

## Kontribusi Geofisika Dalam Eksplorasi Hidrogen Geologis (*Geologic Hydrogen*) Di Bawah Permukaan

Handoyo Handoyo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, Indonesia

DOI: 10.29303/geoscienceed.v6i1.497

### Article Info

Received: 17 September 2024

Revised: 4 November 2024

Accepted: 6 November 2024

Correspondence:

Phone: +62 852-9540-0039

**Abstrak:** penelitian ini bertujuan untuk melihat kontribusi geofisika dalam eksplorasi geologis di bawah permukaan. Transisi energi ke sumber energi yang lebih ramah lingkungan sangat penting untuk mengurangi emisi karbon di atmosfer bumi. Di antara jenis energi baru yang ramah lingkungan, terdapat peningkatan kesadaran akan potensi hidrogen ( $H_2$ ) geologis yang terbentuk secara alami sebagai sumber energi primer yang dapat dimasukkan ke dalam pasokan energi pada masa depan. Geofisika diperkirakan akan memainkan peran penting dalam upaya tersebut. Ada dua jenis  $H_2$  geologis yang berbeda yaitu  $H_2$  alami (*gold  $H_2$* ) yang secara konsep terakumulasi secara alami di reservoir dalam kondisi geologi tertentu. Selanjutnya adalah  $H_2$  terstimulasi (*orange  $H_2$* ) yang diproduksi secara artifisial dari batuan sumber melalui stimulasi kimia dan fisika. Pada paper ini, kami akan membahas peranan geofisika dalam eksplorasi  $H_2$  geologis sebagai perbandingan yang kontras dengan skenario  $H_2$  biru dan hijau (*blue and green  $H_2$* ). Kemudian, akan dibahas pentingnya metode geofisika pada eksplorasi  $H_2$  alami dan  $H_2$  terstimulasi baik dalam hal teknik eksplorasi dan pemantauan (*monitoring*). Dengan memberdayakan berbagai instrumen dan metode-metode geofisika terintegrasi dalam eksplorasi dan produksi hidrokarbon yang sudah ada, diharapkan dapat diperoleh gambaran mengenai peranan geofisika dalam eksplorasi  $H_2$  secara efektif. Secara umum, strategi eksplorasi  $H_2$  akan melibatkan peralihan sudut pandang dari pendekatan yang berpusat pada reservoir ke pendekatan yang berpusat pada batuan sumber. Terakhir, kami yakin bahwa metode geofisika yang melibatkan integrasi multi-geofisika, akuisisi data yang efisien, dan pembelajaran mesin dalam  $H_2$  geologis berpotensi memberikan pemahaman baru dan peluang signifikan untuk melanjutkan penelitian dalam beberapa mendatang.

**Kata kunci:** eksplorasi; hidrogen ( $H_2$ ); geofisika; energi; *machine learning*

**Citation:** Handoyo. (2024). Kontribusi Geofisika Dalam Eksplorasi Hidrogen Geologis (*Geologic Hydrogen*) Di Bawah Permukaan. *Journal Pendidikan, Sains, Geologi dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 6 (1), 117-128

### Pendahuluan

Hidrogen ( $H_2$ ) telah menjadi komponen penting dalam transisi energi. Peta jalan *Net-Zero* dari Badan Energi Internasional (IEA: *International Energy Agency's*), menyatakan bahwa pada tahun 2050, permintaan hidrogen dapat mencapai angka sebesar 500 Mt/tahun (IEA, 2019; 2021; DOE, 2021). Faktanya, persediaan hidrogen yang ada saat ini tidak dapat memenuhi permintaan ini. Oleh karena itu, diperlukan sumber daya hidrogen yang berasal dari proses-proses geologis (*geologic hydrogen*) termasuk  $H_2$  alami (*natural*

*$H_2$* ) dan  $H_2$  terstimulasi (*stimulated  $H_2$* ) yang sangat berpotensi untuk mencapai menjadi penyuplai energi hidrogen di masa depan (Yedinak, E.M., 2022). Berdasarkan penelitian para ilmuwan dari USGS dan seluruh dunia, potensi cadangan hidrogen geologis bervariasi dari 500.000 ton/tahun (Lollard *kk.*, 2014) hingga miliaran ton/tahun (Klein *dkk.*, 2020; Zgonnik, V., 2020; Ellis & Gelman, 2022). Bukti keberadaan  $H_2$  geologis telah ditemukan di seluruh dunia, seperti Mali (Renaud, C., 2014), Oman (Neal & Stanger, 1983), Amerika Serikat (Guélard *dkk.*, 2017), Australia

Email: [handoyo.geoph@tg.itera.ac.id](mailto:handoyo.geoph@tg.itera.ac.id)

(Boreham dkk., 2021), Prancis (Lefevre dkk., 2022), dan Brasil (Prinzhofer dkk., 2019).

Para peneliti berbagai publikasi seringkali menggunakan berbagai warna untuk merujuk pada asal usul gas hidrogen yang berbeda dalam pasokan energi. Gambar 1 menunjukkan empat asal usul H<sub>2</sub> dan sebutan warna yang lazim digunakan. Hidrogen biru (*blue H<sub>2</sub>*) berasal dari fosil hidrokarbon melalui proses *steam reforming*, dimana CO<sub>2</sub> yang dihasilkan harus ditangkap dan disimpan. *Blue H<sub>2</sub>* dapat memiliki emisi CO<sub>2</sub> yang positif yang dapat digunakan sebagai

pembawa energi. Sementara itu, para geofisikawan berkontribusi pada penyimpanan dan pemantauan CO<sub>2</sub> pada teknologi *Carbon Capture Storage (CCS)*. Selanjutnya, hidrogen hijau (*green H<sub>2</sub>*), yang dihasilkan melalui elektrolisis air, menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> mendekati nol dan tetap menjadi pembawa energi. Salah satu tantangan utama dalam hal hidrogen ramah lingkungan adalah kebutuhan logam untuk panel surya dan turbin angin, dimana geofisika juga dapat berkontribusi dalam eksplorasi mineral untuk kebutuhan tersebut.

	Blue H <sub>2</sub>	Green H <sub>2</sub>	Gold H <sub>2</sub>	Orange H <sub>2</sub>
Energy Source	Fossil Hydrocarbon	Wind Solar	Subsurface H <sub>2</sub>	Subsurface Rocks
Processing	Steam reforming require CO <sub>2</sub> storage	Electrolysis require metals		Catalyzed reaction (H <sub>2</sub> O and CO <sub>2</sub> )
Emission Solution	Positive CO <sub>2</sub>	Zero CO <sub>2</sub>	Zero CO <sub>2</sub>	Negative CO <sub>2</sub>
Role of H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> is energy carrier		H <sub>2</sub> is primary energy carrier resource	
Role of Geophysics	CO <sub>2</sub> storage monitoring	Mineral Exploration	Characterize reservoir and source	Monitor stimulation and extraction

**Gambar 1.** Representasi warna H<sub>2</sub> yang berbeda dalam transisi energi. Perbedaan terbesar dari H<sub>2</sub> biru dan H<sub>2</sub> hijau adalah bahwa H<sub>2</sub> geologis merupakan sumber energi primer, bukan pembawa energi. Sementara itu, peran geofisika juga berubah seiring dengan perubahan H<sub>2</sub> yang berbeda (diadaptasi dari Zhang & Li, 2024).

H<sub>2</sub> geologis mencakup H<sub>2</sub> alami, yang disebut sebagai H<sub>2</sub> emas, dan H<sub>2</sub> terstimulasi, yang disebut sebagai H<sub>2</sub> jingga. H<sub>2</sub> alami, yang ditemukan secara alami dalam akumulasi bawah permukaan, tidak memerlukan pemrosesan signifikan seperti yang dilakukan H<sub>2</sub> biru dan H<sub>2</sub> hijau, sehingga berpotensi mengeluarkan nol CO<sub>2</sub>. H<sub>2</sub> terstimulasi, yang dihasilkan dari stimulasi buatan terhadap reaksi kimia dalam batuan sumber, juga tidak mengeluarkan CO<sub>2</sub>, dan potensi manfaat tambahannya adalah bahwa proses produksi juga dapat berfungsi sebagai penyimpan karbon termineralisasi jika reaksi yang dikatalisis melibatkan jenis yang dapat mereduksi kandungan CO<sub>2</sub>. H<sub>2</sub> geologis mentransisikan peran H<sub>2</sub> dari pembawa energi (yaitu setara dengan peran baterai) menjadi sumber energi. Pentingnya perubahan ini tidak bisa dilebih-lebihkan dalam peran hidrogen geologis dalam membantu mencapai transisi energi *net-zero*.

### Metode

Paper ini berusaha untuk menyoroti potensi peranan bidang keilmuan geofisika dalam eksplorasi H<sub>2</sub> geologis karena hampir banyak publikasi yang telah diterbitkan berfokus pada geokimia dan geologi. Sementara itu, masih sedikit diskusi tentang peranan geofisika dalam eksplorasi hidrogen geologis. Pada prinsipnya, para ahli geofisika dapat mengeksplorasi H<sub>2</sub> alami dengan mengidentifikasi batuan sumber dan reservoir, dan dapat memfasilitasi proses pembentukan H<sub>2</sub> yang terstimulasi dengan memantau stimulasi dan ekstraksi. Kami mengantisipasi peningkatan penelitian dalam bidang ini dan dengan secara eksplisit mengidentifikasi tantangan utama dan kesenjangan metodologis. Kami bertujuan untuk mendorong penelitian yang lebih inovatif dari komunitas geofisika terapan. Dengan demikian, hidrogen geologis adalah bidang yang berkembang dengan jelas di mana

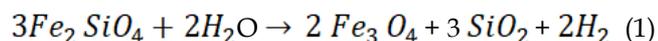
geofisika dapat berkontribusi langsung terhadap keberlangsungan menjaga pasokan energi yang stabil dan mencapai emisi CO<sub>2</sub> bersih.

Pada paper ini, kami akan fokus pada peran geofisika dalam studi H<sub>2</sub> geologis. Pertama-tama kami membandingkan dan membedakan aspek-aspek kunci dari sistem hidrokarbon dan sistem hidrogen berdasarkan pemahaman yang berkembang saat ini. Kami kemudian membahas sistem H<sub>2</sub> alami dan sistem H<sub>2</sub> terstimulasi sebagai dua komponen utama H<sub>2</sub> geologis. Kemudian, kami membahas secara terpisah tantangan dan potensi kontribusi geofisika. Satu bagian akan mengeksplorasi tantangan dalam sistem H<sub>2</sub> alami dan solusi yang dapat ditawarkan oleh geofisika. Bagian lainnya membahas kendala-kendala yang dihadapi dalam sistem H<sub>2</sub> terstimulasi dan bagaimana geofisika dapat memberikan solusinya. Terakhir, kami merangkum metode geofisika yang ada dan potensi arah baru yang dapat dilakukan oleh ahli geofisika di bidang eksplorasi H<sub>2</sub> geologis di masa depan.

## Hasil dan Pembahasan

### Mekanisme Pembentukan H<sub>2</sub> geologis

Dari perspektif sistem hidrogen yang terjadi secara alami, ahli geologi telah mengidentifikasi banyak jenis mekanisme pembangkitan hidrogen dan sumber terkait seperti serpentinisasi (Coveney dkk. 1987, Etiopie dkk. 2011, McCollom dan Seewald 2013, Holm dkk. 2015, McCollom dkk., 2022), piritisasi (misalnya Arrouvel dan Prinzhofer, 2021), dan radiolisis (misalnya Bouquet dkk., 2017). Metamorfisme batuan ultrabasa (misalnya serpentinisasi) merupakan mekanisme paling penting untuk menghasilkan hidrogen di kerak bumi (Milkov, 2022). Secara kimiawi, reaksi yang terjadi ditunjukkan oleh persamaan (1).



Persamaan (1) secara natural akan menghasilkan unsur H<sub>2</sub> serta magnetit. Proses ini secara umum dapat menyebabkan peningkatan kerentanan magnetik dan penurunan resistivitas listrik pada zona alterasi yang dihasilkan. Perubahan sifat fisik yang terkait dengan serpentinisasi telah menjadi subjek penyelidikan dalam konteks eksplorasi mineral secara konvensional (He dkk., 2018) dan baru-baru ini dalam konteks penyimpanan karbon melalui mineralisasi dalam batuan ultrabasa (Cutts dkk., 2021).

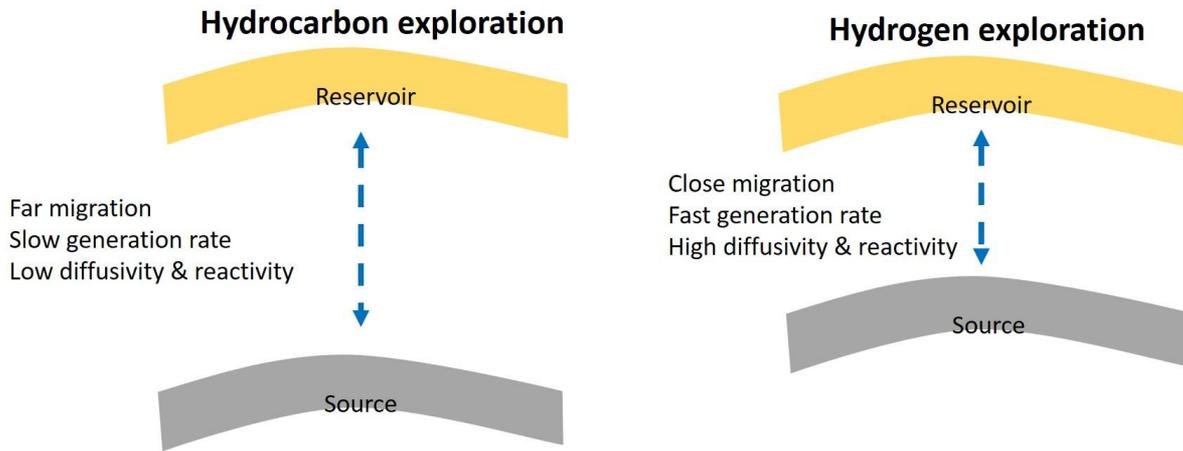
### Sistem H<sub>2</sub> dan sistem gas natural

Bukti H<sub>2</sub> telah ditemukan di seluruh dunia seperti di Mali (Renaud, 2014), Oman (Neal dan

Stanger, 1983), Amerika Serikat (Guélard dkk., 2017), Australia (Boreham 2021), Prancis (Lefevre et al. 2022), dan Brasil (Prinzhofer et al. 2019), dimana Mali dan Oman memiliki studi yang lebih komprehensif. Berdasarkan contoh-contoh dan studi penelitian ini, ada banyak perbedaan antara sistem H<sub>2</sub> dari serpentinisasi dan sistem hidrokarbon. Dalam *paper* ini, kami membahas tentang perbedaan dari dua hal tersebut dan berusaha menganalisis pilihan metode geofisika dalam berbagai skenario.

Hidrokarbon dalam bahan bakar fosil seperti gas alam membutuhkan waktu jutaan tahun untuk terbentuk. Hidrogen geologis dapat dihasilkan dengan relatif cepat, dan dalam skala waktu yang kemungkinan besar berada dalam urutan tahun atau dekade (Neal dan Stanger, 1983; McCollom dan Bach, 2009; Klein dkk., 2013; Leong dkk.; 2023). Sedangkan gas alam bersifat stabil dan memiliki sifat difusif yang lebih rendah serta reaktivitas yang lebih rendah dibandingkan hidrogen, sehingga gas alam dapat lebih mudah terakumulasi di dalam batuan reservoir. Sebaliknya, H<sub>2</sub> geologis mempunyai sifat difusi yang tinggi dan reaktivitas yang tinggi pula (Bardelli dkk., 2014; Gaucher, 2020; Menez, 2020). Tingginya difusivitas dan reaktivitas menunjukkan bahwa H<sub>2</sub> tidak mudah terakumulasi jauh dari sumbernya karena sebagian besar H<sub>2</sub> dapat bereaksi sepanjang perjalanannya yang cukup panjang (*on the way of long-distance migration*).

Dapat dipahami bahwa sebagian H<sub>2</sub> mungkin telah bermigrasi dalam jarak yang jauh dari sumber yang berada mantel ke dekat permukaan kerak bumi. Namun, mengingat sumber H<sub>2</sub> pada mantel memiliki posisi yang sangat dalam, kecil kemungkinan terjadinya akumulasi H<sub>2</sub> dalam jumlah besar kecuali jika kondisinya menguntungkan seperti kondisi geologi, suhu dan tekanan yang dapat mencegah H<sub>2</sub> tereduksi oleh reaksi kimia dan faktor lain selama migrasi yang panjang. Faktor-faktor yang terkait dengan proses migrasi yang panjang ini cenderung menurunkan kemungkinan akumulasi H<sub>2</sub> dibandingkan dengan situasi jarak yang relatif pendek antara batuan sumber dan reservoir. Di sisi lain, tingkat kecepatan terakumulasi dapat meningkat pada jarak migrasi yang lebih pendek juga berimplikasi pada kecepatan pengisian ulang gas H<sub>2</sub> pada batuan reservoir yang berada di dekat batuan sumber. Oleh karena itu, volume gas H<sub>2</sub> pada batuan reservoir yang besar juga sangat mungkin terjadi pada jalur migrasi yang pendek di dekat batuan sumber. Poin-poin penting dari perbandingan dan kontras antara sistem gas alam dan hidrogen ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Ringkasan perbedaan antara sistem hidrokarbon dan salah satu skenario sistem hidrogen yang bersumber dari batuan ultrabasa (diadaptasi dari Zhang & Li, 2024).

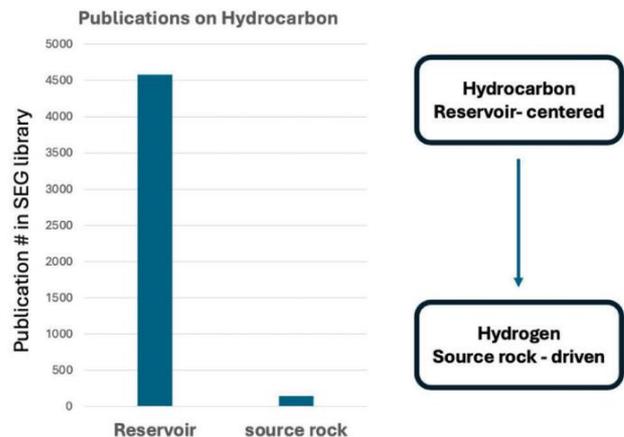
Berdasarkan fenomena yang telah dijelaskan sebelumnya, kami mengusulkan skenario eksplorasi hidrogen yang menjadi fokus penelitian awal dan pengembangannya adalah mengembangkan teknologi untuk menemukan akumulasi H<sub>2</sub> yang terakumulasi di dekat batuan sumber dengan skenario pembentukan melalui proses serpentinisasi pada batuan ultrabasa. Strategi ini relatif kontras dengan strategi pendekatan eksplorasi hidrokarbon konvensional yaitu berpusat pada reservoir seperti diilustrasikan pada Gambar 3, dimana akumulasi hidrokarbon dalam batuan reservoir dapat berada jauh dari batuan sumber. Ketika hidrogen telah ditemukan pada suatu lapisan batuan, kita dapat mengeksplorasi komponen lain dari proses migrasi dan akumulasi H<sub>2</sub> di sekitar batuan sumber (*source rock*). Fitur-fitur dalam sistem hidrogen ini memerlukan pengembangan dan studi metode-metode geofisika yang terintegrasi yang dapat mengkarakterisasi secara efektif komponen-komponen sistem hidrogen dan visualisasinya dibawah permukaan.

**Sistem H<sub>2</sub> alami dan sistem H<sub>2</sub> terstimulasi**

Terdapat dua sistem H<sub>2</sub> lain yang menjelaskan bagaimana kita dapat menghasilkan hidrogen geologis. Yang pertama adalah dari akumulasi H<sub>2</sub> yang terjadi secara alami dan kedua adalah melalui sistem H<sub>2</sub> terstimulasi. Menjadi hal penting untuk membedakan antara H<sub>2</sub> alami dan sistem H<sub>2</sub> terstimulasi.

Keberadaan H<sub>2</sub> alami dalam jumlah banyak memerlukan beberapa kondisi yang sesuai seperti reaksi pada Persamaan (1) (Milkov, 2022), yang seringkali tidak mudah terjadi secara spontan di alam. Karena hidrogen secara alami terus berproduksi dibawah permukaan tanah pada kedalaman tertentu melalui proses geokimia dan biologi alami (Dopffel dkk., 2023), kita dapat mempercepatnya proses secara

artifisial. Osselin dkk. (2022) mengusulkan pembentukan H<sub>2</sub> terstimulasi secara artifisial pada batuan induk yang dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti suhu, tekanan, tingkat pH air, komposisi batuan sumber yang dipilih, dan rasio batuan-air (Neal dan Stanger, 1983; McCollom dan Bach, 2009; Klein dkk., 2013; Leong dkk., 2023). Perlakuan buatan ini dapat merangsang pembentukan hidrogen langsung dari batuan sumber tanpa memerlukan reservoir



**Gambar 3.** Jumlah publikasi tentang eksplorasi hidrokarbon dalam dua dekade terakhir diperoleh dari Perpustakaan Masyarakat Geofisika Eksplorasi (SEG: Society of Exploration Geophysicists). Terdapat 30 kali lebih banyak publikasi mengenai batuan reservoir dibandingkan dengan batuan sumber (diadaptasi dari Zhang & Li, 2024).

Dalam sistem H<sub>2</sub> yang terjadi secara alami, tahap akumulasi reservoir dan pembangkitan hidrogen dari batuan sumber umumnya terpisah baik dalam umur geologi maupun spasial, meskipun jarak

pemisahannya lebih singkat dari itu dalam sistem hidrokarbon (sistem petroleum) dan jarak spasialnya lebih dekat daripada sistem hidrokarbon. Oleh karena itu, adalah mungkin untuk melihat perbedaan dimensi antara batuan reservoir dan batuan sumber secara terpisah dalam eksplorasi H<sub>2</sub> alami.

Sebaliknya, batuan reservoir dan batuan sumber dalam hidrogen terstimulasi posisinya dapat tercampur dalam dimensi ruang dan waktu. Oleh karena itu, kita harus memperhatikan letak batuan reservoir dan batuan sumber secara bersamaan. Dinamika kompleks dari proses pembentukan dan akumulasi hidrogen pada batuan sumber terlebih dahulu berasal dari rangsangan generasi H<sub>2</sub>, kemudian dari tindakan mengekstraksi H<sub>2</sub> dalam rentang waktu singkat atau bersamaan dengan kegiatan stimulasi. Untuk memastikan produksi H<sub>2</sub> terstimulasi yang berkelanjutan dan efisien, serta harus melakukan hal ini memantau proses pembentukan H<sub>2</sub> seperti serpentinisasi dan memastikan kelanjutan dan efisiensinya serta memantaunya perubahan cairan dan batuan terhadap waktu yang berhubungan dengan ekstraksi H<sub>2</sub>. Oleh karena itu, tugas utamanya adalah memantau serpentinisasi pada *hard rock* selama proses stimulasi.

### Peran geofisika dalam eksplorasi H<sub>2</sub> geologis

Sebagai konsekuensi untuk mencari reservoir dan batuan induk pada eksplorasi H<sub>2</sub> alami atau untuk memantau dinamika H<sub>2</sub> terstimulasi, kita perlu menggambarkan variasi di bawah permukaan sebagai fungsi spasial dan waktu yang secara teknis adalah bidang yang dapat dibantu oleh pendekatan metode-metode geofisika. Dengan demikian, geofisika memainkan peran penting dalam eksplorasi dan produksi hidrogen geologi secara umum.

Untuk eksplorasi H<sub>2</sub> alam, beberapa alat geofisika yang digunakan dalam eksplorasi hidrokarbon tradisional dapat diterapkan pada aspek pencarian dan penggambaran geometri reservoir, serta teknik untuk deliniasi batuan sumber. Untuk hidrogen terstimulasi, pemantauan harus fokus pada reaksi kimia dan dinamika fluida H<sub>2</sub> pada saat proses ekstraksi. Pada sub bab selanjutnya, dibahas mengenai penelitian dan pengembangan dan penggunaan geofisika pada H<sub>2</sub> geologis.

### Eksplorasi H<sub>2</sub> alam (*gold H<sub>2</sub>*) menggunakan metode geofisika

#### a. Integrasi metode gaya berat, magnetik, *electromagnetic* (EM), dan seismik

Karena H<sub>2</sub> mempunyai difusivitas dan reaktivitas yang kuat, semakin jauh H<sub>2</sub> bermigrasi setelah dihasilkan, semakin kecil kemungkinannya untuk terakumulasi pada batuan reservoir. H<sub>2</sub> dapat

dieksploitasi sepanjang jalur migrasi karena reaktivitas dan reaksi biologis (dikonsumsi oleh bakteri tertentu) yang tinggi, atau hilang karena difusivitas yang tinggi. Oleh karena itu, terdapat potensi bagi sebagian H<sub>2</sub> untuk bermigrasi dalam jarak yang jauh di sepanjang jalur migrasi, seperti patahan. Namun demikian, kemungkinan besar akumulasi H<sub>2</sub> yang berukuran lebih kecil (volume lebih kecil) akan terbentuk dengan probabilitas yang lebih tinggi dibandingkan sistem hidrokarbon setelah bermigrasi sepanjang jalur migrasi. Oleh karena itu, untuk mencapai volume simpanan ekonomis yang sama dengan simpanan hidrokarbon, sangat masuk akal untuk menyimpulkan bahwa jarak antara reservoir hidrogen dan batuan sumber harus lebih pendek (Gambar 2).

Batuan sumber juga akan terserpentinisasi sebagian dengan distribusi yang tidak merata (He dkk., 2018). Dapat dilihat bahwa berhipotesis adanya serpentinisasi parsial juga dapat menjadi komponen kunci karena hal ini dapat berarti bahwa reservoir telah terisi ulang dalam umur geologis yang relatif muda. Sebagai tambahan, volume batuan sumber yang mengalami alterasi baik secara keseluruhan maupun sebagian berimplikasi paada umur yang lebih tua sejak pembentukan aktif hidrogen geologis dan akumulasi hidrogen yang tersimpan relatif memiliki akumulasi yang kecil. Oleh karena itu, interval waktu antara proses serpentinisasi dan kondisi saat ini batuan induk juga dapat menjadi faktor kunci.

Oleh karena itu, lokasi dengan prospektivitas H<sub>2</sub> yang lebih tinggi untuk eksplorasi H<sub>2</sub> alami akan berada di dekat batuan sumber yang memiliki volume cukup besar dan telah mengalami serpentinisasi parsial. Masih harus dipahami seberapa besar volume yang "cukup" melalui penelitian dan analisis data eksplorasi di masa depan, namun kedua aspek ini merupakan kondisi yang harus diketahui. Oleh karena itu, mencari batuan sumber dalam sistem H<sub>2</sub> merupakan cara tidak langsung untuk membantu menemukan reservoir H<sub>2</sub> di dekatnya. Strategi berbasis batuan sumber yang kita bahas mengharuskan pendekatan multifisika (multi disiplin ilmu geosains) yang telah dikembangkan dalam eksplorasi mineral, misalnya menggunakan data elektromagnetik, gravitasi, dan magnetik (Nabighian dan Asten, 2002; Dentith dan Mudge, 2014) serta pencitraan terintegrasi geologi bawah permukaan menggunakan alat interpretasi kuantitatif seperti inversi, join inversi, dan diferensiasi geologi (Li dan Oldenburg, 1996; 1998; Oldenburg dkk., 2005; Holtham dan Oldenburg, 2010; Devriese dkk., 2017; Melo and Li, 2021). Metode-metode tersebut sangat memungkinkan untuk memperoleh pemetaan dan penggambaran keberadaan batuan sumber seperti batuan ultrabasa yang kaya Fe

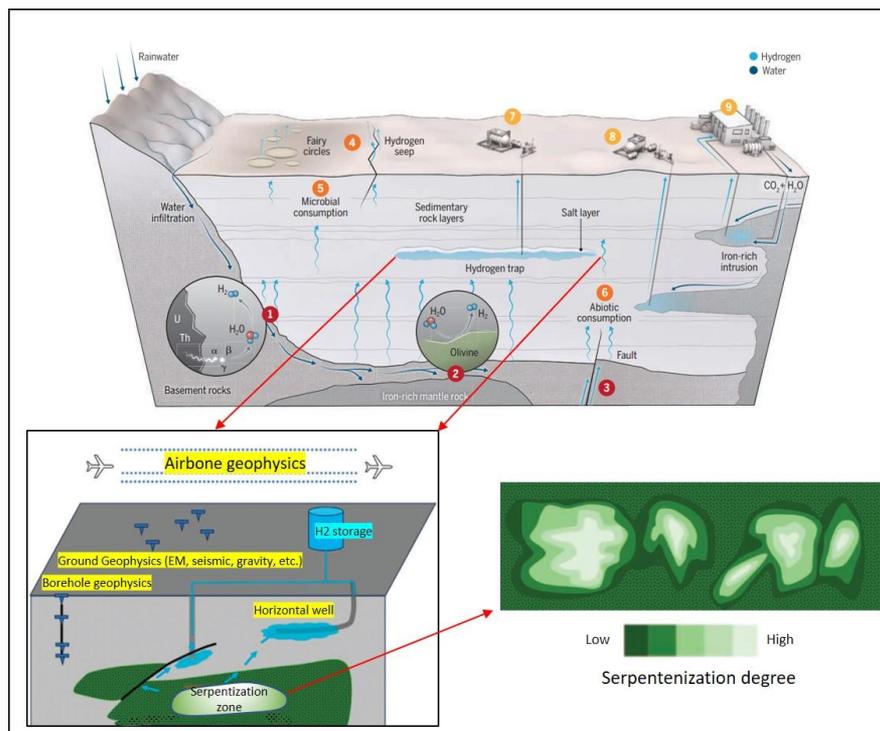
(II) pada Persamaan (1) dan juga memperkirakan volume dan derajat serpentinisasi dalam batuan sumber.

H<sub>2</sub> yang tersimpan (*preserved*) akan bermigrasi ke reservoir yang memiliki lapisan penutup (*system trap*) atau terakumulasi ke lokasi yang memiliki sesar dengan kemiringan relatif landai. Selanjutnya dapat mengekstraksi H<sub>2</sub> melalui teknologi sumur horizontal pada reservoir atau melalui sumur vertikal jika H<sub>2</sub> terperangkap oleh patahan atau perangkap struktural. Metode seismik akan memberikan keuntungan untuk menggambarkan reservoir, batuan penutup, patahan, dan perangkap struktural. Banyak metodologi yang dikembangkan dalam eksplorasi gas alam konvensional dapat diadaptasi dan dimodifikasi untuk menemukan dan menggambarkan reservoir H<sub>2</sub>. Metode-metode ini mencakup pendekatan pencitraan (Baysal dkk., 1983; Chang dan McMechan, 1994; Zhang dkk., 2016; Handoyo dkk., 2016), analisis atribut (Marfurt dkk., 1998; Dou dkk., 2017; Handoyo dkk., 2024), dan inversi bentuk gelombang penuh (*full wave inversion*) serta analisis fisika batuan untuk mengkarakterisasi kandungan fluida di reservoir (Virieux dan Operto, 2009; Wu dan McMechan, 2019; Zanetta dkk., 2021).

Jika mengikuti strategi dalam eksplorasi gas alam dan berusaha menerapkan pendekatan yang sama pada eksplorasi hidrogen alami, kita mungkin menganggap bahwa hanya metode seismik yang mungkin diperlukan untuk mengidentifikasi reservoir

H<sub>2</sub>. Namun demikian, faktor-faktor unik dan spesifik yang disebutkan sebelumnya pada H<sub>2</sub> alam dapat menyebabkan penerapan metode eksplorasi seismik untuk menghasilkan penemuan reservoir gas alam secara tidak sengaja. Sementara itu, ketebalan zona transisi antara reservoir H<sub>2</sub> dan batuan penutup (*capping seal*), dapat menyebabkan perubahan kecepatan seismik yang kecil pada zona transisi yang berimplikasi pada jumlah reflektor-reflektor seismik yang tidak teramati baik pada data seismik. Akibatnya, penerapan metode seismik secara langsung dapat menyebabkan hasil yang kurang optimal dalam eksplorasi H<sub>2</sub>.

Strategi integrasi untuk deliniasi batuan sumber menggunakan EM, gravitasi, dan magnetik, lalu eksplorasi reservoir H<sub>2</sub> di sekitar batuan sumber tidak hanya dapat memitigasi risiko secara signifikan, namun juga mengantisipasi solusi yang diperlukan. Gambar 4 mengilustrasikan konsep eksplorasi terintegrasi untuk mengidentifikasi batuan sumber H<sub>2</sub> menggunakan beberapa pendekatan geofisika seperti magnetik dari udara, gradiometri gravitasi udara, gravitasi di permukaan tanah, EM di udara dan tanah, dan metode log resistivitas untuk memetakan dan menggambarkan ion-ion (*ion-rich*) pada batuan sumber seperti ultrabasa. Gambar 4 juga menunjukkan skenario identifikasi reservoir H<sub>2</sub> menggunakan data geofisika dengan resolusi tinggi, diikuti dengan eksploitasi dari sumur vertikal atau sumur horizontal tergantung pada karakteristik batuan reservoir.



**Gambar 4.** Ilustrasi peranan geofisika dalam eksplorasi H<sub>2</sub> alam. Desain akuisisi geofisika yang efisien dapat membantu mengurangi biaya pengumpulan data (diadaptasi dari Hand, 2023).

### **Pengumpulan data geofisika yang efisien dan memiliki resolusi tinggi**

Fakta yang menarik dan menjadi perhatian bersama adalah bahwa belum ada penemuan reservoir H<sub>2</sub> dalam jumlah besar yang terkait dengan pengeboran minyak dan gas selama beberapa dekade di cekungan-cekungan besar meskipun secara data terdapat sejumlah besar sumur-sumur yang pada awalnya mengandung gas hidrogen. Salah satu kemungkinan yang terjadi adalah kita belum mencari di lokasi yang tepat. Namun, pertimbangan yang hati-hati dan teliti harus mempertimbangkan fakta bahwa sebagian besar cekungan besar telah dieksplorasi dan dieksploitasi untuk industri minyak dan gas sehingga kecil kemungkinannya untuk menemukan reservoir H<sub>2</sub> kelas dunia (*world-class H<sub>2</sub> reservoir*) yang sebanding dengan reservoir gas alam. Oleh karena itu, wilayah dengan prospektivitas tinggi kemungkinan besar berada di pinggir *basin (margins of the basins)* atau jauh dari *basin*. Pertimbangan ini juga konsisten dengan apa yang telah dipahami sebagai kondisi yang diperlukan, yaitu kedekatan dengan unit batuan ultrabasa yang terserpentinisasi sebagian. Sementara itu, kurangnya penemuan besar di cekungan-cekungan sedimen juga menunjukkan kemungkinan bahwa endapan atau reservoir H<sub>2</sub> terdapat dalam ukuran yang lebih kecil dibandingkan dengan reservoir gas alam. Oleh karena itu, setidaknya pada tahap awal eksplorasi H<sub>2</sub> dan setelah pengeboran uji tes, dibutuhkan upaya untuk memindai wilayah yang luas dan mencitrakan volume bawah permukaan untuk mengidentifikasi wilayah yang lebih prospektif dan bermutu tinggi.

Konsekuensi dari fakta-fakta tersebut, cakupan spasial yang dikerjakan oleh geofisika menjadi naik secara signifikan dan biaya perolehan data geofisika, serta pengambilan sampel geokimia dan gas, di wilayah yang luas dapat menjadi hambatan besar bagi penemuan H<sub>2</sub> (*high cost*). Demikian pula dengan waktu yang dibutuhkan untuk memperoleh data-data tersebut juga dapat memberikan dampak negatif yang besar. Ada dua faktor yang menjadi penting yaitu kemampuan untuk mengumpulkan data secara efisien dan hemat biaya pada wilayah yang luas dan kemampuan untuk mengumpulkan data yang memiliki resolusi tinggi dengan anggaran yang tersedia dan dalam jangka waktu yang dapat diterima oleh para investor.

Pengumpulan data geofisika yang efisien dan hemat biaya dapat dicapai salah satunya adalah melalui adaptasi sensor dan peralatan berbiaya rendah

dan terdistribusi yang sudah ada (telah teruji berhasil diaplikasikan) atau belum ditemukan dan dikembangkan. Cara lainnya adalah dengan menerapkan desain survei geofisika yang efisien pada implementasi di lapangan. Akuisisi berbasis pengotimalan instrumen-instrumen (*Compressive sensing-based acquisition*) dalam eksplorasi seismik telah menunjukkan keberhasilan besar dalam desain dan akuisisi survei seismik berbiaya rendah (Herrmann, 2010; Li dkk., 2013; Mosher dkk., 2014; Brown dkk., 2017). Pengambilan sampel ergodik (desain akuisisi untuk memaksimalkan informasi dari sampel terbatas) yang relatif baru dikembangkan (Zhang dan Li, 2022; 2023; 2024) juga dapat memberikan desain survei alternatif yang dapat diterapkan secara luas untuk akuisisi data geofisika melalui darat dan udara berbiaya rendah seperti pada metode EM, gravitasi, gradiometri gravitasi, dan data magnetik. Pendekatan ini dapat digunakan untuk mencakup wilayah survei pengintaian dengan skala 2 hingga 10 kali lebih luas dibandingkan dengan pendekatan konvensional. Lebih dari itu, pengambilan sampel ergodik dapat digunakan untuk memperoleh data dengan resolusi yang jauh lebih tinggi di area target tanpa menimbulkan peningkatan biaya atau waktu. Dengan demikian, pengambilan sampel ergodik dapat digunakan untuk mengumpulkan lebih banyak informasi untuk pencitraan yang lebih rinci pada area target.

### **c. Integrasi interdisiplin metode dan pembelajaran mesin**

Proses pembentukan, migrasi, dan penyimpanan H<sub>2</sub> merupakan sebuah sistem kompleks dan juga memiliki karakteristik geofisika yang kompleks. Sistem ini melibatkan tatanan batuan keras, air dan komponen hidrologi, reaksi kimia, dan pengaturan batuan sedimen untuk akumulasi dan penyimpanan H<sub>2</sub>. Oleh karena itu, elemen-elemen pada sistem yang telah ada seperti sistem mineral, sistem hidrogeologi, dan sistem perminyakan, juga terlibat dalam eksplorasi H<sub>2</sub>. Sebagai konsekuensi, teknik geofisika dari berbagai metode termasuk eksplorasi mineral batuan keras, eksplorasi minyak dan gas batuan sedimen, dan fluida hidrotermal dalam eksplorasi panas bumi akan diperlukan. Kompleksitas yang terkait dengan sistem ini dan interaksinya hanya dapat dipahami melalui pendekatan interdisipliner dengan menggunakan pengetahuan multidisiplin. Oleh karena itu, menggabungkan dan mengkonfigurasi ulang teknik-teknik yang sudah ada adalah kunci untuk menemukan dan memproduksi H<sub>2</sub> geologis.

Selain itu, kompleksitas yang terlibat dalam pengintegrasian berbagai jenis data geofisika serta informasi geologi dan spesifik lokasi diperkirakan akan menjadi tantangan yang signifikan. Pembelajaran mesin dan bahkan pendekatan kecerdasan buatan kemungkinan besar akan menjadi metode yang tepat dan membuka jalan bagi integrasi yang efektif untuk mendapatkan informasi-informasi penting dalam menemukan sumber daya H<sub>2</sub>.

### Pemantauan H<sub>2</sub> terstimulasi (*orange H<sub>2</sub>*) menggunakan geofisika

Kondisi bawah permukaan dapat terus menghasilkan hidrogen melalui proses geokimia dan aktivitas biologi alami (Dopffel dkk., 2023). Namun, dalam beberapa kasus, tingkat pembentukannya mungkin tidak cukup signifikan (Aiken dkk., 2022) untuk memenuhi permintaan H<sub>2</sub>. Untuk dapat memproduksi lebih banyak H<sub>2</sub> secara artifisial jika kita dapat meningkatkan atau mendorong lebih banyak proses pembangkitan H<sub>2</sub> seperti serpentinisasi dan menekan konsumsi H<sub>2</sub> yang dihasilkan. Prosedur ini dapat dilakukan pada H<sub>2</sub> terstimulasi yang telah dibahas sebelumnya. Sementara itu, batuan sumber seperti ultramafik yang kaya olivin tersebar luas di seluruh dunia. Produksi H<sub>2</sub> yang terstimulasi dengan memanfaatkan batuan sumber yang tersedia secara luas dapat menurunkan kebutuhan eksplorasi secara signifikan dibandingkan dengan H<sub>2</sub> alami. Pada awalnya, mungkin tampak bahwa geofisika tidak mempunyai banyak pengaruh terhadap H<sub>2</sub> terstimulasi selain pemetaan batuan sumber. Hal ini boleh jadi terjadi jika stimulasi mudah diterapkan di lokasi seperti di laboratorium dan H<sub>2</sub> dapat diekstraksi tanpa risiko lingkungan apa pun. Namun, terdapat banyak tantangan dalam proses H<sub>2</sub> terstimulasi yang tidak terdapat dalam eksplorasi H<sub>2</sub> alami. Oleh karena itu, kita memerlukan metode inovatif untuk mengatasi

#### a. Pemantauan secara *real-time monitoring* pada proses pembentukan H<sub>2</sub> menggunakan integrasi metode elektromagnetik (EM) dan magnetik

Data elektromagnetik (EM) dan magnetik merupakan metode yang efisien dan memiliki sensitivitas yang baik terhadap konduktivitas listrik dan kerentanan magnetik batuan ultrabasa serta zona serpentinisasi di dalamnya. Integrasi data EM dan magnetik dapat digunakan untuk mengkaraktirasi batuan induk ultrabasa dan menggambarkan zona serpentinisasi selama stimulasi H<sub>2</sub>. Batuan ultrabasa memiliki rentang nilai properti fisik yang berbeda (misalnya kerentanan magnetik, konduktivitas, dan kepadatan) (He dkk., 2018; Cutts dkk., 2021), yang akan memungkinkan para peneliti geofisika untuk menggambarkan struktur batuan sumber. Proses

tantangan ini dan geofisika mempunyai peran penting. Ada beberapa tantangan dalam sistem H<sub>2</sub> terstimulasi yang tidak dihadapi oleh H<sub>2</sub> alami (Tabel 1). Perbedaan utamanya adalah perubahan yang jauh lebih cepat pada sistem H<sub>2</sub> terstimulasi dapat diamati dalam skala waktu yang relatif singkat yang dapat memerlukan waktu sehari-hari atau berminggu-minggu.

Tabel 1. Perbedaan antara H<sub>2</sub> alami dan H<sub>2</sub> terstimulasi (Zhang skk., 2024)

	Natural H <sub>2</sub>	Stimulated H <sub>2</sub>
<b>Generation and accumulation</b>	different geologic time and different locations	same time and similar locations
<b>Chemical reaction</b>	little	rapid change (minute to hour)
<b>Physical properties</b>	stable	varying
<b>Temperature and deformation</b>	little change	rapid change and significant influence on H <sub>2</sub> generation

Karena posisi antara zona pembentukan dan zona akumulasi pada H<sub>2</sub> terstimulasi yang dapat berdekatan, integrasi parameter fisis dari integrasi beberapa metode geofisika adalah suatu keniscayaan. Sementara itu, terjadi perubahan cepat pada proses stimulasi H<sub>2</sub> terkait dengan reaksi kimia, sifat fisik yang dihasilkan, serta suhu dan bidang deformasi sehingga pemantauan *real-time* menggunakan geofisika juga diperlukan. Sub bab selanjutnya akan membahasnya secara lebih detail.

serpentinisasi dapat mengubah konduktivitas dan kerentanan sehingga memungkinkan para peneliti geofisika untuk menggambarkan proses pembentukan, derajat, dan luasan spasial pada zona serpentinisasi.

Dengan mempelajari gambaran perubahan konduktivitas dari data EM dan perubahan kerentanan dari data magnetik, kita dapat mengidentifikasi zona serpentinisasi dimana lokasi H<sub>2</sub> dihasilkan.

#### b. Karakterisasi dan pemantauan suhu pada zona target

Pencitraan dan pemantauan suhu lapangan pada zona target sangat signifikan dalam proses menstimulai H<sub>2</sub>. Pentingnya komponen ini dapat bernilai ganda. Pertama, baik proses injeksi air maupun proses serpentinisasi akan mengubah nilai suhu pada

batuan sumber H<sub>2</sub> (Allen dan Seyfried, 2004). Yang kedua, suhu dan aliran panas memiliki pengaruh besar pada proses serpentinisasi dan pembentukan H<sub>2</sub> (McCullom dkk., 2016). Beberapa penelitian menunjukkan kelayakan pembentukan H<sub>2</sub> bersuhu Bach, 2009).

Meskipun suhu optimal untuk menstimulasi H<sub>2</sub> belum pasti, dapat dipastikan bahwa pemantauan suhu merupakan suatu hal yang sangat penting. Berbeda dengan percobaan laboratorium pada skala sampel, suhu di zona target tidak dapat diukur secara langsung di seluruh volume serpentinisasi. Geofisika dapat membantu memantau suhu dan rekonstruksi distribusi suhu menggunakan proses inversi. Distribusi suhu yang tergambar sepenuhnya dalam volume stimulasi berpotensi memainkan peran ganda sebagai indikator efektif mengenai derajat serpentinisasi dan stimulasi untuk mempertahankan dan mengoptimalkan pembentukan H<sub>2</sub>.

### c. Karakterisasi dan pemantauan deformasi pada zona target

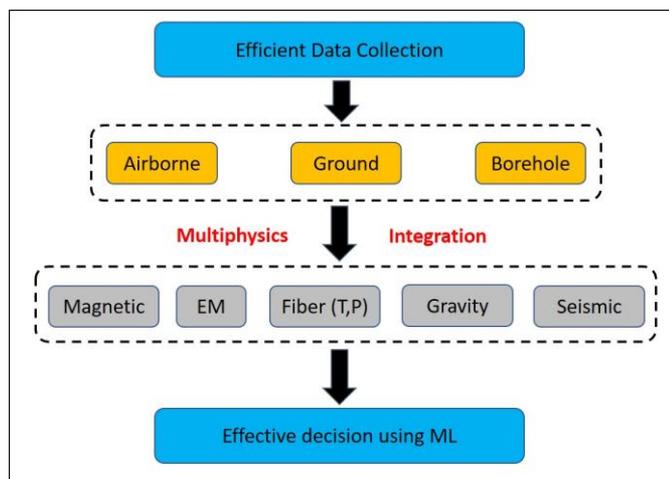
Pencitraan dan pemantauan zona batuan sumber yang distimulasi merupakan sarana untuk mencapai tujuan pada rekayasa pembentukan H<sub>2</sub>. Pemantauan ini pada akhirnya akan memberikan informasi yang dapat ditindaklanjuti untuk pengambilan keputusan operasional guna menyesuaikan dan mengendalikan proses stimulasi sehingga dapat mempertahankan dan mengoptimalkan pembentukan dan ekstraksi H<sub>2</sub>. Penelitian sebelumnya (McCullom dan Bach, 2009) menjelaskan bahwa litologi, suhu, tekanan, tingkat pH air, dan rasio volume air dan batuan dapat mempengaruhi laju pembentukan H<sub>2</sub> dan konsentrasi H<sub>2</sub>. Terdapat banyak pekerjaan yang didasarkan pada

rendah di bawah 100°C (Neal dan Stanger, 1983; Leong dkk., 2023). Sementara itu, penelitian lain menunjukkan kisaran suhu yang lebih tinggi di atas 200°C (McCullom dan

Proses serpentinisasi dapat menyebabkan pemuai volume (Cutts dkk., 2021). Sementara itu, efek termal yang terkait dengan proses serta rekahan batuan sumber juga diperkirakan mengakibatkan deformasi pada batuan sumber selama pembangkitan hidrogen terstimulasi. Oleh karena itu, penggunaan data deformasi seperti pengukuran regangan dan pencitraan zona sumber deformasi dapat memberikan informasi tambahan tentang kondisi spasial dan derajat serpentinisasi. Bidang deformasi yang dicitrakan dapat memberikan informasi pelengkap untuk mengkarakterisasi dan menggambarkan secara *real-time* pada proses pembangkitan hidrogen terstimulasi. Data deformasi permukaan dan data regangan dari informasi lubang bor dapat digunakan untuk tujuan ini.

### d. Umpan balik untuk operasi teknik dan kontrol

penelitian laboratorium, namun konversi hasil penelitian ini ke H<sub>2</sub> terstimulasi pada skala lapangan memerlukan informasi-informasi penting mengenai parameter-parameter fisis untuk dimana metode geofisika dapat membantu memberikan informasi-informasi tersebut. Untuk memaksimalkan pengolahan data dan inversi data geofisika, kita membutuhkan teknologi komputasi berkinerja tinggi. Untuk mengekstrak informasi dari berbagai kumpulan data geofisika secara *real-time*, pendekatan *machine learning* (ML) diperlukan dan terbukti menjadi cara pengembangan yang efektif (Gambar 5).



**Gambar 5.** Rangkuman mengenai peranan geofisika dalam eksplorasi H<sub>2</sub> dan potensi penggunaan AI

## Kesimpulan

Upaya produksi hidrogen geologis terdiri dari eksplorasi akumulasi H<sub>2</sub> yang terjadi secara alami dan stimulasi produksi H<sub>2</sub>. Geofisika akan memainkan peran penting dalam kedua skenario tersebut. Geofisika memainkan peranan penting dalam upaya untuk menggambarkan parameter-parameter fisis dari batuan sumber serpentinifikasi dengan menggunakan integrasi metode-metode geofisika seperti gaya berat, magnetik, EM, seismik dan dikombinasi dengan data sumur bor. Penelitian geokimia juga memberikan informasi tambahan untuk dapat menggambarkan kondisi zona target secara utuh.

Jelas bahwa metode geofisika yang multimetode diperlukan untuk eksplorasi dan produksi sumber daya H<sub>2</sub> alam dan untuk menstimulasi produksi H<sub>2</sub> secara ringkas dirangkum

pada Gambar 5. Tahap pertama adalah pengumpulan data geofisika yang efisien termasuk instrumen berbiaya rendah dan desain survei yang efisien. Akuisisi geofisika melalui udara, darat, dan lubang bor dapat diterapkan tergantung pada kondisi geologi dan ukuran target. Dalam H<sub>2</sub> geologi alami, integrasi data EM, gravitasi, magnet, dan seismik dapat mengkarakterisasi batuan sumber dan reservoir. Tipe data ini bersama dengan data suhu dan deformasi batuan dapat memberikan pemahaman mengenai pembentukan dan ekstraksi H<sub>2</sub> dalam H<sub>2</sub> terstimulasi. Pada akhirnya, tujuan utama adalah untuk mengambil keputusan secara efisien dengan menggunakan teknologi *artificial intelligence* (AI) seperti pemanfaatan *machine learning* (ML) dalam pengolahan dan interpretasi data ini dalam eksplorasi dan produksi hidrogen geologis.

### Daftar Pustaka

- Allen, D. E., & Seyfried Jr, W. E. (2004). Serpentinization and heat generation: constraints from Lost City and Rainbow hydrothermal systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(6), 1347-1354.
- Arrouvel, C., & Prinzhofer, A. (2021). Genesis of natural hydrogen: new insights from thermodynamic simulations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(36), 18780-18794.
- Baysal, E., Kosloff, D. D., & Sherwood, J. W. (1983). Reverse time migration. *Geophysics*, 48(11), 1514-1524.
- Bouquet, A., Glein, C. R., Wyrick, D., & Waite, J. H. (2017). Alternative energy: production of H<sub>2</sub> by radiolysis of water in the rocky cores of icy bodies. *The Astrophysical Journal Letters*, 840(1), L8.
- Boreham, C. J., Edwards, D. S., Czado, K., Rollet, N., Wang, L., van der Wielen, S., ... & Henson, P. A. (2021). Hydrogen in Australian natural gas: occurrences, sources and resources. *The APPEA Journal*, 61(1), 163-191.
- Brown, L., Mosher, C. C., Li, C., Olson, R., Doherty, J., Carey, T. C., ... & Staples, E. (2017). Application of compressive seismic tight sandstone reservoir. *Journal of Mines, Metals & Fuels*, 65(3).
- Ellis, S. G., & Gelman, S. E. (2022). A preliminary model of global subsurface natural hydrogen resource potential. In *Geological Society of America Abstracts with Programs* (Vol. 54, No. 5, p. 2022).
- Etiopo, G., Schoell, M., & Hosgörmez, H. (2011). Abiotic methane flux from the Chimaera seep and Tekirova ophiolites (Turkey): understanding gas exhalation from low temperature serpentinization and implications for Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 310(1-2), 96-104.
- Guélard, J., Beaumont, V., Rouchon, V., Guyot, F., Pillot, D., Jézéquel, D., ... & Deville, E. (2017). Natural H<sub>2</sub> in Kansas: Deep or shallow origin?. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(5), 1841-1865.
- Hand E . Hidden hydrogen. *Science* 2023; 375 : Issue 6633, 630-6363. <https://www.science.org/content/article/hidden-hydrogen-earthmay-hold-vast-stores-renewable-carbon-free-fuel>. (diakses terakhir pada 11 Juni 2024)
- Handoyo, H., Sudarsana, M. R., & Almiati, R. (2016). Rock Physics Modeling and Seismic Interpretation to Estimate Shallow Cemented Zone in Carbonate Reservoir Rock. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 1(1), 45-50.
- Handoyo, H., Ronlei, B. C., Sigalingging, A. S., Avseth, P., Triyana, E., Akin, Ö., ... & Carbonell, R. (2024). Characterization of Carbonate Reservoir Potential in Salawati Basin, West Papua: Analysis
- Chang, W. F., & McMechan, G. A. (1994). 3-D elastic prestack, reverse-time depth migration. *Geophysics*, 59(4), 597-609.
- Coveney Jr, R. M., Goebel, E. D., Zeller, E. J., Dreschhoff, G. A., & Angino, E. E. (1987). Serpentinization and the origin of hydrogen gas in Kansas. *AAPG Bulletin*, 71(1), 39-48.
- Cutts, J. A., Steinthorsdottir, K., Turvey, C., Dipple, G. M., Enkin, R. J., & Peacock, S. M. (2021). Deducing mineralogy of serpentinized and carbonated ultramafic rocks using physical properties with implications for carbon sequestration and subduction zone dynamics. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(9), e2021GC009989.
- Dentith, M., & Mudge, S. T. (2014). *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press.
- Devriese, S. G., Davis, K., & Oldenburg, D. W. (2017). Inversion of airborne geophysics over the DO-27/DO-18 kimberlites –Part 1: Potential fields. *Interpretation*, 5(3), T299-T311. DOE. Department of Energy. Hydrogen Shot, 2021. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-shot> (terakhir diakses pada 16 April 2024)
- Dopffel, N., An-Stepiec, B. A., de Rezende, J. R., Sousa, D. Z., & Koerdt, A. (2023). Microbiology of underground hydrogen storage. *Frontiers in energy research*, 11, 1242619.
- Dou, Y., Wang, D., Zhang, M., & Zhang, M. (2017). Lithology prediction and pore fluid detection of

- of Seismic Direct Hydrocarbon Indicator (DHI), Seismic Attributes, and Seismic Spectrum Decomposition. *Indonesian Journal on Geoscience*, 11(2), 173-188.
- He, L., Chen, L., Dorji, He, Z., Wang, X., Xiao, B., ... & Chen, R. (2018). Mapping chromite deposits with audio magnetotellurics in the Luobusa ophiolite of southern Tibet. *Geophysics*, 83(2), B47-B57.
- Herrmann, F. J. (2010). Randomized sampling and sparsity: Getting more information from fewer samples. *Geophysics*, 75(6), WB173-WB187.
- Holm, N. G., Oze, C., Mousis, O., Waite, J. H., & Guilbert-Lepoutre, A. (2015). Serpentinization and the formation of H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> on celestial bodies (planets, moons, comets). *Astrobiology*, 15(7), 587-600.
- Holtham, E., & Oldenburg, D. W. (2010). Three-dimensional inversion of ZTEM data. *Geophysical Journal International*, 182(1), 168-182.
- IEA, Global Hydrogen Review 2021. International Energy Agency, 2021; 218 p. Paris. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021> (terakhir diakses pada 23 April 2024).
- IEA. The future of hydrogen: seizing today's opportunities. International Energy Agency 2019; 203 p. Paris. <https://www.iea.org/reports/thefuture-of-hydrogen> (terakhir diakses pada 23 April 2024).
- Klein, F., Bach, W., & McCollom, T. M. (2013). Compositional controls on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks. *Lithos*, 178, 55-69.
- Klein, F., Tarnas, J. D., & Bach, W. (2020). Abiotic sources of molecular hydrogen on Earth. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 16(1), 19-24.
- Lefeuvre, N., Truche, L., Donzé, F. V., Gal, F., Tremosa, J., Fakoury, R. A., ... & Gaucher, E. C. (2022). Natural hydrogen migration along thrust faults in foothill basins: The North Pyrenean Frontal Thrust case study. *Applied Geochemistry*, 145, 105396.
- Leong, J. A., Nielsen, M., McQueen, N., Karolytè, R., Hillegonds, D. J., Ballentine, C., ... & Kelemen, P. (2023). H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> outgassing rates in the Samail ophiolite, Oman: implications for low-temperature, continental serpentinization rates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 347, 1-15.
- Li, Y., & Oldenburg, D. W. (1996). 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*, 61(2), 394-408.
- Li, Y., & Oldenburg, D. W. (1998). 3-D inversion of gravity data. *Geophysics*, 63(1), 109-119.
- Li, C., Mosher, C. C., Shan, S., & Brewer, J. D. (2013). Marine towed streamer data reconstruction based on compressive sensing. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013* (pp. 3597-3602). Society of Exploration Geophysicists.
- Lollar, B. S., Onstott, T. C., Lacrampe-Couloume, G., & Ballentine, C. J. (2014). The contribution of the Precambrian continental lithosphere to global H<sub>2</sub> production. *Nature*, 516(7531), 379-382.
- Marfurt, K. J., Kirilin, R. L., Farmer, S. L., & Bahorich, M. S. (1998). 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm. *Geophysics*, 63(4), 1150-1165.
- McCollom, T. M., & Bach, W. (2009). Thermodynamic constraints on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(3), 856-875.
- McCollom, T. M., & Seewald, J. S. (2013). Serpentinites, hydrogen, and life. *Elements*, 9(2), 129-134.
- McCollom, T. M., Klein, F., Robbins, M., Moskowitz, B., Berquó, T. S., Jöns, N., ... & Templeton, A. (2016). Temperature trends for reaction rates, hydrogen generation, and partitioning of iron during experimental serpentinization of olivine. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 181, 175-200.
- McCollom, T. M., Klein, F., & Ramba, M. (2022). Hydrogen generation from serpentinization of iron-rich olivine on Mars, icy moons, and other planetary bodies. *Icarus*, 372, 114754.
- Melo, A., & Li, Y. (2021). Geology differentiation by applying unsupervised machine learning to multiple independent geophysical inversions. *Geophysical Journal International*, 227(3), 2058-2078.
- Milkov, A. V. (2022). Molecular hydrogen in surface and subsurface natural gases: Abundance, origins and ideas for deliberate exploration. *Earth-Science Reviews*, 230, 104063.
- Mosher, C. C., Li, C., Morley, L. C., Janiszewski, F. D., Ji, Y., & Brewer, J. (2014, October). Non-uniform optimal sampling for simultaneous source survey design. In *SEG International Exposition and Annual Meeting* (pp. SEG-2014). SEG.
- Nabighian, M. N., & Asten, M. W. (2002). Metalliferous mining geophysics—State of the art in the last decade of the 20th century and the beginning of the new millennium. *Geophysics*, 67(3), 964-978.
- Neal, C., & Stanger, G. (1983). Hydrogen generation from mantle source rocks in Oman. *Earth and Planetary Science Letters*, 66, 315-320.

- Oldenburg, D., Eso, R., Napier, S., & Haber, E. (2005). Controlled source electromagnetic inversion for resource exploration. *first break*, 23(7).
- Osselin, F., Soullain, C., Fauguerolles, C., Gaucher, E. C., Scaillet, B., & Pichavant, M. (2022). Orange hydrogen is the new green. *Nature Geoscience*, 15(10), 765-769.
- Prinzhofer, A., Moretti, I., Françolin, J., Pacheco, C., d'Agostino, A., Werly, J., & Rupin, F. (2019). Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H<sub>2</sub>-emitting structure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(12), 5676-5685.
- Renaud, C. (2014). Nature and evolution of Neoproterozoic ocean-continent transition: Evidence from the passive margin of the West African craton in NE Mali. *Journal of African Earth Sciences*, 91, 1-11.
- Virieux, J., & Operto, S. (2009). An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics. *Geophysics*, 74(6), WCC1-WCC26.
- Wu, Y., & McMechan, G. A. (2019). Parametric convolutional neural network-domain full-waveform inversion. *Geophysics*, 84(6), R881-R896.
- Yedinak, E. M. (2022). The curious case of geologic hydrogen: Assessing its potential as a near-term clean energy source. *Joule*, 6(3), 503-508.
- Zanetta, E. V., Handoyo, H., Fatkhan, F., Laesanpura, A., & Hutami, H. Y. (2021). Analisis Parameter Elastisitas Untuk Interpretasi Litologi Dan Fluida Pori Reservoir Batupasir Formasi Intra Gumai Cekungan Sumatera Selatan. *Jurnal Geofisika*, 19(2), 45-50.
- Zgonnik, V. (2020). The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews*, 203, 103140.
- Zhang, M., Du, G., Man, W., Wang, D. X., & Zhao, Y. H. (2016, October). Seismic sedimentary analysis of the tight reservoir based on TT transform. In *SEG International Exposition and Annual Meeting* (pp. SEG-2016). SEG.
- Zhang, M. (2022). Compressive sensing acquisition with application to Marchenko imaging. *Pure and Applied Geophysics*, 179(6), 2383-2404.
- Zhang, M., & Li, Y. (2023, December). Geologic H<sub>2</sub> resource exploration using geophysics. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2023, pp. NS11A-07).
- Zhang, M., & Li, Y. (2024). Ergodic sampling: Acquisition design to maximize information from limited samples. *Geophysical Prospecting*, 72(2), 435-467.
- Zhang, M., & Li, Y. (2024). The role of geophysics in geologic hydrogen resources. *Journal of Geophysics and Engineering*, gxae056.