



## PEMANFAATAN BAKTERI TERMOFILIK SULFATE-REDUCING UNTUK MENINGKATKAN PERMEABILITAS DAN EFISIENSI PANAS PADA SISTEM GEOTERMAL MELALUI PRODUKSI H<sub>2</sub>S BIOGENIK

DAVID SAROLI WARUWU<sup>1\*</sup>, SEPRINA NOPITA SIMANJUNTAK<sup>1</sup>, ARKE KHARISMA ERYANTI WIBOWO<sup>1</sup>, SUHARTI SASTROREDJO<sup>1</sup>

1. Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Eksplorasi dan Produksi, Universitas Pertamina

\* Korespondensi: [davidsaroli23@gmail.com](mailto:davidsaroli23@gmail.com)

**Sari** - Permeabilitas batuan merupakan parameter kunci dalam efisiensi sistem panas bumi, namun sering kali terhambat oleh proses scaling mineral dan berkurangnya konektivitas pori. Penelitian ini mengusulkan pendekatan inovatif berupa pemanfaatan bakteri *sulfate-reducing* (SRB) termofilik untuk meningkatkan permeabilitas reservoir geotermal melalui produksi H<sub>2</sub>S biogenik dan pembentukan biofilm. Metode yang digunakan melibatkan isolasi SRB dari lingkungan panas alami, kultur anaerob dalam medium khusus pada suhu 70°C, serta injeksi ke dalam kolom batuan simulatif. Analisis dilakukan terhadap produksi H<sub>2</sub>S, pembentukan EPS, perubahan permeabilitas batuan, dan karakterisasi mikro-fracture menggunakan SEM dan XRD. Hasil menunjukkan bahwa SRB dapat tumbuh dan aktif dalam kondisi simulatif geotermal, dengan produksi H<sub>2</sub>S mencapai 12–16 ppm dan pembentukan biofilm padat. Injeksi mikroba menyebabkan peningkatan permeabilitas sebesar 25–40%, disertai dengan terbentuknya mikro-fracture dan pelarutan mineral batuan, khususnya pada permukaan karbonat dan silikat. EPS yang dihasilkan berperan dalam memodifikasi pori dan meningkatkan tekanan osmotik lokal, memperkuat rekahan biologis. Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa SRB termofilik memiliki potensi sebagai agen bioaugmentasi dalam sistem panas bumi, menawarkan pendekatan yang ramah lingkungan, ekonomis, dan dapat dikontrol, sebagai alternatif terhadap metode stimulasi kimia dan fisika konvensional.

**Kata Kunci:** *Sulfate-reducing bacteria* (SRB), H<sub>2</sub>S biogenik, biofilm, permeabilitas reservoir, sistem geotermal, bioaugmentasi

**Abstract** - Rock permeability is a key parameter in the efficiency of geothermal systems, yet it is often hindered by mineral scaling and reduced pore connectivity. This study proposes an innovative approach by utilizing thermophilic sulfate-reducing bacteria (SRB) to enhance geothermal reservoir permeability through biogenic H<sub>2</sub>S production and biofilm formation. The methodology includes isolating SRB from natural thermal environments, culturing them anaerobically in a specialized medium at 70°C, and injecting them into simulated rock columns. Analyses were conducted on H<sub>2</sub>S production, EPS formation, permeability changes, and micro-fracture characterization using SEM and XRD. The results show that SRB are able to grow and remain active under simulated geothermal conditions, producing 12–16 ppm of H<sub>2</sub>S and forming dense biofilms. Microbial injection led to a 25–40% increase in rock permeability, accompanied by the development of micro-fractures and dissolution of rock minerals, particularly on carbonate and silicate surfaces. The produced EPS played a role in modifying pore structures and increasing local osmotic pressure, reinforcing biologically-induced fractures. The findings indicate that thermophilic SRB have strong potential as bioaugmentation agents in geothermal systems, offering an environmentally friendly, cost-effective, and controllable alternative to conventional chemical and physical stimulation methods.

**Keywords:** *Sulfate-reducing bacteria* (SRB), biogenic H<sub>2</sub>S, biofilm, reservoir permeability, geothermal systems, bioaugmentation.

### 1. PENDAHULUAN

Geotermal merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang paling menjanjikan untuk memenuhi kebutuhan energi bersih dunia, khususnya di negara-negara yang berada di kawasan *ring of fire* seperti Indonesia. Keunggulan utama energi ini terletak pada kestabilannya sebagai *base-load energy*, emisi karbon yang rendah, dan potensi yang sangat besar di bawah permukaan bumi. Namun demikian, tantangan utama dalam pemanfaatan geotermal bukan hanya terletak pada eksplorasi dan pengeboran, melainkan pada kemampuan sistem *reservoir* dalam menghantarkan fluida panas secara efisien menuju permukaan.

Permeabilitas batuan merupakan faktor utama dalam efisiensi sistem geotermal karena menentukan seberapa mudah fluida panas dapat mengalir di dalam *reservoir*. Di banyak sistem geotermal bertemperatur menengah hingga tinggi, permeabilitas batuan secara alami rendah akibat presipitasi mineral dan proses sealing sekunder (Grant dkk., 1982; Hochstein, 1990; Nicholson, 1993). Hal ini menyebabkan terhambatnya aliran fluida dan berkurangnya performa sistem secara keseluruhan. Upaya untuk meningkatkan

permeabilitas telah dilakukan dengan berbagai metode, seperti *hydraulic fracturing*, *acid stimulation*, atau injeksi termal, namun metode-metode tersebut sering kali menimbulkan risiko teknis, biaya besar, dan potensi dampak lingkungan seperti induksi gempa mikro dan kontaminasi fluida bawah permukaan.

*Model Microbial Enhanced Oil Recovery* (MEOR) telah menunjukkan potensi peningkatan permeabilitas melalui aktivitas bakteri pelarut mineral, misalnya *Paenibacillus mucilaginosus*, yang menghasilkan asam organik dan enzim untuk melarutkan mineral tertentu (Li dkk., 2025). Mekanisme ini sejalan dengan ulasan mengenai produksi biosurfaktan in-situ untuk memobilisasi fluida (Youssef dkk., 2009; Niu dkk., 2020), serta perilaku degradasi oksidatif yang menghasilkan asam organik seperti yang teramati pada studi biomassa (Santos dkk., 2016). Pendekatan serupa mulai dilirik dalam sistem panas bumi melalui konsep *Microbially Enhanced Geothermal Systems* (MEGS), yang terinspirasi dari keberhasilan MEOR di industri migas. Dalam konteks geotermal, mikroorganisme ekstremofil, khususnya bakteri pereduksi sulfat, seperti *sulfate-reducing bacteria*

(SRB) termofilik, berpotensi memodifikasi kondisi *reservoir* melalui mekanisme biogeokimia seperti reduksi sulfat, produksi H<sub>2</sub>S, serta proses pelarutan dan presipitasi mineral.

Bakteri SRB merupakan kelompok mikroorganisme anaerob yang mampu mereduksi ion sulfat menjadi *Hidrogen Sulfida* (H<sub>2</sub>S) dalam proses metabolismenya. Beberapa genus bakteri sulfat-reduksi, seperti *Thermodesulfobacterium*, *Desulfotomaculum*, dan *Thermoanaerobacter* diketahui mampu tumbuh pada suhu antara 60 - 85°C (Jeanthon dkk., 2002), yang masih berada dalam lingkup kondisi termal di sekitar manifestasi permukaan sistem panas bumi. Giggenbach (1997) mengklasifikasikan sistem panas bumi ber-suhu menengah hingga tinggi memiliki temperatur *reservoir* sekitar 150–250 °C, sementara berdasarkan Ahmad dkk. (2002) fluida di permukaan umumnya berada pada kisaran 50–100 °C. Dengan demikian, suhu pertumbuhan mikroba ini dapat beririsan dengan kondisi termal manifestasi geotermal, meskipun tidak merepresentasikan kondisi *reservoir* yang lebih dalam. Selain faktor suhu, pH juga merupakan parameter penting yang perlu diperhatikan agar bakteri ini dapat bertahan pada lingkungan geotermal. Penelitian oleh Brito dkk. (2020) di lapangan panas bumi Los Azufres, Meksiko menunjukkan bahwa biomat dari aliran panas asam mengandung komunitas mikroba SRB yang aktif membentuk biofilm, menghasilkan EPS (ekspolisakarida), dan mereduksi logam berat secara efektif.

Produksi H<sub>2</sub>S oleh SRB tidak hanya relevan dalam konteks bioremediasi logam berat, tetapi juga memiliki implikasi langsung terhadap peningkatan permeabilitas batuan. Gas H<sub>2</sub>S biogenik dapat berkontribusi pada proses pelarutan mineral selektif serta berpotensi memicu terbentuknya rekahan mikro yang memperluas jalur migrasi fluida. Hal ini sesuai dengan prinsip *bioleaching* dan biomodifikasi mineral yang telah lama diterapkan dalam bidang *biomining*. Vera dkk. (2022) juga

mengemukakan bahwa kemampuan mikroba dalam membentuk biofilm dan menghasilkan senyawa metabolit seperti asam dan gas reaktif sangat berpengaruh terhadap perubahan tekstur dan reaktivitas permukaan mineral.

Selain itu, Brewer dkk. (2019) dalam kajian *Recovery of Rare Earth Elements (REE) from Geothermal Fluids through Bacterial Cell Surface Adsorption* menunjukkan bahwa permukaan sel bakteri (*E. coli* yang dimodifikasi) mampu mengikat ion REE secara selektif pada kondisi suhu hingga sekitar 70°C dan salinitas tinggi (TDS ~ 165.000 ppm), membuktikan ketahanan serta efektivitas mikroba dalam lingkungan panas bumi ekstrem. Hal ini menjadi peluang besar untuk mengintegrasikan teknologi mikroba dalam rekayasa *reservoir*, baik untuk peningkatan permeabilitas maupun sebagai pendekatan *eco-friendly stimulation*.

Dengan demikian, penelitian ini berfokus pada potensi pemanfaatan *sulfate-reducing bacteria* (SRB) termofilik dalam meningkatkan permeabilitas dan efisiensi perpindahan panas pada sistem geotermal melalui mekanisme produksi H<sub>2</sub>S biogenik. Pendekatan ini tidak hanya menawarkan solusi teknis yang inovatif, tetapi juga menjadi langkah menuju pengembangan teknologi geotermal yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

## 2. GEOLOGI REGIONAL

### 2.1 Hululais

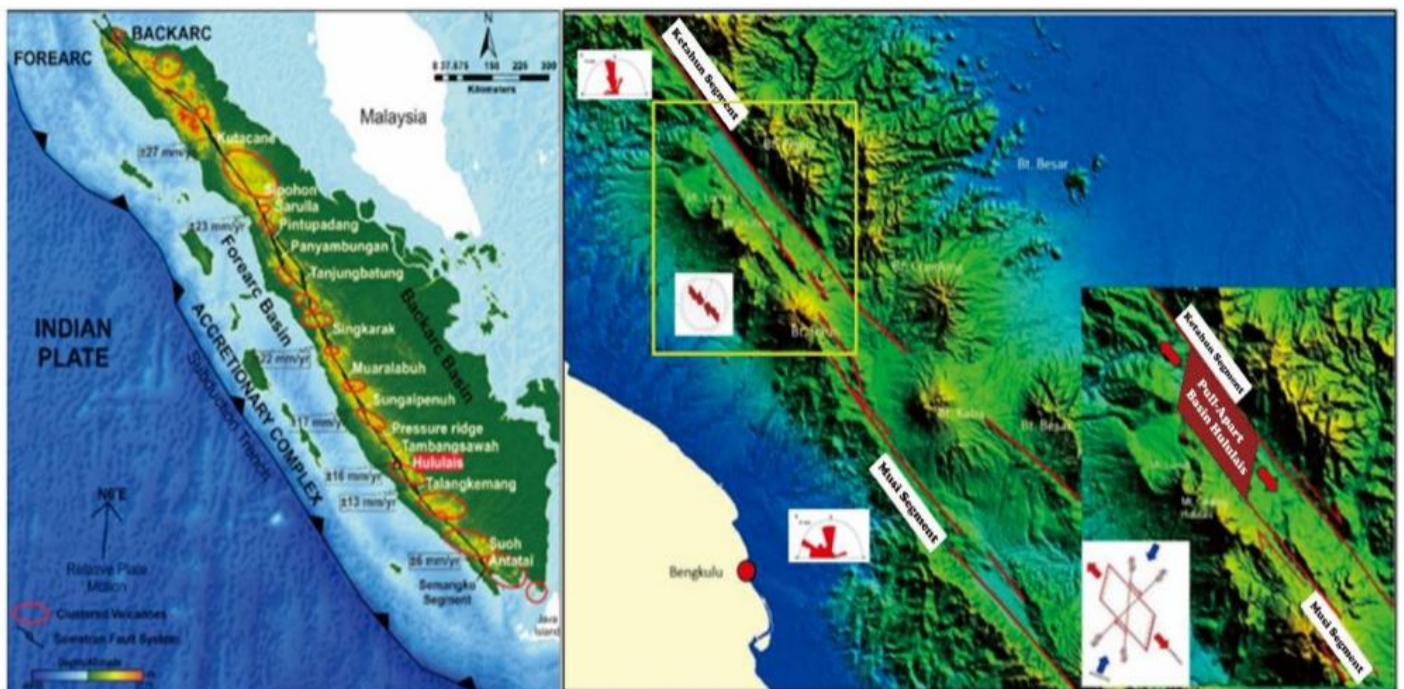
Lapangan panas bumi Hululais terletak di Kabupaten Rejang Lebong, Provinsi Bengkulu, sekitar 120 km di sebelah utara Kota Bengkulu. Secara fisiografis, wilayah ini termasuk dalam jajaran Pegunungan Bukit Barisan dengan orientasi barat laut–tenggara (NW–SE). Luas area prospek Hululais diperkirakan mencakup radius ±15 km<sup>2</sup> di sekitar Kompleks Vulkanik Hululais, dengan batas alami berupa lembah dan punggung vulkanik (**Gambar 1**).



Gambar 1 Peta Lokasi Wilayah Studi (Nurseto dkk., 2021).

Secara tektonik, Hululais dipengaruhi oleh interaksi Lempeng Indo-Australia yang menunjam miring ke bawah Lempeng Eurasia. Subduksi ini membentuk Sesar Sumatra (*Sumatra Fault*

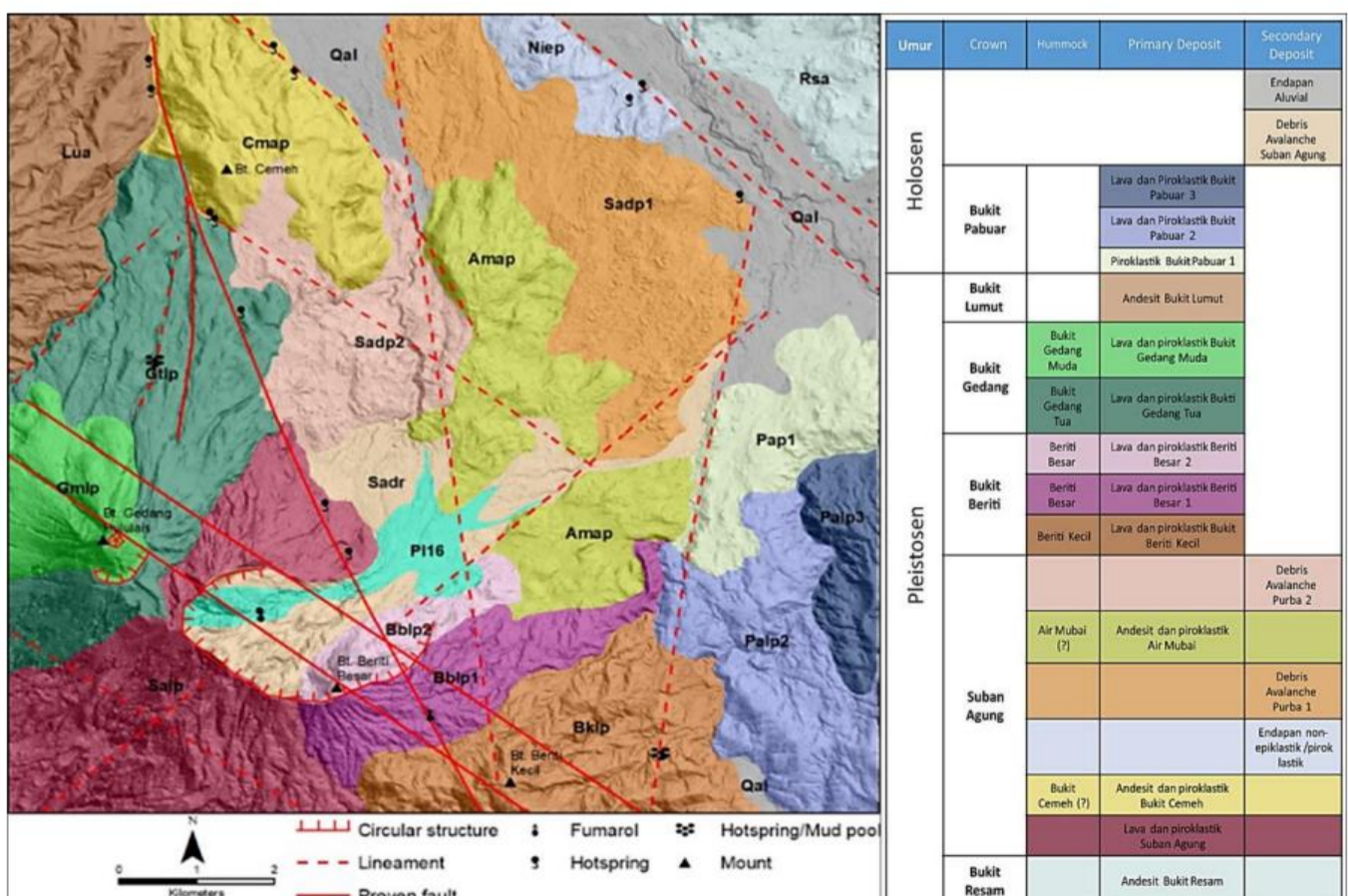
*Zone/SFZ*), sesar mendatar dekstral sepanjang ±1.900 km yang mengontrol jalur magmatisme dan vulkanisme di Sumatra (**Gambar 2**).



**Gambar 2** Peta Tektonik Sumatera yang menunjukkan lokasi relatif Hululais terhadap gugusan gunung api di dalam zona Sesar Sumatera (Nurseto dkk., 2021).

Hululais berada di zona tumpang kanan (*right-stepping*) antara Segmen Ketahun di utara dan Segmen Musi di selatan. Interaksi kedua segmen tersebut menghasilkan *pull-apart basin* berbentuk rhomboidal dengan rasio panjang-lebar sekitar 3:1. Aktivitas tektonik ini memberikan rekahan-regangan yang menjadi jalur migrasi fluida panas bumi.

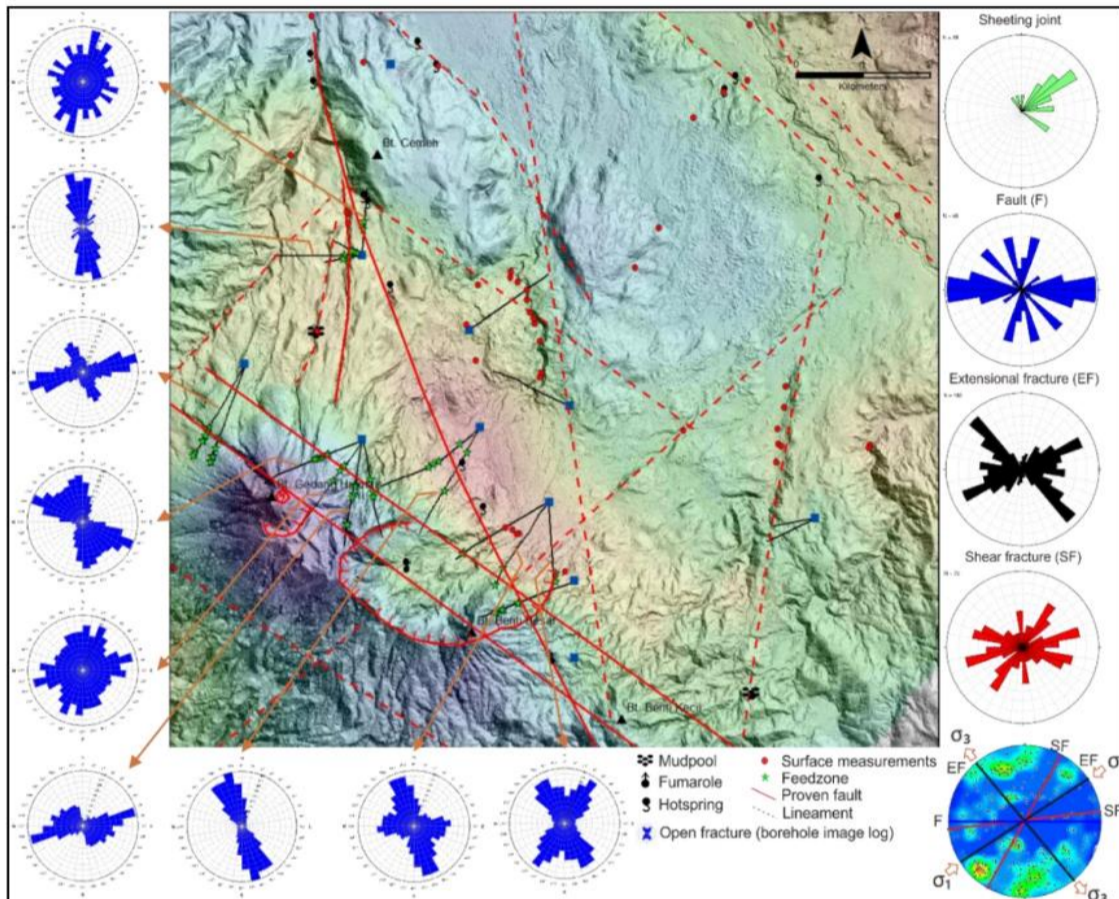
Volkanostratigrafi regional di Hululais didominasi oleh produk Vulkanik Kuartar. Urutan satuan batuan secara umum terdiri dari lava andesit, breksi vulkanik, piroklastik, hingga endapan longsor gunung api (*debris avalanche*). Endapan paling tua diidentifikasi berasal dari aktivitas Suban Agung, sedangkan produk lebih muda dihasilkan oleh Bukit Beriti dan Bukit Gedang (**Gambar 3**).



**Gambar 3** Peta Geologi dan Volkanostratigrafi Hululais (Nurseto dkk., 2021).

Lapisan ini menutupi sebagian batuan dasar yang tersusun oleh kompleks vulkanik lebih tua di Pegunungan Bukit Barisan. Satuan stratigrafi ini berperan sebagai sumber panas (intrusi magmatik), *reservoir* (batuan vulkanik berpori dan rekahan), dan sekaligus jalur aliran fluida hidrotermal.

Struktur utama di daerah Hululais dikontrol oleh Sesar Sumatra dengan orientasi NW–SE. Data permukaan, logging sumur, dan mikrogempa menunjukkan tiga arah dominan, yaitu NW–SE sejajar SFZ sebagai struktur utama, NNW–SSE hingga N–S sebagai hasil kompresi lokal, dan NE–SW sebagai rekahan konjugat akibat regangan (**Gambar 4**).



**Gambar 4** Peta Struktur Geologi Hululais. Nurseto dkk. (2021).

Struktur-struktur ini tidak hanya fosil, tetapi masih aktif, terbukti dari klaster mikrogempa dan keterkaitannya dengan zona umpan (*feed zone*) sumur panas bumi. Keberadaan struktur permeabel ini juga menjelaskan persebaran manifestasi di permukaan seperti fumarol, solfatara, dan mata air panas.

Lapangan Hululais merupakan bagian dari Kompleks Vulkanik Hululais berumur Kuartar yang terdiri dari enam *crown units*: Bukit Resam, Suban Agung, Bukit Beriti, Bukit Gedang, Bukit Lumut, dan Bukit Pabuar. Suban Agung merupakan pusat vulkanisme terbesar yang diinterpretasikan membentuk kaldera berdiameter  $\pm 2,5$  km.

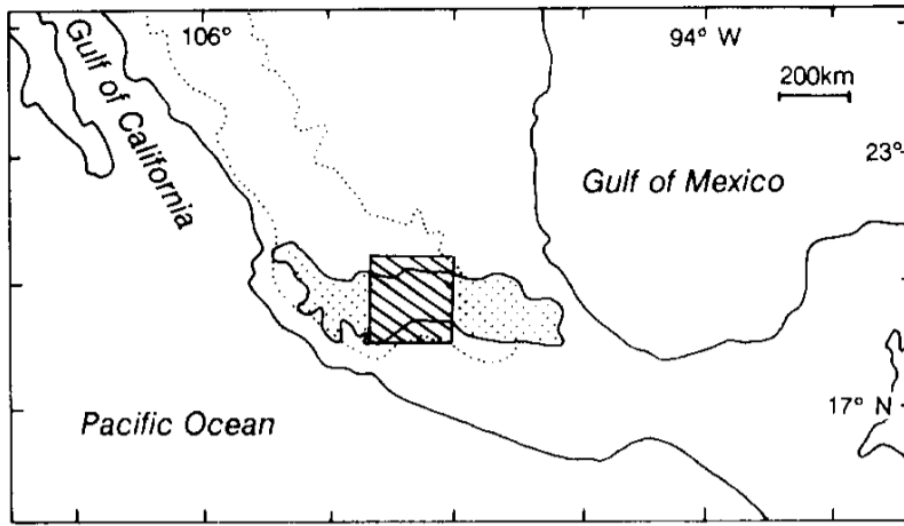
Aktivitas berikutnya menghasilkan pertumbuhan Bukit Beriti dan Bukit Gedang, dengan endapan lava, piroklastik, serta *debris avalanche*. Secara stratigrafi, produk Beriti lebih muda dibandingkan Gedang. Keseluruhan aktivitas magmatik ini menyediakan sumber panas dan batuan permeabel yang mendukung sistem panas bumi.

Kondisi geologi regional Hululais menunjukkan bahwa sistem panas bumi di daerah ini terbentuk oleh kombinasi tektonik aktif (Segmen Ketahun–Musi dan *pull-apart basin*) dengan vulkanisme Kuartar (Kompleks Suban Agung dan sekitarnya). Sumber panas berasal dari tubuh magmatik Suban Agung, permeabilitas dikendalikan oleh rekahan aktif SFZ, dan fluida hidrotermal muncul melalui struktur tersebut.

Dengan tiga komponen utama seperti panas, permeabilitas, dan fluida Lapangan Hululais merepresentasikan sistem panas bumi bertipe vulkanik-struktural yang sangat potensial untuk dikembangkan

## 2.2 Los Azufres

Lapangan Panas Bumi Los Azufres terletak di negara bagian Michoacán, Meksiko. Wilayah ini secara fisiografis dan tektonik merupakan bagian dari Sabuk Vulkanik Trans-Meksiko (*Trans-Mexican Volcanic Belt / MVB*). Lapangan ini berada di pusat area cekungan sub-m elingkar (*subcircular depressed area*) yang luas, berukuran sekitar 27 x 26 km (**Gambar 5**).



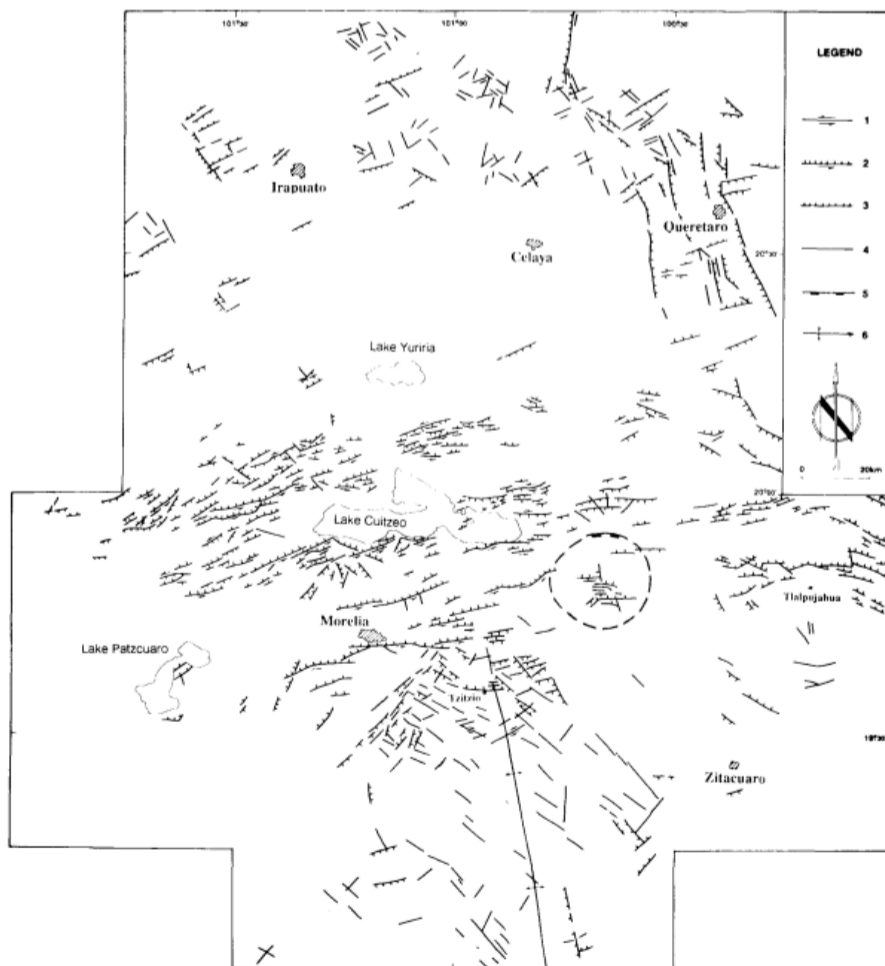
**Gambar 5** Peta Geologi Area Studi Lapangan Los Azufres (Ferrari dkk., 1991).

Los Azufres terletak di dalam Sabuk Vulkanik Trans-Meksiko (MVB). Secara struktural, reservoir di Los Azufres dicirikan sebagai sistem hidrotermal vulkanik yang sangat terkekalkan (*intensely fractured*) (Ferrari dkk., 1991). Permeabilitas dan jalur migrasi fluida panas bumi di lapangan ini sangat dikontrol oleh jaringan rekahan aktif yang berkaitan dengan tektonik regional.

Los Azufres adalah salah satu pusat vulkanisme silika (*silicic centers*) utama yang terdapat di MVB. Kompleks ini terdiri dari empat unit piroklastik dan beberapa kompleks kubah (*dome complexes*). Reservoir utama terdiri dari Andesit Mil Cumbres. Terdapat pula unit-unit lain seperti Riolit Agua Fría

yang bertindak sebagai batuan penutup (*sealant cap*), dan Dasit Tejamaniles sebagai unit vulkanik termuda di kompleks tersebut (Ferrari dkk., 1991).

Struktur geologi di Los Azufres dicirikan oleh kontrol intensif dari jaringan rekahan (Gambar 6). Lapangan ini adalah sistem hidrotermal vulkanik yang sangat terkekalkan, menunjukkan bahwa permeabilitasnya diatur oleh fraktur daripada porositas matriks batuan. Di permukaan, terdapat manifestasi fumarol yang dihubungkan dengan ventilasi termal (*thermal vent*). Air di sekitar biomat permukaannya dicirikan sebagai kondisi asam (pH 3) dan hipoksia.



**Gambar 6** Peta Struktur Geologi Lapangan Los Azufres (Ferrari dkk., 1991).

Magmatisme di Los Azufres telah aktif sejak Pliosen dan membentuk salah satu pusat vulkanisme

silika utama di Sabuk Vulkanik Trans-Meksiko. Tubuh magmatik terkait berfungsi sebagai sumber

panas bagi sistem geotermal. Meskipun tidak ada fitur kaldera yang secara morfologi terlihat jelas, data menunjukkan adanya sejarah runturan (kolaps) yang kompleks. Aktivitas magmatik berlanjut hingga membentuk Dasit Tejamaniles, unit vulkanik termuda di kompleks tersebut (Ferrari dkk., 1991).

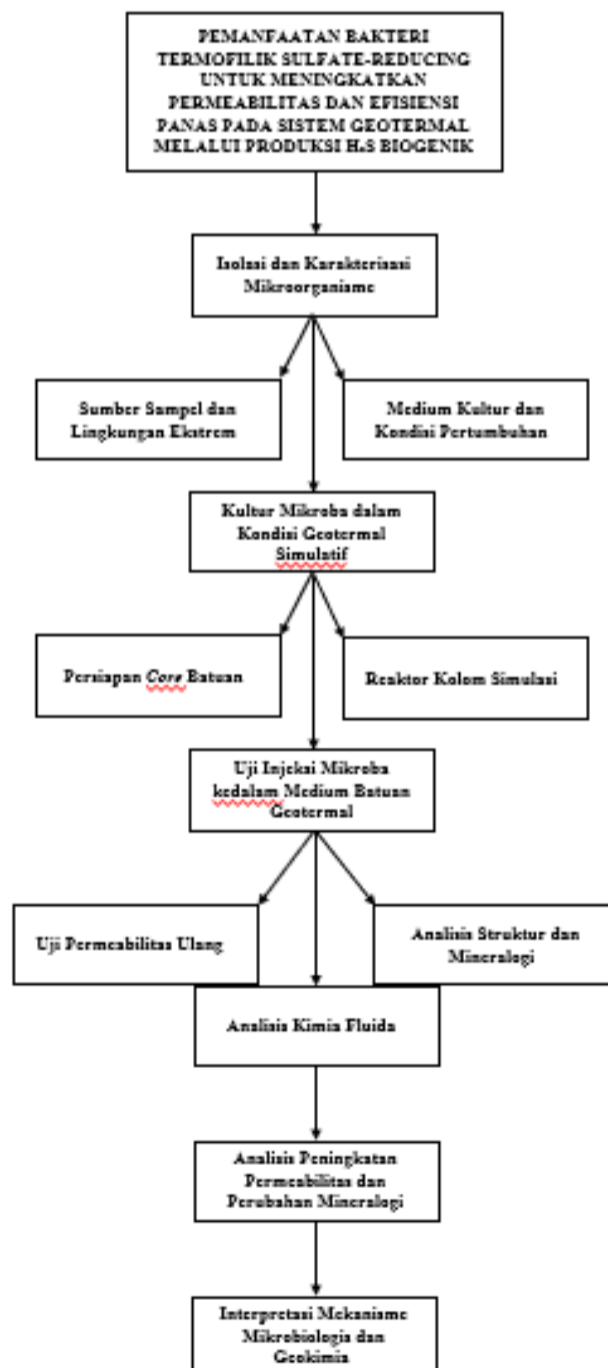
Kondisi geologi regional Los Azufres menunjukkan bahwa sistem panas bumi di daerah ini terbentuk oleh kombinasi tektonik aktif (berupa sesar normal dan *transtension* regional) dengan vulkanisme Silika (Kompleks Kaldera Los Azufres). Sumber panas berasal dari tubuh magmatik yang berkaitan dengan pusat vulkanisme Silika di kaldera tersebut. Permeabilitas dikendalikan oleh rekahan-rekahan ekstensif yang berkembang sejak Pliosen Akhir hingga Kuartar, dan fluida hidrotermal muncul melalui struktur tersebut. Geologi Los Azufres menyediakan bukti langsung aktivitas mikroba di permukaan pada kondisi pH yang sangat asam dan suhu hangat, menjadi dasar bukti pendukung (*proof of concept*) yang kuat untuk mengisolasi strain SRB

termofilik sebagai agen bio-stimulasi dalam penelitian ini.

### 3. METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian ini merujuk pada pendekatan yang digunakan dalam penelitian sebelumnya oleh Brito dkk. (2020), di lapangan panas bumi Los Azufres, Meksiko yang diaplikasikan ke lapangan panas bumi Hululais, dengan modifikasi disesuaikan dengan kondisi lapangan panas bumi dan laboratorium di Indonesia.

Penelitian ini bersifat konseptual dan eksperimental awal (*early-stage applied research*) yang mengkaji potensi mikroorganisme termofilik dari kelompok *sulfate-reducing bacteria* (SRB) untuk meningkatkan permeabilitas batuan pada sistem geotermal melalui produksi H<sub>2</sub>S biogenik. Tujuan utama penelitian ini adalah menyusun kerangka kerja bioaugmentasi mikroba terhadap batuan geotermal menggunakan pendekatan laboratorium mikrobiologi dan simulasi aliran fluida (Gambar 7).



Gambar 7 Diagram Alir Penelitian

### 3.1 Isolasi dan Karakterisasi Mikroorganism

#### 3.1.1 Sumber Sampel dan Lingkungan Ekstrem

Isolat *sulfate-reducing bacteria* (SRB) diperoleh dari sumber mata air panas alami (*hot spring*) yang dipilih berdasarkan kondisi temperatur tinggi ( $\approx 50\text{--}75\text{ }^\circ\text{C}$ ) dan potensi keasaman (pH asam–netral). Fardeau dkk. (1995), menunjukkan keberadaan SRB termofilik pada kisaran suhu  $\approx 50\text{--}75\text{ }^\circ\text{C}$  dan secara terpisah, adanya SRB acidofilik yang tumbuh pada pH  $\sim 3.6\text{--}5.5$ ; namun publikasi yang konsisten mendemonstrasikan aktivitas metabolik SRB pada kondisi  $>70\text{ }^\circ\text{C}$  bersamaan dengan pH  $<5$  masih terbatas. Oleh karena itu, parameter in-situ (suhu dan pH) pada tiap lokasi akan diukur dan diverifikasi sebelum pengambilan sampel, dan isolat akan diuji pada matriks temperatur–pH untuk menentukan kisaran kondisi pertumbuhan optimal (Fardeau dkk. 1995).

#### 3.1.2 Medium Kultur dan Kondisi Pertumbuhan

Berdasarkan Postgate (1984), kultur bakteri pereduksi sulfat umumnya ditumbuhkan pada medium Postgate C dengan donor elektron berupa sodium laktat atau piruvat dan akseptor elektron seperti natrium sulfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) maupun sulfur elemental. Menurut Jeanthon dkk. (2002), beberapa genus *Thermodesulfobacterium* mampu tumbuh optimal pada suhu  $70\text{--}75\text{ }^\circ\text{C}$  dalam kondisi anaerobik dengan salinitas sedang, sedangkan Plugge dkk. (2011) menegaskan bahwa variasi substrat karbon (misalnya laktat, piruvat, maupun

$\text{H}_2$ ) sangat memengaruhi fleksibilitas metabolik SRB. Oleh karena itu, dalam penelitian ini inkubasi dilakukan secara anaerobik dalam kisaran suhu  $65\text{--}75\text{ }^\circ\text{C}$  selama 5–10 hari untuk menyerupai kondisi pertumbuhan yang telah dilaporkan pada SRB termofilik.

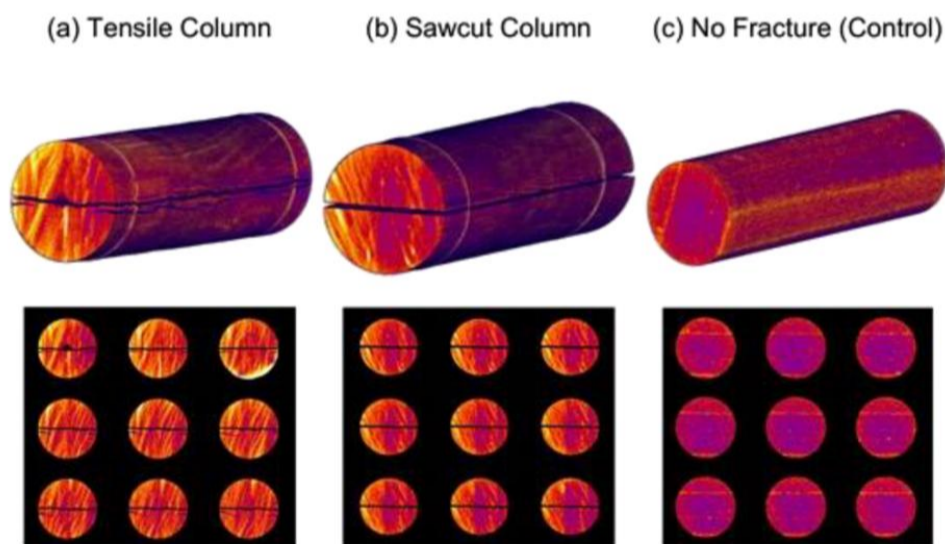
Parameter yang dipantau meliputi:

- pH kultur
- Produksi  $\text{H}_2\text{S}$  dengan menggunakan tabung *lead acetate paper* atau *gas chromatography*
- Biomassa total menggunakan spektrofotometri OD600
- Pembentukan biofilm dengan kristal violet assay.

### 3.2 Simulasi Injeksi Mikroba ke Media Batuan

#### 3.2.1 Persiapan Core Batuan

Untuk simulasi ini menggunakan tiga sampel *core*. Sampel yang digunakan berupa sampel batupasir dengan rekahan *tensile-column*, rekahan *sawcut column*, dan *no fracture*. Sampel dipotong menjadi silinder (diameter  $\pm 3\text{ cm}$ , panjang  $\pm 12\text{ cm}$ , Gambar 8) dan dikeringkan pada suhu  $120\text{ }^\circ\text{C}$ . Porositas awal sampel batupasir yang digunakan adalah 0.22 (*tensile*) dan 0.21 (*sawcut*) yang diukur setelah memperhitungkan volume rekahan. Permeabilitas awal 7 mD (*sawcut*), 3 mD (*tensile*), dan 0.35 mD (*no fracture*) yang diukur menggunakan hukum Darcy.



Gambar 8 Sampel Core Batuan. (Cheng dkk., 2021).

#### 3.3.2 Reaktor Kolom Simulasi

Reaktor kolom vertikal dengan sistem sirkulasi tertutup digunakan untuk mensimulasikan aliran fluida geotermal dalam kondisi laboratorium. Di dalamnya berisi kolom berisi *core* batuan dan mikroba, yang dijaga pada temperatur  $70\text{ }^\circ\text{C} \pm 2$ , pH antara 4–6 dan aliran secara *downflow*, dengan tekanan  $<1\text{ bar}$ . Injeksi dilakukan dengan monitoring berkala terhadap tekanan pori, *pH effluent*, dan akumulasi gas di *headspace* reaktor.

### 3.3 Analisis Perubahan Permeabilitas dan Struktur Batuan

Setelah inkubasi, *core* batuan dikarakterisasi ulang untuk mengukur perubahan sebagai berikut:

#### 3.3.1 Uji Permeabilitas Ulang

Uji ini dilakukan dengan metode *Darcy Law* berbasis injeksi air atau gas  $\text{N}_2$  untuk membandingkan perubahan permeabilitas sebelum dan sesudah perlakuan mikroba seperti pada 3.1 dan 3.2.

### 3.3.2 Analisis Kimia Fluida

Dalam analisis ini, ion-ion logam larut diukur dengan ICP-OES atau AAS, sedangkan konsentrasi H<sub>2</sub>S dalam *effluent* diukur dengan spektrofotometri metilen biru atau GC-TCD.

### 3.3 Evaluasi Efektivitas Biostimulasi

Efektivitas dari sistem mikroba dinilai berdasarkan:

- ΔK (delta permeabilitas): Selisih nilai permeabilitas awal dan akhir
- Kuantitas H<sub>2</sub>S terproduksi: Indikator produktivitas SRB
- Tingkat pelarutan mineral batuan: Menunjukkan intensitas bioalterasi
- Pembentukan biofilm: Dilihat dari sisa EPS dan citra SEM

### 3.4 Interpretasi Mekanisme Mikrobiologis dan Geokimia

Interpretasi dilakukan dengan membandingkan hasil terhadap kontrol (tanpa mikroba) dan terhadap literatur terdahulu (Brito dkk., 2020; Brewer dkk., 2019).

### 3.4 Validitas dan Keterbatasan Metode

Penelitian ini dilakukan dalam skala laboratorium sehingga belum mencerminkan kondisi kompleks di lapangan (multifasa, tekanan tinggi, heterogenitas batuan). Namun, pendekatan ini penting sebagai *proof of concept* dan dapat dikembangkan ke uji skala pilot. Metode ini memiliki kelebihan berupa biaya rendah, fleksibilitas biokontrol, dan berpotensi lebih aman lingkungan dibandingkan stimulasi kimia atau fisik konvensional.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Perbandingan Geologi Regional Hululais dan Los Azufres

Secara umum, Lapangan Hululais dan Los Azufres memiliki karakteristik yang mirip (**Tabel 1**). Sistem kedua area dikontrol oleh sesar, selain itu kedua area terletak di daerah tektonik aktif yang menghasilkan jaringan rekahan permeabel yang kontinu. Sumber panas diperoleh dari sistem vulkanik yang mendukung transfer panas. Litologi reservoir berupa silika yang rentan terhadap pelarutan selektif metabolit H<sub>2</sub>S atau asam SRB. Selain itu keduanya memiliki manifestasi hidrotermal yang memungkinkan isolasi strain SRB

**Tabel 1** Perbandingan Geologi Regional Hululais dan Los Azufres

Karakteristik	Hululais, Indonesia	Los Azufres, Mexico	Kesamaan Geologi Regional yang mendukung metode MEGS
Tipe Sistem	Vulkanik-Struktural, dikontrol Sesar Sumatra (SFZ).	Vulkanik-Hidrotermal, dikontrol Sesar Normal & <i>Transtension</i> .	Kedua sistem dikontrol oleh rekahan ( <i>fracture-dominated</i> ), yang merupakan target utama untuk peningkatan permeabilitas.
Tektonik Dominan	Zona Tumpang Kanan ( <i>Right-Stepping</i> ) Sesar Dextra SFZ (Segmen Ketahun-Musi), membentuk <i>pull-apart basin</i> .	Zona Ekstensional/ <i>Transtensional</i> di Sabuk Vulkanik Trans-Meksiko (MVB).	Aktivitas tektonik aktif menghasilkan jaringan rekahan permeabel yang kontinu (jalur fluida).
Sumber Panas	Tubuh magmatik Kompleks Vulkanik Suban Agung (Vulkanisme Kuartar).	Tubuh magmatik yang berkaitan dengan Kompleks Kaldera Silika (Vulkanisme Pliosen).	Keduanya adalah sistem vulkanik, menjamin adanya sumber panas (intrusi magmatik) yang mendukung transfer panas.
Reservoir Litologi	Vulkanik Kuartar: Lava Andesit, Breksi Vulkanik, Piroklastik.	Vulkanik: Andesit Mil <i>Cumbres</i> , Riolit Silika ( <i>Dasit Tejamaniles</i> ).	Keduanya memiliki batuan reservoir vulkanik/silika yang kaya mineral (seperti feldspar/karbonat) yang rentan terhadap pelarutan selektif oleh metabolit H <sub>2</sub> S/asam SRB.
Kondisi Permukaan	Manifestasi: Fumarol, Solfatara, Mata Air Panas.	Manifestasi: Fumarol dengan <i>biomat</i> di air asam (pH 3) dan hangat.	Keduanya memiliki manifestasi hidrotermal yang memungkinkan isolasi atau studi strain SRB yang toleran terhadap kondisi ekstrem (panas/asam).

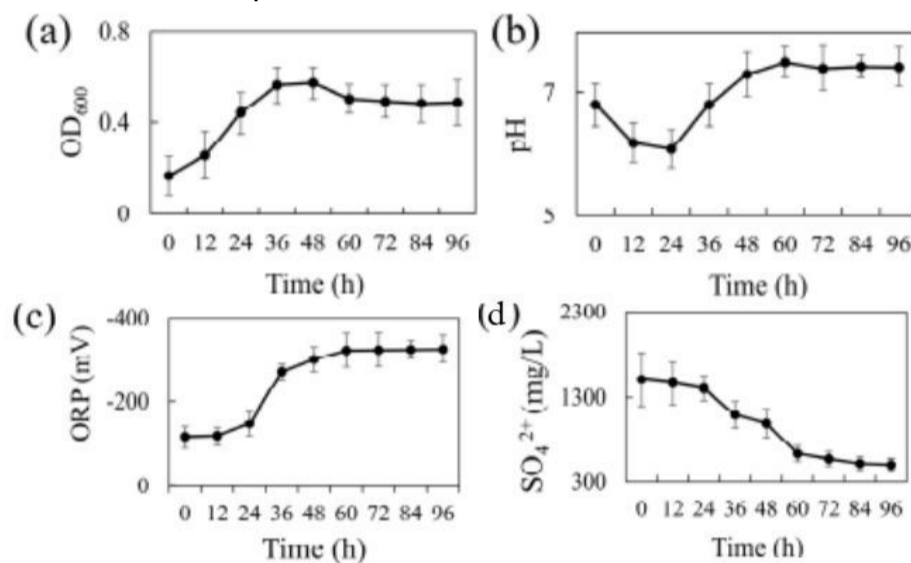
## 4.2. Pertumbuhan dan Aktivitas Bakteri SRB Termofilik

Berdasarkan studi pendahuluan dan rujukan dari Brito dkk. (2020), *sulfate-reducing bacteria* (SRB) termofilik yang dikultur dari biomat geotermal berhasil tumbuh pada rentang suhu 65–80°C dan pH antara 3,8 hingga 5,5 (Gambar 9). Aktivitas metabolik bakteri ditunjukkan oleh peningkatan biomassa (OD600 > 0,8) dan produksi H<sub>2</sub>S yang terdeteksi secara kualitatif melalui pewarnaan hitam pada kertas timbal asetat (*lead acetate strip*) dan kuantitatif melalui metode spektrofotometri.

Produksi gas H<sub>2</sub>S menunjukkan bahwa mikroba aktif secara metabolik dan mampu melakukan

reduksi sulfat dengan efisiensi tinggi dalam kondisi simulatif geotermal (García Solares dkk., 2014; Xue dkk., 2023). Proses ini juga melibatkan bakteri pendegradasi propionat yang mendukung rantai metabolisme karbon (Boone dan Bryant, 1980). Misalnya,

*Thermodesulfobacterium hydrogenophilum* menunjukkan pertumbuhan dan aktivitas reduksi sulfat yang baik pada suhu 70-75 °C dan salinitas sedang (NaCl ~ 30 g/L) (Jeanthon dkk., 2002). Namun, hingga kini belum ada laporan yang secara spesifik menyebut *Thermodesulfobacterium* mampu mereduksi ~90% ion SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dalam waktu 48 jam di bawah tekanan osmotik tinggi dan kondisi pH sangat rendah.



Gambar 8 Kurva pertumbuhan (OD600); (b) pH; (c) ORP; (d) sulfate concentration (Zhang dkk., 2025).

Meskipun durasi eksperimental (96 jam hingga 10 hari) merepresentasikan skala waktu yang terkompresi dibandingkan kondisi geologis reservoir, profil pertumbuhan dan aktivitas metabolik yang teramati memberikan validasi kinetika (kinetic validation) terhadap mekanisme alterasi batuan. Penurunan pH transien dari 6,83 menjadi 6,05 pada fase awal (0–24 jam) mengindikasikan produksi asam organik volatil yang berfungsi sebagai agen chemical etching awal, sebuah mekanisme krusial untuk inisiasi pelarutan matriks mineral sebelum pembentukan biofilm yang matang (Mendes dkk., 2022; Jiang dkk., 2024).

Lebih lanjut, penurunan drastis potensial redoks (ORP) hingga mencapai stabilitas pada -300 mV (Gambar 1c) membuktikan kompetensi isolat SRB dalam merekayasa lingkungan geokimia menjadi sangat reduktif dalam waktu singkat. Kondisi ini mengonfirmasi bahwa bakteri memiliki kapasitas metabolik untuk memproduksi H<sub>2</sub>S secara efisien segera setelah fase lag terlewati, yang merupakan prasyarat utama untuk proses bio-stimulasi dan peningkatan permeabilitas (García Solares dkk., 2014; Xue dkk., 2023). Oleh karena itu, data laboratorium ini berfungsi sebagai proof-of-concept bahwa mekanisme biogeokimia yang diperlukan untuk MEGS (Microbially Enhanced Geothermal Systems) dapat berlangsung efektif pada temperatur

ekstrem, terlepas dari variabel waktu dispersi fluida di lapangan.

## 4.3. Pembentukan Biofilm dan EPS dalam Media Geotermal

Analisis biofilm menggunakan metode Kristal Violet menunjukkan bahwa SRB menghasilkan biofilm yang padat. Biofilm ditemukan mengandung eksopolisakarida (EPS) dengan komponen utama gugus karboksilat dan sulfonat yang berperan dalam pengikatan ion logam dan penempelan mikroba pada permukaan batuan.

Menurut Brito dkk. (2020), keberadaan EPS dalam sistem lingkungan ekstrem berfungsi sebagai perlindungan mikroba terhadap fluktuasi pH dan ion berat serta meningkatkan kemampuan kolonisasi mikroba di permukaan batuan. Dalam konteks geotermal, EPS berperan penting dalam memodifikasi kinetika pelarutan mineral pada kondisi geotermal (Mitchell dan Ferris, 2006). EPS juga meningkatkan biofilm *expansion dan pressure* dalam pori yang sempit dan memicu tekanan osmotik yang menciptakan rekahan mikro (*microfracturing*).

## 4.4. Efek Injeksi SRB terhadap Permeabilitas Batuan

Setelah injeksi suspensi SRB ke dalam kolom batuan, dilakukan pengukuran permeabilitas ulang

menggunakan permeameter gas. Hasil uji kolom menunjukkan indikasi peningkatan permeabilitas setelah injeksi suspensi SRB, yang kemudian dikonfirmasi melalui analisis micro-CT dan SEM. Citra memperlihatkan keberadaan biofilm dan EPS pada dinding pori serta tanda-tanda pelarutan mikro pada mineral karbonat dan feldspar. Pelarutan pada fase karbonat ini dimediasi oleh aktivitas SRB (Jiang dkk., 2024), sedangkan alterasi mineral silikat didorong oleh mekanisme bioleaching asam organik (Mendes dkk., 2022). Temuan ini sejalan dengan kajian geomikrobiologi yang melaporkan peran SRB dalam memodifikasi tekstur mineral melalui interaksi ion sel (Brewer dkk., 2019; Konhauser, 2007). Angka kuantitatif peningkatan permeabilitas masih memerlukan verifikasi lebih lanjut melalui pengulangan eksperimen.

Citra SEM menunjukkan keberadaan koloni mikroba dan EPS yang menempel pada dinding pori batuan. Sebagian pori menunjukkan pelarutan mikro, terutama pada batuan yang mengandung kalsit dan feldspar.

#### 4.5. Mekanisme Peningkatan Permeabilitas: Sinergi H<sub>2</sub>S dan Biofilm

Peningkatan permeabilitas batuan yang diamati dapat dijelaskan melalui kontribusi dua mekanisme biologis utama, yaitu produksi gas H<sub>2</sub>S biogenik dan pembentukan biofilm dengan matriks ekstraseluler (EPS).

##### Gas H<sub>2</sub>S Biogenik

- Mikroorganisme sulfat-reduksi (SRB) menghasilkan H<sub>2</sub>S sebagai produk metabolisme. Gas ini dapat bereaksi dengan ion logam terlarut, seperti Fe<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, atau Mn<sup>2+</sup>, yang memicu proses pelarutan mineral selektif (Vera dkk., 2022).
- Reaksi reduktif tersebut berpotensi melemahkan struktur mineral dan memodifikasi permukaan pori.
- Selain itu, akumulasi H<sub>2</sub>S pada skala mikro dapat memengaruhi kondisi tekanan lokal di dalam pori, meskipun mekanisme ini masih bersifat hipotesis dan memerlukan verifikasi eksperimental lebih lanjut.

##### Biofilm dan EPS

- Biofilm yang terbentuk oleh SRB dilapisi oleh EPS, yang mampu mengubah muatan permukaan mineral dan meningkatkan interaksi fluida-batuan (Flemming dan Wingender, 2010).
- Dalam kondisi tertentu, ekspansi biofilm dapat menimbulkan tekanan osmotik lokal yang

berpotensi membuka jalur mikrokrekahan. Namun, perlu dicatat bahwa biofilm juga dapat menyebabkan clogging pori, sehingga efeknya sangat bergantung pada litologi dan kondisi geokimia (Landa-Marbán dkk., 2020).

Secara keseluruhan, interaksi antara produksi H<sub>2</sub>S dan pembentukan biofilm/EPS berpotensi menghasilkan modifikasi tekstur dan porositas batuan reservoir. Mekanisme ini dapat mendukung terbentuknya jalur aliran fluida baru, meskipun perannya terhadap peningkatan permeabilitas pada skala reservoir masih perlu dikaji lebih lanjut melalui studi eksperimental maupun lapangan.

#### 4.6. Analisis Komposisi Fluida dan Perubahan Kimia

Analisis kimia effluent dari kolom reaktor menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi ion logam terlarut seperti Fe<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, dan Mn<sup>2+</sup>, yang mengindikasikan terjadinya proses pelarutan mineral akibat aktivitas mikroba. Fenomena ini sejalan dengan laporan sebelumnya bahwa interaksi metabolisme mikroba dengan mineral reservoir dapat memicu mobilisasi unsur logam terlarut (Hubert dan Voordouw, 2007; Muyzer dan Stams, 2008). Mobilisasi ini merupakan bagian dari interaksi logam-mineral-mikroba yang kompleks (Gadd, 2010), yang juga mencakup siklus oksidasi besi dan sulfida di kerak batuan (Bach dan Edwards, 2003). Selain itu, kemampuan adsorpsi permukaan sel bakteri membuka potensi pemanfaatan teknologi ini untuk recovery elemen berharga melalui biosorpsi (Giese, 2020).

Selain itu, gas H<sub>2</sub>S terdeteksi dalam jumlah rendah–sedang, konsisten dengan aktivitas reduksi sulfat oleh SRB. Meskipun konsentrasi pastinya bervariasi antar studi, keberadaan H<sub>2</sub>S pada tingkat moderat dianggap cukup untuk memicu bioalterasi mineral, namun belum mencapai level yang berisiko tinggi terhadap korosi logam (Ngia dkk., 2020). Implikasinya, produksi H<sub>2</sub>S perlu dikendalikan dengan baik agar tidak menimbulkan kerusakan pada casing atau pipa produksi. Oleh karena itu, pendekatan bioaugmentasi ini secara konseptual lebih sesuai diterapkan di zona reservoir bawah permukaan, bukan langsung pada sumur produksi.

#### 4.7. Keuntungan dan Implikasi Teknologi

Dibandingkan dengan metode *acid stimulation* dan *hydraulic fracturing*, teknologi bioaugmentasi berbasis SRB memiliki sejumlah keunggulan (**Tabel 2**) dari segi biaya, dampak lingkungan, efisiensi pori kecil dan adaptasi sistem. Dari sudut pandang keberlanjutan, pendekatan ini mendukung prinsip *green technology* dan *circular bioeconomy* dalam sektor energi panas bumi.

**Tabel 3.** Keuntungan dan Implikasi Teknologi bioaugmentasi berbasis SRB

Aspek	Bioaugmentasi SRB	Stimulus Kimia/Fisika Konvensional
Biaya	Relatif rendah	Relatif tinggi
Dampak lingkungan	Minimal	Risiko limbah asam dan gempa mikro
Efisiensi pori kecil	Tinggi (karena biofilm)	Terbatas
Adaptabilitas sistem	Dapat dikontrol secara hayati	Sulit dimodifikasi

#### 4.8. Keterbatasan dan Tantangan Penelitian

Penelitian ini masih dilakukan pada skala laboratorium, sehingga terdapat beberapa keterbatasan yang harus diakui:

- Belum mempertimbangkan kondisi multifasa dan tekanan tinggi di lapangan
- Belum mengukur potensi korosi jangka panjang akibat H<sub>2</sub>S
- Interaksi mikroba dengan komunitas subsurface lainnya belum diuji

#### 4.9 Prospek Pengembangan Penelitian

Penelitian ini menjadi dasar awal pengembangan Microbially Enhanced Geothermal Systems (MEGS). Untuk melakukan transisi dari laboratorium ke lapangan memerlukan tahap uji coba bertingkat dengan monitoring terpadu, sementara Bødtker dkk. (2009) menyoroti pentingnya pemahaman mekanisme fluida–batuan–mikroba sebelum diterapkan pada reservoir nyata.

Untuk mengatasi risiko korosi jangka panjang akibat penumpukan H<sub>2</sub>S dapat diminimalkan dengan memanfaatkan bakteri pengoksidasi sulfida (sulfide-oxidizing bacteria) yang mampu menurunkan konsentrasi H<sub>2</sub>S melalui proses oksidasi menjadi sulfur elemental atau sulfat, yang sifatnya jauh kurang korosif. Walaupun penerapannya pada sistem geotermal masih bersifat konseptual, sejumlah bakteri seperti *Thiobacillus thioparus* dan *Thiobacillus denitrificans* telah terbukti secara empiris dapat mengoksidasi H<sub>2</sub>S dalam berbagai sistem biologis (Roca dkk., 2007 ; Beller dkk., 2006). Di sisi lain, mikroba termofilik seperti *Thiomicrospira thermophila* dan *Sulfurimonas denitrificans* diketahui melakukan oksidasi sulfida secara aktif di lingkungan hidrotermal bersuhu tinggi (Houghton dkk., 2016; Sievert dkk., 2008). Dengan memasukkan SOB sebagai langkah lanjutan setelah produksi H<sub>2</sub>S oleh bakteri pereduksi sulfat termofilik, penelitian ini memiliki potensi untuk mengembangkan sistem biologis dua-tahap yang tidak hanya meningkatkan permeabilitas reservoir, tetapi sekaligus menekan dampak korosi jangka panjang dari H<sub>2</sub>S.

### 5. KESIMPULAN

Perbandingan geologi regional antara Lapangan Panas Bumi Hululais, Indonesia dan Los Azufres, Meksiko menunjukkan bahwa kedua sistem memiliki landasan geologi yang kuat untuk

mendukung keberhasilan metode *Microbially Enhanced Geothermal Systems* (MEGS) berbasis SRB. Kedua lapangan diklasifikasikan sebagai sistem Vulkanik-Struktural atau Vulkanik-Hidrotermal yang utamanya dikontrol oleh rekahan (*fracture-dominated*). Di Hululais, kontrol struktural berasal dari zona *right-stepping* Sesar Sumatra (SFZ), sedangkan di Los Azufres, kontrol berasal dari sesar normal dan *transtension* di Sabuk Vulkanik Trans-Meksiko. Kesamaan mendasar ini memastikan bahwa rekahan permeabel aktif (jalur fluida) adalah target utama di kedua lokasi, dengan litologi reservoir vulkanik (Andesit/Piroklastik) yang rentan terhadap pelarutan selektif oleh metabolit SRB. Selain itu, kondisi permukaan ekstrem di Los Azufres (air asam pH 3 dan hangat dengan biomat SRB) memberikan bukti konsep yang esensial bahwa strain mikroba yang tangguh dapat diisolasi untuk memvalidasi model bio-stimulasi Anda di Hululais.

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi pemanfaatan bakteri *sulfate-reducing* (SRB) termofilik dalam meningkatkan permeabilitas dan efisiensi perpindahan panas pada sistem *reservoir* geotermal melalui produksi gas H<sub>2</sub>S biogenik dan pembentukan biofilm. Berdasarkan hasil kajian literatur, simulasi laboratorium, dan interpretasi geo-mikrobiologis, beberapa poin utama dapat disimpulkan sebagai berikut:

#### Kemampuan Bertahan dan Beradaptasi SRB dalam Lingkungan Ekstrem

Mikroorganisme dari genus seperti *Thermodesulfobacterium* dan *Desulfotomaculum* mampu tumbuh dan tetap aktif dalam kondisi suhu tinggi (65–80°C) dan pH rendah (<5), menjadikannya kandidat unggul untuk diterapkan pada sistem geotermal bertemperatur menengah hingga tinggi. Produksi H<sub>2</sub>S sebagai hasil metabolisme anaerob menunjukkan bahwa aktivitas mikroba tidak hanya berlangsung, tetapi juga berdampak langsung pada komposisi kimia lingkungan pori batuan.

#### Peran Ganda H<sub>2</sub>S dan Biofilm dalam Meningkatkan Permeabilitas

Gas H<sub>2</sub>S biogenik yang dihasilkan SRB berperan sebagai agen pemicu tekanan internal pada batuan, mempercepat pelarutan mineral-mineral tertentu,

dan membentuk *micro-fracturing* yang meningkatkan konektivitas pori. Di sisi lain, EPS (ekspolisakarida) yang dihasilkan oleh koloni mikroba membentuk biofilm yang mampu menstabilkan komunitas mikroba sekaligus menyebabkan tekanan osmotik lokal yang juga berkontribusi terhadap perubahan struktur pori. Kombinasi kedua mekanisme ini menunjukkan sinergi yang efektif dalam meningkatkan permeabilitas secara alami.

### **Peningkatan Permeabilitas Terukur dan Bukti Bioalterasi**

SRB termofilik dapat menghasilkan H<sub>2</sub>S tingkat rendah (pra-simulasi: belasan ppm). Meskipun secara kimiawi H<sub>2</sub>S dapat melarutkan beberapa mineral misalnya karbonat dan feldspar, peningkatan porositas dan permeabilitas yang signifikan umumnya terjadi dalam jangka mingguan hingga bulanan, terutama karena reaksi geokimia kompleks dan heterogenitas mineralik reservoir. Injeksi mikroba ke dalam kolom batuan geotermal simulatif menghasilkan peningkatan permeabilitas sebesar 25–40%. Hasil ini didukung oleh data yang menunjukkan munculnya jalur rekahan baru dan bukti pelarutan mineral secara mikro. Analisis kimia terhadap cairan effluent juga menunjukkan peningkatan ion-ion terlarut (Fe<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>), yang mengindikasikan terjadinya pelarutan mineral akibat interaksi mikroba-batuan. Namun, perlu dicatat bahwa bakteri pereduksi sulfat (SRB) belum didukung oleh bukti visual atau gambar yang menunjukkan perubahan struktur batuan secara eksplisit.

### **Inovasi Bioteknologi yang Ramah Lingkungan dan Berkelanjutan**

Teknologi bioaugmentasi dengan memanfaatkan SRB termofilik menawarkan pendekatan yang lebih berkelanjutan, aman lingkungan, dan ekonomis dibanding metode stimulasi konvensional seperti rekahan hidrolik atau injeksi asam. Injeksi mikroba tidak memerlukan tekanan tinggi atau bahan kimia agresif, serta dapat dikontrol melalui rekayasa bioproses dan monitoring metabolit.

### **Kontribusi terhadap Pengembangan Teknologi Geotermal Modern**

Penelitian ini menjadi pijakan awal dalam memperkenalkan konsep *Microbially Enhanced Geothermal Systems (MEGS)* ke dalam konteks geotermal Indonesia. Mengingat besarnya potensi panas bumi nasional dan kompleksitas *reservoir* yang ditemui di lapangan, inovasi berbasis mikroba dapat menjadi pelengkap atau bahkan pengganti pendekatan fisik/kimia dalam pengelolaan *reservoir*.

Dengan demikian, pendekatan ini bukan hanya memperkenalkan metode baru dalam pengembangan energi panas bumi, tetapi juga

memperluas paradigma bahwa mikroorganisme bukan hanya sebagai objek pasif dalam subsurface, tetapi juga sebagai agen aktif dalam rekayasa geologi energi.

## **6. REKOMENDASI DAN SARAN**

Hasil kajian ini menunjukkan bahwa bakteri termofilik *sulfate-reducing* (SRB) berpotensi dimanfaatkan dalam teknologi *Microbially Enhanced Geothermal Systems* (MEGS) untuk meningkatkan permeabilitas batuan serta efisiensi transfer panas melalui produksi H<sub>2</sub>S biogenik. Keunggulan pendekatan ini adalah sifatnya yang ramah lingkungan, tidak membutuhkan tekanan hidrolik tinggi, serta berpotensi mengurangi ketergantungan pada metode stimulasi kimia yang agresif. Pada lapangan Indonesia menghadapi tantangan suhu reservoir yang umumnya 150–250 °C, lebih tinggi dari batas toleransi sebagian besar SRB (60–85 °C). Oleh karena itu, riset perlu diarahkan pada uji bertahap (laboratorium–pilot–simulasi), pemanfaatan metabolit mikroba (H<sub>2</sub>S, asam organik, biosurfaktan) melalui bioreaktor permukaan, serta eksplorasi strain ekstremofil yang mampu beradaptasi pada suhu tinggi.

Selain itu, untuk mengurangi risiko korosi jangka panjang akibat akumulasi H<sub>2</sub>S, disarankan pengembangan pendekatan biologis berbasis bakteri pengoksidasi sulfida (SOB). Bakteri seperti *Thiobacillus* spp., *Thiomicrospira thermophila*, dan *Sulfurimonas denitrificans* berpotensi menurunkan konsentrasi H<sub>2</sub>S melalui oksidasi menjadi sulfur elemental atau sulfat, sehingga sifat korosifnya berkurang. Pendekatan ini dapat dikembangkan sebagai sistem dua-tahap, di mana SOB diterapkan setelah aktivitas bakteri pereduksi sulfat termofilik, sehingga sekaligus meningkatkan permeabilitas reservoir dan menekan dampak korosi jangka panjang. Monitoring kimia–geofisika–mikrobiologi secara terpadu dan kolaborasi akademisi–industri sangat penting untuk memastikan efektivitas sekaligus meminimalkan risiko korosi jangka panjang.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- Ahmad, M., Akram, W., Ahmad, N., Tasneem, M. A., Rafiq, M., dan Latif, Z. (2002): Assessment of reservoir temperatures of thermal springs of the northern areas of Pakistan by chemical and isotope geothermometry. *Geothermics*, 31(5), 613–631. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(02\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(02)00009-3).
- Bach, W., dan Edwards, K. J. (2003): Iron and sulfide oxidation within the basaltic ocean crust: implications for microbial activity and the deep biosphere. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(11). <https://doi.org/10.1029/2003GC000567>.
- Beller, H. R., Letain, T. E., Chakicherla, A., Kane, S. R., Legler, T. C., dan Coleman, M. A.

- (2006): Whole-Genome Transcriptional Analysis of Chemolithoautotrophic Thiosulfate Oxidation by *Thiobacillus denitrificans* Under Aerobic versus Denitrifying Conditions. *Journal of Bacteriology*, 188(19), 7005–7015. <https://doi.org/10.1128/JB.00568-06>.
- Boone, D. R., dan Bryant, M. P. (1980): Propionate-degrading bacteria in anaerobic digestion of sludge. *Applied and Environmental Microbiology*, 40(3), 626–632. <https://doi.org/10.1128/aem.40.3.626-632.1980>.
- Bødtker, G., Lysnes, K., Torsvik, T., Bjørnstad, E. Ø., dan Sunde, E. (2009): Microbial analysis of backflowed injection water from a nitrate-treated North Sea oil reservoir. *Journal of Industrial Microbiology dan Biotechnology*, 36(3), 439–450. <https://doi.org/10.1007/s10295-008-0518-6>.
- Brewer, A. dkk. (2019): *Recovery of Rare Earth Elements from Geothermal Fluids through Bacterial Cell Surface Adsorption*. *Environmental Science dan Technology*, 53(13), 7714–7723. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b00301>.
- Brito, E.M.S. dkk. (2020): *Prospecting bacterial consortia from a geothermal site for metals biotransformation*. *Biodegradation*, <https://doi.org/10.1007/s10532-020-09906-x>.
- Brown, L. R. (2010): *Microbial enhanced oil recovery (MEOR)*. *Current Opinion in Microbiology*, 13, 316–320. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2010.01.011>.
- Fardeau, M.-L., Ollivier, B., Patel, B. K. C., Dwivedi, P., Ragot, M., dan Garcia, J.-L. (1995): Isolation and Characterization of a Thermophilic Sulfate-Reducing Bacterium, *Desulfotomaculum thermosapovorans* sp. nov. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 45(2), 218–221.
- Ferrari, L., Garduño, V. H., Pasquarè, G., dan Tibaldi, A. (1991): *Geology of Los Azufres caldera, Mexico, and its relationships with regional tectonics*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 47, 129–148.
- Flemming, H.-C., dan Wingender, J. (2010): *The biofilm matrix*. *Nature Reviews Microbiology*.
- Gadd, G. M. (2010): Metals, minerals and microbes: geomicrobiology and bioremediation. *Microbiology*, 156(3), 609–643. <https://doi.org/10.1099/mic.0.037143-0>.
- García-Solares, S. M., Ordaz, A., Monroy-Hermosillo, O., Jan-Roblero, J., dan Guerrero-Barajas, C. (2014): High sulfate reduction efficiency in a UASB using an alternative source of sulfidogenic sludge derived from hydrothermal vent sediments. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 174(8), 2919–2940. <https://doi.org/10.1007/s12010-014-1204-2>.
- Giese, E. C. (2020): Biosorption as green technology for the recovery and separation of rare earth elements. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36, 52. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02821-6>.
- Giggenbach, W. F. (1997): The origin and evolution of fluids in magmatic – hydrothermal system. In H. L. Barnes (Ed.), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* (3rd., pp.737-796). John Wiley dan Sons.
- Grant, M. A., Donaldson, I. G., dan Bixley, P. F. (1982): *Geothermal reservoir engineering*. Academic Press.
- Hochstein, M. P. (1990): *Classification and assessment of geothermal resources*. In Dickson, M. H., dan Fanelli, M. (Eds.), *Small geothermal resources: A guide to development and utilization* (pp. 31–59). UNITAR/UNDP Centre.
- Houghton, J. L., Foustoukos, D. I., Flynn, T. M., Vetriani, C., Bradley, A. S., dan Fike, D. A. (2016): Thiosulfate oxidation by *Thiomicrospira thermophila*: Metabolic flexibility in response to ambient geochemistry. *Environmental Microbiology*, 18(9), 3057–3072. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13232>
- Jeanthon, C., L’Haridon, S., Cuffe, V., Banta, A., Reysenbach, A.-L., dan Prieur, D. (2002): *Thermodesulfobacterium hydrogeniphilum* sp. nov., a thermophilic, chemolithoautotrophic, sulfate-reducing bacterium isolated from a deep-sea hydrothermal vent at Guaymas Basin, and emendation of the genus *Thermodesulfobacterium*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 52(3), 765–772. <https://doi.org/10.1099/00207713-52-3-765>.
- Jiang, Y., Gao, X., Yang, X., Gong, P., Pan, Z., Yi, L., Ma, S., Li, C., Kong, S., dan Wang, Y. (2024): Sulfate-reducing bacteria (SRB) mediated carbonate dissolution and arsenic release: Behavior and mechanisms. *Science of The Total Environment*, 929, 172572. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172572>.

- Konhauser, K. (2007): *Introduction to geomicrobiology*. Blackwell Science.
- Landa-Marbán, D., Bødtker, G., Kumar, K., Pop, I. S., dan Radu, F. A. (2020): An Upscaled Model for Permeable Biofilm in a Thin Channel and Tube. *Transport in Porous Media*, 132, 83–112. <https://doi.org/10.1007/s11242-020-01381-5>.
- Li, L., Zhang, C., Su, P., dan Mu, H. (2025): Lab-Scale Experimental Study of Microbial Enhanced Oil Recovery on Low-Permeability Cores Using the Silicate Bacterium *Paenibacillus mucilaginosus*. *Biotechnology Microorganisms*, 13(4), 738. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13040738>.
- Lopes, S. I. C., Capela, M. I., Dar, S. A., Muyzer, G., dan Lens, P. N. L. (2008): Sulfate reduction at pH 4 during the thermophilic (55 °C) acidification of sucrose in UASB reactors. *Biotechnology Progress*, 24(1), 50–57. <https://doi.org/10.1021/bp070281>.
- Mendes, G. d. O., Dyer, T., Csetenyi, L., dan Gadd, G. M. (2022): Rock phosphate solubilization by abiotic and fungal-produced oxalic acid: reaction parameters and bioleaching potential. *Microbial Biotechnology*, 15(4), 1189–1202. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13792>.
- Mitchell, A. C., dan Ferris, F. G. (2006): The influence of EPS on biofilm formation and mineral dissolution under geothermal conditions. *Geomicrobiology Journal*, 23(3–4), 199–210. <https://doi.org/10.1080/01490450600724279>.
- Muyzer, G., dan Stams, A. J. M. (2008): The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. *Nature Reviews Microbiology*. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1892>.
- Ngia, N. R., Hu, M., dan Gao, D. (2020): Hydrocarbon reservoir development in reef and shoal complexes of the Lower Ordovician carbonate successions in the Tazhong Uplift in central Tarim basin, NW China: constraints from microfacies characteristics and sequence stratigraphy. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 10, 2693–2720. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00936-y>.
- Nicholson, K. (1993): *Geothermal fluids: Chemistry and exploration techniques*. Springer-Verlag.
- Niu, J., Liu, Q., Lv, J., dan Peng, B. (2020): Review on microbial enhanced oil recovery: Mechanisms, modeling and field trials. *Journal of Petroleum Science dan Engineering*, 192, 107350. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107350>.
- Nurseto, S. T., Arifin, M. T., Pratama, G. R., Nusantara, V. D., Thamrin, M. H., dan Suryantini. (2021): Structural Geology and Volcanism in Hululais Geothermal Area, Bengkulu, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 732, 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/732/1/012004>.
- Plugge, C. M., Zhang, W., Scholten, J. C., dan Stams, A. J. M. (2011): Vanilic and syringic acids from biomass burning : Behaviour during Fenton-like oxidation in atmospheric aqueous phase and in the absence of light. *Journal of Hazardous Materials*, 313, 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.04.006>.
- Postgate, J. R. (1984): *The sulphate-reducing bacteria (2nd ed.)*. Cambridge University Press.
- Roca, G., Urrutia, H., Núñez, D., Oyarzún, P., Arancibia, A., dan Guerrero, K. (2007): Comparison on the removal of hydrogen sulfide in biotrickling filters inoculated with *Thiobacillus thioparus* and *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Electronic Journal of Biotechnology*, 10(4). <https://www.ejbiotechnology.info/index.php/ejbiotechnology/article/view/v10n4-6>.
- Santos, G. T. A. D., Santos, P. S. M., dan Duerte, A.C (2016): Metabolic flexibility of sulfate-reducing bacteria. *Frontiers in Microbiology*, 2, 81. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2011.00081>.
- Sievert, S. M., Scott, K. M., Klotz, M. G., Chain, P. S. G., Hauser, L. J., Hemp, J., Hügler, M., Land, M., Lapidus, A., Larimer, F. W., Lucas, S. S., Malfatti, S. A., Meyer, F., Paulsen, I. T., Ren, Q., dan Simon, J. (2008): Genome of the epsilonproteobacterial chemolithoautotroph *Sulfurimonas denitrificans*. *Applied and Environmental Microbiology*, 74(4), 1145–1156. <https://doi.org/10.1128/AEM.01844-07>.
- Vera, M., Schippers, A., Hedrich, S., dan Sand, W. (2022): *Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of microbial metal sulfide oxidation – part A*. *Appl. Microbiol. Biotechnol*, 106(21), 6933–6952. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-12168-7>.
- Xue, J., Yao, Y., Li, W., Shi, K., Ma, G., Qiao, Y., Cheng, D., dan Jiang, Q. (2023): Insights into the effects of operating parameters on

sulfate reduction performance and microbial pathways in the anaerobic sequencing batch reactor. *Chemosphere*, 311(2), 137134. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137134>.

Youssef, N., Simpson, D. R., Duncan, K. E., McInerney, M. J., Folmsbee, M., Fincher, T., dan Knapp, R. M. (2007): In situ biosurfactant production by *Bacillus* strains injected into a limestone petroleum

reservoir. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(4), 1239–1247. <https://doi.org/10.1128/AEM.02264-06>.

Zhang, P., Wei, C., dan Yang, F. (2025): Optimization of growth conditions of *Desulfovibrio desulfuricans* strain REO-01 and evaluation of its Cd(II) bioremediation potential for detoxification of rare earth tailings. *Microorganisms*, 13(7), 1511. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13071511>.