

KARAKTERISTIK HIDROGEOKIMIA DAN ISOTOP AIR TANAH DI PESISIR KOTA BALIKPAPAN, KALIMANTAN TIMUR

IRSYADULHAQ^{1*}, ARIFIN², AGUS. M. RAMDHAN^{1,3}, RIMA RACHMAYANI⁴, IRWAN ISKANDAR^{1,5}, KEMALA WIJAYANTI¹

1. Program Studi Magister Teknik Air Tanah, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No.10, Bandung, Indonesia.
2. Program Studi Geografi, University College London, London WC1E 6BT, UK.
3. Program Studi Teknik Geologi, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No.10, Bandung, Indonesia.
4. Program Studi Oseanografi, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No.10, Bandung, Indonesia.
5. Program Studi Teknik Pertambangan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No.10, Bandung, Indonesia.

*Email: irsyadulhaq07@gmail.com

Sari – Daerah studi meliputi wilayah pesisir Kota Balikpapan yang memiliki jumlah penduduk sekitar 733 ribu, dengan persentase pemanfaatan air tanah untuk keperluan domestik diperkirakan sebesar 70%. Sebagai kota penyangga bagi Ibu Kota Nusantara (IKN), diperkirakan akan terjadi peningkatan jumlah penduduk di Balikpapan pada masa yang akan datang yang dapat berdampak terhadap meningkatnya jumlah pemanfaatan air tanah dan perubahan kualitas air tanah. Studi ini mengkaji karakteristik hidrogeokimia dan isotop air tanah, mengidentifikasi keberadaan dan penyebab fenomena intrusi air laut, serta merekonstruksi model konseptual hidrogeologi menggunakan data sampel air tanah, litologi, seismik, muka air tanah, dan pasang surut air laut. Hasil studi ini menunjukkan nilai *Total Dissolved Solids* (TDS) air tanah berkisar antara 141 – 11.023 mg/l dan pH sampel air tanah berkisar antara 4,49 hingga 9,29. Fasies air tanah terdiri dari *mixed cation/HCO₃⁻*, *Na⁺/Cl⁻*, *Na⁺/HCO₃⁻*, *Ca²⁺/HCO₃⁻*, dan *Na⁺/mixed anion*. Komposisi isotop ¹⁸O dan ²H mengindikasikan evolusi kimia air tanah melalui proses evaporasi dan interaksi air tanah dengan batuan. Indikasi intrusi air laut ditemukan pada satu sampel air tanah (titik M-2.1) pada akuifer di kedalaman 30 – 33 m. Intrusi air laut tersebut diperkirakan terjadi secara alamiah. Perhitungan rasio pencampuran menunjukkan komposisi air tanah tawar sekitar 60% dan air laut sebesar 40%. Adapun model konseptual hidrogeologi di daerah studi menunjukkan perselingan batupasir dan batulempung atau perselingan akuifer dengan akuitar, dimana akuifer pada kedalaman 30 hingga 33 m di titik M-2.1 diinterpretasi terhubung dengan laut.

Kata kunci: air tanah, Balikpapan, hidrogeokimia, isotop, intrusi air laut

Abstract - The study area encompasses the coastal region of Balikpapan City, which has a total population of approximately 733,000, with an estimated groundwater use for domestic purposes of about 70%. As the buffer zone for Nusantara (IKN), the future population of Balikpapan is expected to increase, which could result in intensified groundwater use as well as alteration in groundwater quality. This study examines hydrogeochemical and isotopic characteristics of groundwater, identifies the occurrence and causes of seawater intrusion, and reconstructs a conceptual hydrogeological model using data comprising groundwater samples, lithology, seismic, groundwater levels, and sea tides. The findings reveal that the Total Dissolved Solids (TDS) of groundwater range between 141 to 11,023 mg/l and the pH varies from 4.49 to 9.29. The groundwater facies consist of mixed cation/HCO₃⁻, Na⁺/Cl⁻, Na⁺/HCO₃⁻, Ca²⁺/HCO₃⁻, and Na⁺/mixed anion. The isotopic composition of ¹⁸O and ²H indicates the chemical evolution of groundwater through evaporation and water-rock interaction. Seawater intrusion is observed in one groundwater sample (point M-2.1) within an aquifer at depths between 30 and 33 m. It is interpreted to occur naturally. The mixing ratio computation shows a composition of approximately 60% freshwater and 40% seawater. The conceptual hydrogeological model of the study area suggests interbeds of sandstones and claystones or aquifers and aquitards, where the aquifer at depths of 30 to 33 m at point M-2.1 is interpreted to be connected to the sea.

Keywords: groundwater, Balikpapan, hydrogeochemistry, isotope, seawater intrusion

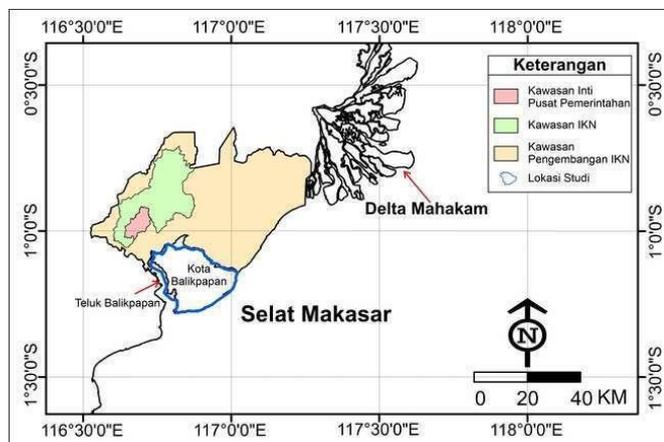
1. PENDAHULUAN

Sebagai salah satu sumber air tawar utama di dunia dengan persentase sebesar lebih kurang 30% (Shiklomanov dalam USGS, 2018), air tanah memegang peranan penting untuk memenuhi kebutuhan air bersih penduduk (Carrard dkk., 2019). Pemahaman terkait karakteristik hidrogeokimia dan isotop air tanah di sebagian

besar daerah pesisir di Indonesia masih sangat terbatas, termasuk di pesisir Kota Balikpapan (Gambar 1).

Balikpapan memiliki garis pantai sepanjang lebih kurang 79,6 km yang terbentang dari Kelurahan Kariangau hingga Kelurahan Teritip (Paramitha

dkk., 2021). Kota ini memiliki jumlah penduduk sebesar lebih kurang 733 ribu dengan jumlah kepala keluarga lebih kurang sebesar 250 ribu (Dinas Kependudukan dan Pencatatan Sipil Balikpapan, 2023). Data dari Perusahaan Umum Daerah (Perumda) Tirta Manuntung Balikpapan (2021) menunjukkan jumlah total pelanggan sekitar 100 ribu, dimana sebanyak sekitar 95 ribu termasuk kategori pemanfaatan untuk kebutuhan rumah tangga atau domestik masyarakat. Sumber air baku yang digunakan oleh perumda tersebut sebanyak lebih kurang 18% berasal dari air tanah (Perumda Tirta Manuntung Balikpapan, 2022). Berdasarkan data-data tersebut, diperkirakan sebanyak 70% kebutuhan air penduduk Balikpapan dipenuhi dari air tanah.



Gambar 1. Peta lokasi Kota Balikpapan dan Ibu Kota Nusantara (IKN). Batas area IKN berdasarkan Undang-Undang Nomor 21 Tahun 2023.

Sebagai kota penyangga untuk Ibu Kota Nusantara (IKN), diperkirakan akan terjadi peningkatan jumlah penduduk yang cukup pesat di Balikpapan seiring dengan pemindahan ibukota Indonesia ke IKN yang dapat berdampak terhadap peningkatan jumlah pemanfaatan air tanah dan perubahan kualitas air tanah. Oleh karena itu, pemahaman terhadap karakteristik hidrogeokimia dan isotop air tanah di daerah pesisir Balikpapan sangat diperlukan, antara lain untuk menganalisis fenomena intrusi air laut yang merupakan salah satu permasalahan utama di daerah pesisir di dunia (Abdalla, 2008).

Jiao dan Post (2019) mendefinisikan intrusi air laut sebagai fenomena meningkatnya salinitas air tanah, baik akibat kontak langsung maupun kontak

tidak langsung dengan laut. Hal ini dapat terjadi karena proses aliran dimana air tanah digantikan atau mengalami pencampuran dengan air laut. Peningkatan jumlah penggunaan air tanah di daerah pesisir serta dampak perubahan iklim, seperti kenaikan muka air laut dan perubahan curah hujan, merupakan beberapa faktor utama penyebab terjadinya intrusi air laut (Werner, 2010).

Hasil studi sebelumnya dengan menggunakan metode geolistrik menunjukkan indikasi intrusi air laut di Balikpapan, tepatnya di Kelurahan Manggar, yang ditandai dengan anomali nilai resistivitas rendah sebesar satu hingga delapan ohm.meter (Sastrawan dan Arisawadi, 2021). Septiardi dkk. (2019) juga melakukan studi intrusi air laut di Balikpapan dengan menganalisis parameter salinitas, konduktivitas, *Total Dissolve Solids* (TDS), dan pH yang diukur dari sumur bor. Hasil dari studi tersebut menunjukkan terdapat satu sumur di daerah Manggar dengan indikasi intrusi air laut.

Studi ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik hidrogeokimia dan isotop air tanah di pesisir Kota Balikpapan serta mengidentifikasi keberadaan dan penyebab fenomena intrusi air laut. Analisis dalam studi ini meliputi karakteristik kimia air tanah, fasies air tanah, komposisi isotop stabil ^{18}O dan ^2H , identifikasi intrusi air laut, dan rekonstruksi model konseptual hidrogeologi.

2. DATA DAN METODOLOGI

Data yang digunakan dalam studi ini dibagi menjadi dua, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer terdiri dari data parameter kimia air tanah dan air laut, data isotop stabil oksigen-18 (^{18}O) dan deuterium (^2H) sampel air tanah, air hujan, dan air laut, serta data muka air tanah. Adapun data sekunder terdiri dari data konstruksi sumur, litologi, data lintasan seismik, serta data pasang surut air laut.

Data konstruksi sumur diperoleh dari laporan hasil pengeboran dan konstruksi sumur dari Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Data lintasan seismik diperoleh dari Pusat Data dan Informasi (Pusdatin) Kementerian ESDM. Adapun data pasang surut air laut diperoleh dari Badan Informasi Geospasial (BIG, 2024).

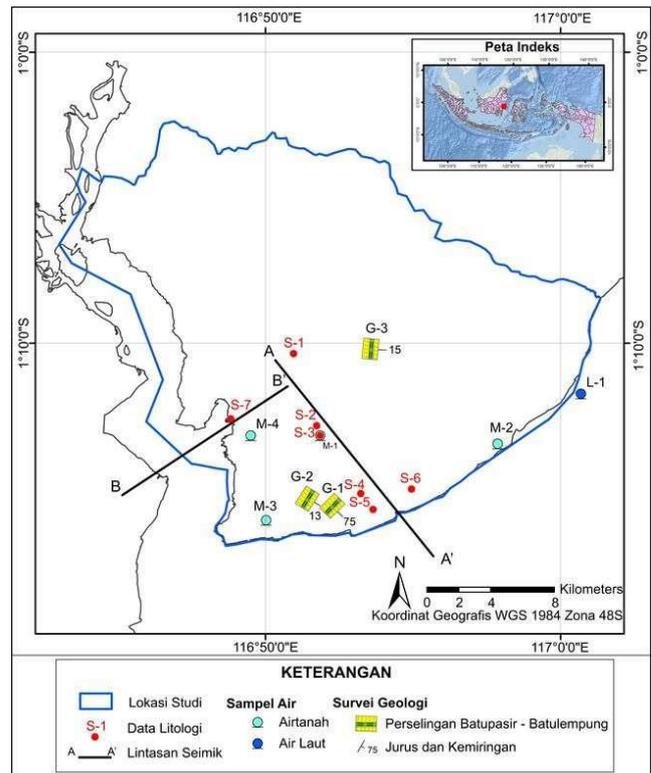
Secara umum, metodologi yang digunakan dalam studi ini meliputi; pengumpulan data primer, analisis parameter kimia dan isotop stabil ¹⁸O dan ²H, analisis intrusi air laut, serta pembuatan model Konseptual.

2.1 Pengumpulan Data Primer

Dalam studi ini, pengumpulan data primer meliputi pengambilan data lapangan dan uji parameter kimia serta isotop. Pengambilan data lapangan dilakukan melalui survei geologi dan hidrogeologi. Survei geologi dilakukan untuk mengumpulkan data geologi berupa litologi serta kemiringan dan jurus lapisan. Survei geologi dilakukan untuk mengkonfirmasi data litologi bawah permukaan dan kemiringan lapisan dari lintasan seismik yang tersedia.

Survei hidrogeologi dilakukan untuk mengumpulkan data muka air tanah (MAT) dan sampel air tanah, air hujan, dan air laut. Selain itu, survei hidrogeologi juga dilakukan untuk mengumpulkan data parameter kimia air tanah dari sumur-sumur dengan kedalaman hingga lebih kurang 150 meter. Jumlah titik pengambilan data MAT, sampel air tanah, dan parameter kimia air tanah sebanyak enam titik. Adapun sampel air laut dan air hujan masing-masing diambil pada satu titik dan tiga titik. Lokasi survei geologi, hidrogeologi dan lintasan seismik dapat dilihat pada Gambar 2. Adapun dokumentasi kegiatan survei geologi dan hidrogeologi dapat dilihat pada Gambar 3.

Uji parameter kimia di lapangan dilakukan terhadap sampel air tanah dan air laut. Adapun uji parameter kimia yang dilakukan di lapangan terdiri dari pengukuran temperatur, pH, dan TDS. Sampel air yang diperoleh dari survei hidrogeologi selanjutnya dianalisis di Laboratorium Hidrogeologi dan Hidrogeokimia ITB untuk memperoleh nilai parameter hidrogeokimia serta isotop ¹⁸O dan ²H. Parameter hidrogeokimia tersebut terdiri dari ion utama (Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, dan CO₃²⁻), nitrat, florin, dan boron. Metode yang digunakan untuk uji bikarbonat dan karbonat adalah metode titrasi, sedangkan metode untuk ion lainnya menggunakan *Ion Chromatography* (IC). Adapun uji komposisi isotop ¹⁸O dan ²H menggunakan *isotopic water analyzer*.



Gambar 2. Lokasi survei geologi, hidrogeologi, lintasan seismik dan data litologi.



Gambar 3. Contoh dokumentasi lapangan: (A) survei geologi, (B) pengambilan sampel air hujan, (C) pengambilan sampel air tanah, (D) preparasi sampel air di lapangan, dan (E) uji parameter kimia di lapangan.

2.2 Analisis Parameter Kimia dan Isotop

Analisis parameter kimia dilakukan terhadap sampel air di lapangan dan di laboratorium. Berdasarkan parameter TDS, Freeze dan Cherry (1979) mengklasifikasikan salinitas air menjadi empat kelompok seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Nilai parameter TDS dan pH air tanah dibandingkan dengan standar baku mutu air untuk

keperluan higiene dan sanitasi berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan (Permenkes) Republik Indonesia (RI) Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah No. 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan. Tabel 2 menunjukkan standar baku mutu air untuk kedua parameter tersebut.

Tabel 1. Klasifikasi salinitas air berdasarkan nilai TDS (Freeze dan Cherry, 1979).

Kelompok	TDS (mg/l)
Fresh	0 – 1.000
Brackish	1.000 – 10.000
Saline	10.000 – 100.000
Brine	>100.000

Tabel 2. Standar baku mutu air untuk parameter TDS dan pH berdasarkan Permenkes No. 2 Tahun 2023.

Parameter	Baku Mutu	Satuan
TDS	<300	mg/l
pH	6,5 – 8,5	-

Analisis isotop dalam studi ini dilakukan menggunakan plot silang antara ¹⁸O dan ²H. Plot silang tersebut dapat digunakan untuk memperkirakan evolusi kimia air tanah (Freeze and Cherry, 1979). Plot silang ¹⁸O dan ²H dilakukan terhadap sampel air hujan, air tanah, dan air laut. Pada plot silang tersebut, digambarkan garis regresi linier data sampel air hujan yang merepresentasikan garis air meteorik lokal. Data isotop ¹⁸O dan ²H dari sampel air laut digunakan untuk menggambarkan karakteristik isotop air laut secara umum di pesisir Kota Balikpapan. Selanjutnya, pada plot silang tersebut juga dibuat garis regresi linier data sampel air tanah yang kemudian dibandingkan dengan garis air meteorik lokal dan komposisi isotop air laut.

2.3 Analisis Intrusi Air Laut

Dalam studi ini, analisis intrusi air laut dilakukan berdasarkan perbandingan antara komposisi kimia dan isotop air tanah dengan air laut. Sampel air tanah dengan nilai TDS lebih dari 10.000 mg/L (kategori asin) merepresentasikan intrusi air laut. Selanjutnya, digunakan plot silang ¹⁸O dan ion Cl⁻ serta plot silang ²H dan ion Cl⁻ untuk menghitung rasio pencampuran (*mixing ratio*) antara air tanah tawar dan air laut. Dari plot silang tersebut, indikasi intrusi air laut ditunjukkan oleh plot data

isotop dan konsentrasi ion klorida yang mendekati komposisi air laut.

Rasio pencampuran antara air tanah tawar dan air laut dihitung menggunakan persamaan *two-end member* berdasarkan Clark (2015). Asumsi yang digunakan yaitu komposisi air tanah hanya berasal dari air meteorik (air tanah tawar) dan air laut. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$f_{gw} + f_{sw} = 1 \quad (1)$$

$$\delta^{18}O_s = f_{gw}\delta^{18}O_{gw} + f_{sw}\delta^{18}O_{sw} \quad (2)$$

$$\delta^2H_s = f_{gw}\delta^2H_{gw} + f_{sw}\delta^2H_{sw} \quad (3)$$

Dimana: f= fraksi, gw = air tanah, sw = air laut, dan s = sampel air tanah hasil uji laboratorium. Perhitungan rasio pencampuran berdasarkan plot silang antara komposisi ion Cl⁻ dengan nilai isotop ¹⁸O dan ²H. Persamaan regresi hasil plot silang antara ion Cl⁻ dengan nilai isotop ¹⁸O dan ²H digunakan untuk mengestimasi nilai $\delta^{18}O_{gw}$ dan δ^2H_{gw} pada Persamaan 2 dan 3.

2.4 Model Konseptual Hidrogeologi

Model konseptual hidrogeologi daerah studi direkonstruksi berdasarkan data geologi dan hidrogeologi di permukaan dan bawah permukaan yang terdiri dari: litologi, jurus dan kemiringan lapisan, lintasan seismik, dan parameter kimia serta isotop air tanah. Model konseptual dalam studi ini digambarkan secara dua dimensi dalam bentuk penampang hidrogeologi.

3. HASIL

3.1 Parameter Kimia Air Tanah dan Air Laut

Hasil pengukuran parameter kimia air tanah dan air laut di lapangan dapat dilihat pada Tabel 3. Nilai parameter TDS sampel air tanah menunjukkan rentang nilai 141 mg/l (tawar) hingga 11.023 mg/l (asin). Berdasarkan klasifikasi dari Freeze dan Cherry (1979), terdapat dua sampel air tanah yang termasuk golongan air payau (*brackish*, warna hijau pada Tabel 3) dan satu sampel air tanah yang asin (warna kuning pada Tabel 3), dan tiga sampel yang termasuk golongan air tawar (*fresh*). Berdasarkan Permenkes No. 2 Tahun 2023, tiga sampel air tanah memiliki nilai TDS melebihi standar baku mutu parameter air untuk keperluan higiene dan sanitasi (tanda * pada Tabel 3).

Tabel 3. Hasil pengukuran kimia air tanah dan air laut di lapangan.

Kode	Kedalaman Akuifer (m)	Suhu (°C)	pH	TDS (mg/l)
M-1	38-112	29,2	7,02	141
M-2	30-33	29,2	9,05*	11.023*
M-2	87-90	29,5	9,29*	1.016*
M-2	132-135	29,3	8,92*	1.759*
M-3	70-80	30,6	4,49*	172
M-4	123-126	29,2	6,5	192
L-1	-	27,9	8,25	31.582*

Keterangan: kode M = sampel air tanah, kode L = sampel air laut, warna kuning = air asin, warna hijau = air payau, * = melebihi nilai baku mutu

Hasil uji sampel air tanah dan air laut untuk parameter pH menunjukkan rentang nilai 4,49 hingga 9,29. Berdasarkan Permenkes No. 2 Tahun 2023, terdapat empat sampel air tanah yang memiliki nilai pH yang tidak memenuhi standar baku mutu parameter air untuk keperluan higiene dan sanitasi (tanda * pada Tabel 3).

Hasil uji komposisi kimia air di laboratorium ditunjukkan pada Tabel 4. Pada studi ini, fasies air tanah ditentukan berdasarkan komposisi ion utama.

Hasil uji kation utama di laboratorium menunjukkan konsentrasi ion Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, dan K⁺ dari sampel air tanah secara berurutan berada pada rentang nilai 6,32 – 2.950,22 mg/l, 4,93 – 348,4 mg/l, 0,6 – 565,76 mg/l, dan 1,5 – 134,42 mg/l. Adapun nilai rata-rata masing-masing kation tersebut yaitu sebesar 634,59 mg/l, 67,8 mg/l, 98,63 mg/l, dan 27,7 mg/l.

Hasil uji anion utama menunjukkan konsentrasi ion Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, dan CO₃²⁻ dari sampel air tanah secara berurutan berada pada rentang nilai 1,9 – 6.340,17 mg/l, 0 – 550,02 mg/l, 27,41 – 1.113,25 mg/l, dan 0 – 71,16 mg/l. Nilai rata-rata untuk masing-masing anion tersebut yaitu 1.102,69 mg/l, 95,92 mg/l, 313,53 mg/l, dan 23 mg/l.

Tabel 4. Hasil uji kimia air di laboratorium.

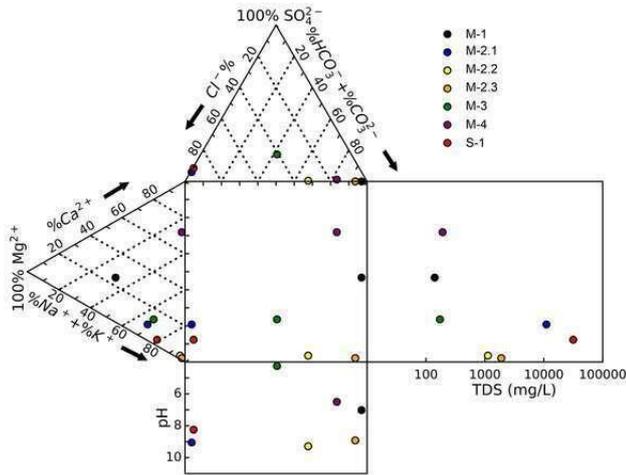
Ion (mg/l)	L-1	M-1	M-2.1	M-2.2	M-2.3	M-4	M-5
Na ⁺	9.114,84	6,32	2.950,22	302,26	497,86	38,21	12,64
K ⁺	334,76	7,73	134,42	7,66	11,36	1,56	3,47
Ca ²⁺	357,16	7,5	348,4	5,51	4,93	7	33,5
Mg ²⁺	1.106,18	8,1	565,76	5,41	5,7	6,2	0,6
NH ₄ ⁺	0	3,44	100,62	7,2	0	0	0
Cl ⁻	18.202,7	1,9	6.340,17	171,64	53,22	35,1	14,1
SO ₄ ²⁻	2.308,7	0	550,02	3,59	0,35	20,19	1,4
HCO ₃ ⁻	156,16	104,92	27,41	448,17	1.113,25	62	125,4
CO ₃ ²⁻	0	0	3,83	63	71,16	0	0
NO ₃ ⁻	0,42	0,40	0,43	0,41	0,5	2,15	0,17
F ⁻	0,17	0,28	0,17	0	0,59	0,06	0,3
Br ⁻	1,36	0	1,78	0,88	0,61	0	0

M-2.1 = Sampel dari titik M-2 dengan kedalaman saringan 30 – 33 m

M-2.2 = Sampel dari titik M-2 dengan kedalaman saringan 87 – 90 m

M-2.3 = Sampel dari titik M-2 dengan kedalaman saringan 132 – 135 m

Fasies air tanah ditentukan berdasarkan komposisi kation dan anion yang lebih besar dari 50% dan diplot pada Diagram Durov (Gambar 4). Sampel air laut memiliki fasies Na⁺/Cl⁻. Adapun sampel air tanah dalam studi ini memiliki fasies *mixed cation*/HCO₃⁻, Na⁺/Cl⁻, Na⁺/HCO₃⁻, Ca²⁺/HCO₃⁻, dan Na⁺/*mixed anion*. Adapun fasies dari air tanah dan air laut pada lokasi studi secara lengkap dirangkum pada Tabel 5.



Gambar 4. Diagram Durov data sampel air tanah dan air laut di daerah studi. Diagram ini dibuat menggunakan program WQChartPy (Yang dkk., 2022).

Tabel 5. Rangkuman fasies dari air tanah (kode M) dan air laut (kode L).

Kode	Fasies	
	Kation	Anion
M-1	Mixed	HCO ₃ ⁻
M-2.1	Na ⁺	Cl ⁻
M-2.2	Na ⁺	HCO ₃ ⁻
M-2.3	Na ⁺	HCO ₃ ⁻
M-4	Na ⁺	Mixed
M-5	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻
L-1	Na ⁺	Cl ⁻

3.2 Parameter Isotop ¹⁸O dan ²H

Hasil uji isotop stabil ¹⁸O dan ²H sampel air tanah secara berurutan menunjukkan nilai berkisar antara -7,68 ‰ hingga -4,58 ‰ dan -46,39 ‰ hingga -27,44 ‰ dengan nilai rata-rata masing-masing sebesar -6,67 ‰ dan -40,98 ‰. Hasil uji isotop ¹⁸O dan ²H sampel air laut secara berurutan menunjukkan nilai sebesar -0,66‰ dan -4,26‰. Adapun hasil uji isotop ¹⁸O dan ²H sampel air hujan secara berurutan menunjukkan nilai berkisar antara -7,53‰ hingga -5,33‰ dan -42,05‰ hingga -26,03‰ dengan nilai rata-rata masing-masing sebesar -6,38 ‰ dan -33,73 ‰. Rangkuman data hasil uji isotop secara keseluruhan ditunjukkan pada Tabel 6.

Hasil plot silang ¹⁸O dan ²H dari sampel air tanah, air hujan, dan air laut menunjukkan bahwa regresi linier sampel air tanah hampir sejajar dan hanya menunjukkan sedikit perbedaan gradien garis dengan regresi linier dari sampel air hujan yang

merepresentasikan garis air meteorik lokal (Gambar 5). Nilai isotop ¹⁸O dan ²H dari air tanah secara berurutan mengalami pergeseran menjadi lebih berat sekitar +0,15 hingga +0,75 dan +4,44 hingga +1,41 dari garis regresi linier air meteorik lokal yang mengindikasikan evolusi karakteristik isotop air tanah melalui proses evaporasi dan interaksi air tanah dengan batuan (*water-rock interaction*). Meskipun demikian, evolusi air tanah belum terjadi secara signifikan dan masih menunjukkan karakteristik air meteorik. Hal ini didukung oleh nilai TDS yang relatif rendah dan fasies anion yang didominasi ion bikarbonat (HCO₃⁻), kecuali untuk sampel air tanah di titik M-2.1 yang memiliki nilai TDS tinggi (kategori asin).

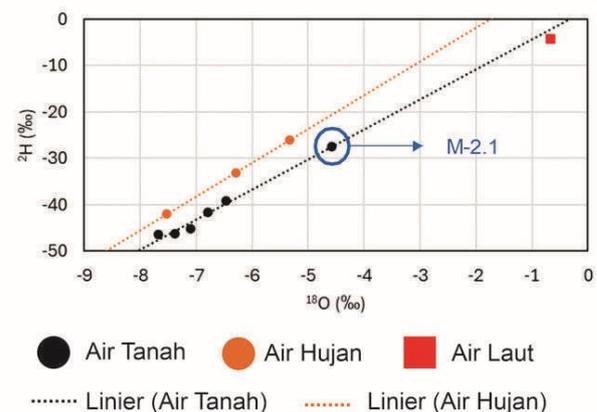
Tabel 6. Hasil uji isotop stabil (¹⁸O dan ²H)

Kode	¹⁸ O (‰)	² H (‰)
M-1	-7.68	-46.39
M-2.1	-4.58	-27.44
M-2.2	-6.46	-39.14
M-2.3	-6.79	-41.57
M-3	-7.39	-46.20
M-4	-7.10	-45.16
L-1	-0.66	-4.26
R-1	-5.33	-26.03
R-2	-7.53	-42.05
R-3	-6.29	-33.11

Kode M = sampel air tanah

Kode L = sampel air laut

Kode R = sampel air hujan



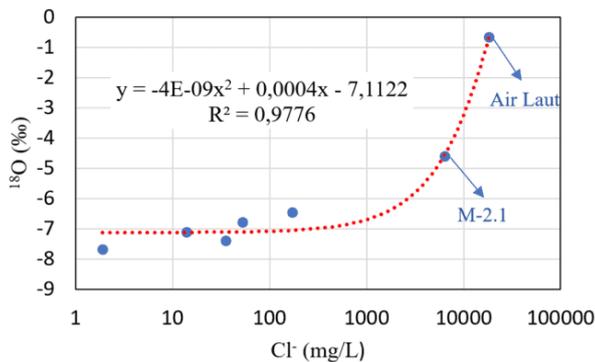
Gambar 5. Plot komposisi isotop ¹⁸O dan ²H dari air tanah, air hujan, dan air laut.

4. DISKUSI

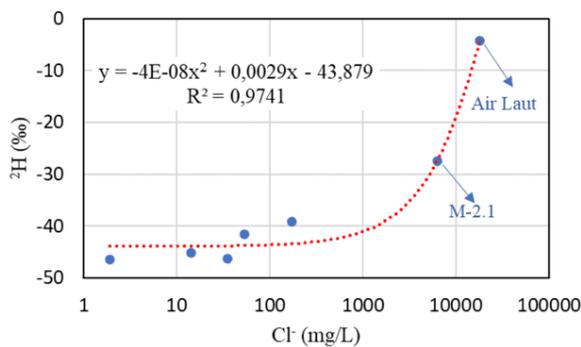
4.1 Keberadaan Intrusi Air Laut

Nilai parameter TDS, komposisi kimia serta isotop air tanah pada sampel di titik M-2.1 menunjukkan kondisi intrusi air laut. Gambar 6 dan 7 secara

berurutan menunjukkan plot silang komposisi ion klorida (Cl⁻) terhadap isotop ¹⁸O dan ²H.



Gambar 6. Plot silang komposisi ¹⁸O dan ion Cl⁻ dari sampel air tanah dan air laut.



Gambar 7. Plot silang komposisi ²H dan ion Cl⁻ dari sampel air tanah dan air laut.

Dari kedua gambar tersebut, fraksi atau persentase air tanah tawar dan air laut pada sampel air tanah di titik M-2.1 dapat dihitung menggunakan Persamaan 1 hingga 3. Parameter $\delta^{18}O_{sw}$ diperoleh dari nilai isotop air laut, sedangkan parameter $\delta^{18}O_{gw}$ diperoleh dari garis regresi pada Gambar 6 dan 7 dengan mempertimbangkan nilai isotop ¹⁸O dan ²H air tanah tawar yang terendah dan tertinggi sebagai faktor ketidakpastian perhitungan.

Tabel 7 menunjukkan hasil perhitungan rasio pencampuran (*mixing ratio*) antara air tanah tawar dan air laut pada sampel air tanah M-2.1. Dapat dilihat bahwa hasil perhitungan menggunakan isotop ¹⁸O dan ²H menghasilkan nilai yang cukup konsisten, yaitu komposisi air tanah tawar sebesar lebih kurang 60% dan air laut sebesar lebih kurang 40%.

Tabel 7. Rasio pencampuran air tanah dan air laut dari sampel air tanah di titik M-2.1.

Isotop	Rasio Pencampuran di M-2.1 (%)	
	Air Tanah Tawar	Air Laut
¹⁸ O	61±0,4	39±0,4
² H	59±0,5	41±0,5

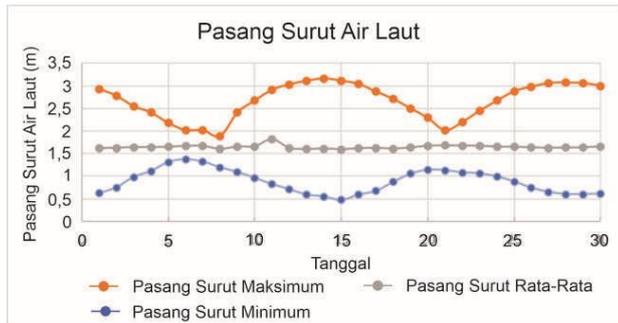
4.2 Faktor Penyebab Intrusi Air Laut

Data kimia dan isotop air tanah, dalam hal ini pada titik M-2.1, menunjukkan keberadaan fenomena intrusi air laut pada titik ini. Posisi saringan atau *screen* pada sumur pantau di titik M-2.1 berada pada kedalaman yang relatif dangkal, yaitu 30 hingga 33 m di bawah permukaan tanah. Secara umum, sumur produksi air tanah oleh industri yang umumnya memiliki debit pemompaan yang besar mengambil air tanah pada akuifer di kedalaman lebih dari 40 m. Sumur produksi air tanah milik industri umumnya di-*grouting* atau disemen pada kedalaman hingga 40 m. Dengan demikian, diperkirakan pengambilan air tanah oleh penduduk untuk kebutuhan rumah tangga atau domestik menjadi satu-satunya faktor antropogenik yang mungkin menyebabkan intrusi air laut tersebut.

Sumur M-2.1 berada di daerah Manggar dimana studi sebelumnya (Sastrawan dan Arisalwadi, 2021; Septiardi dkk., 2019) melaporkan indikasi keberadaan intrusi air laut berdasarkan data geolistrik dan salinitas air tanah. Hasil studi ini mengkonfirmasi hal tersebut. Adapun fenomena intrusi air laut pada akuifer di kedalaman 30 – 33 m di titik M-2.1 diperkirakan terjadi secara alamiah dengan asumsi bahwa pengambilan air tanah oleh penduduk (dalam hal ini melalui sumur gali) tidak menyebabkan penurunan muka air tanah secara signifikan. Hal ini didukung oleh data muka air tanah pada titik M-2.1, dimana kedalaman muka air tanah pada titik ini adalah sebesar 1,1 m di bawah muka tanah. Kedalaman muka air tanah tersebut tidak menunjukkan pengambilan air tanah yang masif atau berlebihan. Selain itu, rekonstruksi model hidrogeologi (dibahas pada subbab berikutnya) juga menunjukkan bahwa akuifer pada titik M-2.1 diperkirakan terhubung dengan laut.

Pasang surut air laut dapat meningkatkan pencampuran air tanah dan air laut (Jiao dan Post, 2019). Data pasang surut muka air laut menunjukkan nilai rata-rata sebesar lebih kurang 1,6 m, dengan nilai maksimum sebesar 3,16 m dan

minimum sebesar 0,47 m (Gambar 8). Hal ini mengindikasikan pengaruh pasang surut air laut terhadap intrusi air laut yang cukup besar karena elevasi permukaan tanah di daerah pesisir di Manggar hanya berkisar hingga 30 m. Model konseptual hidrogeologi pada subbab berikutnya menggambarkan pengaruh pasang surut muka air laut terhadap potensi intrusi air laut di titik M-2.1.



Gambar 8. Grafik pasang surut air laut selama Bulan Desember 2023 (BIG, 2024).

Selain itu, di sebelah utara titik M-2.1 terdapat Sungai Manggar yang berjarak lebih kurang 600 m dari titik ini, dimana nilai TDS sungai ini lebih kurang sebesar 31800 mg/l. Hal ini mengindikasikan pergerakan air laut yang dapat mencapai jarak yang cukup jauh ke darat.

4.3 Model Konseptual Hidrogeologi

Model konseptual hidrogeologi di daerah studi, terutama terkait fenomena intrusi air laut, direkonstruksi dari data geologi dan hidrogeologi yang tersedia serta hasil analisis karakteristik hidrogeokimia dan isotop. Kondisi geologi di lokasi studi diinterpretasi berdasarkan korelasi penampang seismik dengan data litologi. Survei geologi permukaan dilakukan untuk mengkonfirmasi kondisi geologi bawah permukaan. Survei geologi dilakukan pada tiga stasiun geologi untuk memperoleh informasi litologi serta jurus dan kemiringan lapisan (Gambar 2).

Secara umum, litologi di daerah studi terdiri dari perselingan antara batupasir dan batulempung dengan sisipan batubara. Batupasir yang ditemukan di lapangan memiliki warna cokelat hingga abu-abu, ukuran butir pasir halus – pasir sedang, matriks berukuran lempung, terdiri dari mineral kuarsa dan litik. Batulempung diamati memiliki ciri-ciri warna abu-abu dan memiliki

ukuran butir lempung. Adapun kemiringan lapisan pada bagian selatan daerah studi berarah tenggara sedangkan pada bagian tengah daerah studi berarah timur. Litologi tersebut diinterpretasikan termasuk ke dalam kelompok Formasi Balikpapan yang berumur Miosen Tengah – Pliosen.

Rekonstruksi kondisi hidrogeologi bawah permukaan dilakukan berdasarkan interpretasi data seismik yang dikalibrasi dengan data log litologi dan data geologi permukaan. Interpretasi seismik dilakukan pada dua lintasan seismik yang tersedia (Gambar 9 hingga 10). Hasil interpretasi seismik Lintasan A-A' (Gambar 9) menunjukkan litologi bawah permukaan yang terdiri dari perselingan batupasir (sebagai akuifer) dan batulempung (sebagai akuitar) dengan kemiringan lapisan berarah ke tenggara.

Kondisi hidrogeologi bawah permukaan dari hasil interpretasi seismik Lintasan B-B' (Gambar 10) memperlihatkan perlapisan batupasir (sebagai akuifer) dengan batulempung (sebagai akuitar). Interpretasi perlapisan di bawah permukaan memperlihatkan kenampakan struktur antiklin pada lintasan ini.

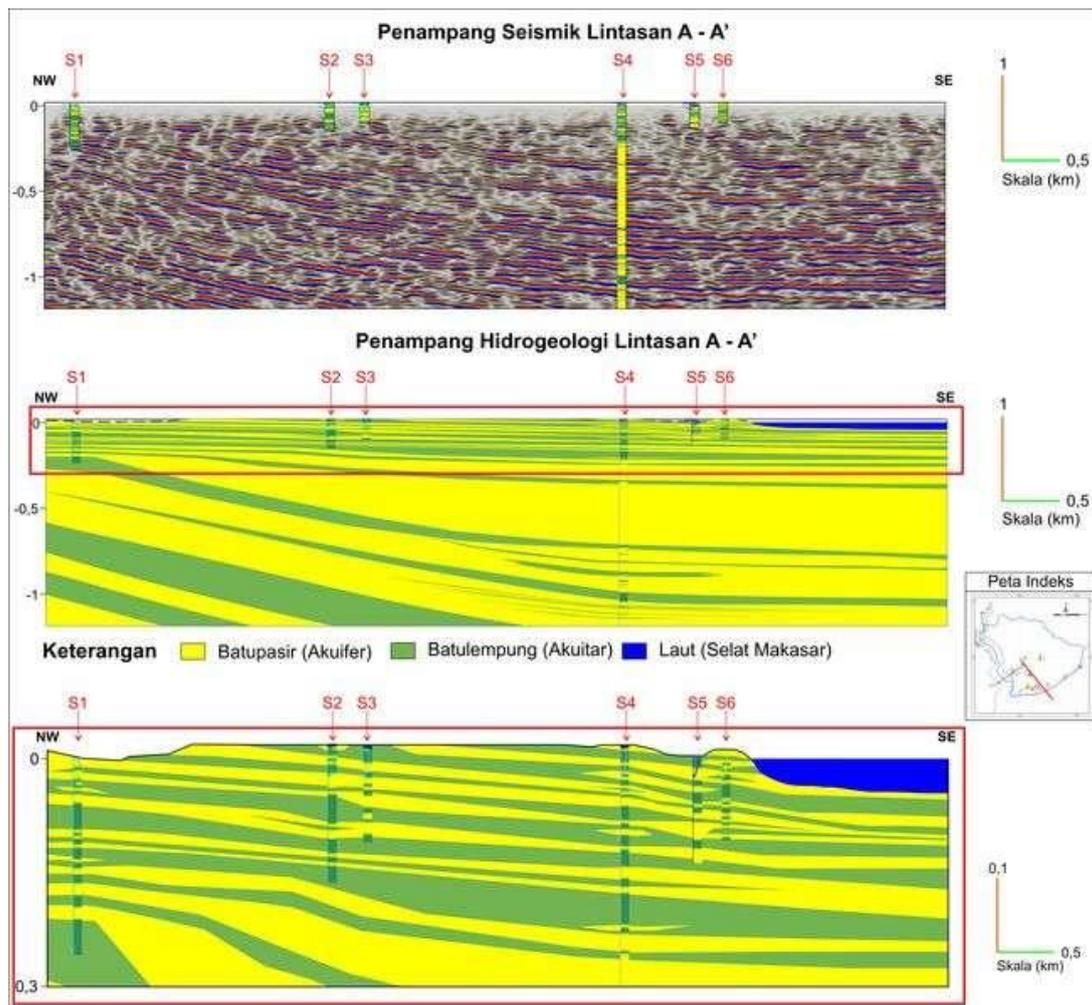
Secara regional, pada Miosen Tengah – Pliosen terjadi inversi yang menyebabkan pengangkatan regional pada Cekungan Kutai sehingga menyebabkan terjadinya regresi akibat peningkatan suplai sedimen dari arah barat menuju timur (Moss dan Chambers, 1999). Adapun kondisi lingkungan saat Formasi Balikpapan terendapkan adalah beriklim hangat dan lembab yang cocok untuk pertumbuhan tanaman terestrial (Jamaluddin dkk., 2023)

Pengukuran muka air tanah (MAT) dilakukan di titik pengambilan sampel air tanah, namun kontur muka air tanah dan pola aliran air tanah tidak direkonstruksi karena jumlah sampel yang terbatas dan berasal dari sumur dengan beberapa lapisan akuifer yang disadap (*commingled*). Hasil pengukuran MAT dirangkum pada Tabel 8. Adapun model konseptual intrusi air laut pada titik M-2.1 ditunjukkan pada Gambar 11.

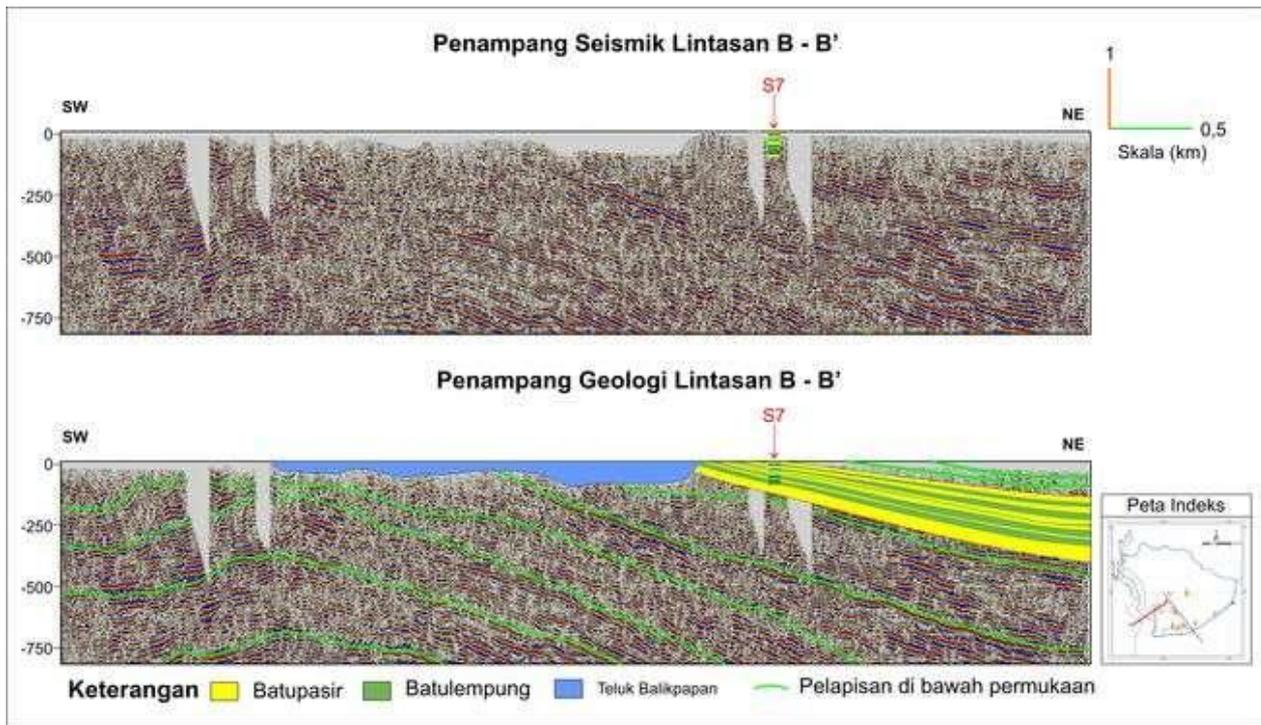
Tabel 8. Hasil pengukuran MAT

Kode	Kedalaman MAT (m)	Kedalaman Akuifer (m)
M-1	-	-
M-2	1,1	30-33
M-2	10,78	87-90
M-2	8,29	132-135
M-3	19,58	-
M-4	4,5	123 - 126

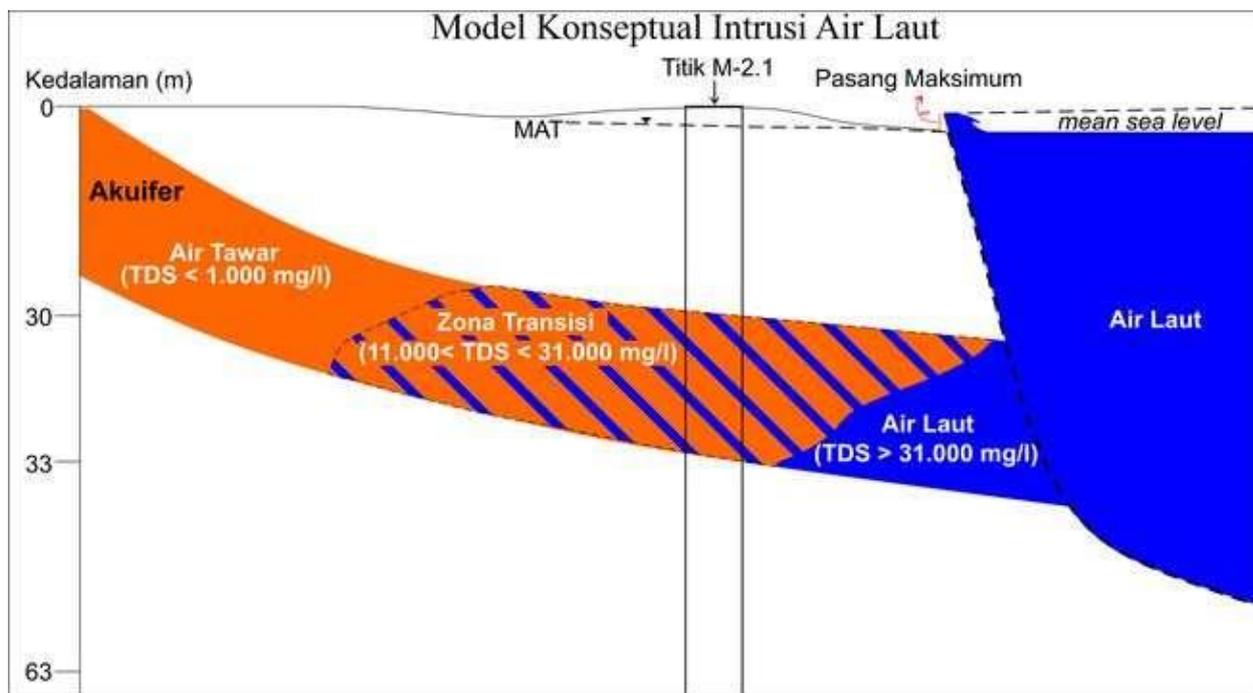
m = meter



Gambar 9. Kondisi hidrogeologi bawah permukaan hasil interpretasi seismik lintasan A-A' yang dikonfirmasi dengan data litologi (S1 – S6); batupasir sebagai akuifer, sedangkan batulempung sebagai akuitar.



Gambar 10. Kondisi hidrogeologi bawah permukaan hasil interpretasi seismik lintasan B-B' yang dikonfirmasi dengan data litologi (S7); batupasir sebagai akuifer, sedangkan batulempung sebagai akuitar.



Gambar 11. Model konseptual intrusi air tanah pada titik M-2.1.

5. KESIMPULAN

Kesimpulan dari studi ini adalah sebagai berikut :

- Hasil analisis parameter kimia air tanah di lapangan menunjukkan nilai TDS berkisar antara 141 mg/l – 11.023 mg/l. Adapun pH sampel air tanah berkisar antara 4,49 hingga 9,29.
- Fasies air tanah terdiri dari *mixed cation/HCO₃⁻*, *Na⁺/Cl⁻*, *Na⁺/HCO₃⁻*, *Ca²⁺/HCO₃⁻*, dan *Na⁺/mixed anion*.
- Hasil plot silang isotop ¹⁸O dan ²H air tanah mengindikasikan evolusi kimia air tanah melalui proses evaporasi dan interaksi air tanah dengan batuan.

- Analisis hidrogeokimia dan isotop stabil menunjukkan indikasi intrusi air laut pada sampel air tanah di titik M-2.1 pada akuifer di kedalaman 30 – 33 meter, dimana intrusi air laut tersebut diperkirakan terjadi secara natural atau alamiah.
- Rasio pencampuran (*mixing ratio*) pada sampel air tanah di titik M-2.1 menunjukkan komposisi air tanah tawar sebesar lebih kurang 60% dan air laut sebesar lebih kurang 40%.
- Model konseptual hidrogeologi dua dimensi di daerah studi menunjukkan perselingan batupasir dan batulempung atau perselingan akuifer dengan akuitar, dimana akuifer pada kedalaman 30 hingga 33 m pada titik M-2.1 diinterpretasi terhubung dengan laut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini merupakan bagian dari proyek berjudul “Korea-Indonesia Marine Technology Cooperation Research Center (20220512)” dan “Establishing Integrated Ocean Fisheries Technology Training Center and Enhancing Capacity Building in Indonesia (PG54000)” yang didanai oleh Ministry of Oceans and Fisheries, Korea.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdalla, A. (2008): *The Student Movement and National Politics in Egypt, 1923-1973*, American Univ in Cairo Press, 308.
- BIG (2024): Data Pasang Surut Air Laut, retrieved March 21, 2024, from internet: <https://srgi.big.go.id/tides>.
- Carrard, N., Foster, T., dan Willetts, J. (2019): Groundwater as a Source of Drinking Water in Southeast Asia and the Pacific: A Multi-Country Review of Current Reliance and Resource Concerns, *Water*, **11**(8), 1605. <https://doi.org/10.3390/w11081605>
- Clark, I. (2015): *Groundwater Geochemistry and Isotopes*, CRC Press, Boca Raton, 456. <https://doi.org/10.1201/b18347>
- Dinas Kependudukan dan Pencatatan Sipil Balikpapan (2023): Data Jumlah Penduduk Balikpapan, retrieved March 25, 2024, from internet: <https://capil.balikipapan.go.id/disdukcapil/statistik>.
- Freeze, R. A., dan Cherry, J. A. (1979):

Groundwater, Prentice-Hall, 638.

- Jamaluddin, Wagreich, M., Gier, S., Schöpfer, K., dan Battu, D. P. (2023): Sedimentary Environments and Paleoclimate Control of the Middle Miocene Balikpapan Group, Lower Kutai Basin (Indonesia): Implications for Evaluation of the Hydrocarbon Potential, *Minerals*, **13**(10), 1259. <https://doi.org/10.3390/min13101259>
- Jiao, J., dan Post, V. (2019): *Coastal Hydrogeology*, Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/9781139344142>
- Moss, S. J., dan Chambers, J. L. C. (1999): Tertiary facies architecture in the Kutai Basin, Kalimantan, Indonesia, *Journal of Asian Earth Sciences*, **17**(1), 157–181. [https://doi.org/10.1016/S0743-9547\(98\)00035-X](https://doi.org/10.1016/S0743-9547(98)00035-X)
- Paramitha, M. K. A., Setyasih, I., dan Anwar, Y. (2021): Analisis Perubahan Garis Pantai Menggunakan Metode Digital Shoreline Analysis System (DSAS) dari Pantai Tanjung Sembilang Sampai Pantai Melawai, retrieved May 22, 2024 from internet: <http://repository.unmul.ac.id/handle/123456789/23329>.
- Perumda Tirta Manuntung Balikpapan (2021): Jumlah Pelanggan Perumda Tirta Manuntung Balikpapan Menurut Kelompok dan Golongan Pelanggan yang Aktif per Agustus 2021, retrieved March 25, 2024, from internet: <https://www.tirtamanuntung.co.id/profil/jumlah-pelanggan/81>.
- Perumda Tirta Manuntung Balikpapan (2022): Sumber Air Baku, retrieved March 25, 2024, from internet: <https://www.tirtamanuntung.co.id/infrastruktur/sumber-air-baku/88>.
- Sastrawan, F., dan Arisalwadi, M. (2021): Studi Awal Indikasi Intrusi Air Laut Menggunakan Metode Gelostrik Tahanan Jenis, *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, **18**, 164. <https://doi.org/10.20527/flux.v18i2.9077>
- Septiardi, M. E., Mislani, M., dan Natalisanto, A. I. (2019): STUDI PEMANFAATAN AIR TANAH DAN POTENSI INTRUSI AIR

LAUT DI DAERAH PESISIR KOTA
BALIKPAPAN, *GEOSAINS KUTAI
BASIN*, **2**(1).
<https://doi.org/10.30872/geofisunmul.v2i1.334>

USGS (2018): Where is Earth's Water?, retrieved
March 25, 2024, from internet:
[https://www.usgs.gov/special-
topics/water-science-
school/science/where-earths-
water#overviewfiles/320/where-earths-](https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/where-earths-water#overviewfiles/320/where-earths-)

water.html.

Werner, A. D. (2010): A review of seawater
intrusion and its management in Australia,
Hydrogeology Journal, **18**(1), 281–285.
[https://doi.org/10.1007/s10040-009-0465-
8](https://doi.org/10.1007/s10040-009-0465-8)

Yang, J., Liu, H., Tang, Z., Peeters, L., dan Ye, M.
(2022): Visualization of Aqueous
Geochemical Data Using Python and
WQChartPy, *Groundwater*, **60**.
<https://doi.org/10.1111/gwat.13185>