



Karakteristik Geokimia dan Biomarker Rembesan Minyak di Daerah Torete, Morowali, Sulawesi Tengah

Geochemical and Biomarker Characteristics of Oil Seepages in Torete Area, Morowali, Central Sulawesi

Achmad Fahrudin^{1,2,*}, Eddy Ariyono Subroto¹, Very Susanto¹, Lauti Dwita Santy², Ryandi Adlan²

¹ Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung (ITB),
 Jalan Ganesha No.10, Kota Bandung, Provinsi Jawa Barat, 40132, Indonesia

² Pusat Survei Geologi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM),
 Jalan Diponegoro No.57, Kota Bandung, Provinsi Jawa Barat, 40122, Indonesia.

*e-mail: 22021005@mahasiswa.itb.ac.id; achmad.fahrudin@esdm.go.id

Naskah diterima: 21 Juli 2023, Revisi terakhir: 04 November 2024, Disetujui: 05 November 2024 Online: 05 November 2024

DOI: <http://dx.doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v25i4.806>

Abstrak.-Dua buah rembesan minyak bumi diambil dari daerah Torete, Morowali, Provinsi Sulawesi Tengah. Kedua sampel rembesan telah dilakukan analisis GC (*gas chromatography*) dan GCMS (*gas chromatography and mass spectrometry*). Analisis geokimia biomarker dilakukan untuk mengetahui karakter minyak bumi berupa asal material organik, lingkungan pengendapan, dan tingkat kematangan. Pada kromatogram alkana normal, kedua sampel menunjukkan satu puncak (unimodal) sebelum nC_{20} dengan rasio Pr/Ph 0,87 dan 0,92. Fragmentogram m/z 217 menunjukkan sedikit dominasi pada sterana C_{29} dibanding sterana C_{27} dan sedikit kehadiran dari diasterana. Fragmentogram m/z 191 menunjukkan adanya dominasi pada terpana trisiklik C_{23} dan terpana tetrasiklik C_{24} serta kehadiran terpana trisiklik C_{26}^+ . Pada terpana pentasiklik menunjukkan dominasi Tm terhadap Ts, hopana C_{29} terhadap hopana C_{30} , kehadiran seri norhopana C_{30} dan gamaserana, serta homohopana C_{35} yang sedikit lebih tinggi dari homohopana C_{34} . Biomarker petunjuk tumbuhan tinggi (oleanana dan bikadinana) tidak hadir pada kedua sampel. Hal ini menunjukkan bahwa kedua sampel minyak bumi berasal dari batuan induk karbonat dengan material organik alga, plankton, radiolaria, atau diatom lingkungan pengendapan anoksik-suboksik (lingkungan transisional), dan tingkat kematangan awal matang sampai level matang.

Abstract- Two oil seepages were taken from the Torete area, Morowali, Central Sulawesi Province. Both seepage samples have been analyzed by GC (*gas chromatography*) and GCMS (*gas chromatography and mass spectrometry*). Geochemical biomarker analysis was conducted to characterize the oil in terms of organic material origin, depositional environment, and maturity level. In the normal alkane chromatogram, both samples showed one peak (unimodal) before nC_{20} with Pr/Ph ratios of 0.87 and 0.92. The fragmentogram m/z 217 showed a slight dominance of C_{29} sterane over C_{27} sterane and a slight presence of diasterane. Fragmentogram m/z 191 shows the dominance of C_{23} tricyclic terpane and C_{24} tetracyclic terpane and the presence of C_{26}^+ tricyclic terpane. The pentacyclic terpane showed dominance of Tm over Ts, C_{29} hopane over C_{30} hopane, presence of 30-norhopane series and gammacerane, and C_{35} homohopane which was slightly higher than C_{34} homohopane. The biomarkers indicative of higher plants (oleanane and bikadinane) were not present in both samples. This indicates that both crude oil samples originated from carbonate source rocks with organic material from algae or plankton, anoxic-suboxic depositional environment (transitional environment), and early mature to mature level.

Katakunci: biomarker, GC, GCMS, Torete, Morowali, Sulawesi Tengah.

Keywords: biomarker, GC, GCMS, Torete, Morowali, Central Sulawesi

PENDAHULUAN

Kehadiran suatu rembesan minyak atau gas bumi menunjukkan bahwa suatu sistem petroleum sudah aktif di bawah permukaan bumi (Magoon dan Dow, 1994). Selain itu juga kehadiran dari rembesan minyak atau gas bumi merupakan suatu data yang sangat penting dalam membangun suatu sistem *petroleum* yang terinterasi seluruhnya (Magoon dan Dow, 1994; Sutadiwiria dkk., 2018; Dembicki Jr., 2017).

Karakteristik geokimia biomarker dalam minyak bumi sangat berguna dalam memprediksi karakter batuan induk yang diperkirakan berkorelasi dengan minyak bumi tersebut.

Karakter tersebut meliputi lingkungan pengendapan batuan induk, asal material organik, litologi, umur relatif batuan induk, kematangan termal, jarak dan arah migrasi minyak bumi, dan tingkatan biodegradasi minyak bumi (Peters dkk., 2005; Dembicki Jr., 2017)

Telah banyak ditemukan rembesan minyak dan gas bumi di Cekungan Banggai, khususnya Cekungan Banggai bagian utara menunjukkan bahwa sistem petroleum pada cekungan ini sudah aktif (Davies,

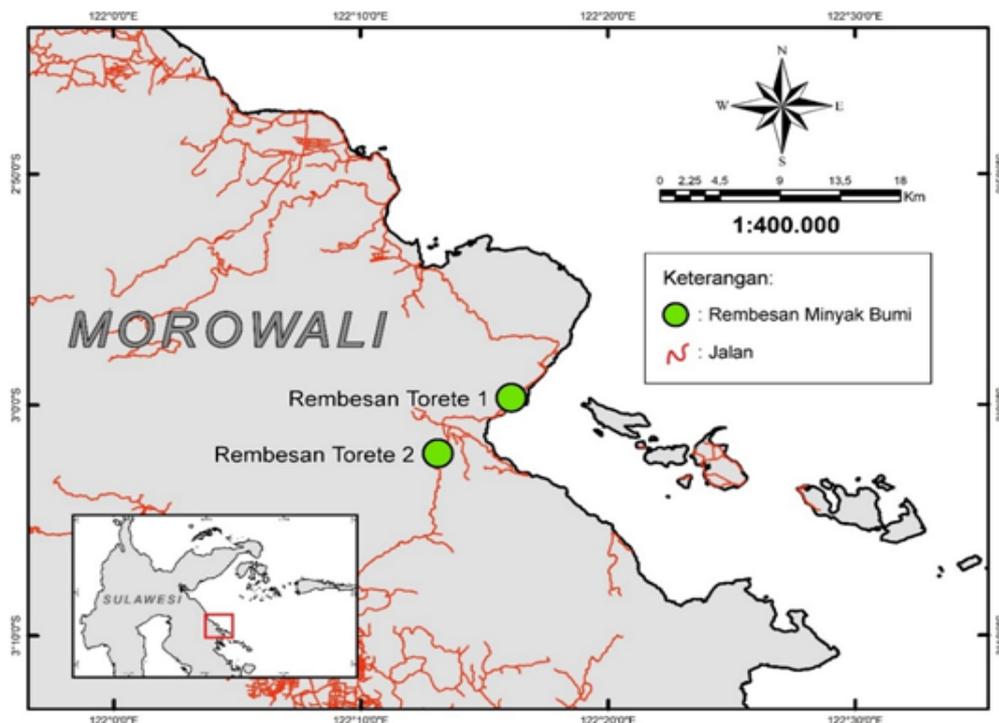
1990; Hasanusi, 2004; Satyana dan Zaitun, 2016).

Berbeda dengan Cekungan Banggai bagian utara, bagian selatannya relatif belum belum dieksplorasi lebih lanjut. Beberapa rembesan minyak bumi hadir di daerah selatan dari Cekungan Banggai ini.

Oleh karena itu, tujuan dari naskah ini adalah untuk mengkarakterisasi geokimia biomarker dari dua rembesan minyak bumi yang ditemukan di Cekungan Banggai bagian selatan atau lebih tepatnya di daerah Torete, Morowali, Provinsi Sulawesi Tengah (Gambar 1).

GEOLOGI REGIONAL

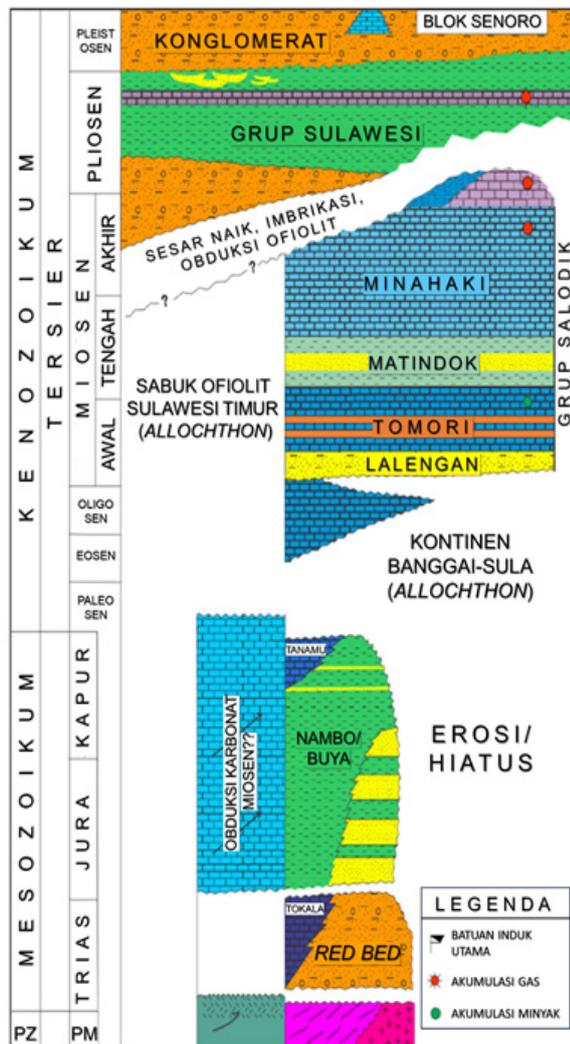
Cekungan Banggai, Provinsi Sulawesi Tengah. Cekungan Banggai terbentuk akibat migrasinya mikro kontinen bagian dari lempeng Australia menuju ke arah Sundaland yang kemudian terjadi tumbukan dengan sabuk ofiolit dari lengan Sulawesi bagian timur (Garrard, 1988; Hall, 2012; Rudyawan dan Hall, 2012). Tumbukan tersebut menghasilkan *foreland basin* yang menjadi tempat akomodasi dari sedimen pada masa Neogen (Garrard, 1988; Davies, 1990; Santy, 2016).



Gambar 1. Lokasi daerah penelitian di Cekungan Banggai, Sulawesi Tengah.

Secara umum, stratigrafi Cekungan Banggai terbagi menjadi dua berdasarkan periode waktu, yaitu saat *rifting* dan *drifting* batas kontinen (sebelum tumbukan terjadi) dan pada saat pengendapan *Celebes Molasse* yang terjadi setelah tumbukan (Garrard, 1988; Davies, 1990).

Stratigrafi Sulawesi Timur dan Pulau Banggai-Sula ditandai oleh kehadiran batuan dasar yang terdiri atas metamorf karbonan, serta granit dan vulkanik berumur Perm-Trias. Lapisan sedimen Formasi Tokala yang berumur Trias-Jura, Formasi Nanaka/Bobong dan Formasi Nambo/Buya yang berumur Jura, Formasi Tanamu yang berumur Kapur Akhir, Formasi Salodik yang berumur Paleogen, Formasi Poh yang berumur Miosen, dan Kelompok Sulawesi/*Celebes Molasse* (*Post Orogenic Sediment*) yang berumur Neogen, serta Terumbu Karang Kuartar (Pertamina BPPKA, 1996) (Gambar 2).



Gambar 2. Stratigrafi Regional Cekungan Banggai (Pertamina BPPKA, 1996)

Batuan dasar dari mikrokontinen Banggai-Sula dapat dijumpai pada singkapan Pulau Peleng serta sumur-sumur di Cekungan Banggai. Batuan dasar ini sebagian besar berupa sekis yang sudah diintrusi oleh granit yang berumur Perm-Trias (Supandjono dan Haryono, 1993). Pada bagian atas dari batuan dasar, Formasi Tokala tersusun atas batuan karbonat marine berumur Trias Akhir-Jura Awal dan diendapkan di lingkungan laut dangkal (Simandjuntak dkk., 2007; Surono dkk., 2011). Selain itu juga diendapkan konglomerat terestrial dan batupasir dari Formasi Bobong yang berumur Jura Awal (Garrard, 1988; Supandjono dan Haryono, 1993). Formasi Buya terletak di atas Formasi Bobong, terdiri atas serpih laut yang berumur Jura Tengah-Jura Akhir (Supandjono dan Haryono, 1993). Formasi Tanamu diendapkan secara tidak selaras di atas Formasi Buya. Formasi ini berumur Kapur yang terdiri atas karbonat laut dalam (Garrard, 1988; Supandjono dan Haryono, 1993; Surono dkk., 2011).

Grup Salodik yang terdiri dari Formasi Tomori, Formasi Matindok dan Formasi Minahaki diendapkan di atas Formasi Tanamu. Formasi Tomori terdiri atas batugamping bioklastik laut dangkal, dolomitik secara lokal, sedikit batulempung, dan batubara. Formasi ini berumur Miosen Awal. Batuan karbonat pada formasi ini diendapkan di paparan laut dangkal (Davies, 1990; Pertamina BPPKA, 1996; Hasanusi, 2004). Formasi Matindok diendapkan secara selaras di atas Formasi Tomori. Formasi ini terdiri atas batulempung yang disertai dengan sedikit batupasir, batugamping, dan batubara. Formasi Matindok memiliki umur Miosen Tengah (Davies, 1990; Pertamina BPPKA, 1996; Hasanusi, 2004). Formasi Minahaki berumur Miosen Akhir dan diendapkan secara selaras di atas Formasi Matindok, Formasi ini terbagi menjadi Anggota Mantawa yang memiliki karakter *build-up* dan Formasi Minahaki yang terendapkan selaras dengan Formasi Matindok di lingkungan paparan karbonat. Anggota Mantawa terdiri atas batugamping yang didominasi oleh *packstone* dengan pecahan koral disertai dengan foraminifera yang terendapkan pada bagian terumbu. Sementara itu, Formasi Minahaki yang terendapkan pada lingkungan paparan karbonat terdiri atas batugamping yang didominasi oleh mikrit, foraminifera *wackestone*, dan mikrosparit (Davies, 1990; Pertamina BPPKA, 1996; Hasanusi, 2004).

Formasi Poh saling menjemari dengan Kelompok Salodik. Formasi ini tersusun atas napal dan batugamping disertai dengan interkalasi dari batupasir. Kumpulan foraminifera pada formasi ini mengindikasikan umur Oligosen Awal hingga Miosen Akhir (Davies, 1990; Pertamina BPPKA, 1996; Hasanusi, 2004).

Kelompok Sulawesi atau sebelumnya dikenal *Celebes Molasse* diendapkan secara tidak selaras di atas Formasi Minahaki. *Celebes Molasse* terdiri atas klastik dengan ukuran butir halus dan kasar serta memiliki sortasi yang buruk yang diendapkan secara cepat. *Celebes Molasse* memiliki komponen utama berupa material ultramafik dan ofiolit yang terobduksi. Kelompok ini memiliki umur Plio-Plistosen (Davies, 1990; Pertamina BPPKA, 1996; Hasanusi, 2004).

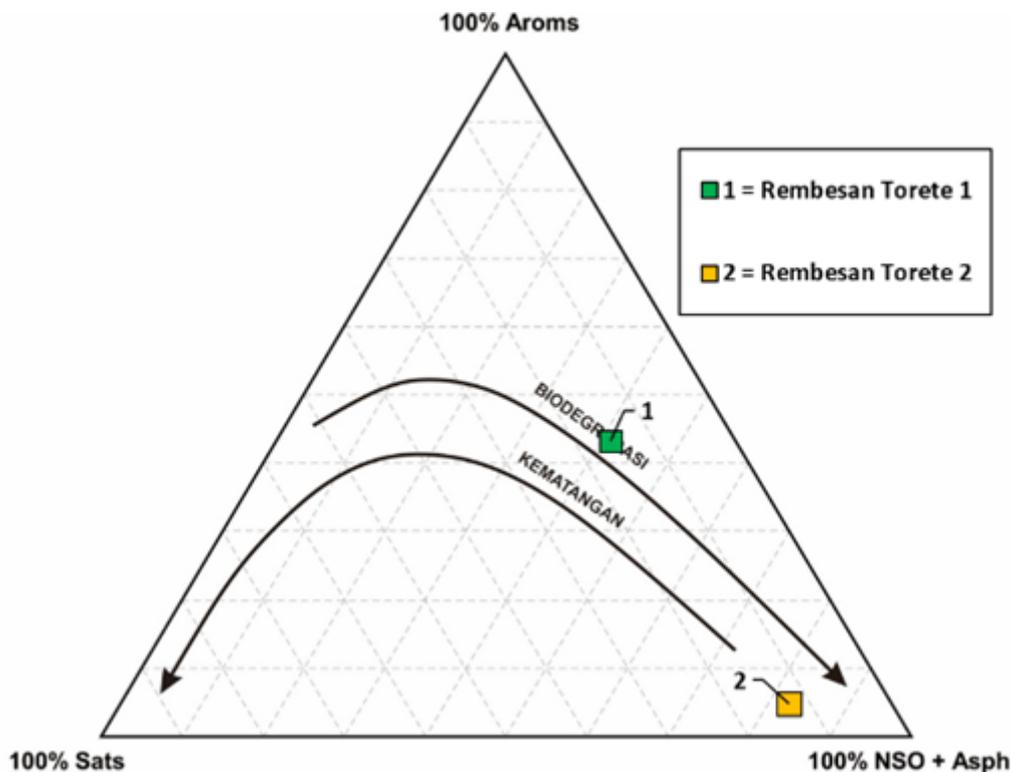
DATA DAN METODE

Secara umum metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah penggabungan antara kegiatan geologi lapangan dan analisis laboratorium. Tahap pertama adalah pencarian literatur berupa laporan dan publikasi. Selanjutnya adalah kegiatan lapangan sekaligus pengambilan sampel rembesan minyak bumi di daerah Torete, Morowali, Provinsi Sulawesi Tengah. Sampel minyak bumi selanjutnya dilakukan analisis sidik jari Kromatografi Gas (GC) menggunakan Agilent 6890 *Gas Chromatograph* (GC) dan biomarker Kromatografi Gas-Spektometri Massa (GC-MS) menggunakan alat Agilent 5973 *Mass Selective Detector* (MSD) di Laboratorium Geokimia Lemigas Jakarta.

HASIL PENELITIAN

Komposisi Minyak

Komposisi minyak bumi pada kedua sampel rembesan minyak bumi cenderung berbeda dalam hal fraksi hidrokarbon jenuh (saturat), aromatik, dan senyawa polar+aspaltena. Menurut Kuo (1994), perbedaan ini dikontrol oleh 4 faktor utama, yaitu: tipe material organik, kematangan batuan induk, migrasi hidrokarbon, dan alterasi hidrokarbon. Hasil plot segitiga dari tiga fraksi minyak bumi pada dua rembesan minyak bumi Torete disajikan pada Gambar 3 yang memperlihatkan rembesan Torete 2 memiliki komposisi senyawa polar+aspaltena yang lebih dominan dibandingkan rembesan Torete 1. Perbedaan ini disebabkan dari tingkat biodegradasi dan kematangan dari kedua sampel rembesan minyak bumi tersebut. Proses biodegradasi akan menghilangkan senyawa hidrokarbon saturat dari yang paling ringan, sehingga komposisi minyak bumi akan didominasi oleh fraksi polar dan aspaltena (Dembicky Jr., 2017).



Gambar 3. Plot segitiga antara hidrokarbon jenuh, aromatik, dan senyawa polar+aspaltena

Alkana Normal dan Isoprenoid

Analisis kromatografi gas (GC) pada kedua sampel menunjukkan adanya satu puncak (unimodal) sebelum alkana nC₂₀ (Gambar 4). Terlihat adanya *hump* atau UCM (*unresolved complex mixtures*) dan juga adanya sedikit dominasi nomor karbon ganjil terhadap nomor karbon genap. Selain itu terlihat juga dominasi dari alkana normal terhadap alkana bercabang (*isoprenoid*) dan alkana siklik. Fitana (Ph) relatif sedikit dominan dibandingkan pristana (Pr) pada kedua sampel dengan nilai rasio Pr/Ph 0,87 dan 0,92.

Terpana Trisiklik dan Tetrasiklik

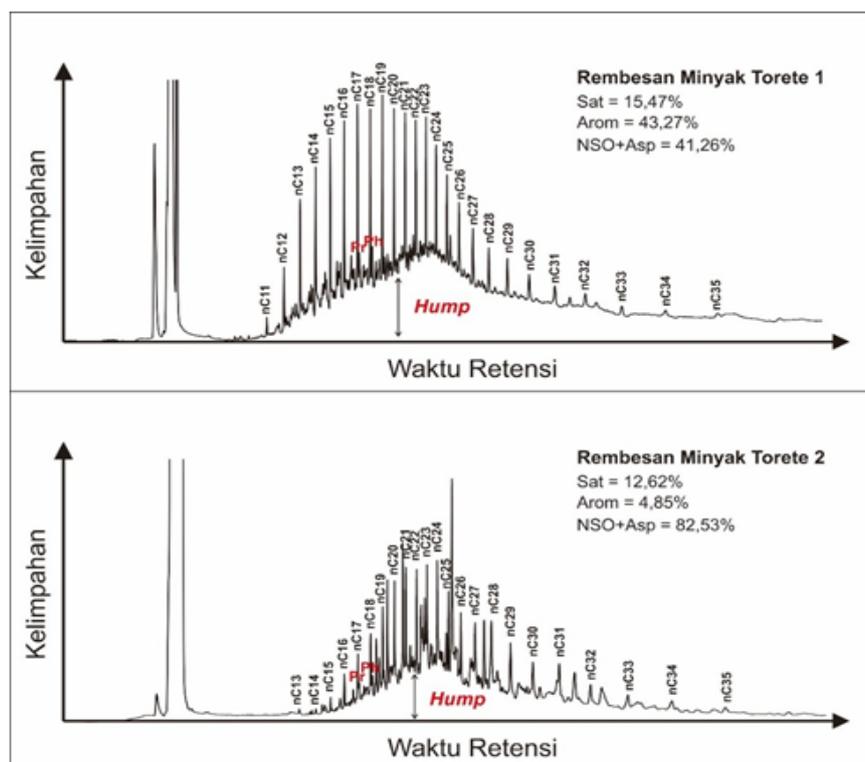
Kelimpahan dari terpana trisiklik relatif lebih rendah dibandingkan dengan terpana pentasiklik. Terlihat juga adanya dominasi dari puncak terpana trisiklik C₂₃ dan hadirnya terpana trisiklik C₂₆⁺ pada kedua sampel. Pola terpana trisiklik menunjukkan terpana trisiklik C₁₉ yang lebih rendah dari C₂₀ yang lebih rendah dari C₂₁ (C₁₉<C₂₀<C₂₁). Terpana tetrasiklik C₂₄Tet puncaknya relatif lebih tinggi dibandingkan dengan semua terpana trisiklik pada kedua sampel (Gambar 5). Hal ini ditunjukkan dengan rasio antara terpana tetrasiklik C₂₄Tet/terpana trisiklik C₂₃>1,3.

Terpana Pentasiklik

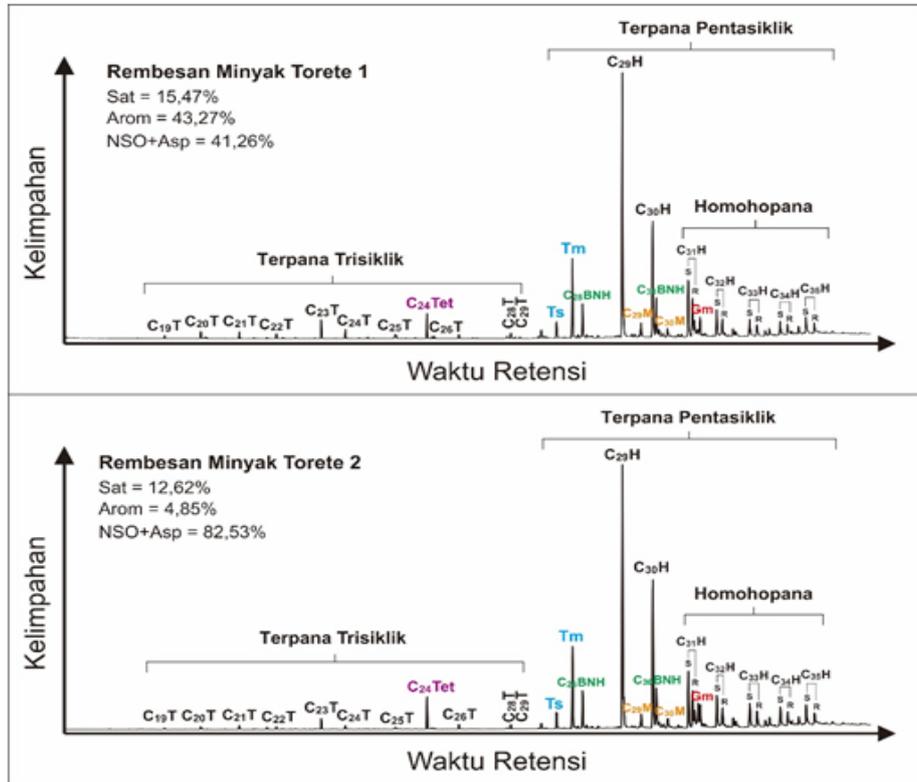
Karakter terpana pentasiklik pada kedua sampel hampir sama karakternya (Gambar 5). Terlihat adanya dominasi hopana C₂₉ terhadap hopana C₃₀ dengan rasio 1,77. Trisnorhopana (Tm) lebih dominan puncaknya dibandingkan dengan trisnorneohopana (Ts) serta moretana C₂₉ dan C₃₀ yang puncaknya sangat rendah dibandingkan hopana C₂₉ dan C₃₀. Oleanana dan bikadinana tidak hadir, sedangkan seri 30-norhopana, bisnorhopana (BNH) dan gamaserana (Gm) hadir pada kedua sampel. Homohopana C₃₁22S dan C₃₂22S relatif lebih tinggi dibandingkan dengan C₃₁22R dan C₃₂22R homohopana. Selain itu homohopana C₃₄ kehadirannya sedikit lebih rendah dibandingkan dengan homohopana C₃₅ dengan nilai rasio 0,84 – 0,99.

Sterana dan Diasterana

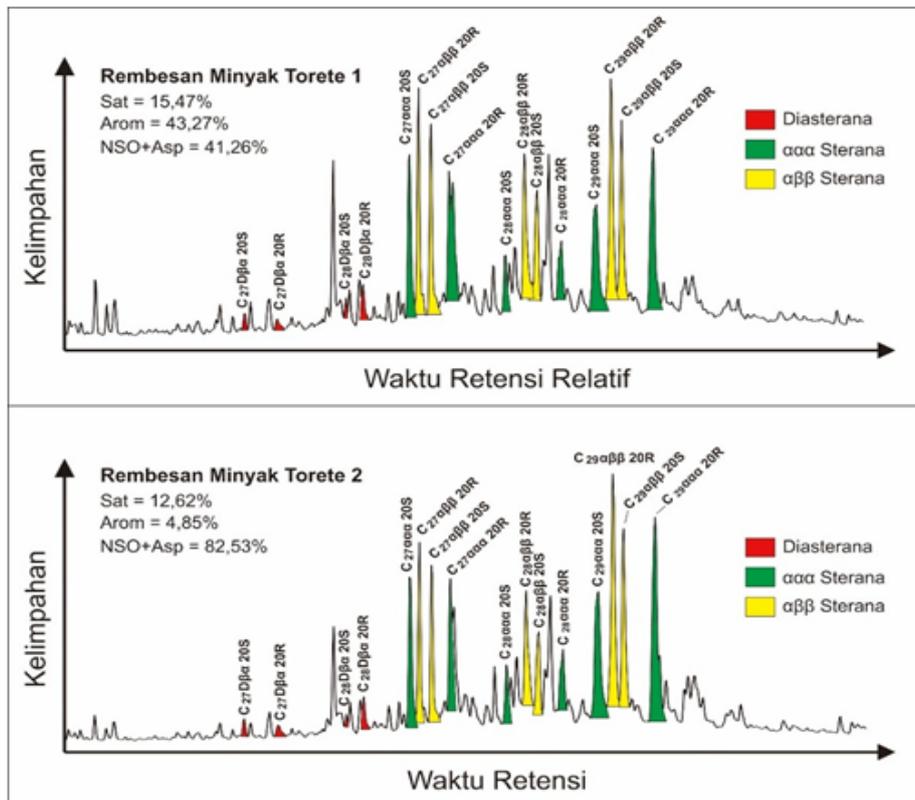
Kedua sampel rembesan memiliki sterana lebih rendah dibandingkan dengan hopana (Gambar 6). Kedua sampel pun memiliki dominasi sterana C₂₉ pada fragmentogram m/z 217 dengan dominasi pada sterana C₂₉αββ diantara dua puncak C₂₉ααα20S dan C₂₉ααα20R dengan rasio 20S/20R 0,62 dan 0,63. Diasterana hadir pada kedua sampel dengan puncak yang sangat kecil dibandingkan dengan sterana.



Gambar 4. Kromatogram alkana normal dari sampel rembesan minyak bumi Torete. Kedua sampel menunjukkan pola puncak yang sama sebelum nC₂₀, dan rasio Pr/Ph <1.



Gambar 5. Fragmentogram m/z 191 terpana dari sampel rembesan minyak bumi Torete. Sampel minyak bumi menunjukkan adanya predominasi dari terpana trisiklik C₂₃ (C23T), puncak terpana tetrasiklik C₂₄ (C₂₄Tet), Tm lebih tinggi dibandingkan Ts, hopana C₂₉ lebih tinggi dibandingkan hopana C₃₀, serta kehadiran bisnorhopana (BNH) dan gamaserana (Gm).



Gambar 6. Fragmentogram m/z 217 sterana dari sampel rembesan minyak bumi Torete. Kehadiran sterana C₂₉ sedikit lebih tinggi dibandingkan sterana C₂₇, dan puncak diasterana yang lebih pendek dibandingkan sterana pada kedua sampel minyak bumi.

DISKUSI

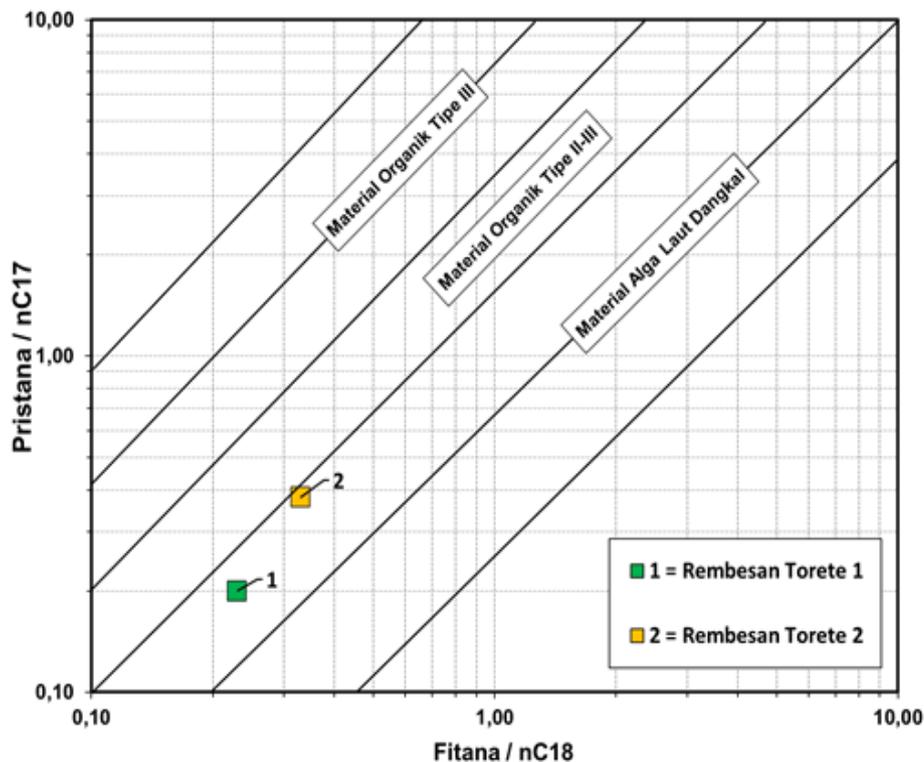
Asal Material Organik

Kedua sampel minyak bumi memiliki satu puncak yang sama (unimodal) sebelum alkana nC_{20} pada kromatogram (C_5+ *whole oil chromatogram*), mengindikasikan hanya ada satu sumber material organik berupa input material organik alga atau plankton (Peters dkk., 2005). Plot silang antara Pr/nC_{17} dan Ph/nC_{18} juga menunjukkan bahwa kedua sampel berasal dari batuan induk yang tersusun oleh material laut (Gambar 7). Oleanana dan bikadinana tidak dijumpai pada kedua sampel minyak bumi (Gambar 5). Hal ini mengindikasikan dua hal. Indikasi pertama adalah kedua sampel berasal dari batuan induk dengan input material organik marine atau nondarat (Waples dan Machihara, 1990; Peters dkk., 2005). Sedangkan pada indikasi kedua, kedua sampel berasal dari batuan

induk yang berumur lebih tua dari Kapur (Peters dkk., 2005).

Pada fragmentogram m/z 217 terlihat adanya dominasi sterana C_{29} pada kedua sampel (Gambar 6). Umumnya dengan adanya dominasi sterana C_{29} mengindikasikan kontribusi material organik darat, khususnya tumbuhan tingkat tinggi (Huang dan Meinschein, 1979).

Namun disatu sisi tidak hadirnya biomarker penciri karakter tumbuhan tingkat tinggi seperti: bikadinana, oleanana, dan puncak alkana normal di atas alkana nC_{22} pada kedua sampel. Sehingga diperkirakan dominasi sterana C_{29} merupakan berasal dari material organik lain. Dominasi sterana C_{29} bisa juga disebabkan kontribusi dari kehadiran radiolaria atau diatom kedalam batuan induk (Volkman, 1986; Hartono dkk., 2023).



Gambar 7. Plot silang antara Pr/nC_{17} dan Ph/nC_{18} untuk menggambarkan asal material organik (adaptasi dari Connan dan Cassou, 1980).

Oleh karena itu, kedua sampel rembesan minyak bumi Torete berasal dari batuan induk yang kaya akan material organik laut (alga, plankton, radiolaria dan diatom). Berdasarkan analisis biomarker penunjuk asal material organik, kedua sampel rembesan Torete kemungkinan berasal dari batuan induk yang tersusun oleh material organik laut yang biasa digolongkan ke dalam kerogen Tipe II.

Lingkungan Pengendapan

Kromatogram dari kedua sampel rembesan menunjukkan pristana yang lebih rendah dibandingkan fitana (Gambar 4). Secara kuantitatif rasio Pr/Ph dari sampel rembesan minyak bumi sebesar 0,87 dan 0,92, yang mengindikasikan bahwa sampel ini diendapkan pada lingkungan anoksik (Didyk dkk., 1978) atau anoksik-suboksik (Peters dkk., 2005). Namun penggunaan parameter pada alkana normal perlu digunakan secara hati-hati. Hal ini disebabkan oleh adanya pengaruh kematangan dalam distribusi alkana normal (Connan dan Cassou, 1980; Peters dkk., 2005).

Pada fragmentogram m/z 191 (Gambar 5), kedua sampel memperlihatkan dominasi terpana trisiklik C_{23} . Secara kuantitatif, hal ini ditunjukkan dengan rasio terpana trisiklik C_{24}/C_{23} dan C_{19}/C_{23} yang rendah (<1). Dominasi terpana trisiklik C_{23} mengindikasikan bahwa minyak bumi berasal dari batuan induk yang diendapkan pada lingkungan laut dangkal (Price dkk., 1987; Zumberge, 1987). Kedua sampel juga menunjukkan kehadiran dari terpana trisiklik $C_{26}+$ dan terpana tetrasiklik C_{24} Tet. Hal ini mengindikasikan bahwa minyak bumi berasal dari batuan induk karbonat yang diendapkan pada lingkungan laut dangkal (Price dkk., 1987; Peters dkk., 2005). Karakter karbonat juga diperlihatkan oleh dominasi hopana C_{29} yang lebih tinggi dibandingkan dengan hopana C_{30} (Gambar 5). Karakter ini biasanya ditemukan pada batuan karbonat (Palacas, 1984; Subroto dkk., 1991; Hartono dkk., 2023). Kehadiran dari senyawa bisnorhopana (BNH) pada kedua sampel menjadi indikator kuat bahwa minyak bumi berasal dari batuan induk karbonat (Subroto dkk., 1991; Subroto, 1990). Pola penurunan homohopana yang diakhiri dengan puncak homohopana C_{35} yang lebih tinggi dibandingkan homohopana C_{34} mendukung

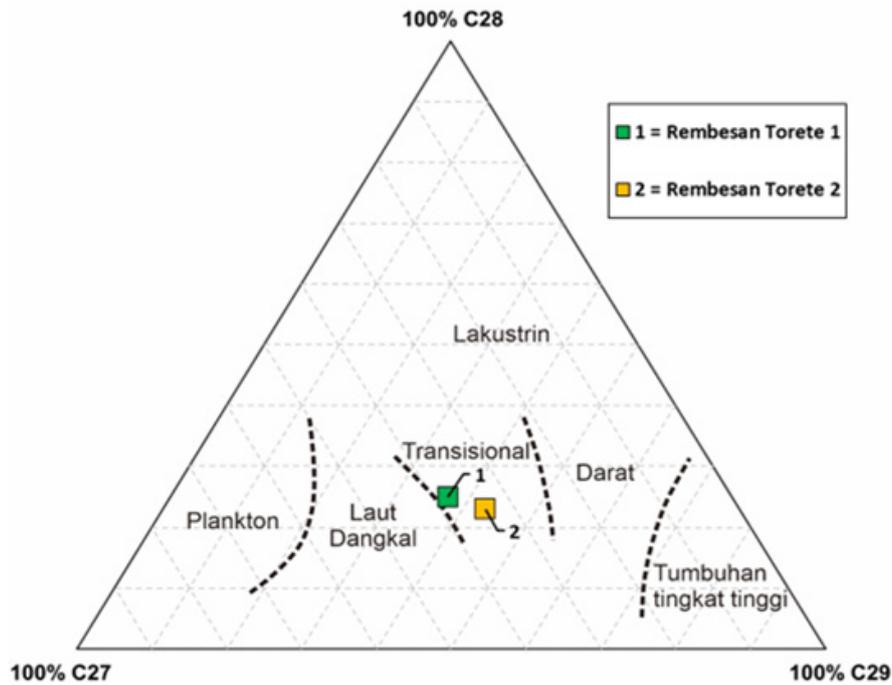
interpretasi bahwa kedua sampel berasal dari batuan induk yang diendapkan pada lingkungan tenang (Waples dan Machihara, 1990). Senyawa gamaserana muncul pada kedua sampel yang mendukung interpretasi bahwa minyak bumi berasal dari batuan induk yang diendapkan lingkungan anoksik (Waples dan Machihara, 1990; Peters dkk., 2005).

Pada fragmentogram m/z 217, kedua sampel menunjukkan dominasi dari sterana C_{29} terutama pada sterana $C_{29} \beta\beta$. Menurut Huang dan Meinschein (1979) hal ini mengindikasikan minyak bumi berasal dari batuan induk yang diendapkan pada lingkungan fluvio-deltaik. Namun disatu sisi biomarker petunjuk lingkungan fluvio-deltaik seperti bikadinana dan oleanana tidak hadir pada kedua sampel. Kemungkinan besar dominasi pada C_{29} ini disebabkan oleh input dari radiolaria dan diatom pada batuan induk karbonat (Volkman, 1986; Hartono dkk., 2023) (Gambar 8).

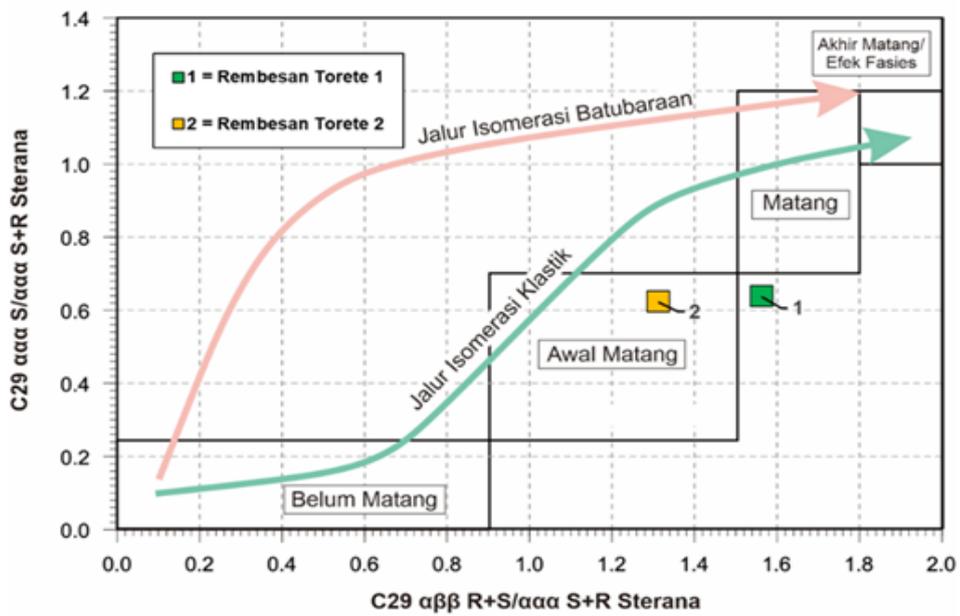
Kematangan Termal

Kematangan termal dari minyak bumi pada kedua sampel ditentukan oleh biomarker alkana normal, terpana, sterana, dan aromatik. Indikator awal bahwa kedua sampel menunjukkan relatif matang secara termal ditunjukkan dengan puncak yang unimodal pada kromatogram alkana normal. Selain itu juga dari nilai CPI (Bray dan Evans, 1961) sebesar 1,01 dan 1,02. Nilai CPI yang mendekati satu ($<1,5$) mengindikasikan bahwa minyak bumi berasal dari batuan induk yang setidaknya telah memasuki jendela minyak (Peters dkk., 2005). Kematangan kedua sampel juga ditentukan dari biomarker sterana yang direpresentasikan oleh plot silang antara rasio sterana $C_{29}\beta\beta/\alpha\alpha$ dan sterana $C_{29}20S/20R$ yang menunjukkan bahwa minyak bumi berasal dari batuan induk yang telah memasuki tahap awal matang hingga matang (Gambar 9).

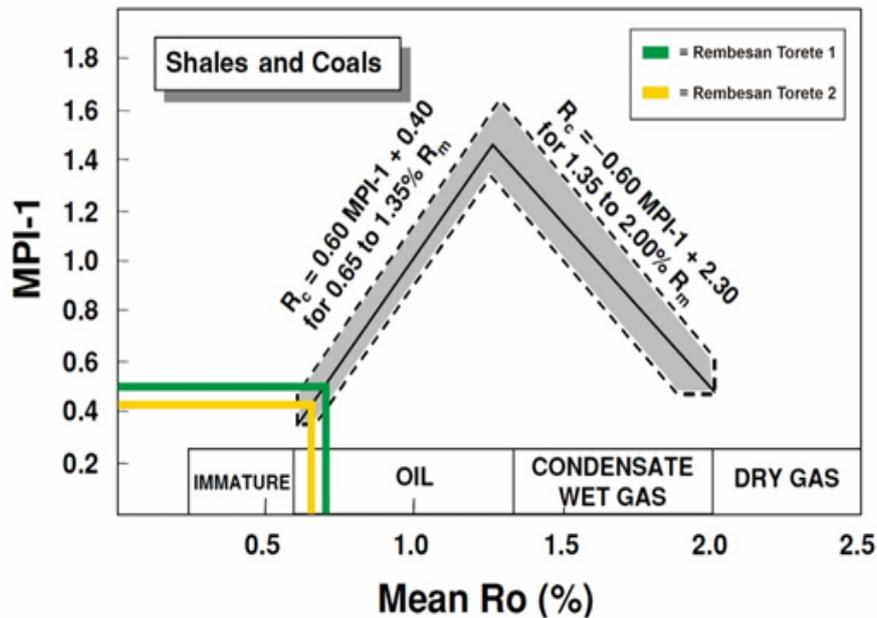
Biomarker aromatik merupakan yang paling lazim digunakan untuk menentukan kematangan (Alexander dkk., 1985; Radke dkk., 1986; Peters dkk., 2005). Nilai R_c untuk kedua sampel sebesar 0,65 dan 0,7. Hal ini mengindikasikan bahwa kedua sampel berasal dari batuan induk yang sudah memasuki puncak awal matang-matang seperti yang terlihat pada Gambar 10.



Gambar 8. Diagram terner sterana C27, C28, dan C29 yang memperlihatkan bahwa sampel rembesan minyak bumi diendapkan pada lingkungan karbonat transisional (Huang dan Meinschein, 1979).



Gambar 9. Plot silang antara rasio biomarker $C_{29\alpha\alpha}20S/C_{29\alpha\alpha}20R$ dan rasio biomarker sterana $\alpha\alpha\alpha$ terhadap sterana $\alpha\beta\beta$ (Miles, 1989). Kedua sampel minyak bumi sudah memasuki tingkat kematangan awal matang-matang.



Gambar 10 Plot silang antara MPI-1 dan kesetaraan Ro pada kedua sampel rembesan minyak bumi Torete (Radke dkk., 1984). Kedua sampel minyak bumi sudah memasuki tingkat kematangan awal matang.

KESIMPULAN

Kedua sampel rembesan Torete memiliki kesamaan dalam komposisi biomarker. Dalam kromatogram alkana normal, kedua sampel memiliki puncak kurang dari nC_{20} dan nilai Pr/Ph sebesar 0,87 dan 0,92. Fragmentogram m/z 191 dan 217 menunjukkan adanya predominasi terpana trisiklik C_{23} , puncak yang menonjol pada terpana tetrasiklik C_{24} , T_m lebih tinggi dibandingkan T_s , hopana C_{29} lebih tinggi dibandingkan hopana C_{30} , kehadiran bisnorhopana (BNH) dan gamaserana, sterana C_{29} yang sedikit lebih tinggi dibandingkan sterana C_{27} , serta sedikit kehadiran dari diasterana. Dari kelimpahan biomarker tersebut menunjukkan kedua sampel berasal dari material organik laut (alga, plankton, radiolaria, dan diatom), litologi batuan induk berupa karbonat dengan lingkungan pengendapan karbonat marine (transisional), serta tingkat kematangan awal matang-matang. Ketidakhadiran dari oleanana dan bikadinana menunjukkan dua hal. Pertama, kedua

sampel minyak bumi berasal dari lingkungan yang jauh dari sumber material tumbuhan tinggi. Kedua, sampel minyak bumi berasal dari batuan induk yang berumur lebih tua dari Kapur Akhir/Mesozoikum yaitu Formasi Nambo/Buya dan Formasi Tokala (Pertamina BPPKA, 1996). Untuk interpretasi yang kedua, harus dilakukan analisis biomarker khas penciri umur Mesozoikum atau dilakukan analisis korelasi minyak bumi yang sudah terbukti berumur Mesozoikum di Kawasan Indonesia Timur (Buton, Seram, Papua, dan Timor).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Survei Geologi dan rekan-rekan Kelompok Kerja Sumber Daya Migas atas bantuan dan diskusinya selama melakukan kegiatan Survei Cekungan Geologi di daerah penelitian dan juga selama penulis sebagai PNS di Pusat Survei, Badan Geologi yang ditugaskan melakukan studi pascasarjana di ITB.

DAFTAR PUSTAKA

- Alexander, R., Kagi, R.I., Rowland, S.J., Sheppard, P.N. dan Chirila, T.V., 1985. The effects of thermal maturity on distributions of dimethylnaphthalenes and trimethylnaphthalenes in some Ancient sediments and petroleum. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(2), 385–395.
- Bray, E.E. dan Evans, E.D., 1961. Distribution of n-paraffins as a clue to recognition of source beds. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 22(1), 2–15.

- Connan, J. dan Cassou, A.M., 1980. Properties of gases and petroleum liquids derived from terrestrial kerogen at various maturation levels. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(1), 1–23.
- Davies, I.C., 1990. Geological and exploration review of the Tomori PSC, eastern Indonesia.
- Dembicki Jr., H., 2017. *Practical Petroleum Geochemistry for Exploration and Production*. Elsevier.
- Didyk, B.M., Simoneit, B.R.T., Brassell, S.C. dan Eglinton, G., 1978. Organic geochemical indicators of palaeoenvironmental conditions of sedimentation. *Nature*, 272(5650), 216–222.
- Garrard, R.A., 1988. The geology of the Banggai-Sula microcontinent, eastern Indonesia. In: Proc. Indon Petrol. Assoc., 17th Ann. Conv. Seventeenth Annual Convention. *Indonesian Petroleum Association (IPA)*.
- Hall, R., 2012. Late Jurassic–Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean. *Tectonophysics*, 570–571, 1–41.
- Hartono, B.M., Subroto, E.A., Kesumajana, A.H.P., Andrianto, R., Malvinas, G. dan Wahyudiono, J., 2023. Geochemistry of carbonate-derived oils in the Seram Basin, eastern Indonesia: A new hydrocarbon generation, migration, and preservation model for exploration in fold-thrust belts. *Journal of Asian Earth Sciences*, 250, p.105647.
- Hasanusi, D., 2004. Prominent Senoro gas field discovery in Central Sulawesi. In: Proceedings, Deepwater and Frontier Exploration in Asia & Australasia Symposium. *Indonesian Petroleum Association (IPA)*.
- Huang, W.-Y. dan Meinschein, W.G., 1979. Sterols as ecological indicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43(5), 739–745.
- Kuo, L.-C., 1994. An experimental study of crude oil alteration in reservoir rocks by water washing. *Organic Geochemistry*, 21(5), 465–479.
- Magoon, L.B. dan Dow, W.G., 1994. The Petroleum System—From Source to Trap. *American Association of Petroleum Geologists*.
- Miles, J.A., 1989. *Illustrated Glossary of Petroleum Geochemistry*. Oxford University Press.
- Palacas, J.G., 1984. Petroleum Geochemistry and Source Rock Potential of Carbonate Rocks. *American Association of Petroleum Geologists*.
- Pertamina BPPKA, 1996. *Petroleum geology of Indonesian Basin: principles, methods, and application volume VI-IX Eastern Indonesia Basin*. Jakarta: Pertamina.
- Peters, K.E., Walters, C.C. dan Moldowan, J.M., 2005. The biomarker guide: Volume 2, *Biomarkers and isotopes in petroleum systems and earth history*. Cambridge University Press.
- Price, P.L., O’Sullivan, T. dan Alexander, R., 1987. The nature and occurrence of oil in Seram, Indonesia. *Indonesian Petroleum Association*.
- Radke, M., Leythaeuser, D. dan Teichmüller, M., 1984. Relationship between rank and composition of aromatic hydrocarbons for coals of different origins. *Organic Geochemistry*, 6, 423–430.
- Radke, M., Welte, D.H. dan Willsch, H., 1986. Maturity parameters based on aromatic hydrocarbons: Influence of the organic matter type. *Organic Geochemistry*, 10(1–3), 51–63.
- Rudyawan, A. dan Hall, R., 2012. Structural Reassessment of The South Banggai-Sula Area: No Sorong Fault Zone. In: Proc. Indon Petrol. Assoc., 36th Ann. Conv. Thirty-Sixth Annual Convention. *Indonesian Petroleum Association (IPA)*.
- Santy, L.D., 2016. The Mesozoic Source Rock Identification in Tomori Basin, East Arm of Sulawesi Its Implication for Petroleum Play. *Indonesian Petroleum Association*.
- Satyana, A.H. dan Zaitun, S., 2016. Origins of oils and gases at Banggai Sula microcontinent, eastern Sulawesi-north Moluccas: constraints from biomarkers and isotope geochemistry-implications for further exploration of Cenozoic and Pre-Cenozoic objectives. In: *Proceedings of the Indonesian Petroleum Association*.
- Simandjuntak, T.O., Rusmana, E., Suroño dan Supandjono, J.B., 2007. *Peta Geologi Lembar Malili, Sulawesi*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Subroto, E.A., 1990. 30-NOR-17 [alpha] (H) - *hopanes and their applications in petroleum geochemistry*. Curtin University.
- Subroto, E.A., Alexander, R. dan Kagi, R.I., 1991. 30-Norhopanes: their occurrence in sediments and crude oils. *Chemical Geology*, 93(1–2), 179–192.
- Supandjono, J.B. dan Haryono, E., 1993. *Peta Geologi Lembar Banggai, Sulawesi - Maluku*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Suroño, Simandjuntak, T.O., Situmorang, R.L. dan Sukido, 2011. *Peta Geologi Lembar Batui, Sulawesi*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Sutadiwiria, Y., Hamdani, A.H., Sendjaja, Y.A., Haryanto, I. dan Yeftamikha, Y., 2018. Biomarker Composition of Some Oil Seeps from West Sulawesi, Indonesia. *Indonesian Journal on Geoscience*, 5(3), 211–220.
- Volkman, J.K., 1986. A review of sterol markers for marine and terrigenous organic matter. *Organic geochemistry*, 9(2), 83–99.

- Waples, D.W. dan Machihara, T., 1990. Application of sterane and triterpane biomarkers in petroleum exploration. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 38(3), 357–380.
- Zumberge, J.E., 1987. Prediction of source rock characteristics based on terpane biomarkers in crude oils: A multivariate statistical approach. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(6), 1625–1637.