

Analisis Isotop ^{18}O dan ^2H untuk Identifikasi Asal Air Tanah Pesisir di Cekungan Air Tanah Ketapang, Madura ***^{18}O and ^2H Isotopic Analysis for Identification of Coastal Groundwater Origins in the Ketapang Groundwater Basin, Madura***Erik Febriarta¹, Sutanto Trijuni Putro², Ajeng Larasati³¹Fakultas Teknologi Sumber Daya Alam, Institut Teknologi Yogyakarta
Jalan Janti Km 4 Gedongkuning, Bantul, D.I. Yogyakarta 55198 - Indonesia²Prodi Pendidikan Geografi, Fakultas Ilmu Sosial, Universitas Negeri Yogyakarta
Kampus UNY Karangmalang, D.I. Yogyakarta 55281 - Indonesia³Palwa Karya, Jalan Damai No.7, Prujakan, Yogyakarta 55581- Indonesia

e-mail: e.febriarta@gmail.com

Naskah diterima 24 Februari 2020, selesai direvisi 11 Maret 2022, dan disetujui 4 April 2022

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi asal usul air tanah di Cekungan Air Tanah (CAT) Ketapang yang berada di sepanjang pesisir utara Pulau Madura berdasarkan analisis isotop stabil (^{18}O dan ^2H). CAT Ketapang juga berada di kawasan karst Madura yang memiliki komponen geologi unik serta berfungsi sebagai pengatur alami tata air. Sebanyak 11 contoh air tanah yang dianalisis bersumber dari air sumur dangkal dan sumur dalam. Hasil penelitian menunjukkan beberapa karakter sistem imbuhan air tanah di CAT Ketapang. Komposisi isotop ^{18}O dan ^2H masih mengikuti garis air hujan lokal, akan tetapi nilai $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ telah mengalami proses pengayaan (*enrichment*) atau pencampuran antara air tawar (hujan) dengan air tanah. Air tanah di dataran aluvial hingga pesisir utara Madura menunjukkan keterkaitan dengan sistem imbuhan air tanah bersifat regional dari perbukitan batugamping. Air tanah pada perbukitan karst Madura menunjukkan keterkaitan dengan sistem imbuhan bersifat lokal yang merupakan bagian dari sistem imbuhan perbukitan batugamping bagian tengah pulau Madura yang mengalir seragam ke arah utara.

Kata kunci: air tanah karst, Cekungan Air Tanah Ketapang, isotop stabil, Madura**ABSTRACT**

This research was designed to identify the origin of water in the Ketapang Groundwater Basin, lying along the northern coast of Madura Island, based on the stable isotope analysis results (^{18}O and ^2H). The groundwater basin is also part of the Madura karst area, which has unique geological components and acts as a natural regulator of the water system. Eleven (11) groundwater samples were collected from shallow and deep wells. The results showed several characters of the groundwater recharge system in the basin. Although its ^{18}O and ^2H isotopic compositions still corresponded to the local meteoric water line, the $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values signified enrichment or a mixture of fresh water (rain) and groundwater. Groundwater distributed from alluvial plains to the island's northern coast correlates with the regional groundwater recharge system of the limestone hills. Meanwhile, the groundwater in the karst hills links to a local recharge system belonging to a larger system in the limestone hills that flows uniformly from the middle of the island to the north.

Keywords: Groundwater Basin Ketapang, karst groundwater, Madura, stable isotopes**PENDAHULUAN**

Pesisir Madura sebelah utara merupakan bagian dari zona antiklinorium Rembang-Madura yang berarah barat-timur sebagai hasil gejala tek-

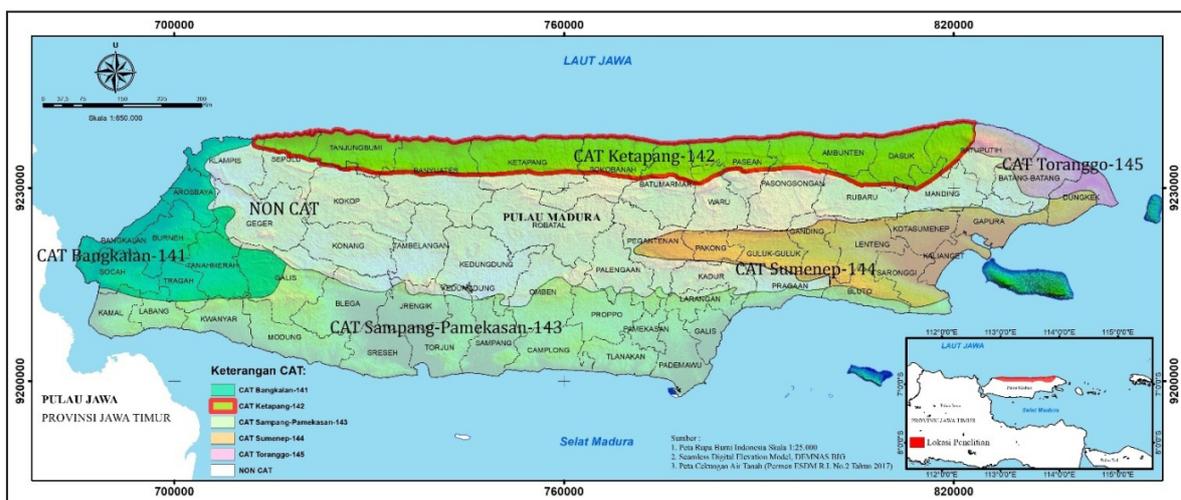
tonik Tersier akhir yang membentuk perbukitan dengan elevasi tidak begitu tinggi, rata-rata kurang dari 500 m (Van Bemmelen, 1970). Arah memanjang perbukitan tersebut mengikuti

sumbu-sumbu lipatan yang umumnya berarah barat-timur. Zona Rembang ke arah timur merupakan zona patahan antara paparan karbonat di utara (Laut Jawa) dengan cekungan yang lebih dalam di selatan (Cekungan Kendeng). Hasil dari tenaga lipatan tersebut mengakibatkan terangkatnya karbonat dari dasar laut. Litologi penyusunnya adalah campuran antara karbonat laut dangkal dengan klastika, serta lempung dan napal laut dalam. Berdasarkan kondisi geologi tersebut, zona antiklinorium Rembang-Madura memiliki akuifer pada formasi batuan yang terbentuk akibat pelarutan air pada batugamping atau dolomit dan memiliki rombakan material batuan pembentuk material aluvium di daerah pesisir (Sukardi, 1992; Marfai dr, 2019; Febriarta dan Larasati, 2020).

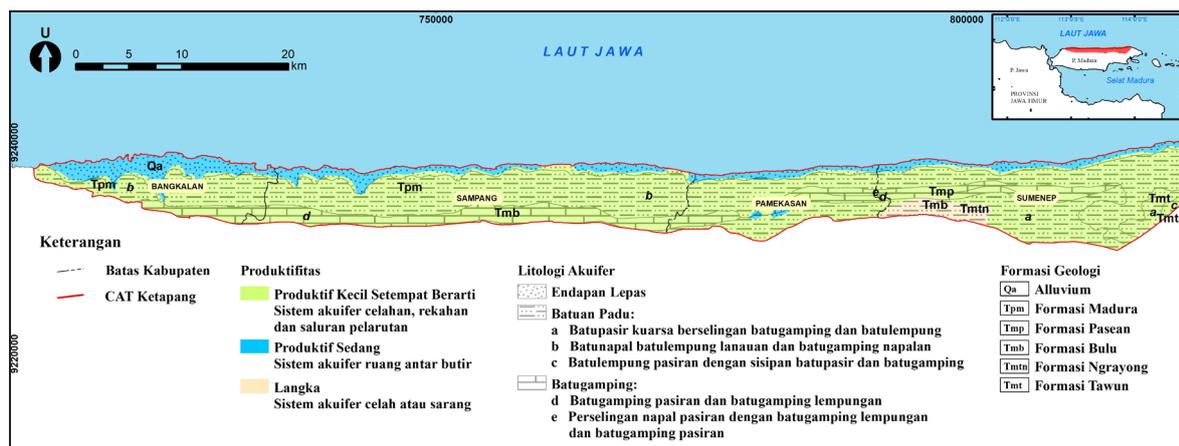
Ketersediaan air tanah berada di antara celah batuan yang memiliki produktivitas air tanah terbatas, seperti pada litologi batugamping di pesisir Madura. Pesisir Madura bagian utara secara meteorologis memiliki curah hujan rendah dan mengalami kekeringan selama tujuh bulan dari April hingga November (Marfai dr., 2019; Febriarta dr., 2020). Kondisi tersebut mengakibatkan berkurangnya debit air tanah pada musim kering. Cekungan Air Tanah (CAT) Ketapang berada di pesisir Pulau Madura bagian utara (ESDM, 2018), yang membentang dari dataran hingga perbukitan batugamping dengan

ketinggian 0–100 m (Gambar 1). CAT Ketapang bagian utara berbatasan langsung dengan Laut Jawa, sedangkan bagian selatan (perbukitan batugamping bagian tengah) merupakan Kawasan Non-CAT dengan formasi penyusun batuan batugamping (Formasi Ngrayong dan Formasi Tawun) (Gambar 2). Formasi tersebut tersusun atas batupasir kuarsa berselingan batugamping dan batulempung, sehingga dalam konteks ketersediaan air tanah, CAT Ketapang merupakan daerah peralihan antara kelulusan langka hingga rendah (ESDM, 2014; ESDM, 2018). Menurut Peraturan Menteri ESDM No. 17 Tahun 2012 (Permen ESDM, 2012; ESDM, 2018, Marfai dr, 2019), CAT Ketapang berada di Kawasan Bentang Alam Karst (KBAK) Madura.

KBAK dicirikan oleh bentang alam yang terbentuk akibat pelarutan air pada batugamping dan dolomit yang menunjukkan bentuk eksokarst dan endokarst (Permen ESDM, 2012). Imbuhan air tanahnya bersumber dari hujan (meteorologis), sehingga memiliki kuantitas sangat terbatas. Selain itu, berdasarkan sifat geologi regionalnya, ketersediaan air tanah yang terbatas juga dikarenakan oleh dominannya litologi batugamping dengan kelulusan langka hingga rendah. Dalam litologi ini, air tanah berada di rongga antarbutir, celah, dan atau saluran pelarutan yang mempunyai potensi produktivitas



Gambar 1. Lokasi penelitian, CAT Ketapang, yang terletak di pesisir utara Pulau Madura (ESDM, 2018).



Gambar 2. Peta Hidrogeologi CAT Ketapang (ESDM, 2015).

rendah. Karakteristik akuifer air tanah dengan produktivitas rendah dipengaruhi oleh litologi akuifer dalam menyimpan dan meloloskan, pada akuifer percelahan seperti pada bentang alam karst memiliki ketersediaan air tanah yang terbatas hingga nihil (Fetter, 2004).

Metode penelitian asal sumber air tanah yang digunakan untuk mengkaji kondisi hidrogeologi daerah CAT Ketapang adalah perbandingan komposisi isotop alam stabil (White, 2015), yakni analisis atom oksigen dan atom hidrogen yang membentuk molekul air (Goldscheider dan Drew, 2007). Hidrogen, karbon, dan oksigen adalah konstituen dominan yang biasanya ditemukan dalam bentuk anion di perairan karst, batuan dasar karst, dan bikarbonat terlarut. Elemen-elemen ini mencakup semua isotop stabil yang menunjukkan variasi yang cukup besar dan dapat diukur dengan instrumen spektrometer massa (Singhal dan Gupta, 2010; Clark, 2015). Sebagian besar komponen hidrologi karst berasal dari curah hujan lokal yang mengimbuhi simpanan air tanah. Dengan demikian, isotop dapat menjelaskan interaksi antara air dengan karbon dioksida atmosfer, bahan organik, dan batuan dasar karbonat. Karbon anorganik terlarut cenderung diturunkan dari batuan dasar karbonat dan karbon dioksida di udara dalam proporsi yang kurang lebih sama (Singhal dan Gupta, 2010; Febriarta, 2016). Isotop alam stabil dapat digunakan sebagai pendekatan konservatif

karena memiliki sifat tetap dan tidak mempengaruhi proses interaksi antara sumber-sumber air maupun antara air dengan batuan (Murillo, 2015; White, 2015). Penyelidikan air dalam batuan (kondisi geologi) sulit diamati secara rinci (Singhal dan Gupta, 2010). Pendekatan isotop alam stabil dapat mengetahui asal dari pola sirkulasi yang ditunjukkan oleh rasio isotop stabil (Prasetio, 2017). Perbedaan titik beku dan tekanan uap isotop air menunjukkan perbedaan konsentrasi ^{18}O dan ^2H dalam imbuhan air dari siklus hidrologi (White, 2015).

Menurut Situmorang, dr. (1992) fisiografi dataran pesisir Madura pada bagian utara tersusun oleh endapan aluvial dengan ketinggian hingga 50 m, sedangkan di bagian selatan terdapat perbukitan batugamping yang merupakan bagian dari Formasi Madura dan Bulu dengan kelulusan rendah (Gambar 2). Berdasarkan sifatnya, ketersediaan air tanah terbagi menjadi dua, yaitu rongga antarbutir dan celah. Air tanah di formasi aluvial terdapat pada rongga antarbutir, sedangkan air tanah di bagian tengah selatan berada di peralihan antarbutir dan celah batuan (Febriarta, dr., 2022).

Produktivitas akuifer di CAT Ketapang secara umum terbagi menjadi tiga. Pertama, perbukitan batugamping di bagian selatan di ketinggian 100 m mempunyai produktivitas sedang dengan kelulusan rendah dan potensi debit < 5 l/detik (ESDM, 2012). Kedua, perbukitan batugam-

ping bagian tengah CAT Ketapang mempunyai produktivitas kecil setempat berarti dengan kelulusan tinggi dan potensi debit >10 l/detik. Ketiga, dataran aluvial di bagian utara mempunyai potensi sedang dengan kelulusan rendah dan potensi debit <5 l/detik (ESDM, 2015) (Gambar 2). Dengan demikian, potensi keterdapatan air tanah terbesar berada pada peralihan perbukitan batugamping hingga dataran aluvial bagian barat laut. Di dataran aluvial terdapat kecenderungan produktivitas akuifer yang mengecil, keterdapatan air tanah yang makin langka, dan curah hujan yang makin rendah (tujuh bulan kering) dari barat ke timur.

Pemetaan sumber daya air diperlukan dalam pengelolaan dan perlindungan lingkungan hidup, sehingga diperlukan informasi dasar sebagai dokumen lingkungan (Febriarta drr, 2018). Studi sistem air tanah menggunakan parameter kondisi topografi, kondisi kedalaman muka air tanah (piezometrik), dan isotop lingkungan serta pendekatan morfologi (geomorfologi) (Freeze dan Cherry, 1979; Fetter, 2004). Selain itu, isotop alam dapat digunakan dalam identifikasi sistem akuifer karst (Setiawan, 2016; Setiawan drr., 2018). Dalam perkembangannya, teknologi isotop membantu menentukan daerah resapan (Seizarwati, 2019). Kondisi pesisir Pulau Madura secara umum tersusun atas endapan aluvial dan batugamping (Marfai drr, 2019; Febriarta drr, 2020). Berdasarkan latar belakang tersebut, tujuan penelitian ini adalah mengkaji keterkaitan asal-usul air tanah di CAT Ketapang dengan isotop stabil ^{18}O dan ^2H .

CAT Ketapang berada di bagian utara Pulau Madura, Povinsi Jawa Timur, yang berbatasan dengan Laut Jawa. Batas CAT Ketapang diperoleh dari Peraturan Menteri ESDM No. 2 Tahun 2017 tentang Cekungan Air Tanah di Indonesia. Secara astronomis (geografis), lokasi tersebut berada di $113^{\circ}0'0''$ – $114^{\circ}0'0''$ BT dan $6^{\circ}50'0''$ – $5^{\circ}90'0''$ LS. Adapun batas wilayah penelitian ini adalah Laut Jawa di sebelah utara, empat kabupaten di sebelah selatan (Kabupaten Bangkalan, Sampang, Pamekasan, dan Sumenep), Kabupaten Bangkalan di sebelah barat, dan

Kabupaten Sumenep di sebelah timur.

Metode yang digunakan meliputi pengambilan contoh air dan analisis isotop stabil ^{18}O dan ^2H . Contoh air tanah yang diuji untuk isotop stabil ^{18}O dan ^2H berjumlah 11 contoh yang bersumber dari air tanah dangkal dan air tanah dalam. Pengambilan contoh air tanah dilakukan pada musim kering pada bulan Juli 2019. Untuk mendapatkan hasil analisis isotop dengan nilai kesalahan yang kecil, contoh air diambil sebanyak 20 ml dimasukkan ke dalam botol kedap udara dan dipastikan tidak terdapat gelembung. Prasetio dan Satrio (2015) menjelaskan bahwa gelembung udara dapat memicu evaporasi yang mengubah senyawa isotop stabil.

Kandungan isotop suatu senyawa dapat berubah bila terjadi proses evaporasi, kondensasi, pembekuan, pencairan, reaksi kimia, atau proses biologi yang umum dikenal dengan fraksinasi isotop. Komposisi atom H (hidrogen) air tanah yang berasal dari infiltrasi air hujan akan terletak di sepanjang garis meteorik lokal (air hujan), kecuali jika air tanah tersebut mengalami perubahan, misalnya pertukaran ^{18}O dengan O (Pratikno drr, 2009; Singhal & Gupta, 2010). Akibat percampuran atom atau proses penguapan, grafik hubungan ^{18}O dan ^2H akan menyimpang dari garis lurus air hujan atau menjauhi garis hujan lokal (Pratikno, drr, 2009; Clark, 2015).

Contoh atom Oksigen -18 (^{18}O) dan atom Hidrogen -2 (^2H) diukur dengan spektrometer massa, yakni alat yang dapat menentukan struktur kimia dari molekul organik berdasarkan perhitungan massa dari molekul tersebut serta pola fragmentasinya (Satrio drr., 2016). Fraksinasi isotop dalam setiap fase siklus hidrologi mengakibatkan air memiliki komposisi rasio isotop yang khas. Kelimpahan relatif, atau penyimpangan, rasio isotop stabil terhadap *Standard Mean Ocean Water* (SMOW) dinyatakan dengan nilai delta (δ) dalam satuan per seribu atau permil (‰) (Prasetio, 2017; White, 2015). Konsentrasi molekuler diubah menjadi nilai rasio isotop $^2\text{H}/^1\text{H}$ dan $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, kemudian nilai $\delta^2\text{H}$ dan $\delta^{18}\text{O}$ dihitung menurut *Standard Mean Ocean Water*

(SMOW) dengan rumus sebagai berikut (Coplen *et al*, 2006; White, 2015):

Kelimpahan relatif untuk deuterium (^2H), notasi $\delta^2\text{H}$:

$$\delta^2\text{H} = \left(\frac{RD \text{ (contoh air)}}{RD \text{ (standar SMOW)}} - 1 \right) \times 1000 \text{ ‰} \dots (1)$$

Kelimpahan relatif ^{18}O , $\delta^{18}\text{O}$:

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{RO-18 \text{ (contoh air)}}{RO \text{ (standar SMOW)}} - 1 \right) \times 1000 \text{ ‰} \dots (2)$$

R_D dan R_{O-18} masing-masing menotasikan rasio komposisi $^2\text{H}/^1\text{H}$ dan $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. Data untuk uji isotop stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ diperoleh dari Laboratorium Pengujian Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi (PAIR) Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN). Selanjutnya, analisis asal usul air tanah disajikan dalam hubungan grafik, yaitu dengan mengplotkan kelimpahan relatif $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$ terhadap garis nilai hujan global atau *Global Meteoric Water Line* (GMWL) (Satrio dan Sidaruk, 2015; Siftianida *dr*, 2016; Setiawan *dr*, 2018). GMWL adalah garis yang menunjukkan nilai rata-rata tahunan rasio isotop hidrogen dan oksigen air hujan di bumi secara global. Selain GMWL, terdapat *Local Meteoric Water Line* (LMWL, garis solid) yang menunjukkan nilai rasio isotop hidrogen dan oksigen air hujan lokal yang diambil secara kontinu. Secara garis besar, jarak titik-titik contoh terhadap garis hujan mengindikasikan tingkat kesamaan contoh air dengan sumber air. Bila titik contoh mendekati garis LMWL, maka sumber air tanah yang dianalisis berasal dari air hujan dengan kondisi perputaran hidrologi lokal. Nilai hujan lokal yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan LMWL di Tuban yaitu δD atau $\delta^2\text{H} = 8,0$. $\delta^{18}\text{O} + 11\text{‰}$ (Febriarta *dr*, 2015).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Daerah penelitian berada dalam CAT Ketapang yang merupakan dataran pesisir utara dari Pulau Madura. Sistem akuifer di CAT Ketapang terdiri

atas 3 (tiga) litologi akuifer yaitu endapan lepas, batuan padu dan batugamping. Litologi akuifer berupa endapan lepas terdapat di sepanjang dataran pantai tersusun atas material lepas berupa pasir, lempung, krikil (Febriarta *dr*, 2020). Litologi akuifer batuan padu yang terdapat di bagian tengah terdiri atas 3 (tiga) karakteristik yaitu (a) batupasir kuarsa berselingan batugamping dan batulempung, batunapal, batulempung lanauan dan batuamping napalan, (c) batulempung pasir dengan sisipan batupasir dan batulempung (Gambar 2). Litologi batugamping terdapat di bagian selatan dari CAT Ketapang. Berdasarkan kondisi litologi akuifer, contoh isotop sumur gali SG-1, SG-4, SG-5, SG-6, SG-7 berada pada litologi akuifer batuan padu berupa lempung pasir, SG-2 berada pada litologi akuifer endapan lepas berupa pasir dan SG-3 berada di litologi akuifer batugamping. Pada contoh isotop dari sumur bor SB-1, SB-3 dan SB-4 berada pada litologi akuifer batuan padu berupa lempung pasir dan contoh SB-2 berada di litologi akuifer batugamping.

Dalam penelitian ini, sebelas contoh air tanah diambil dari air tanah dangkal yang bersumber dari sumur gali (SG) atau sumur dangkal serta sumur bor (SB) untuk mewakili akuifer dalam untuk mengetahui komposisi isotop air tanah, seperti yang disajikan dalam Tabel 1. Lokasi contoh air berada di dataran pantai (pesisir), yang menurut Febriarta *dr*, (2020) dataran ini termasuk daerah akuifer pesisir. Hasil analisis contoh menunjukkan komposisi isotop yang berbeda untuk SG dan SB. Contoh air tanah dari SG mempunyai rata-rata komposisi ^{18}O sebesar $-3,44\text{‰}$ dengan standar deviasi 0,56 dan rata-rata komposisi ^2H sebesar $-30,47\text{‰}$ dengan standar deviasi 2,7. Standar deviasi ^2H memiliki nilai relatif tinggi yang mengindikasikan kondisi pertukaran atom H yang besar dan tidak memiliki kecenderungan yang sama. Hasil analisis isotop SG disajikan pada Tabel 1. Hasil analisis isotop contoh air tanah dalam atau dari SB mempunyai rata-rata komposisi ^{18}O sebesar $-3,14\text{‰}$ dengan standar deviasi 0,23 dan rata-rata komposisi ^2H sebesar $-30,00\text{‰}$ dengan

standar deviasi 0,94. Hasil analisis isotop dari SB disajikan pada Tabel 2.

Berdasarkan grafik Gambar 3, genesis ^2H sumur bor serupa dengan contoh sumur gali. Standar deviasi ^{18}O mendekati nilai 0 yang menunjukkan bahwa air tanah relatif homogen atau mempunyai kedekatan nilai isotop antar sumber air. Untuk memudahkan pengelompokan nilai, digunakan pengelompokan distribusi interval atau frekuensi interval, yaitu pembagian nilai (data) ke dalam kelompok yang memiliki rentang nilai sama. Pengelompokan menggunakan komposisi ^{18}O untuk mencari kedekatan atom O (pertukaran nilai O^{18}) contoh air tanah dengan air hujan lokal. Pengelompokan kandungan ion ^{18}O dapat diartikan sebagai berikut: nilai tinggi berarti atom O memiliki kedekatan dengan komposisi awal dan menjadi indikasi bahwa contoh air tanah terkait berasal dari air hujan, sedangkan nilai atau harga negatif lebih kecil menunjukkan komposisi isotop contoh lebih kecil dari standar. Kondisi tersebut dapat mengindikasikan adanya hujan di daerah imbuhan dan secara alami mengalami evaporasi disertai fraksinasi isotop pada air (Kharisma drr., 2015).

Grafik nilai deplesi ^{18}O diperoleh dengan mengelompokkan komposisi isotop ^{18}O dan ^2H (Tabel 1) menurut sumber contoh air, yaitu SG dan SB

(Seizarwati, 2019). Berdasarkan pengelompokan komposisi isotop ^{18}O dan ^2H contoh SG, diperoleh tiga (3) kelompok contoh air. Contoh air SG-1, SG-2, dan SG-3 memiliki komposisi isotop tinggi dengan standar deviasi 0,20. Standar deviasi tersebut menunjukkan adanya variasi data. Menurut Pujindiyati, drr. (2012), variasi tersebut dapat disebabkan oleh bercampurnya air tanah dengan sistem air tanah lain. Di lokasi penelitian, kondisi tersebut dimungkinkan terjadi karena adanya pengaruh 3 (tiga) litologi akuifer dengan nilai kelulusan yang berbeda. Titik SG-1 berada di litologi akuifer batuan padu berupa lempung pasir dengan kelulusan rendah, SG-3 berada di litologi batugamping atau media akuifer bercelah dengan kelulusan tinggi, sedangkan titik SG-2 berada di dataran aluvial dengan material penyusun berupa pasir dan sistem akuifer bebas dengan kelulusan sedang hingga tinggi. Hasil pengelompokan menunjukkan fenomena pengayaan isotop pada contoh air tanah dengan komposisi tinggi (Tabel 3). Karakteristik komposisi ^{18}O pada contoh air tanah di daerah penelitian memiliki kemiripan dengan kondisi isotop air tanah di pesisir Tuban, yaitu menunjukkan pengayaan isotopik (*enrichment*) akibat evaporasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan hujan (Febriarta drr, 2015). Selain itu, SB-4 memiliki komposisi ^{18}O lebih tinggi dari pada contoh

Tabel 1. Hasil analisis isotop berupa komposisi ^{18}O dan ^2H contoh air tanah dari SG

| No. | Kode | X | Y | Elevasi (mdpal) | Lokasi Contoh | ^{18}O (‰) | ^2H (‰) |
|-----------|------|--------|---------|-----------------|--------------------|---------------------|------------------|
| I-01 | SG-1 | 712928 | 9237415 | 11 | Sumur Klampis | -2,80 | -25,00 |
| I-02 | SG-2 | 724114 | 9238069 | 7 | Sumur Tanjungbumi | -3,00 | -30,00 |
| I-03 | SG-3 | 728398 | 9234221 | 71 | Sumur Nungbadung | -3,20 | -33,00 |
| I-04 | SG-4 | 728114 | 9235893 | 22 | Sumur Dangkah Raya | -4,21 | -30,00 |
| I-05 | SG-5 | 741435 | 9236448 | 17 | Sumur Banyuates | -3,28 | -31,20 |
| I-07 | SG-6 | 764518 | 9236613 | 38 | Sumur Sokobanah 1 | -3,40 | -33,00 |
| I-09 | SG-7 | 783880 | 9236309 | 34 | Sumur Basean | -4,21 | -31,10 |
| Rata-rata | | | | | | -3,44 ± 0,56 | -30,47 ± 2,7 |

Tabel 2. Hasil analisis isotop berupa komposisi ^{18}O dan ^2H contoh air tanah dari dan SB

| No. | Kode | X | Y | Elevasi (mdpal) | Lokasi Contoh | ^{18}O (‰) | ^2H (‰) |
|-----------|------|--------|---------|-----------------|-------------------|---------------------|------------------|
| I-06 | SB-1 | 751638 | 9235384 | 64 | Sumur ketapang | -3,20 | -30,00 |
| I-08 | SB-2 | 772580 | 9233173 | 64 | Sumur Sokobanah 2 | -3,28 | -30,06 |
| I-10 | SB-3 | 805955 | 9234606 | 75 | Sumur Ambuten | -3,28 | -32,00 |
| I-11 | SB-4 | 814883 | 9233303 | 140 | Sumur Manding | -2,80 | -31,00 |
| Rata-rata | | | | | | -3,14 ± 0,23 | -30,77 ± 0,94 |

Tabel 3. Contoh air tanah pada SG dan SB dengan komposisi isotop ¹⁸O dan ²H tinggi

| Contoh Sumur Gali (SG) | | | | Contoh Sumur Bor (SB) | | | |
|------------------------|-------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|---------------|---------------------|--------------------|
| Kode | Lokasi | ¹⁸ O (‰) | ² H (‰) | Kode | Lokasi | ¹⁸ O (‰) | ² H (‰) |
| SG-1 | Sumur Klampis | -2,80 | -25,00 | SB-4 | Sumur Manding | -2,80 | -31,00 |
| SG-2 | Sumur Tanjungbumi | -3,00 | -30,00 | | | | |
| SG-3 | Sumur Nungbadung | -3,20 | -29,33 | | | | |
| | Rata-rata | -3,00 | 4,04 | | | | |
| | Standar deviasi | 0,20 | | | | | |

Sumber: Analisis, 2021

SG-1, dimungkinkan menunjukkan pengayaan isotopik yang menandakan proses evaporasi yang lebih tinggi dari pada hujan wilayah.

Komposisi isotop ¹⁸O dan ²H sedang ditemukan pada SG-5 dan SG-6 dengan standar deviasi 0,08. Standar deviasi tersebut mengindikasikan adanya kemiripan atau perbedaan yang tidak signifikan antara kedua contoh air tanah yang dimungkinkan berasal dari akuifer yang sama dengan daerah resapan berada di ketinggian tertentu. Selain itu, SB-1 memiliki komposisi isotop yang mendekati SG-5. Plot titik-titik contoh dengan komposisi isotop sedang berada di bawah garis air meteorik dan mengikuti pola proses evaporasi, tetapi menunjukkan deviasi dari garis air meteorik yang mengindikasikan terjadinya pengayaan isotopik. Ketiga contoh air tanah dengan komposisi sedang tersebut (SG-5, SG-6, SB-1) berada pada litologi akuifer yang sama, yaitu lempung pasiran dengan potensi produktivitas kecil (Gambar 2). Dengan kata lain, akuifer daerah tersebut bersifat bebas dengan kedalaman yang relatif dangkal. Temuan ini serupa dengan hasil pengukuran Marfai, dr. (2019) yang menunjukkan kedalaman freatik dangkal, yaitu 2–7 m di bawah permukaan tanah. Contoh air tanah dangkal dengan komposisi ¹⁸O dan ²H rendah di antaranya SG-4 dan SG-7. Keduanya memiliki komposisi ¹⁸O sebesar -4,21‰ (standar deviasi 0,00) (Tabel 4) yang menunjukkan sifat homogen atau kemiripan dengan sumber yang relatif sama, yaitu akuifer dengan litologi berupa lanau, pasir, lempung, dan kerikil. Dibandingkan dengan kelompok komposisi isotop tinggi dan sedang, contoh air tanah pada sumur gali dengan komposisi isotop rendah memiliki nilai ¹⁸O yang menjauhi nilai 0 (Tabel 5). Komposisi isotop yang rendah di-

fer yang sama, yaitu lempung pasiran dengan potensi produktivitas kecil (Gambar 2). Dengan kata lain, akuifer daerah tersebut bersifat bebas dengan kedalaman yang relatif dangkal. Temuan ini serupa dengan hasil pengukuran Marfai, dr. (2019) yang menunjukkan kedalaman freatik dangkal, yaitu 2–7 m di bawah permukaan tanah.

Contoh air tanah dangkal dengan komposisi ¹⁸O dan ²H rendah di antaranya SG-4 dan SG-7. Keduanya memiliki komposisi ¹⁸O sebesar -4,21‰ (standar deviasi 0,00) (Tabel 4) yang menunjukkan sifat homogen atau kemiripan dengan sumber yang relatif sama, yaitu akuifer dengan litologi berupa lanau, pasir, lempung, dan kerikil. Dibandingkan dengan kelompok komposisi isotop tinggi dan sedang, contoh air tanah pada sumur gali dengan komposisi isotop rendah memiliki nilai ¹⁸O yang menjauhi nilai 0 (Tabel 5). Komposisi isotop yang rendah di-

Tabel 4. Contoh air tanah pada SG dan SB komposisi isotop ¹⁸O dan ²H sedang

| Contoh Sumur Gali (SG) | | | | Contoh Sumur Bor (SB) | | | |
|------------------------|-------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| Kode | Lokasi | ¹⁸ O (‰) | ² H (‰) | Kode | Lokasi | ¹⁸ O (‰) | ² H (‰) |
| SG-5 | Sumur Banyuates | -3,28 | -31,20 | SB-1 | Sumur Ketapang | -3,20 | -30,00 |
| | Sumur Sokobanah 1 | -3,40 | -33,00 | | | | |
| | Rata-rata | -3,34 | -32,1 | | | | |
| SG-6 | Standar deviasi | 0,08 | 1,27 | | | | |

Sumber: Analisis, 2021

Tabel 5. Contoh air tanah pada SG dan SB komposisi isotop ¹⁸O dan ²H rendah

| Contoh Sumur Gali (SG) | | | | Contoh Sumur Bor (SB) | | | |
|------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|--------------------|
| Kode | Lokasi | ¹⁸ O (‰) | ² H (‰) | Kode | Lokasi | ¹⁸ O (‰) | ² H (‰) |
| SG-4 | Sumur Dangkah Raya | -4,21 | -30,00 | SB-2 | Sumur Sokobanah 2 | -3,28 | -30,06 |
| SG-7 | Sumur Basean | -4,21 | -31,10 | SB-3 | Sumur Ambuten | -3,28 | -32,00 |
| | Rata-rata | -4,21 | -30,55 | | Rata-rata | -3,28 | -31,03 |
| | Standar deviasi | 0 | 0,78 | | Standar deviasi | 0 | 1,37 |

Sumber: Analisis, 2021

pengaruhi oleh elevasi tempat jatuhnya hujan yang jauh dari garis pantai (Seizarwati, 2019). Kondisi serupa ditemukan pada komposisi isotop contoh air tanah dari sumur bor (SB), yaitu SB-2 dan SB-3, yang menunjukkan deplesi isotop karena pengaruh kondisi hujan wilayah yang lebih tinggi daripada proses evaporasi.

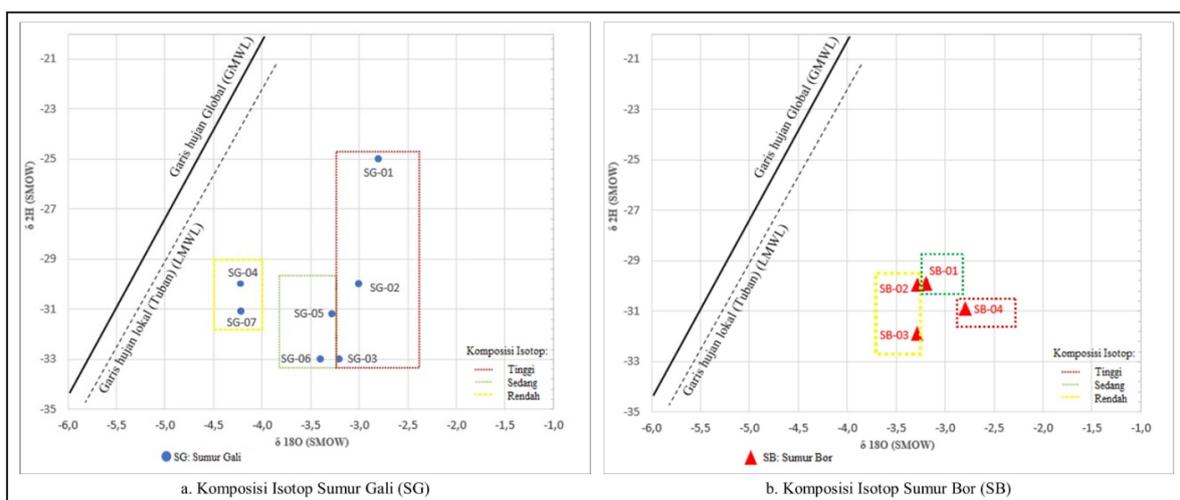
Hasil pemplotan kelimpahan relatif isotop ^{18}O dan ^2H semua sampai contoh air tanah di CAT Ketapang, Madura, menunjukkan penyimpangan terhadap garis air meteorik di wilayah hujan global (GMWL) dan di wilayah hujan lokal (Tuban), seperti yang ditunjukkan pada grafik distribusi nilai isotop pada Gambar 3. White (2015) menyebutkan bahwa deviasi ini kemungkinan dipengaruhi oleh proses evaporasi yang ditentukan oleh faktor batuan dan penggunaan lahan. Dalam hal ini, evaporasi yang terjadi dimungkinkan oleh faktor evaporasi sekunder karena daerah penelitian memiliki vegetasi yang jarang atau tutupan lahan yang gersang, di antaranya semak-belukar dan lahan terbuka. Evaporasi tersebut mengakibatkan pengayaan komposisi isotop terutama karena adanya rata-rata tujuh bulan kering dalam setahun (Marfai, dr., 2019; Febriarta, dr., 2020).

Distribusi komposisi isotop ^{18}O dan ^2H menunjukkan variasi spasial menurut ketinggian

tempat atau elevasi dan kedekatan komposisi yang relatif sama antar sumber air. Contoh air tanah dengan komposisi isotop tinggi, yakni SG-1, SG-2, SG-3, SB-1, dan SB-4, berada pada ketinggian bervariasi, mulai dari dataran aluvial hingga peralihan perbukitan batugamping. Tingginya komposisi isotop ^{18}O dan ^2H dimungkinkan dipengaruhi oleh imbuhan dengan sifat lokal yang berasal dari perbukitan batugamping di bagian selatan daerah penelitian.

Dataran aluvial memiliki komposisi isotop yang beragam: tinggi di bagian barat, sedang di bagian tengah, dan rendah di bagian timur (Gambar 4). Komposisi sedang di bagian tengah menunjukkan bahwa air tanahnya berasal dari sistem imbuhan air tanah bersifat lokal, sedangkan komposisi rendah di bagian barat dimungkinkan karena air tanah tersebut berasal dari sistem imbuhan menengah hingga regional, yaitu daerah perbukitan batugamping.

Contoh air tanah dengan komposisi isotop sedang secara spasial terdistribusi dengan potensi kecil setempat, seperti SG-5, SB-2, SB-3, dan SG-6 yang di bagian tengah CAT Ketapang. Hal ini menunjukkan bahwa kemungkinan air tanah yang diambil contoh mendapat imbuhan dari sistem lokal dan menengah dari dataran batugamping hingga perbukitan batugamping.



Gambar 3. Distribusi kelimpahan relatif isotop ($\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$) pada contoh air tanah dari sumur gali dan sumur bor terhadap garis air hujan lokal (Tuban). Kelimpahan relatif dinyatakan dalam satuan ‰ dan didasarkan pada penyimpangan terhadap SMOW untuk isotop air.



Gambar 4. Distribusi spasial komposisi isotop ^{18}O dan ^2H di CAT Ketapang Madura.

Contoh air tanah dengan komposisi isotop ^{18}O dan ^2H rendah, seperti SG-4 dan SG-7, berada di atas batugamping dengan produktivitas setempat yang dimungkinkan dipengaruhi oleh sifat kelulusan batuan tinggi dengan debit relatif tinggi. Debit yang relatif tinggi diduga karena mendapat imbuhan air tanah bersifat menengah hingga regional dari perbukitan batugamping.

Secara umum arah aliran air tanah bergerak dari utara perbukitan batugamping menuju utara yaitu kearah pantai (Marfai, dr., 2019). Sumber dari imbuhan adalah dataran batugamping dan perbukitan batugamping di bagian selatan. Hasil analisis isotop alam stabil ^{18}O dan ^2H pada contoh air tanah yang bersumber dari sumur gali (air tanah dangkal) dan sumur bor (air tanah dalam) menunjukkan bahwa komposisi tinggi memiliki keterkaitan dengan imbuhan air tanah lokal dan dekat dengan komposisi LMWL. Hasil tersebut serupa dengan hasil komposisi isotop air pesisir dalam penelitian Febriarta, dr. (2015), yakni ^{18}O dengan rentang komposisi -1,01 hingga -3,40. Nilai komposisi rendah pada contoh SG-2 dimungkinkan terjadi intrusi air laut seperti komposisi air pesisir di Tuban dalam penelitian Febriarta dr., (2015) dan komposisi intrusi air laut di Tegal dalam penelitian (Wati, dr., 2020). Nilai isotop air tanah dengan komposisi isotop ^{18}O dan ^2H sedang menunjukkan keterkaitan sistem air tanah dengan imbuhan bersifat lokal dan menengah. Air tanah dengan komposisi isotop ^{18}O dan ^2H rendah menunjukkan imbuhan

air tanah yang berasal dari menengah dan regional. Komposisi isotop rendah ini dipengaruhi oleh litologi penyusun batuan yang memiliki kelulusan tinggi dan potensi debit >10 l/detik. Lokasi contoh yang berada di dataran aluvial menjadi faktor nilai isotop rendah, hal tersebut dipengaruhi oleh lokasi berkumpulnya dan bercampurnya air dari regional yang mengalami proses pengayaan (*enrichment*).

Contoh air tanah dengan komposisi isotop sedang secara spasial terdistribusi dengan potensi kecil setempat, seperti SG-5, SB-2, SB-3, dan SG-6 yang di bagian tengah CAT Ketapang. Hal ini menunjukkan bahwa kemungkinan air tanah yang diambil contoh mendapat imbuhan dari sistem lokal dan menengah dari dataran batugamping hingga perbukitan batugamping.

Contoh air tanah dengan komposisi isotop ^{18}O dan ^2H rendah, seperti SG-4 dan SG-7, berada di atas batugamping dengan produktivitas setempat yang dimungkinkan dipengaruhi oleh sifat kelulusan batuan tinggi dengan debit relatif tinggi. Debit yang relatif tinggi diduga karena mendapat imbuhan air tanah bersifat menengah hingga regional dari perbukitan batugamping.

Secara umum arah aliran air tanah bergerak dari utara perbukitan batugamping menuju utara yaitu kearah pantai (Marfai, dr., 2019). Sumber dari imbuhan adalah dataran batugamping dan perbukitan batugamping di bagian selatan. Hasil analisis isotop alam stabil ^{18}O dan ^2H pada con-

toh air tanah yang bersumber dari sumur gali (air tanah dangkal) dan sumur bor (air tanah dalam) menunjukkan bahwa komposisi tinggi memiliki keterkaitan dengan imbuhan air tanah lokal dan dekat dengan komposisi LMWL. Hasil tersebut serupa dengan hasil komposisi isotop air pesisir dalam penelitian Febriarta, dr. (2015), yakni ^{18}O dengan rentang komposisi -1,01 hingga -3,40. Nilai komposisi rendah pada contoh SG-2 dimungkinkan terjadi intrusi air laut seperti komposisi air pesisir di Tuban dalam penelitian Febriarta dr., (2015) dan komposisi intrusi air laut di Tegal dalam penelitian (Wati, dr., 2020). Nilai isotop air tanah dengan komposisi isotop ^{18}O dan ^2H sedang menunjukkan keterkaitan sistem air tanah dengan imbuhan bersifat lokal dan menengah. Air tanah dengan komposisi isotop ^{18}O dan ^2H rendah menunjukkan imbuhan air tanah yang berasal dari menengah dan regional. Komposisi isotop rendah ini dipengaruhi oleh litologi penyusun batuan yang memiliki kelulusan tinggi dan potensi debit >10 l/detik. Lokasi contoh yang berada di dataran aluvial menjadi faktor nilai isotop rendah, hal tersebut dipengaruhi oleh lokasi berkumpulnya dan bercampurnya air dari regional yang mengalami proses pengayaan (*enrichment*).

KESIMPULAN

Melalui metode analisis komposisi isotop alam stabil ^{18}O dan ^2H dalam penelitian ini diketahui bahwa kondisi evaporasi lebih tinggi dibandingkan dengan potensi hujan dan mendeteksi asal usul air tanah, yakni dari siklus hidrologi yang pendek atau, dengan kata lain, terdapat potensi presipitasi yang tidak jauh dari laut. Kondisi evaporasi tersebut dicirikan oleh komposisi ^{18}O yang hampir mendekati nilai 0. Contoh air SG menunjukkan variasi komposisi isotop yang relatif kecil yang diduga berasal dari perpaduan akuifer kekang dimungkinkan setempat dan akuifer bebas dengan sistem aliran bawah permukaan yang relatif dangkal. Contoh air SB menunjukkan perubahan komposisi isotop yang lebih tinggi sebagai akibat dari proses evaporasi,

sehingga air tanah yang diambil contoh diduga berasal dari akuifer bebas dengan kedalaman freatik relatif dangkal. Hasil studi ini diharapkan dapat digunakan sebagai informasi dasar (acuan) dalam pengembangan dan pengelolaan air tanah pesisir di Madura.

UCAPAN TERIMA KASIH

Artikel ini merupakan analisis lanjutan dari kajian “Air tanah Berkelanjutan Berbasis Masyarakat di Kabupaten Bangkalan, Madura” yang difasilitasi oleh PT. Pertamina Hulu Energi West Madura Offshore (PHE WMO). Ucapan terima kasih disampaikan kepada PT. Pertamina Hulu Energi West Madura Offshore (PHE WMO) yang telah mendukung dan memfasilitasi penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Craig, H., 1961. *Isotopic variations in meteoric waters*. Science 133: 1702–1703. DOI: 10.1126/science.133.3465.1702.
- Clark, I., 2015. *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, US.
- Fakultas Geografi, 2019. Strategi Pemenuhan Kebutuhan Air Berkelanjutan Berbasis Masyarakat Desa Bandangdajah Kecamatan Tanjungbumi Kabupaten Bangkalan. *Laporan Akhir*, Fakultas Geografi, Yogyakarta.
- Febriarta, E., Haryono, E., dan Adji, T. N. 2015. Aplikasi Teknologi Isotop Alam untuk Menentukan Asal Usul Air tanah Pesisir. *Seminar Nasional Pengelolaan Pesisir dan Daerah Aliran Sungai Ke-1*, 1, 100–105. DOI:10.17605/osf.io/7a5m6.
- Febriarta, E. 2016. Kajian Dinamika Karakteristik Akuifer Di Sebagian Pesisir Kabupaten Tuban Provinsi Jawa Timur. *Tesis*. Yogyakarta. Master Program On Planning and Management Of Coastal and Watershed, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada.
- Febriarta, E., Prabawa, B.A., dan Rosaji, F.S.C. 2018. Sumber Daya Air Pelapis, Kepulauan

- Karimata, Kabupaten Kayong Utara. *Prosiding Seminar Nasioanl Ke-4: Pengelolaan Pesisir dan Daerah Aliran Sungai*. 4. 181-186. DOI:10.17605/osf.io/v6nx8
- Febriarta, E., dan Larasati, A. 2020. Karakteristik Akuifer Air Tanah Dangkal Di Endapan Muda Merapi Yogyakarta. *Jurnal Sains Dan Teknologi Lingkungan*. 12(2). 84–99. DOI:10.20885/jstl.vol12.iss2.art1
- Febriarta, E., dan Oktama, R. (2020). Pemetaan Daya Dukung Lingkungan Berbasis Jasa Ekosistem Penyedia Pangan Dan Air Bersih Di Kota Pekalongan. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 18(2). 283–289. DOI:10.14710/jil.18.2.283-289.
- Febriarta, E., Marfai, M. A., Hizbaron, D. R., dan Larasati A. 2020. Kajian Spasial Multi Kriteria DRASTIC Kerentanan Air tanah Pesisir Akuifer Batugamping di Tanjungbudi Madura. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 18(3). 476-487. DOI:10.14710/jil.18.3.476-487
- Febriarta, E., Marfai, M. A., Wacano, D., Larasati, A., & Hizbaron, D. R. (2022). Pemetaan Zona Kerentanan Airtanah Pesisir Formasi Batugamping Terhadap Pencemaran Nitrat Di Kecamatan Sepulu Madura. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(2), 219–230. DOI:10.14710/jil.20.2.219-230
- Fetter, C.W., 2004. *Applied Hydrogeology 5 Edition*. Ohio: Merrill Publishing Company.
- Freeze, R.A., and Cherry, J.A., 1979. *Groundwater*. Prentice Hall, Inc. USA.
- Goldscheider and Drew., 2007. *Methods in Karst Hydrogeology*. Taylor and Francis Group. London: UK.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), 2012. *Geologi Litologi*. Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Diakses pada 10 Februari 2020, dari [https:// www. geoportal. esdm. go. id/ geologi](https://www.geoportal.esdm.go.id/geologi)
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), 2014. *Kawasan Bentang Alam Karst*. Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Diakses pada 10 Februari 2020, dari [https:// www. geoportal. esdm. go. id/ geologi](https://www.geoportal.esdm.go.id/geologi)
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), 2015. *Produktivitas Akuifer*. Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Diakses pada 10 Februari, dari [https:// www. geoportal. esdm. go. id/ geologi](https://www.geoportal.esdm.go.id/geologi)
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), 2017. *Peraturan Menteri Energi dan Sumber daya Mineral No.2 Tahun 2017 tentang Cekungan Air Tanah di Indonesia*. Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). 2018. *Cekungan Air Tanah*. Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Diakses pada 10 Februari 2020, dari [https:// www. geoportal. esdm. go. id/ geologi](https://www.geoportal.esdm.go.id/geologi)
- Kharisma, H. L., Budhie, A., & Wilopo, W., 2015. Aplikasi Isotop Alam untuk Mengetahui Asal-Usul Air Umpur Cokro, Kecamatan Tulung, Kabupaten Klaten. *Forum Teknik*, 36(1), 73–80.
- Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (Permen ESDM), 2012. *Penetapan Kawasan Bentang Alam Karst (KABAK) nomor 17 tahun 2012*. Jakarta.
- Pratikno, B., Abidin Z., Sidauruk P., Satrio, 2009. Aplikasi Isotop Alam ^{18}O , ^2H dan ^{14}C Untuk Studi Air Tanah di Kepulauan Seribu. *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radioasi*. Vol 5 No.1 Juni 2009. 68-82.
- Prasetio, R., dan Satrio, 2015. Aplikasi teknik isotop alam ^{18}O dan ^2H untuk studi air tanah pada cekungan air tanah Semarang, Jawa Tengah. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah - Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*, Yogyakarta, 9 - 10 Juni 2015, 46–51.
- Prasetio R., Laksmiiningputri N., Pratikno B., 2017. Karakteristik Isotop dan Geokimia Area Panas Bumi Danau Toba Sumatra Utama. *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*. Vol 13 no.2.79-86.
- Pujindiyati, E.R., Adi, N.S., dan Rustam, A., 2012. Studi Isotop Oksigen -18 dan Deterium Pada Air Laut di Teluk Banten. *Jurnal Teknik Lingkungan*. 123-131.

- Marfai, M.A., Febriarta, E., Prabawa, B.A., Rosaji, F.S.C., 2019. Rencana Pemenuhan Kuantitas Dan Kualitas Air Desa Bandangdaja, Tanjungbumi, Bangkalan, Madura. *Laporan Final*. Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada: Yogyakarta.
- Murillo, R.S., Brooks, E., Elliot, J.W. and Bolla, J., 2015. *Isotope Hydrology and Baseflow Geochemistry in Natural and Human-Altered Watersheds in the Inland Pacific Northwest, USA*. Isotopes in Environmental and Health Studies.
- Satrio, dan Sidaruk P., 2015. Studi Daerah Imbuhan Sistem Air Sungai Bawah Tanah Gunungkidul—Yogyakarta Menggunakan Isotop Stabil $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^2\text{H}$. *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*. Vol 11 No.2.89-98.
- Satrio, Pratikno B., Sidauruk P., 2016. Studi Karakteristik Air Tanah Daerah Nganjuk Jawa Timur dengan Isotop Alam. *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*. Vol 12 no.2.89-96.
- Setiawan, T., 2016. Sistem Akuifer Kars Waekabubak, Sumba Barat, Berdasarkan Analisis Densitas Kelurusan Morfologi dan Variasi Spasial Hidrogeokimia. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*. Vol.7. 89-102.
- Setiawan T., Isnaini S., Asghaf N.M.A., Efendi I., 2018. Sistem Imbuhan Air Tanah Daerah Kasrt Wonosari-Baron Kabupaten Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta Berdasarkan Analisis Isotop ^{18}O dan ^2H . *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*. Vol.9.III.143-155
- Seizarwati, W., 2019. Penentuan Daerah Resapan Mata Air di Pulau Yamdena dengan Metode Istop Stabil. *Prosiding Seminar Nasional Kebumihan Ke-12*. 703-722.
- Siftianida I.I., Wijanta A.B., Praktino B., 2016. Aplikasi Isotop Alam Untuk Pendugaan Daerah Resapan Air Mata Air di kecamatan Cijeruk, Kabupaten Bogor, Jawa Barat. *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*. Vol 12.II.97-106.
- Singhal, B.B.S., and Gupta, R.P., 2010. *Applied Hydrogeology of Fracture Rock*, Springer Dordrecht Heidelberg London: Springer.
- Situmorang, R. L., Agustianto, D. A., & Suparman, M., 1992. *Geologi Lembar Waru-Sumenep*, Jawa. Badan Geologi, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung: Badan Geologi.
- Sukardi, 1992. *Geologi Lembar Surabaya & Sapulu, Jawa*. Badan Geologi, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung: Badan Geologi.
- Van Zuidam, R. A., 1983. *Guide to Geomorphologic Areal Photographic Interpretation and Mapping*, Section of Geology and Geomorphology, ITC, Enschede, The Netherlands.
- Van Bemmelen, R.W., 1970, *The Geology of Indonesia, vol. 1A, General Geology of Indonesia and Adjacent Archipelagoes, 2nd ed.*, Martinus Nijhoff, The Haque. AAPG UGM-SC., 2013, *Guidebook Volcanic Petroleum Play AAPG UGM-SC*.
- Wati, H. S., Rayhana, E., & Pratikno, B. (2020). Studi Intrusi Air Laut di Tegal - Jawa Tengah Menggunakan Isotop Stabil Oksigen-18 (^{18}O) dan Deuterium (^2H). *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop Dan Radiasi*, 16(1), 23–30.
- White, W. M., 2015. *Isotope Geochemistry*. John Wiley & Sons, Wiley Blackwell, UK.