ANALISIS KOMPARASI SPEKTRUM *FOURIER TRANSFORM INFRARED* AIR FORMASI PANAS BUMI SUMUR HAM-29A DAN HAM-30

Muhammad Ilham Kharisma Putera[1], Henk Subekti[1*], Raja Hamonangan Manurung[2]
[1]Teknik Produksi Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No. 38, Cepu, Blora 58315
[2]Logistik Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No. 38, Cepu, Blora 58315
**E-mail: henksubekti@gmail.com*

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik spektral air formasi (brine) sumur injeksi HAM-29A dan sumur produksi HAM-30 di Lapangan IKP menggunakan spektrometri *Fourier Transform Infrared - Attenuated Total Reflectance* (FTIR-ATR) yang diintegrasikan dengan validasi kimia kuantitatif laboratorium. Sampel diuji secara kuantitatif di Laboratorium Penguji Pusdiklat Migas melalui metode AAS, titrimetri, dan standar APHA, serta dianalisis spektrumnya pada rentang 4000–400 cm^{-1} terhadap material pembanding (akuades, SiO_2, $CaCO_3$, dan NaCl). Hasil pengujian menunjukkan profil spektral kedua sumur hampir identik dengan koefisien korelasi sebesar 0,988741, mengonfirmasi homogenitas fluida formasi. Spektrum fase cair didominasi oleh interferensi pelarut air (H_2O) pada pita regangan O–H dan tekuk H–O–H. Tingginya korelasi silika ($r > 0{,}98$) dipengaruhi oleh kemiripan latar belakang pelarut air dengan selisih marjinal terhadap akuades murni. Sementara itu, korelasi moderat $CaCO_3$ (0,9211–0,9408) terkonfirmasi oleh konsentrasi kalsium (576–604 mg/L) dan bikarbonat (88–105 mg/L). Korelasi moderat terhadap larutan NaCl ($r \approx 0{,}94$), bukan akibat serapan langsung ion klorida (14,56–37,91 mg/L) yang nonaktif terhadap inframerah, melainkan distorsi struktur ikatan hidrogen air. Dengan demikian, metode FTIR fase cair efektif sebagai penapisan awal kualitatif, namun evaluasi geokimia definitif tetap memerlukan integrasi data kuantitatif komprehensif.
.

Kata kunci: Air formasi, *Fourier Transform Infrared - Attenuated Total Reflectance,* Geokimia, Panas bumi, SiO_2

1. PENDAHULUAN

Air formasi (brine) pada sistem panas bumi merupakan fluida hidrotermal kompleks yang membawa informasi penting mengenai interaksi fluida-batuan (*water-rock interaction*) serta dinamika termodinamika reservoir [1]. Karakteristik fisik dan kimia fluida ini dapat bervariasi antarsumur di dalam satu lapangan yang sama, terutama antara sumur produksi yang membawa fluida bersuhu tinggi dari reservoir dan sumur injeksi yang mengalirkan kembali fluida setelah melalui pemisahan fasa di fasilitas permukaan [2]. Oleh karena itu, pemantauan karakteristik fluida pada kedua jenis sumur tersebut menjadi aspek krusial dalam program pengelolaan reservoir dan pemantauan kontinuitas operasi fasilitas lapangan secara berkelanjutan [3].

Karakterisasi fluida formasi umumnya mengandalkan pengujian laboratorium konvensional melalui analisis kation-anion kuantitatif. Meskipun memberikan data akurat, metode tersebut membutuhkan tahapan preparasi yang cukup panjang dan biaya analisis yang relatif tinggi. Sebagai alternatif pendekatan, spektroskopi *Fourier Transform Infrared* (FTIR) menawarkan metode skrining awal (*rapid preliminary screening*) yang cepat, non-destruktif, serta hanya membutuhkan volume sampel yang minimal [4]. Spektroskopi ini bekerja berdasarkan interaksi radiasi inframerah dengan perubahan momen dipol vibrasi ikatan kimia, sehingga menghasilkan profil sidik jari spektral (*spectral fingerprint*) yang mencerminkan gugus fungsi senyawa di dalam sampel [5]. Penggunaan FTIR telah banyak diterapkan untuk karakterisasi endapan mineral pada sistem perpipaan maupun kuantifikasi campuran mineral geologi [6], [7].

Namun demikian, pengujian FTIR secara langsung pada sampel air formasi fase cair menghadapi tantangan analitis mendasar berupa dominasi serapan pelarut air (H_2O). Molekul air menghasilkan pita serapan yang sangat lebar dan intens pada rentang bilangan gelombang regangan *O–H* (~3300–3400 cm^{-1}) dan tekuk *H–O–H* (~1635 cm^{-1}) [8]. Intensitas serapan pelarut yang sangat kuat ini berpotensi mengaburkan (*masking*) atau tumpang tindih dengan puncak serapan spesies anorganik terlarut yang memiliki konsentrasi jauh lebih rendah, sehingga algoritma pencarian pustaka (*library search*) instrumen berisiko tinggi merefleksikan profil air dibanding konstituen terlarut secara spesifik [9]. Di sisi lain, variasi kondisi operasional permukaan tetap menuntut pemahaman mendalam atas perilaku fluida agar integritas sistem perpipaan tetap terjaga [10].

Di Lapangan IKP, evaluasi komparatif profil spektral FTIR antara air formasi sumur injeksi HAM-29A dan sumur produksi HAM-30 belum pernah dilaporkan secara sistematis. Rumusan masalah dalam penelitian ini berfokus pada identifikasi karakteristik spektrum FTIR kedua sumur, evaluasi derajat kemiripannya terhadap material acuan pembanding (akuades, silika, kalsium karbonat, dan larutan NaCl), serta analisis sejauh mana dominasi matriks pelarut air memengaruhi hasil korelasi fase cair. Sejalan dengan hal tersebut, tujuan penelitian ini adalah menganalisis komparasi spektrum FTIR air formasi sumur HAM-29A dan HAM-30 secara objektif guna mengevaluasi penerapan korelasi spektral inframerah sebagai metode penapisan awal (*rapid preliminary screening*) fluida panas bumi. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan gambaran awal mengenai tingkat homogenitas spektral fluida antarsumur sekaligus memperjelas batasan ilmiah metode FTIR fase cair sebelum dilanjutkan ke tahap analisis geokimia kuantitatif. Selanjutnya, keseluruhan naskah ini disusun secara sistematis ke dalam lima bagian utama, meliputi pendahuluan, metode penelitian dan pengujian laboratorium, pembahasan hasil analisis terintegrasi, simpulan, serta daftar pustaka.

2. METODE



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

A. Pengambilan dan Preservasi Sampel Air Formasi

Sampel air formasi (*brine*) diambil dari dua sumur di Lapangan IKP, yaitu sumur injeksi HAM-29A dan sumur produksi HAM-30 (pada administrasi pengujian laboratorium diberi kode sampel HCE-29A dan HCE-30). Pengambilan sampel dilakukan langsung pada katup uji (*sampling point*) kepala sumur menggunakan botol polietilena densitas tinggi (*High-Density Polyethylene*, HDPE) bervolume 1 liter yang telah dibilas terlebih dahulu dengan fluida sampel guna mencegah kontaminasi. Botol diisi penuh tanpa menyisakan ruang udara (*zero headspace*) untuk meminimalkan pelepasan gas terlarut (*degassing*) dan kontak oksidasi dengan udara luar. Selama proses pengiriman ke laboratorium, sampel dijaga pada suhu ruang terkontrol (25°C).

B. Pengujian Kimia Kuantitatif di Pusdiklat Migas

Sebelum dilakukan analisis spektroskopi inframerah, sampel air formasi diuji secara kuantitatif di Laboratorium Penguji Pusdiklat Migas Cepu untuk mengidentifikasi konsentrasi ion-ion utama pembentuk mineral terlarut. Pengujian parameter kation kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}) dilakukan menggunakan metode *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS). Parameter anion bikarbonat (HCO_3^-) ditentukan melalui metode titrimetri asam-basa. Sementara itu, kadar klorida (Cl^-) dan sulfat (SO_4^{2-}) diuji masing-masing mengacu pada metode standar APHA edisi ke-23 tahun 2017 bagian 4500-Cl^- dan 4500-SO_4^{2-}. Rincian hasil pengujian kuantitatif disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Kimia Kuantitatif Air Formasi (Pusdiklat Migas)

Parameter	Satuan	Hasil HAM-29A (Injeksi)	Hasil HAM-30 (Produksi)	Metode Pengujian
Kalsium (Ca^{2+})	mg/L	576	604	AAS
Magnesium (Mg^{2+})	mg/L	15,79	9,72	AAS
Bikarbonat (HCO_3^-)	mg/L	88	105	Titrimetri
Klorida (Cl^-)	mg/L	14,56	37,91	APHA 4500-Cl^-, 23rd Ed 2017
Sulfat (SO_4^{2-})	mg/L	46,4	13,7	APHA 4500-SO_4^{2-}, 23rd Ed 2017

C. Preparasi Bahan Acuan Pembanding FTIR

Sebagai pembanding profil spektral, disiapkan empat bahan acuan dengan penyesuaian fasa dan kelarutan:

- Aquades: Digunakan sebagai cairan dasar (*baseline fluid*) air murni untuk mengevaluasi kontribusi serapan intrinsik pelarut H_2O.
- Larutan Silika (SiO_2 0,1 M): Disiapkan menggunakan natrium metasilikat yang dilarutkan ke dalam aquades hingga konsentrasi analitik 0,1 M untuk merepresentasikan spesi silikat terlarut dan koloidal.
- Suspensi Kalsium Karbonat ($CaCO_3$ 0,1 M): Mengingat kelarutan $CaCO_3$ yang sangat rendah dalam air murni, bahan acuan dibuat sebagai suspensi halus dengan konsentrasi nominal 0,1 M yang dihomogenkan sesaat sebelum pengukuran untuk menyediakan vibrasi gugus karbonat (CO_3^{2-}).
- Larutan Klorida (NaCl 0,1 M): Menggunakan larutan garam NaCl 0,1 M untuk mengamati respons matriks salinitas terhadap struktur ikatan air, mengingat ion Cl^- bebas merupakan spesi monoatomik yang tidak aktif inframerah di wilayah *mid-IR*.

D. Prosedur Karakterisasi Spektroskopi FTIR

Pengujian inframerah dilakukan menggunakan spektrometer FTIR PerkinElmer Spectrum IR versi 10.6.2 yang dilengkapi dengan modul pantulan total teratenuasi (*Attenuated Total Reflectance*, ATR) berkristal ZnSe/Diamond:

1. Kalibrasi Latar Belakang (*Background*): Instrumen dikalibrasi terlebih dahulu dengan pengukuran udara kosong (*air background*) untuk mengeliminasi gangguan serapan uap air dan CO_2 atmosfer.
2. Pengukuran Sampel: Sebanyak 25 µL sampel cair (aquades, air formasi HAM-29A, air formasi HAM-30, serta bahan acuan) diteteskan secara bergantian di atas permukaan kristal ATR. Pengukuran dilakukan pada rentang bilangan gelombang 4000–400 cm^{-1} dengan resolusi 4 cm^{-1} dan akumulasi 16 kali pemindaian (*scan*). Kristal ATR dibersihkan secara menyeluruh menggunakan aquades dan etanol serta dikeringkan setiap kali pergantian sampel.
3. Koreksi Baseline: Spektrum transmitansi (%T) mentah dikoreksi *baseline*-nya secara otomatis melalui perangkat lunak instrumen.

E. Analisis Korelasi Spektral dan Evaluasi Terintegrasi

Data spektrum sampel air formasi dianalisis tingkat kemiripannya terhadap spektrum bahan acuan menggunakan algoritma pencarian pustaka (*library search*) berbasis korelasi silang titik-per-titik (*point-by-point cross-correlation*). Derajat korelasi dinyatakan dalam koefisien korelasi (r) dengan ambang batas klasifikasi:

- $r \geq 0{,}95$: Kemiripan profil spektral tinggi / kuat.
- $0{,}90 \leq r < 0{,}95$: Kemiripan profil spektral moderat.
- $r < 0{,}90$: Kemiripan profil spektral rendah

Hasil evaluasi spektral kualitatif ini kemudian diintegrasikan dengan data konsentrasi kuantitatif dari Pusdiklat Migas guna memberikan analisis karakteristik air formasi yang objektif, sekaligus mengidentifikasi batas pengaruh pelarut air terhadap serapan analit terlarut.

3. PEMBAHASAN

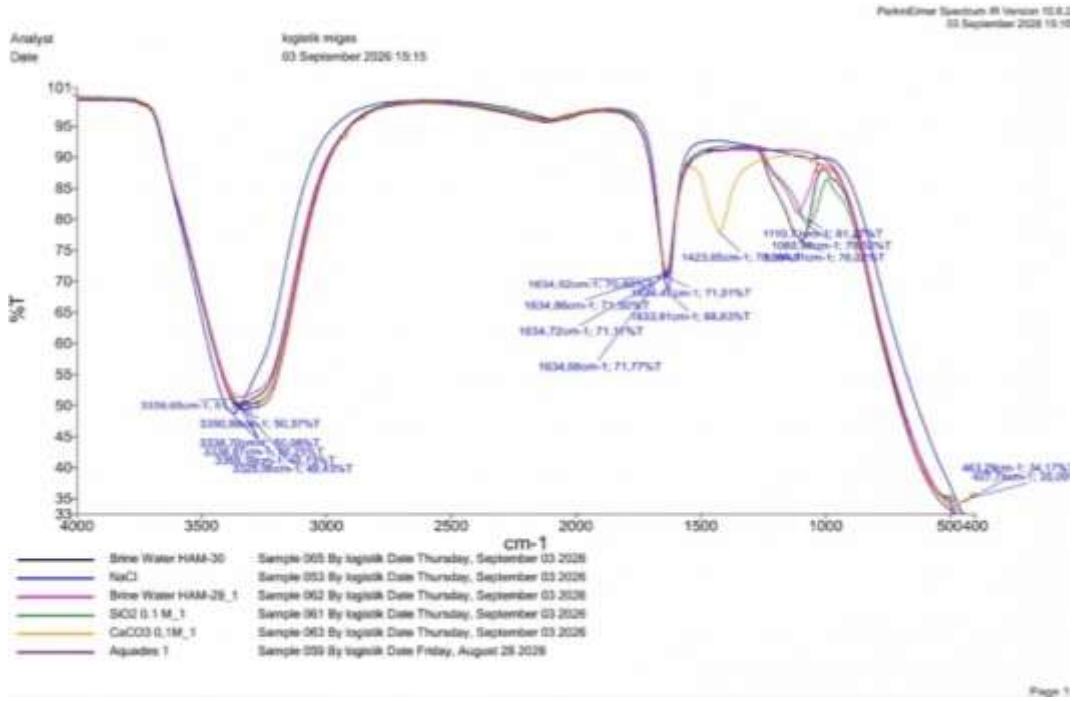
A. Hasil Korelasi Spektral

Hasil pencarian pustaka spektral (*search report*) untuk kedua sampel brine water terhadap keempat senyawa acuan disajikan pada Tabel 2. Seluruh pasangan pembanding menunjukkan status "Pass" pada uji korelasi, dengan nilai koefisien korelasi yang bervariasi antar senyawa acuan. Gambar 2 memperlihatkan overlay spektrum FTIR kedua sampel brine bersama keempat senyawa acuan. Secara visual, kelima kurva menunjukkan pola serapan yang serupa pada rentang bilangan gelombang tinggi (regangan O-H) dan menengah (tekuk H-O-H), dengan perbedaan yang lebih tampak pada rentang 1750-1000 cm^{-1} yang menjadi wilayah pembeda utama antar senyawa acuan.

Tabel 2. Hasil Korelasi Spektral (*Search Report*)

Sampel Uji	Dibandingkan Dengan	Koefisien Korelasi	Hasil
Brine Water HAM-29A	Aquades	0,979226	Pass
Brine Water HAM-29A	Brine Water HAM-30	0,988741	Pass
Brine Water HAM-29A	CaCO3	0,940774	Pass
Brine Water HAM-29A	NaCl	0,949827	Pass
Brine Water HAM-29A	SiO2	0,982944	Pass
Brine Water HAM-30	Aquades	0,967431	Pass

Sampel Uji	Dibandingkan Dengan	Koefisien Korelasi	Hasil
Brine Water HAM-30	Brine Water HAM-29A	0,988741	Pass
Brine Water HAM-30	CaCO3	0,921132	Pass
Brine Water HAM-30	NaCl	0,940328	Pass
Brine Water HAM-30	SiO2	0,980914	Pass



Gambar 2. Overlay Spektrum FTIR Brine Water HAM-29A, Brine Water HAM-30, dan Keempat Senyawa Acuan

B. Ringkasan Puncak Serapan Dominan

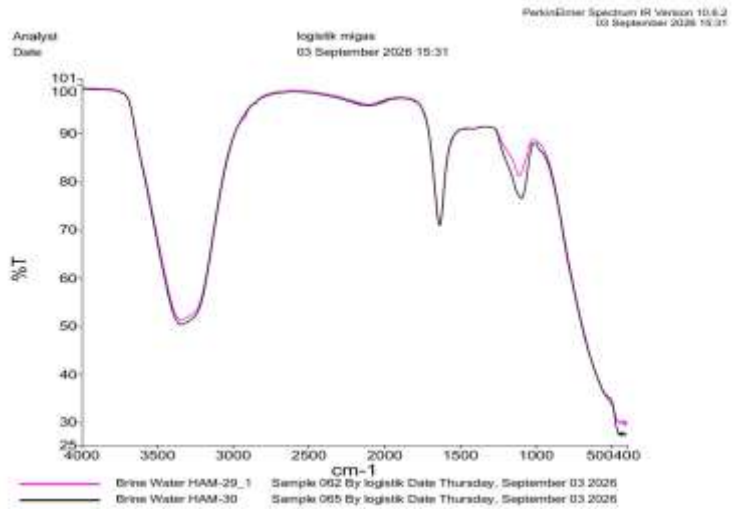
Tabel 3 merangkum puncak serapan dominan yang teridentifikasi dari overlay spektrum, beserta dugaan gugus fungsi awal berdasarkan pola umum yang dilaporkan dalam literatur FTIR untuk mineral karbonat dan silikat. Penetapan gugus fungsi ini bersifat dugaan awal dan memerlukan konfirmasi lebih lanjut, mengingat pita serapan karbonat, silikat, dan gugus M-O pada rentang bilangan gelombang rendah dapat saling tumpang tindih pada sampel campuran, sebagaimana juga dilaporkan pada karakterisasi kerak dengan FTIR pada jaringan pipa air [6],[7] dan pada metode kuantifikasi kalsit-kuarsa [8].

Tabel 3. Ringkasan Puncak Serapan Dominan dari Overlay Spektrum

Bilangan Gelombang (cm^{-1})	%T Terukur (Kisaran)	Dugaan Gugus Fungsi / Perlu Dikonfirmasi Studi Pustaka
3325 - 3369	48,7 - 51,3 %T	Pita lebar (*broad band*); vibrasi regangan O–H dari pelarut air (H_2O).
1633 - 1634	68,8 - 71,8 %T	Pita serapan tajam; vibrasi tekuk (*bending*) H–O–H pelarut air (H_2O).
1423,65	78,35 %T	Vibrasi regangan asimetris CO_3^{2-}
1065 - 1110	76,6 - 81,3 %T	Serapan daerah sidik jari; vibrasi regangan asimetris ikatan siloksan (Si–O–Si).
407 - 463	34,2 - 35,1 %T	Kemungkinan tekuk M-O (logam-oksigen), khas mineral karbonat/silikat

C. Perbandingan Langsung Spektrum Brine Water HAM-29A dan HAM-30

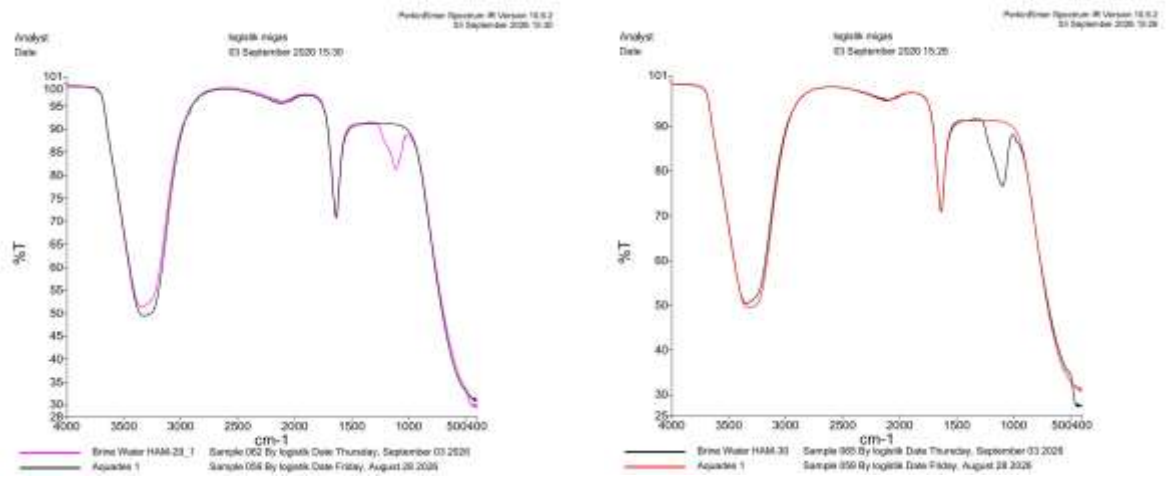
Perbandingan spektrum kedua sumur secara langsung menghasilkan koefisien korelasi sebesar 0,988741, yang merupakan nilai korelasi tertinggi di antara seluruh pasangan pembanding dalam penelitian ini (Tabel 2). Gambar 3 memperlihatkan pola serapan yang hampir berimpit secara sempurna di sepanjang rentang bilangan gelombang 4000–400 cm^{-1}. Tingginya nilai korelasi ini membuktikan adanya homogenitas karakteristik kimia dan sifat fisik spektral fluida yang tinggi antara sumur injeksi HAM-29A dan sumur produksi HAM-30. Kesamaan ini konsisten dengan kondisi fluida yang bersumber dari tatanan sistem reservoir panas bumi yang sama di Lapangan IKP. Namun demikian, korelasi spektral antarsumur ini semata-mata mencerminkan kemiripan profil optik fase cair secara makro, sehingga analisis spesifik terhadap perilaku masing-masing sumur tetap memerlukan parameter operasional lapangan dan data geokimia pendukung.



Gambar 3. Overlay Spektrum FTIR Brine Water HAM-29A terhadap Brine Water HAM-30 (Korelasi 0,988741)

D. Perbandingan terhadap Aquades sebagai Baseline

Perbandingan spektrum kedua sampel terhadap akuades menghasilkan koefisien korelasi yang sangat tinggi, yaitu 0,979226 untuk HAM-29A dan 0,967431 untuk HAM-30 (Gambar 4). Selisih koefisien korelasi yang kecil antara kedua sumur terhadap akuades lebih merefleksikan variasi ketebalan lapisan mikro (*path length*) saat penempatan tetesan sampel pada kristal ATR, bukan perbedaan mendasar komposisi air. Temuan ini menjadi evaluasi kritis bagi metode korelasi pustaka instrumen: karena matriks pelarut air menghasilkan sinyal serapan yang masif, algoritma pencarian korelasi silang otomatis cenderung bias terhadap profil pelarut (*solvent interference*). Oleh karena itu, pengujian langsung pada fase cair memiliki keterbatasan dalam membedakan analit berkonsentrasi rendah, sehingga penerapan teknik pemisahan serapan air (*water spectral subtraction*) atau analisis pada residu padat kering (*dry residue*) sangat disarankan untuk studi spektroskopi inframerah lanjutan.

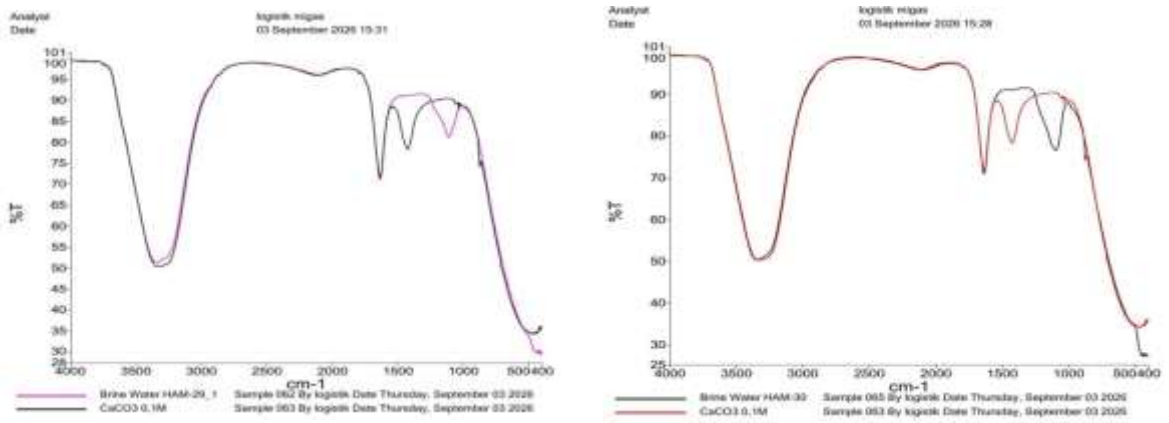


(a) Brine Water HAM-29A vs Aquades (b) Brine Water HAM-30 vs Aquades

Gambar 4. Perbandingan Spektrum (a) HAM-29A dan (b) HAM-30 terhadap Aquades (Korelasi 0,979226 dan 0,967431)

E. Perbandingan Korelasi terhadap $CaCO_3$

Korelasi spektral air formasi terhadap suspensi pembanding $CaCO_3$ 0,1 M menghasilkan nilai 0,940774 untuk HAM-29A dan 0,921132 untuk HAM-30 (kategori moderat). Nilai korelasi yang berada pada rentang 0,92–0,94 ini didukung oleh kemunculan serapan bahu lemah pada bilangan gelombang 1423,65 cm^{-1}, yang merupakan karakteristik moda vibrasi regangan asimetris gugus karbonat (ν_3 CO_3^{2-}). Kemunculan serapan ini selaras dengan hasil pengujian kimia kuantitatif dari Laboratorium Penguji Pusdiklat Migas (Tabel 1). Data kuantitatif menunjukkan bahwa kedua fluida kaya akan kation kalsium terlarut (576–604 mg/L) serta mengandung ion bikarbonat (88–105 mg/L). Keberadaan pasangan ion Ca^{2+} dan HCO_3^- ini memberikan konfirmasi analitis yang rasional terhadap keberadaan spesies karbonat terlarut yang terbaca pada FTIR.



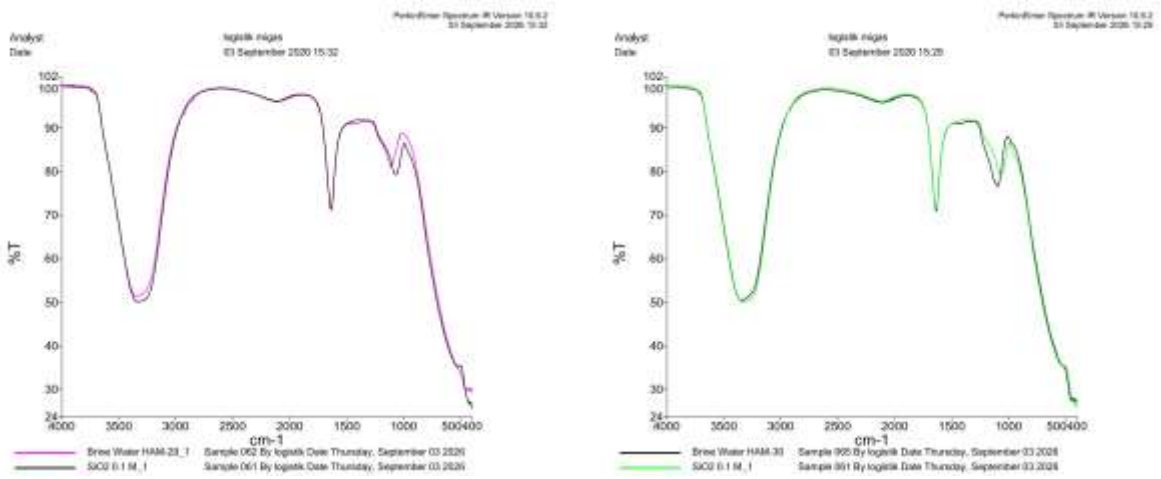
(a) Brine Water HAM-29A vs $CaCO_3$ (b) Brine Water HAM-30 vs $CaCO_3$

Gambar 5. Perbandingan Spektrum (a) HAM-29A dan (b) HAM-30 terhadap $CaCO_3$ (Korelasi 0,940774 dan 0,921132)

F. Perbandingan Korelasi terhadap SiO_2

Korelasi spektral terhadap larutan pembanding SiO_2 0,1 M menghasilkan nilai yang tinggi pada kedua sumur, yaitu 0,982944 untuk HAM-29A dan 0,980914 untuk HAM-30 (keduanya di atas ambang batas 0,95). Kurva *overlay* pada Gambar 6 memperlihatkan kemiripan profil serapan di wilayah bilangan gelombang 1065–1110 cm^{-1}, yang bersesuaian dengan moda vibrasi regangan ikatan siloksan (Si–O–Si). Keberadaan gugus ini mengindikasikan adanya

spesi silika terlarut atau koloid silikat di dalam air formasi. Meskipun demikian, tingginya nilai korelasi ($r > 0{,}98$) ini harus ditafsirkan secara kritis. Nilai korelasi sampel terhadap larutan acuan SiO_2 (0,982) hanya berselisih sangat tipis dengan nilai korelasinya terhadap aquades murni (0,979), yaitu selisih marjinal sebesar 0,0037 (< 0,4%). Hal ini menunjukkan bahwa kesesuaian kurva spektral sebagian besar tetap dipandu oleh serapan air sebagai pelarut pembawa pada larutan pembanding. Mengingat parameter silika terlarut (SiO_2) belum tercakup dalam sertifikat analisis kuantitatif Pusdiklat Migas saat ini, korelasi FTIR yang tinggi ini berfungsi sebagai indikasi awal keberadaan gugus silikat, namun belum dapat digunakan untuk menyimpulkan konsentrasi absolut silika tanpa uji spektrofotometri molibdat atau ICP-OES lanjutan.

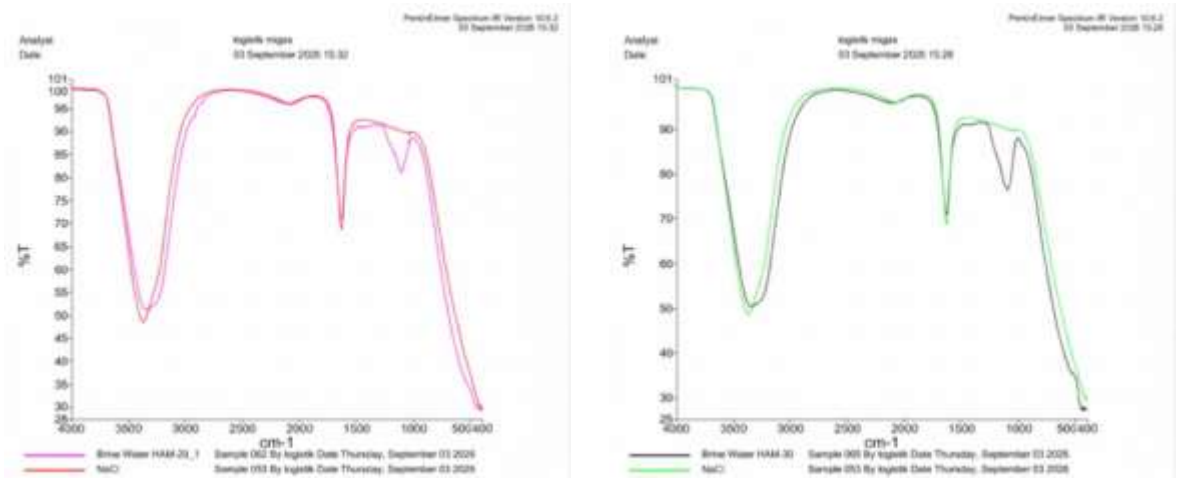


(a) Brine Water HAM-29A vs SiO_2 0,1 M (b) Brine Water HAM-30 vs SiO_2 0,1 M

Gambar 6. Perbandingan Spektrum (a) HAM-29A dan (b) HAM-30 terhadap SiO2 0,1 M (Korelasi 0,982944 dan 0,980914)

G. Perbandingan Korelasi terhadap NaCl

Korelasi spektral terhadap larutan pembanding NaCl 0,1 M mencatatkan nilai 0,949827 untuk HAM-29A dan 0,940328 untuk HAM-30 (kategori kemiripan moderat). Secara fundamental, dalam spektroskopi inframerah, ion klorida bebas (Cl^-) merupakan ion monoatomik yang tidak memiliki momen dipol vibrasi aktif pada daerah inframerah menengah (*mid-IR*, 4000–400 cm^{-1}). Ion Cl^- murni tidak memiliki pita absorpsi karakteristik tersendiri. Hal ini diperkuat oleh data uji kuantitatif laboratorium yang mencatat bahwa kadar klorida terlarut pada kedua sumur tergolong sangat rendah, yaitu hanya 14,56 mg/L pada HAM-29A dan 37,91 mg/L pada HAM-30. Oleh karena itu, deviasi spektral yang teramati pada Gambar 7 dan penetapan koefisien korelasi moderat terhadap larutan NaCl tidak merefleksikan serapan langsung ion Cl^-. Deviasi tersebut merupakan manifestasi sekunder dari interaksi hidrasi ionik, di mana keberadaan ion terlarut (Na^+ dan Cl^-) sedikit mendistorsi kekuatan jejaring ikatan hidrogen antarmolekul air di sekitarnya (*water structure perturbation*). Hal ini membuktikan bahwa metode FTIR fase cair merespons perubahan matriks fisik pelarut, bukan mendeteksi ion klorida secara terisolasi.

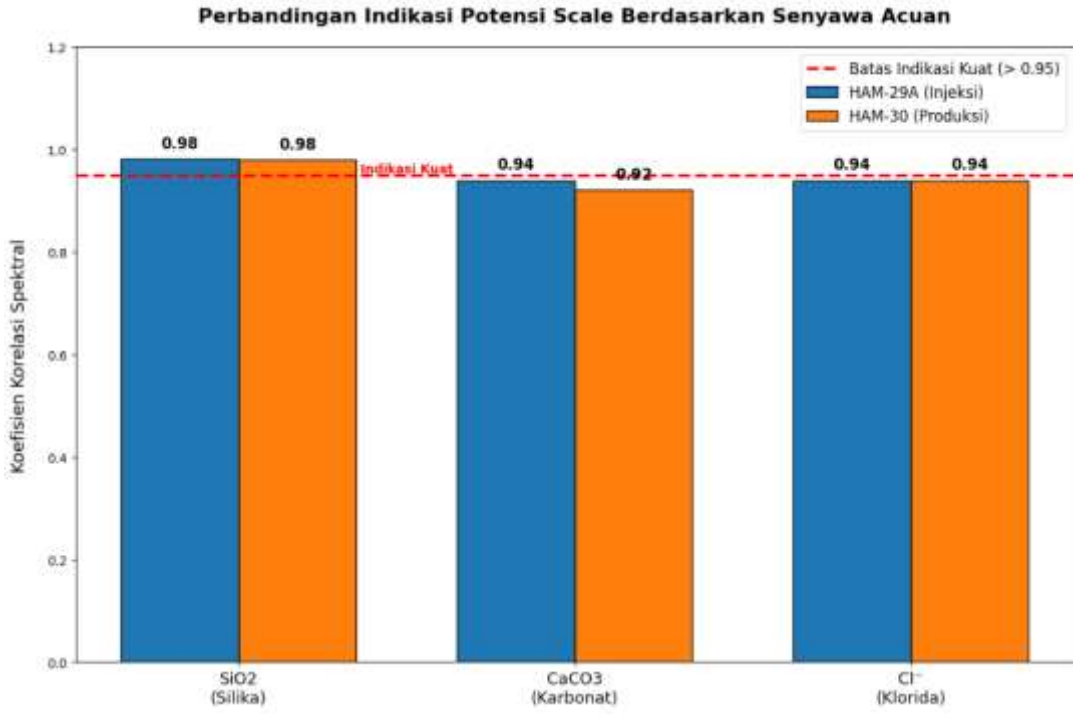


(a) Brine Water HAM-29A vs Cl^- (b) Brine Water HAM-30 vs Cl^-

Gambar 7. Perbandingan Spektrum (a) HAM-29A dan (b) HAM-30 terhadap Larutan NaCl (Korelasi 0,949827 dan 0,940328)

H. Sintesis Karakteristik Fluida dan Integrasi Data Kimia

Berdasarkan hasil analisis korelasi spektral FTIR dan data uji laboratorium kuantitatif, Gambar 8 adalah karakteristik air formasi Lapangan IKP. Merujuk pada Gambar 8, spektrum FTIR secara konsisten menunjukkan bahwa air formasi kedua sumur memiliki karakteristik gugus fungsi yang serupa dan didominasi oleh matriks air, dengan indikasi keberadaan gugus silikat (Si–O–Si) serta karbonat (CO_3^{2-}). Data laboratorium Pusdiklat Migas memvalidasi temuan ini dengan mengonfirmasi keberadaan komponen kalsium (576–604 mg/L) dan bikarbonat (88–105 mg/L), sekaligus mendeteksi ion sulfat terlarut (13,7–46,4 mg/L). Keberadaan sulfat ini menjadi temuan pelengkap yang berharga, mengingat senyawa sulfat belum tercakup dalam pengujian acuan pustaka FTIR pendahuluan.



Gambar 8. Diagram Batang Koefisien Korelasi Spektral Berdasarkan Senyawa Acuan.

Dari sudut pandang pengelolaan fluida panas bumi, pemantauan karakteristik kimia air formasi pada sumur produksi HAM-30 dan sumur injeksi HAM-29A merupakan langkah penting untuk menjaga kelancaran operasi fasilitas. Pada fasilitas permukaan menuju sumur injeksi, penurunan temperatur fluida secara teoretis dapat memengaruhi kesetimbangan kelarutan mineral silika amorf, sedangkan pada sumur produksi, penurunan tekanan (*flashing*) dapat memengaruhi kesetimbangan kesadahan karbonat. Namun demikian, penentuan langkah teknis operasional maupun pemilihan bahan kimia pencegah kerak (*scale inhibitor*) tidak dapat didasarkan semata-mata pada nilai korelasi FTIR fase cair ini. Korelasi spektral ini memposisikan FTIR sebagai alat penapis awal (*rapid screening tool*) yang memverifikasi stabilitas dan homogenitas profil fluida antarsumur secara cepat.

I. Keterbatasan Penelitian dan Rekomendasi Studi Lanjutan

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan metodologis yang perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan hasil spektral yang diperoleh. Pengujian langsung pada sampel fasa cair menimbulkan interferensi matriks pelarut air yang sangat dominan, sehingga pita serapan spesi anorganik terlarut dengan konsentrasi rendah sebagian besar tertutupi oleh respons molekul air. Di samping itu, korelasi spektral inframerah pada penelitian ini berfungsi murni sebagai metode penapisan awal secara kualitatif, sehingga nilai kemiripan spektrum tidak dapat diartikan secara langsung sebagai kadar kuantitatif spesi mineral maupun risiko pembentukan endapan di lapangan. Keterbatasan analitis lainnya mencakup belum tersedianya data kuantitatif silika terlarut pada sertifikat pengujian laboratorium saat ini, serta pengambilan sampel fluida yang terbatas pada satu titik waktu tanpa memperhitungkan variasi operasional secara temporal.

Sebagai tindak lanjut, penelitian mendatang disarankan untuk melengkapi skrining spektral FTIR dengan perhitungan indeks kejenuhan (Stiff and Davis, atau Langelier Saturation Index), maupun difraksi sinar-X (XRD) pada endapan kerak aktual apabila tersedia, sebelum kesimpulan ini digunakan sebagai dasar keputusan investasi mitigasi berskala besar. Pengambilan sampel secara berkala pada kedua sumur juga disarankan untuk mengonfirmasi konsistensi kecenderungan scaling yang teridentifikasi pada penelitian ini, sekaligus memperluas basis data pembanding untuk sumur-sumur lain di Lapangan IKP.

4. SIMPULAN

Analisis komparasi spektral FTIR terhadap air formasi Lapangan IKP menunjukkan tingkat homogenitas profil fluida yang sangat tinggi antara sumur injeksi HAM-29A dan sumur produksi HAM-30 dengan koefisien korelasi mencapai 0,988741. Meskipun koefisien korelasi terhadap larutan silika tergolong tinggi ($r > 0{,}98$) serta korelasi terhadap suspensi kalsium karbonat dan larutan NaCl berada pada kategori moderat (0,92 hingga 0,94), interpretasi spektrum fase cair ini didominasi secara signifikan oleh pita serapan fundamental pelarut air. Tingginya nilai korelasi silika sangat dipengaruhi oleh kemiripan kurva latar belakang pelarut air yang memiliki selisih marjinal terhadap akuades murni, sehingga tidak dapat serta-merta diartikan sebagai kuantitas massa silika maupun risiko pembentukan kerak secara langsung. Keberadaan serapan gugus karbonat pada bilangan gelombang 1423,65 cm^{-1} terkonfirmasi secara rasional oleh hasil uji laboratorium Pusdiklat Migas melalui konsentrasi kalsium (576–604 mg/L) dan bikarbonat (88–105 mg/L). Sementara itu, deviasi spektral pada larutan pembanding NaCl mencerminkan respons terhadap perturbasi struktur ikatan hidrogen air akibat pengaruh salinitas fluida, mengingat kadar klorida terlarut terukur relatif rendah (14,56–37,91 mg/L) dan ion klorida bebas tidak memiliki keaktifan pada spektroskopi inframerah menengah.

Dalam konteks pengelolaan keandalan aliran fluida (*flow assurance*), spektroskopi FTIR fase cair terbukti efektif dan efisien sebagai metode penapisan awal (*screening tool*) untuk

memantau konsistensi karakteristik dasar fluida antarsumur secara berkala. Namun, penetapan strategi mitigasi lapangan yang definitif—seperti penginjeksian bahan kimia pencegah kerak, pengondisian pH, maupun pengaturan temperatur injeksi—tidak dapat didasarkan semata-mata pada nilai korelasi spektral ini. Pengambilan keputusan teknis operasional harus diintegrasikan dengan data geokimia kuantitatif yang lengkap, mencakup penentuan kadar silika terlarut melalui analisis kuantitatif lanjutan, pemodelan indeks kejenuhan termodinamika fluida seperti indeks Stiff dan Davis atau Langelier, serta karakterisasi mineralogi endapan aktual menggunakan difraksi sinar-X guna memastikan langkah penanganan yang tepat dan berbasis data komprehensif.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] K. Nicholson, *Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1993.
[2] N. Andritsos and A. J. Karabelas, "Silica scale formation in geothermal power plants," *Geothermics*, vol. 32, no. 4–6, pp. 565–585, 2003.
[3] C. Wanjie, "Geochemical monitoring of reservoir response to production," in *Short Course on Exploration for Geothermal Resources*, Lake Naivasha, Kenya, 2012, pp. 1–11.
[4] B. H. Stuart, *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2004.
[5] P. R. Griffiths and J. A. de Haseth, *Fourier Transform Infrared Spectrometry*, 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007.
[6] P. Padilla-González, C. Bautista-Capetillo, A. Ruiz-Canales, J. González-Trinidad, H. E. Júnez-Ferreira, A. R. Contreras-Rodríguez, and C. O. Robles-Rovelo, "Characterization of scale deposits in a drinking water network in a semi-arid region," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 6, p. 3257, 2022.
[7] F. Bosch Reig, J. V. Gimeno Adelantado, and M. C. M. Moya Moreno, "FTIR quantitative analysis of calcium carbonate (calcite) and silica (quartz) mixtures using the constant ratio method: Application to geological samples," *Talanta*, vol. 58, no. 4, pp. 811–821, 2002.
[8] J. J. Max and C. Chapados, "Isotope effects in liquid water by infrared spectroscopy. III. H_2O and D_2O spectra from 6000 to 0 cm^{-1}," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 131, no. 18, p. 184505, 2009.
[9] M. R. Al-Degs, A. H. El-Sheikh, and J. A. Sweileh, "Simultaneous determination of components in aqueous mixtures using ATR-FTIR spectrometry and multivariate calibration," *Talanta*, vol. 75, no. 4, pp. 904–910, 2008.
[10] S. N. Ashraf and M. A. Kurniawan, "Mineral scaling in geothermal surface facilities: Mechanisms and mitigation strategies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 152, no. 2, pp. 111–125, 2021.

Daftar Simbol

%T	=	Transmitansi, %
cm^{-1}	=	Bilangan gelombang, sentimeter^{-1}
r	=	Koefisien korelasi spektral (*search report*)