan dan keberlanjutan pengambilan energi panas bumi dari *reservoir* superkritikal. Pengujian dan pemantauan dapat meliputi pengukuran suhu, tekanan, dan komposisi fluida di dalam *reservoir* serta pemantauan dampak lingkungan yang dihasilkan dari pengambilan energi panas bumi.
- Pengembangan pasar: Pengembangan pasar untuk energi panas bumi dari *reservoir* superkritikal juga penting untuk mendukung pengembangan teknologi dan keberlanjutan pengambilan energi panas bumi. Hal ini meliputi pengembangan sistem distribusi energi, pemrosesan dan pengemasan energi panas bumi, serta peningkatan ketersediaan dan keamanan pasokan energi panas bumi.

3.7. Unsur Geokimia pada Panas Bumi Superkritikal

Geokimia panas bumi superkritikal adalah studi tentang sifat dan komposisi kimia dari fluida panas bumi yang terdapat di *reservoir* panas bumi superkritikal. Studi ini melibatkan analisis komponen-komponen kimia dari fluida panas bumi, termasuk gas dan mineral yang terkandung di dalamnya. Fluida panas bumi superkritikal memiliki komposisi kimia yang kompleks, terdiri dari berbagai elemen seperti nitrogen, karbon dioksida, hidrogen, oksigen, sulfur, dan unsur-unsur lainnya. Studi geokimia panas bumi superkritikal dapat memberikan informasi tentang asal muasal dan evolusi fluida tersebut, serta sumber panas dan tekanan yang terkait dengan aktivitas geologi di daerah tersebut. Geokimia panas bumi superkritikal juga dapat memberikan wawasan tentang potensi pengambilan energi dari *reservoir* panas bumi superkritikal. Analisis komposisi fluida dapat membantu para ahli untuk menentukan jenis teknologi yang tepat untuk mengekstraksi energi panas bumi tersebut. Selain itu, studi geokimia juga dapat membantu dalam mengidentifikasi risikoterkait dengan pengambilan energi panas bumi, seperti kerusakan *reservoir* atau dampak lingkungan yang mungkin terjadi[5].

- Air: Komponen utama dari fluida panas bumi adalah air, yang terdiri dari sekitar 98% atau lebih dari jumlah total fluida.
- Gas: Gas yang paling umum ditemukan dalam fluida panas bumi superkritikal adalah nitrogen (N_2), karbon dioksida (CO_2), dan metana (CH_4). Gas-gas ini juga dapat terdapat dalam bentuk terlarut di dalam air.
- Mineral: Fluida panas bumi superkritikal juga mengandung berbagai mineral yang terlarut, seperti natrium, kalsium,



- magnesium, sulfat, klorida, dan fluorida. Komposisi mineral dapat bervariasi tergantung pada lokasi *reservoir*.
- Unsur logam: Fluida panas bumi juga dapat mengandung unsur logam seperti arsenik, boron, timah, seng, dan unsur-unsur lainnya.
 - Radionuklida: Beberapa fluida panas bumi superkritikal mengandung radionuklida seperti uranium, radium, dan radon. Meskipun kandungan ini biasanya dalam konsentrasi rendah, namun perlu diperhatikan dalam pengambilan energi panas bumi.

Beberapa mineral yang umum ditemukan dalam air panas bumi superkritikal adalah silika (SiO_2), kalsium (Ca), magnesium (Mg), natrium (Na), dan kalium (K). Kandungan mineral ini dapat membentuk endapan mineral yang dikenal sebagai *tuff* atau *travertine*, dan dapat mengakibatkan korosi pada pipa dan peralatan yang digunakan untuk mengambil energi panas bumi. Selain mineral, air panas bumi superkritikal juga dapat mengandung gas-gas seperti CO_2 , metana (CH_4), hidrogen sulfida (H_2S), dan nitrogen (N_2). Kandungan gas-gas ini dapat mempengaruhi komposisi kimia fluida dan sifat fisik batuan *reservoir*. Kandungan kimia dalam *reservoir* panas bumi superkritikal juga dapat berdampak pada teknologi pengambilan energi panas bumi. Kandungan mineral yang tinggi dapat menyebabkan formasi endapan mineral yang dapat menghambat aliran fluida panas bumi dan memperburuk korosi pada pipa dan peralatan produksi. Oleh karena itu, pengendalian kandungan mineral dan penggunaan bahan tahan korosi menjadi penting dalam teknologi pengambilan energi panas bumi. Selain itu, kandungan gas-gas seperti CO_2 dan H_2S juga dapat mempengaruhi proses pengambilan energi panas bumi dan memerlukan perhatian khusus dalam proses pengeboran dan produksi [10].

IV. KESIMPULAN

Dalam kesimpulannya, pengembangan teknologi *geothermal* superkritikal adalah proses yang kompleks dan menantang yang memerlukan investasi yang signifikan dalam penelitian, pengembangan teknologi, dan kerja sama. Pengembangan teknologi *geothermal supercritical* masih termasuk ke dalam kategori teknologi yang baru. Banyaknya hambatan dalam pengembangan teknologi ini menjadi tantangan tersendiri untuk mengembangkan energi ini. Kurang optimalnya pemanfaatan sumber daya *geothermal* yang ada, menjadikan sebuah tantangan tersendiri bagi masyarakat Indonesia. Menurut data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Indonesia memiliki potensi *geothermal* mencapai kisaran angka 28.996 MW. Penggunaan teknologi *geothermal supercritical* di Indonesia diharapkan nantinya dapat memberikan manfaat yang signifikan dalam menyediakan pasokan energi yang bersih dan berkelanjutan serta mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil. Saat ini, beberapa proyek eksplorasi yang sedang berlangsung mencakup pengeboran sumur-sumur eksplorasi di Meksiko, Italia, USA, Kenya, Islandia, dan Jepang. Melalui pengeboran dan eksplorasi ini diharapkan akan tercipta peluang kolaborasi internasional yang lebih besar dalam memanfaatkan sumber daya *supercritical geothermal* secara efektif dan aman. Sumber daya *geothermal* superkritikal saat ini sedang diteliti di banyak wilayah di seluruh dunia melalui program gabungan internasional. Teknologi pengembangan *supercritical geothermal* terus dikembangkan, contohnya adalah pemanfaatan CO_2 dan *closed loop supercritical geothermal*. Dalam pengembangan *supercritical geothermal* dibutuhkan kolaborasi dari berbagai bidang studi seperti geologi, geokimia, geofisika, *petroleum engineering*, *reservoir engineering*, dll. *Reservoir* panas bumi superkritikal terbentuk di daerah-daerah dengan aktivitas vulkanik atau tektonik yang kuat. Di dalam *reservoir* ini, air dan gas terkompresi dalam kondisi superkritikal yang memungkinkan keduanya menjadi cairan yang homogen. Pemanfaatan *reservoir* panas bumi superkritikal untuk pembangkit listrik tenaga panas bumi dapat dilakukan dengan menggunakan teknologi *Cycle Supercritical Organic Rankine (SCOR)*, yang merupakan teknologi yang dapat menghasilkan listrik dengan efisiensi yang tinggi. Pengembangan *reservoir geothermal* superkritikal masih dalam tahap awal, karena teknologi pengambilan energi panas bumi dari *reservoir* superkritikal masih dalam tahap pengembangan dan pengujian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Scott, T. Driesner, and P. Weis, "Geologic controls on *supercritical geothermal* resources above magmatic intrusions," *Nat Commun*, Vol. 6, Jul. 2015, doi: 10.1038/ncomms8837.
- [2] M. Heřmanská, B. I. Kleine, and A. Stefánsson, "Supercritical Fluid Geochemistry in *Geothermal* Systems," *Geofluids*, Vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/6023534.
- [3] M. H. Røed, M. Hjelstuen, and A. Liberale, "DEVELOPMENT OF A LOW COST NOVEL PT LOGGING TOOL FOR HIGH TEMPERATURE OPERATION (600°C)," 2020.
- [4] T. Reinsch, P. Dobson, H. Asanuma, E. Huenges, F. Poletto, and B. Sanjuan, "Utilizing *supercritical geothermal* systems: a review of past ventures and ongoing research activities," *Geothermal Energy*, Vol. 5 (1). SpringerOpen, Dec. 01, 2017. doi: 10.1186/s40517-017-0075-y.
- [5] M. Kruszewski and V. Wittig, "Review of failure modes in *supercritical geothermal* drilling projects," *Geothermal Energy*, vol. 6 (1). SpringerOpen, Dec. 01, 2018. doi: 10.1186/s40517-018-0113-4.



- [6] M. Kruszewski and V. Wittig, "Review of failure modes in *supercritical geothermal* drilling projects," *Geothermal Energy*, Vol. 6 (1). SpringerOpen, Dec. 01, 2018. doi: 10.1186/s40517-018-0113-4.
- [7] T. Reinsch, P. Dobson, H. Asanuma, E. Huenges, F. Poletto, and B. Sanjuan, "Utilizing *supercritical geothermal* systems: a review of past ventures and ongoing research activities," *Geothermal Energy*, Vol. 5 (1). SpringerOpen, Dec. 01, 2017. doi: 10.1186/s40517-017-0075-y.
- [8] H. Muraoka, H. Asanuma, N. Tsuchiya, T. Ito, T. Mogi, and H. Ito, "The Japan beyond-brittle project," *Scientific Drilling*, no. 17, pp. 51–59, 2014, doi: 10.5194/sd-17-51-2014.
- [9] L. Zhang, F. Luo, R. Xu, P. Jiang, and H. Liu, "Heat transfer and fluid transport of *supercritical* CO₂ in enhanced *geothermal* system with local thermal non-equilibrium model," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2014, pp. 7644–7650. doi: 10.1016/j.egypro.2014.11.798.
- [10] E. K. Levy, X. Wang, C. Pan, C. E. Romero, and C. R. Maya, "Use of hot *supercritical* CO₂ produced from a *geothermal reservoir* to generate electric power in a gas turbine power generation system," *Journal of CO₂ Utilization*, Vol. 23, pp. 20–28, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.jcou.2017.11.001.
- [11] D. T. W. Lin, J. C. Hsieh, and B. Y. Shih, "The optimization of *geothermal* extraction based on *supercritical* CO₂ porous heat transfer model," *Renew Energy*, Vol. 143, pp. 1162–1171, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.05.090.
- [12] A. Amaya, J. Scherer, J. Muir, M. Patel, and B. Higgins, "GreenFire Energy Closed-Loop *Geothermal* Demonstration using Supercritical Carbon Dioxide as Working Fluid."
- [13] F. Parisio, V. Vilarrasa, W. Wang, O. Kolditz, and T. Nagel, "The risks of long-term re-injection in *supercritical geothermal* systems," *Nat Commun*, Vol. 10 (1), Dec. 2019, doi: 10.1038/s41467-019-12146-0.
- [14] Elvirosa Brancaccio - Serintel Sr, "Supercritical *Geothermal* Resources: Exploration and Development," Rome, Italy