



## Proses Diagenesis Batupasir Formasi Kanikeh, Seram Bagian Timur, Maluku, Indonesia

### *Sandstone Diagenesis Process of Kanikeh Formation, Eastern Seram, Molucca, Indonesia*

Akhmad Khahlil Gibran<sup>1</sup>, Aries Kusworo<sup>2</sup>, Joko Wahyudiono<sup>2</sup>, Eko Bayu Purwasatriya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Soedirman, Kompleks Fakultas Teknik,  
 Jl. Mayjen Sungkono Km. 5, Blater, Kalimanah, Purbalingga

<sup>2</sup>Pusat Survei Geologi, Jalan Diponegoro No. 57 Bandung

email : [akgibran@unsoed.ac.id](mailto:akgibran@unsoed.ac.id)

Naskah diterima: 27 Juli 2018, Revisi terakhir: 25 Juli 2022, Disetujui: 25 Juli 2022, Online: 01 Agustus 2022

DOI: <http://dx.doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v23.2.113-122>

**Abstrak** - Batupasir Formasi Kanikeh yang berumur Carnian-Norian, tersebar dari Maluku hingga Maluku Tenggara. Formasi Kanikeh terendapkan pada lingkungan transisi dan karakter reservoir pada formasi ini masih belum banyak diungkap. Studi ini fokus terhadap pengaruh diagenesis terhadap karakteristik reservoir pada sikuen batupasir berumur Carnian-Norian di Daerah Seram Bagian Timur, Maluku. Metode yang digunakan adalah pengamatan petrografi dan *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectrometer* (SEM-EDS). Hasil pengamatan petrografi menunjukkan batupasir pada Seram Bagian Timur ini didominasi oleh *lithic wacke*, *litharenite*, dan *arkose*. Dari pengamatan SEM-EDS, mineral yang teramati termasuk dalam grup silika yang berasal dari kelompok mineral silika, feldspar, mineral lempung, dan mineral mika. Kelompok silika berupa butiran kuarsa. Kelompok feldspar yang teramati adalah K-feldspar yang berupa butiran. Kelompok mineral lempung paling dominan muncul di antaranya smektit, illit, kaolinit, halloisit. Kelompok mika yang teramati adalah muskovit. Diagenesis yang terjadi pada batupasir ini termasuk kompaksi; sementasi kalsit, kuarsa, mineral lempung, dan oksida besi; pelarutan; dan rekahan pada butiran karena tektonik. Butiran klastik yang tidak stabil, seperti feldspar mengalami alterasi menjadi mineral lempung. Berdasarkan karakteristik diagenesis tersebut, batupasir Formasi Kanikeh pada daerah ini memiliki karakter reservoir yang dapat diabaikan.

**Abstract** - Carnian-Norian aged sandstone from Kanikeh Formation are spread from Molucca to Southeast Molucca. The Kanikeh formation is deposited in a transitional environment, and reservoir characteristics of this formation are poorly known. This paper will discuss the diagenetic influence on reservoir characteristics investigated for the Carnian-Norian sandstone sequence in the Eastern Seram. This study consists of two main methods: petrographic analysis and *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectrometer* (SEM-EDS). The petrographic analysis shows that the sandstones of the Carnian sequence in the Eastern Seram are dominantly lithic wacke, litharenite, and arkose. SEM-EDS observations showed that the minerals belong to the silica group derived from the silica minerals, feldspar, clay minerals, and mica minerals. The silica mineral is a quartz grain. The observed feldspar mineral is K-feldspar in the form of granules. The most dominant clay minerals appear as smectite, illite, kaolinite, and halloysite. The observed mica group is muscovit. Diagenetic events in these sandstones include compaction, cementation by calcite, quartz, clay minerals and iron oxides, dissolution and alteration of unstable clastic grains, and tectonically induced grain fracturing. Unstable clastic grains like feldspars suffered considerable alteration to clay minerals. Based on the characteristics of the diagenesis, the Kanikeh Formation sandstones in the study area have a negligible reservoir characteristic.

**Keywords:** Diagenesis, Kanikeh, reservoir, Seram.

**Katakunci:** Diagenesis, Kanikeh, reservoir, Seram.

## PENDAHULUAN

Proses litifikasi adalah proses perubahan sedimen lepas menjadi batuan kompak (Selley, 2005). Kata 'diagenesis' merupakan kata yang mendeskripsikan proses litifikasi (von Gumbel, 1888). Diagenesis mengacu terutama pada reaksi yang terjadi dalam sedimen antara satu mineral dan mineral lainnya, atau antara beberapa mineral dan cairan interstisial atau supernatant (Pettijohn, 1957). Pada tahun 1968, Dunoyer de Segonzac memberikan penjelasan rinci tentang sejarah konsep diagenesis, dan menunjukkan bahwa, selain proses kimia yang disebutkan oleh Pettijohn (1957), beberapa proses fisik, seperti pemadatan, penting dalam diagenesis. Jadi, dua jenis diagenesis sekarang dikenal: fisik dan kimia. Diagenesis adalah istilah yang menggambarkan proses fisik dan kimiawi yang terjadi pada sedimen setelah pengendapan dan sebelum mencapai ambang metamorfosis (Selley, 2005). Proses fisik meliputi hilangnya cairan yang terkandung dan pemadatan, yang menghancurkan porositas, dan rekahan yang meningkatkan permeabilitas. Proses kimiawi meliputi sementasi penghancur porositas dan pelarutan yang meningkatkan porositas (Gibran dkk., 2020).

Di Cekungan Bula ada 2 wilayah kerja minyak bumi yang aktif, ialah blok Bula dengan play batupasir serta batugamping Kuarter; serta blok Oseil dengan play batugamping Jura (Gibran & Kusworo, 2020). Minyak bumi dari lapangan Bula serta lapangan Oseil berasal dari sumber yang sama (Wahyudiono dkk., 2018a). Formasi Kanikeh sudah lama diketahui mempunyai ciri batuan induk yang baik (Kemp & Mogg, 1992; Sujono & Wijayanti, 2012; Adlan dkk., 2018). Batupasir Carnian-Norian Formasi Kanikeh berpotensi menjadi reservoir yang baik (Adlan dkk., 2018). Formasi Kanikeh ialah batuan sedimen tertua yang ada di Cekungan Bula (Tjokrosapoetro & Budhitrisna, 1982). Formasi ini terdiri atas batuan silisiklastik yang menindih secara tidak selaras batuan metamorf yang lebih tua dan ditemukan kontak sesar dengan batuan yang lebih tua (Gafoer dkk., 1993). Formasi Kanikeh tersusun oleh perselingan batupasir serta serpih yang terendapkan pada lingkungan transisi (Wahyudiono dkk., 2018b; Chandra & Kusworo, 2019; Gibran & Kusworo, 2020). Studi batupasir Formasi Kanikeh dipilih karena keterdapatannya yang luas di Maluku dan adanya penemuan minyak baru-baru ini berasal dari batuan Mesozoikum pada sedimen Cekungan Bula, termasuk di daerah survei. Tujuan dilakukannya studi pada sikuen klastik Formasi Kanikeh ini untuk

mengungkap sejarah diagenesisnya serta karakter reservoir dengan menggunakan sampel permukaan yang berguna sebagai analogi bawah permukaan untuk memahami secara lebih baik kualitas reservoir tersebut.

## Kajian Pustaka

Diagenesis merupakan proses fisika, biologi dan kimia yang merubah material lepas sedimen menjadi batuan, sehingga tekstur dan/atau mineraloginya turut berubah (Pettijohn, 1975; Santy, 2014). Diagenesis bekerja sesaat setelah pengendapan sampai terbentuknya proses metamorfosis (temperatur sampai 150°/200°C dengan/tanpa tekanan). Diagenesis terjalin jika mineralogi batuan dalam kondisi tidak normal bagaikan hasil pergantian di dalam keadaan fisika, biologi dan kimia. Ketidak-stabilan umumnya terjalin pada kontak butiran serta di dalam ruang pori antar butiran. Pergantian tekanan serta temperatur menimbulkan mineral baru tercipta atau pun mineral yang telah terdapat sebelumnya beradaptasi dengan keadaan kesetimbangan yang baru.

Ada sebagian klasifikasi diagenesis yang bisa digunakan untuk mengenali tingkatan diagenesis batupasir. Klasifikasi tersebut sudah diperkenalkan oleh Burley dkk. (1987); Pettijohn dkk. (1987); Helmod & van de Kamp (1984); Schmidt & McDonald (1979). Klasifikasi Helmod & van de Kamp (1984) serta Schmidt & McDonald yang sudah dimodifikasi dalam Burley dkk. (1987) digunakan dalam studi ini. Helmod & van de Kamp (1984), membagi proses diagenesis akibat penimbunan menjadi Grup A (*early shallow subsurface*), Grup B (*late deep subsurface*), dan Group C. Tingkatan diagenesis dapat dibagi menjadi eodiagenesis, mesodiagenesis belum matang, mesodiagenesis semi matang, mesodiagenesis matang A, mesodiagenesis matang B, serta luar biasa matang (Schmidt & McDonald, 1979). Burley dkk. (1987) membagi tingkatan diagenesis menjadi tingkatan Ia, I, II, III, serta IV. Karakteristik reservoir batupasir ditentukan oleh proses diagenesis. Proses ini dapat menambah maupun mengurangi porositas batuan. Proses yang paling penting adalah kompaksi, pelarutan, sementasi oleh kalsit, mineral lempung, dan oksida besi.

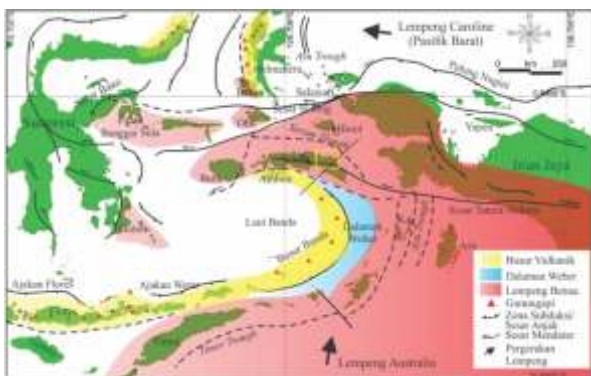
Selama proses diagenesis, sedimen mengalami perubahan lingkungan dengan kondisi berbeda yang dapat mengaktifkan sumber silika untuk semen kuarsa, seperti pelarutan feldspar (Hawkins, 1978), *pressure solution* (Houseknecht, 1988; Dutton & Diggs, 1990; Dutton, 1993; Walderhaug, 1994), penggantian kuarsa dan feldspar oleh kalsit (Burley & Kantorowicz, 1986) dan perubahan mineral lempung (Hower dkk., 1976). Untuk setiap mol K-feldspar teralterasi menjadi kaolinit, dua mol silika dilepaskan dan menjadi bahan dasar semen (Siever, 1957). Tahap lanjut pelarutan feldspar dan

kepingan material vulkanik, kaolinitisasi, dan kompaksi kimia adalah sumber silika yang memungkinkan terjadinya sementasi kuarsa. Semen kuarsa mulai mengalami presipitasi pada pori yang terbuka sebelum sementasi kalsit secara masif.

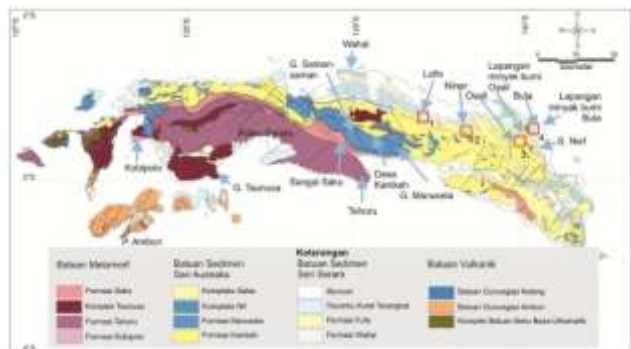
**GEOLOGI REGIONAL**

Daerah survei dilalui sejumlah patahan yang memotong batuan dasar dengan arah baratlaut-tenggara dan menerus hingga Pulau Papua di timur (Hill, 2012; Gambar 1). Struktur sepanjang Pulau Seram dalam bentuk Sesar mendatar mengiri Tarera Aiduna memotong batuan dasar dan lapisan sedimen di atasnya. Lipatan-lipatan yang terdeformasi secara kuat, berasosiasi dengan berbagai patahan yang memiliki arah berbeda. Lipatan tersebut membentuk antiklin asimetris menunjam dua arah yang biasa ditemukan di lapangan (Gambar 2).

Secara umum Pulau Seram menjadi dua bagian (Hill, 2012), yaitu: Seram Bagian Barat, terdiri atas lembaran sesar anjakan yang disusun oleh seri batuan metamorfik derajat rendah dan berumur Paleozoikum hingga Pliosen Awal. Batugamping berumur Trias juga banyak dikenali ikut ke dalam seri sesar anjakan Pulau Seram. Sementara itu, di bagian timur terdiri atas seri imbrikasi runtunan sedimen laut dalam berumur Trias hingga Miosen dengan blok batuan metamorf derajat tinggi (Gambar 2). Litologi terdiri atas kompleks batuan metamorf, ofiolit dan suksesi batuan sedimen yang terimbrikasi oleh kumpulan sesar anjakan yang berkembang ke arah timur-timurlaut. Audley-Charles (1979) menyebutkan bahwa Pulau Seram secara geologi mirip dengan Pulau Timor yang terdiri atas: 1) Komplek batuan dasar metamorfik, 2) Seri batuan para autohton berumur Trias hingga Miosen, 3) Seri batuan alohton yang terdiri atas imbrikasi batuan metamorf, batugamping Trias dan olisostrom berumur Miosen Akhir, dan 4) Sedimen yang berkaitan dengan orogenesis Pliosen-Plistosen.



**Gambar 1.** Tatanan tektonik Indonesia Timur (modifikasi dari Hill, 2012). Kotak warna kuning adalah lokasi survei.



sumber: modifikasi Tjokrosoetro dkk., 1993; Gafoer dkk.,1993

**Gambar 2.** Peta geologi Pulau Seram. Kotak merah adalah lokasi survei.

**METODOLOGI**

Total ada 26 sampel digunakan untuk merepresentasikan studi petrografi dan *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectrometer* (SEM-EDS) yang didapatkan dari singkapan. Pengamatan singkapan dan pengumpulan sampel difokuskan kepada batuan-batuan siliklastik berumur Trias, dalam hal ini batuan sedimen yang termasuk ke dalam Formasi Kanikeh. Sampel dikumpulkan berdasarkan urutan stratigrafi dan letak geografisnya (Gambar 3). Preparasi sampel dan pengamatan petrografi dilakukan di Laboratorium Pusat Survei Geologi. Analisis petrografi bertujuan untuk mengetahui komposisi, jenis, dan presentase butiran, matriks, semen, dan porositas sampel batupasir. Dalam mengidentifikasi kebulgaran butiran menggunakan pembandingan Powers (1953) dan kontak butiran merujuk Taylor (1950). Pengamatan jenis porositas batuan berdasarkan Boggs (2009). Analisis SEM bertujuan untuk mengamati topografi, morfologi, dan komposisi batuan atau mineral. Topografi dilakukan untuk menganalisis permukaan dan tekstur. Morfologi adalah teknik untuk menganalisis bentuk dan ukuran dari sampel. Komposisi adalah teknik untuk menganalisis komposisi dari permukaan benda secara kuantitatif dan kualitatif. Preparasi dan pengujian sampel SEM dilakukan di Laboratorium Pusat Survei Geologi Bandung. Pengujian menggunakan peralatan *Scanning Electron Microscope* JEOL JSM-6360LA, dilengkapi dengan *Energy Dispersive Spectrometer* (EDS) system JEOL JED-2300. Alat ini dapat memperbesar objek sampai 300.000 kali dan menentukan konsentrasi unsur kimia secara semi-kuantitatif.

**HASIL KEGIATAN**

**Analisis Petrografi**

Analisis petrografi dilakukan terhadap 5 sampel batuan siliklastik berupa batupasir Formasi Kanikeh. Analisis



mikroskopis ini dilakukan untuk mengamati komposisi mineral, tekstur, dan tahapan diagenesis yang telah dialami batuan. Berdasarkan prosentase mineral yang terkandung (kuarsa (Q), feldspar (F), litik (L)) dan persentase kandungan jumlah matriksnya, batuan diklasifikasikan ke dalam klasifikasi batuan sedimen oleh Pettijohn dkk. (1987). Hasil penghitungan prosentase setiap jenis mineral dan menentukan nama batuan dalam klasifikasi petrografi batuan siliklastik, menghasilkan tiga nama batuan yaitu *lithic wacke*, *arkose*, dan *litharenite*.

**Lithic Wacke**

Sayatan batuan sedimen kode sampel 14KG025 dengan warna coklat terang, struktur masif, tekstur klastika fragmental, pemilahan buruk, kemas terbuka, ukuran butir 0,05 mm hingga 0,73 mm dengan rata-rata 0,26 mm, butiran membundar tanggung hingga menyudut tanggung, hubungan butir dicirikan dengan hubungan butir titik dan panjang. Butiran terdiri atas kuarsa monokristalin dan polikristalin, feldspar, litik, dan mika. Kuarsa memiliki pepadaman bergelombang, membundar tanggung, dijumpai retakan. Feldspar memiliki kembaran, dijumpai retakan, sebagian berubah menjadi mineral lempung. Litik terdiri atas batuan sedimen berbentuk membundar hingga menyudut tanggung. Mika hadir di antara butiran sebagai mineral allogenetik (Gambar 4.A).

**Arkose**

Sayatan batuan sedimen kode sampel 14KG45R dengan warna coklat terang keruh, struktur laminasi sejajar, tekstur klastika fragmental sedang, pemilahan sedang, kemas tertutup, ukuran butir 0,06 mm hingga 0,53 mm dengan rata-rata 0,28 mm. Butiran berbentuk membundar tanggung hingga menyudut tanggung, hubungan butir umumnya panjang dan gerigi. Butiran terdiri atas kuarsa monokristalin, kuarsa polikristalin, felspar, kepingan batuan, bercak karbon, piroksen, mika, dan mineral opak. Semen berupa rekristalisasi matriks berupa mineral kalsit, oksida besi, dan karbonat. Sistem porositas berupa intergranular (Gambar 4.B).

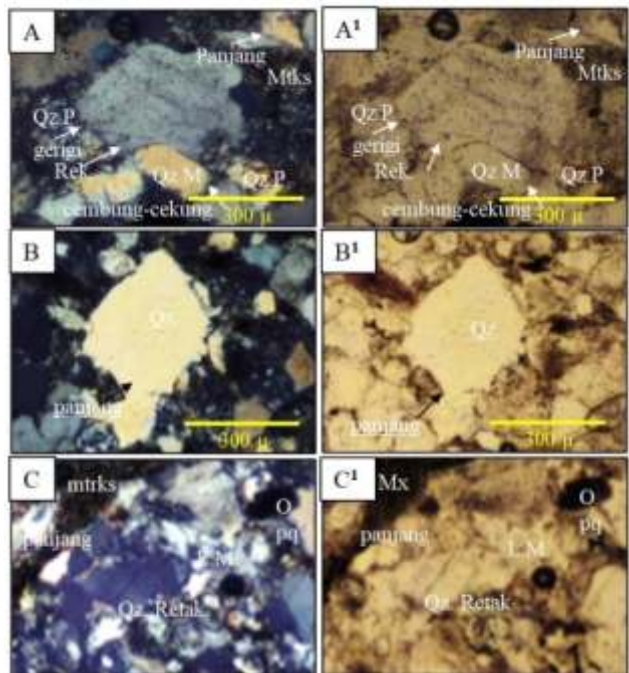
**Litharenite**

Sayatan batuan sedimen kode sampel 14KW20C dengan warna coklat terang keruh, tekstur klastika pemilahan buruk, kemas tertutup, ukuran butir 0,05 - 0,4 mm, dengan rata-rata 0,15mm. Butiran berbentuk menyudut tanggung hingga menyudut, hubungan butir titik, panjang dan gerigi. Komposisi batuan

tersusun atas mineral kuarsa monokristalin dan polikristalin, felspar, kepingan batuan, mika, dan karbon yang tertanam dalam matriks berupa lempung yang telah mengalami rekristalisasi menjadi mineral lempung, sementasi berupa oksida besi dan kalsit. Porositas berupa dan intragranular dan intergranular (Gambar 5).



**Gambar 3.** Peta lokasi survei di lintasan Bula, Oseil, Niner dan Lofin terletak di pulau Seram, Provinsi Maluku.



**Gambar 4.** A. Mikrofoto petrografi nikol silang batupasir Formasi Kanikeh yang menunjukkan adanya butiran kuarsa mono kristalin dan poli kristalin, kontak butiran memanjang dan gerigi. Sampel 14KG025); A1. Adalah foto petrografi nikol sejajar dari gambar 5.A.; B. Mikrofoto petrografi nikol silang yang menunjukkan kontak butiran panjang pada Sampel 14KG045R); B1. Adalah mikrofoto petrografi nikol sejajar dari gambar 5.B.; C. Mikrofoto petrografi yang menunjukkan bukti adanya proses kompaksi adanya hubungan butir panjang dan gerigi, selain itu juga ditemukan butiran kuarsa yang retak yang sudah terjadi sebelum pengendapan (Sampel 14KG020C); C1. Adalah mikrofoto petrografi nikol sejajar dari gambar 5.C.

### Analisis SEM-EDS

Analisis SEM-EDS dilakukan terhadap 21 sampel batuan yang diambil dari 4 lokasi pengamatan, jenis litologi yang diamati berupa batupasir. Analisis SEM-EDS bertujuan untuk mengamati topografi, morfologi, dan komposisi batuan atau mineral.

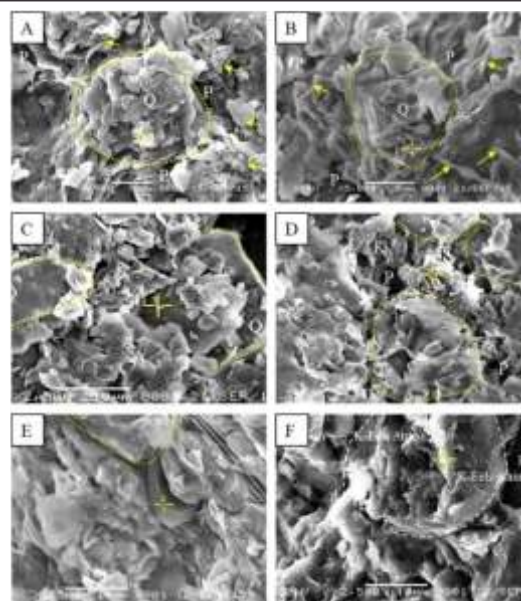
Dari pengamatan SEM-EDS yang dilakukan semuanya termasuk dalam grup silika yang berasal dari kelompok mineral silika, feldspar, mineral lempung, dan mineral mika. Kelompok silika berupa butiran kuarsa, Kelompok feldspar yang teramati adalah K-Feldspar yang berupa butiran. Kelompok mineral lempung paling dominan muncul antara lain smektit, illit, kaolinit, halloisit, dan kelompok mika yang teramati adalah muskovit.

Smektit adalah mineral lempung yang tergolong dalam kelompok silika. Berdasarkan seluruh pengamatan SEM yang telah dilakukan dalam survei, mineral ini paling banyak muncul (Tabel 1). Smektit banyak menggantikan matriks lempung dan sebagai *pore lining* yang menyelimuti butiran halus. Pada pengamatan SEM dengan kode sampel KW17, smektit berkembang dengan baik, berbentuk pipih sebagian melapisi butiran kuarsa (Q). Morfologi webby yang khas dari sistem kristal smektit (Gambar 5.A). Berdasar kanan analisis SEM-EDS menunjukkan smektit tersusun oleh unsur utama Al, Si, K, Fe.

Illit adalah mineral lempung yang tergolong dalam kelompok silika. Pada pengamatan sampel KW23L teramati morfologi khas mineral illit yang berbentuk pipih berlembar, pada ujungnya berserabut, menyelimuti butiran kuarsa, dan mengisi pori-pori batuan (*pore bridging*; Gambar 5.B).

Halloisit adalah mineral lempung yang tergolong dalam kelompok silika. Berdasarkan pengamatan SEM mineral muncul dengan persentase 2% dari seluruh pengamatan yang telah dilakukan. Berdasarkan pengamatan di bawah SEM pada sampel KW23E mineral halloisit berbentuk tabung memanjang menempel pada butiran kuarsa mengisi pori-pori batuan (Gambar 5.C).

Kaolinit merupakan salah satu jenis mineral lempung yang termasuk dalam grup silika. Berdasarkan pengamatan mikroskopis di bawah SEM kaolinit berbentuk berbuku-buku mengisi rongga antar butiran sebagai *discrete particle* (Gambar 5.D). Mineral kaolinit jarang hadir dalam rekahan mikro dalam butiran, namun sering terbentuk insitu sebagai *expense* dari proses pencucian mineral feldspar.



**Gambar 5.** A) Mikrofoto SEM pada sampel KW17V menunjukkan butiran kuarsa (Q) yang dilingkupi oleh mineral lempung smektit (panah kuning); B) Mikrofoto SEM pada sampel KW23L menunjukkan butiran kuarsa (Q) dan pori-pori batuan (P) yang terlingkupi oleh mineral illit (panah kuning); C) Mikrofoto SEM pada perbesaran 2000 kali pada sampel KW23E, menggambarkan butiran kuarsa yang terlingkupi mineral halloisit (tanda silang) dan mineral smektit (S), kuarsa berbentuk memanjang dan pori-pori (P) batuan masih terawetkan dengan baik; D) Mikrofoto SEM sampel KW23M, menunjukkan adanya mineral kaolinit (K) berbentuk berbuku seperti akordeon, mineral kaolinit mengisi pori-pori batuan (P) sebagai *discrete particle*; E) Mikrofoto SEM sampel KW17AS menunjukkan adanya butiran mika (tanda silang) yang telah mengalami pembengkokan akibat proses kompaksi; F) Mikrofoto SEM sampel KW17BH yang menggambarkan butiran K-feldspar yang telah mengalami pelarutan sehingga menghasilkan K-feldspar autogenik di sekitar butiran K-feldspar.

Muskovit sebagai butiran berbentuk pipih berlembar, berukuran lebar 10  $\mu\text{m}$  dan tebal 3  $\mu\text{m}$ , dalam foto SEM butiran mika nampak telah mengalami pembengkokan akibat proses kompaksi (Gambar 5.E).

Kuarsa sebagai butiran berbentuk kotak, tertanam dalam matriks lempung, ukuran diameternya 5  $\mu\text{m}$ . Berdasarkan SEM-EDS unsur utama penusunnya adalah Si (Gambar 5.C).

K-Feldspar mengalami pelarutan dan membentuk mineral lempung autigenik. Ukuran diameter butir feldspar 20  $\mu\text{m}$  dan ukuran feldspar autogenik berdiameter 2-3  $\mu\text{m}$  (Gambar 5.F).

### DIAGENESIS

Karakteristik batupasir ditentukan oleh proses diagenesis, proses ini dapat menambah maupun mengurangi porositas batuan. Proses yang paling penting adalah kompaksi, pelarutan, dan sementasi (Gibran dkk., 2020).

**Tabel 1.** Hasil pengamatan foto SEM-EDS

Kode Sampel	Lokasi	Jenis Mineral	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	S	Mn	Ca	Ti	Fe	Rh	Zn	Ta	Nb	Jumlah
15KW017BH	Oseil	K-feldspar	48.78				13.55	31.05	6.63										100.01
		K-feldspar	49.02					13.07	31.27	6.05									
15KW017BD	Oseil	Smektit	47.49					14.33	28.6	7.10				2.42					100
15KW017BA	Oseil	Muskovit	48.91					14.70	30.31	6									100
15KW017A5	Oseil	Kaolinite	51.27					10.96	31.77										100
		Smektit	48.88					14.59	30.42	6.12									100
15KW017AN	Oseil	Smektit	0.55	45.15				14.16	25.3	6.43	3.2			5.22					100.01
15KW017AD	Oseil	Smektit	52.50					5.97	41.47										100
		Smektit	22.1		1.24	6.21			3.53					3.87			63.05		100
15KW017V	Oseil	Smektit	48.3					14.32	29.72	5.9									100.01
		Smektit	47.68					14.81	28.53	6.80					2.11				99.99
15KW017P	Oseil	Smektit	48.11		1.11			13.81	29.31	6.02									100
		Smektit	0.72	48.39				13.69	30.59	6.61									100
15KW017J	Oseil	Smektit	47.33					14.53	27.67	6.03			0.99	6.398					102.948
15KW017E	Oseil	Smektit	0.13	48.21	0.39	1.15		15.74	28.12	6.26									100
		Smektit	0.77	47.99				15.02	28.42	6.07					2.12				99.99
15KW017A	Oseil	Illit	40.42					9.33	19.74	7.7		4.01	2.83	15.97					100
		Illit	40.09					10.4	26.99	3.42	1.56	2.37		7.57					100
15KW023A	Nirer	Illit	1.75	48.14		0.99		13.41	30.23	5.49									100.01
		Smektit	2.03	42.99	1.05			10.88	25.08	9.46					8.51				100
15KW023E	Nirer	Smektit	3.02	46.90		0.90		13.72	28.45	5.3		1.39							100
		Haloisit	51.33					14.79	33.68										100
15KW023F	Nirer	Illit	47.94					10.99	27.44	7.63									100
		Smektit	09.68	15.52				5.39	9.42										100.01
15KW023G	Nirer	Smektit	1.69	48.40		0.51	7.54	34.81	2.91					4.08					100
		Kunzia	52.36					7.69	39.95										100
15KW023J	Nirer	Smektit/illit	2.29	46.26		1.22	13.2	27.57	4.95					4.51					100
		Smektit	3.08	47.1		1.14	14.04	28.65	5.99										100
15KW023L	Nirer	Illit	1.68	47.41				11.53	30.73	4.31				4.54					100
		Illit	6.41	42.98		1.12	11.5	25.13	3.53					9.31					100
15KW023M	Nirer	Illit	1.6	45.06		0.91	8.56	28.79	3.38					11.05	0.66				100.01
		Kaolinit	1.14	43.23	1.03		8.9	25.92	2.91					16.89					100
15KW023N	Nirer	Illit	1.41	48.33		1.36	13.77	29.96	5.16										99.99
		Illit	1.89	46.4				14.12	27.5	4.65				5.43					99.99
15KW023Q	Nirer	Illit	1.22	47.62				10.17	31.84	3.98				3.18					100.01
		Smektit	1.42	48.58		1.13	10.74	32.57	4.68						0.88				100
15KW024I	Nirer	Illit	3.62	45.31				12.94	27.31	4.99				5.83					100
		Smektit	6.4	42.71				11.49	23.42	4.73								11.25	100
15KW029X	Lofin	Smektit	2.9	50.05				8.52	37.01	1.52									100
		Smektit	2.23	49.29	1.78			12.06	33.01	1.62									99.99

**Kompaksi**

Seluruh batupasir mengalami proses kompaksi mekanik, meskipun pengaruh penimbunan tidak efektif menghasilkan efek kompaksi yang kuat, beberapa efek mekanik ditandai oleh hubungan butiran titik, panjang, cembung cekung, dan gerigi (Gambar 4), selain itu juga terdapat butiran mika yang terbelokkan (Gambar 5.E).

Proses kompaksi akan mengurangi volume porositas intergranular secara signifikan. Porositas intergranular sangat dipengaruhi oleh kehadiran semen kalsit, hadirnya semen kalsit akan mengurangi volume porositas. Proses kompaksi mekanik dan semen autigenik akan mengurangi nilai porositas dan permeabilitas, berbeda dengan proses pelarutan butiran klastik (feldspar) sehingga meningkatkan nilai porositas batupasir. Proses kompaksi tahap lanjut tetap berlangsung hingga dimulainya proses hubungan butir gerigi pada sampel (Gambar 4.B). Hal tersebut menunjukkan proses kompaksi tahap lanjut.

**Pelarutan**

Beberapa kenampakan pelarutan butiran *unstable* juga merupakan hasil proses diagenesis batupasir. Butiran yang paling banyak mengalami proses pelarutan adalah feldspar (Gambar 4.D). Pelarutan dapat terjadi di dekat permukaan bumi oleh air

meteorik (Mathisen, 1984). Proses tersebut menghasilkan porositas untuk sementasi sekunder, beberapa pori batuan menjadi tempat pengendapannya (*coating*) mineral lempung. Selain itu proses pelarutan juga terjadi pada saat tahap akhir dari proses diagenesis yang ditandai dengan pelarutan semen autigenik, biasanya kalsit. Kedua proses tersebut menghasilkan porositas sekunder.

**Sementasi**

Beberapa jenis mineral autigenik yang teramati pada sayatan batuan yaitu: oksida, kalsit, dan mineral lempung. Kehadiran semen-semen tersebut mengurangi nilai porositas.

**Mineral Lempung**

Kehadiran mineral lempung tidak dominan dan sangat minor dari sampel yang diamati. Mineral lempung umumnya hadir dan berfungsi sebagai matriks. Hasil pengamatan petrografi belum dapat memisahkan jenis dari mineral lempung yang hadir apakah haloisit, kaolinit, smektit ataupun illit (Gambar 5). Analisis SEM-EDS dapat membantu dalam determinasi mineral lempung yang hadir dalam sayatan. Mineral lempung hadir sebagai matriks yang mengisi ruang antar butiran. Kehadiran mineral lempung sangat signifikan mengurangi volume pori-pori batuan.



### Karbonat

Semen kalsit merupakan satu-satunya mineral karbonat yang dijumpai pada batupasir, semen tersebut hadir. Kalsit hadir sebagai mineral autigenik yang mengisi rongga antar butiran.

### Oksida Besi

Semen oksida besi hadir dengan rata-rata 2-5 %, meskipun kebanyakan batupasir hanya sedikit kandungannya. Semen ini hadir di antara butiran dan bahkan memenuhi pori-pori sehingga mengurangi nilai porositas, selain itu semen juga banyak dijumpai melapisi butiran kuarsa. Semen oksida besi nampak pada sampel yang diamati. Beberapa oksida besi terbentuk pada lingkungan dengan kondisi oksidasi merupakan proses diagenesis tahap awal.

Semen oksida besi hadir pada tahap awal dari proses diagenesis sebelum secara signifikan terkompaksi. Pigmen warna merah pada lapisan batupasir berasal dari proses diagenesis dan merupakan atribut utama dari alterasi intrastratal dari material silikat setelah pengendapan.

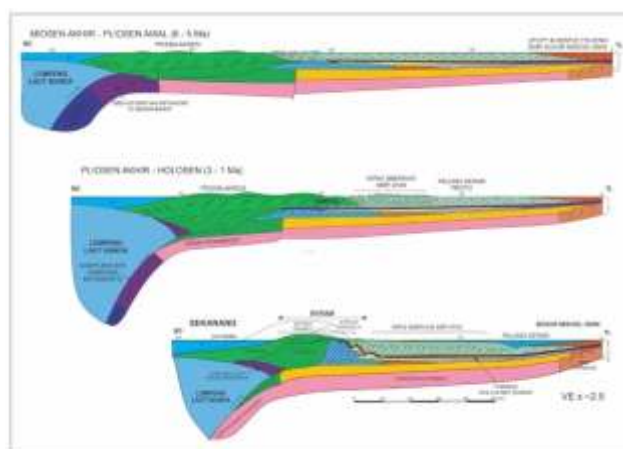
## DISKUSI

Pengujian petrografi dan SEM memberi gambaran umum jenis batuan yang dianalisis terhadap 26 sampel terpilih. Batupasir yang diuji memiliki komposisi kuarsa, feldspar, dan litik, yang dapat diklasifikasi menjadi *lithic wacke*, *arkose*, dan *litharenite*. Proses diagenesis yang membentuk batupasir ini termasuk kompaksi, sementasi, dan pelarutan. Karakteristik dari reservoir sangat dipengaruhi oleh komposisi dari batupasir, kedalaman *burial*, dan pengangkatan. Mineral diagenesis utama yang ada di batupasir ini, yaitu kalsit, kuarsa, oksida besi, dan mineral lempung.

Berdasarkan proses kompaksi yang dicirikan oleh dominasi kontak antar butir *long contact* (Gambar 4.A), *concave-convex contact* (Gambar 4.A), dengan sedikit pembengkokan mika (Gambar 5., munculnya *quartz overgrowth* akibat *pressure solution* (Gambar 5.E), dan perubahan mineral lempung smektit menjadi illit (Gambar 5.B), serta disolusi butiran feldspar (Gambar 4.D dan 5.F), maka batupasir Carnian-Norian ini termasuk dalam diagenesis *late deep subsurface* (Group C) menurut klasifikasi Helmod & van de Kamp (1984). Berdasarkan klasifikasi Schmidt & McDonald (1979), termasuk ke dalam mesogenetik matang B. Berdasarkan klasifikasi Burley dkk. (1987), batupasir

ini termasuk dalam bagian bawah dari tingkat III dengan temperatur 95°-120°C, dan kedalaman timbunan berkisar antara 3.000 m hingga 4.000 m (Tabel 2).

Hill (2012) telah membuat penampang regional Pulau Seram menggambarkan struktur geologi Pulau Seram dari ujung timur di busur Misool-Onin hingga di baratdaya pada subduksi lempeng samudera di selatan Seram (Gambar 6). Tinggian Onin, telah mengalami pengangkatan dan erosi pada Miosen Akhir (Pairault dkk., 2003). Daerah tersebut diinterpretasikan masih berada pada lempeng benua dengan ketebalan normal. Sedimen Plistosen pada *Seram Trough* telah mengalami perlipatan dan sesar anjak menengah hingga sekarang. Sesar lantai yang membatasi bagian bawah sesar anjak adalah *Kola Shale* dan *Nief Beds* bagian bawah. Di bawah Pulau Seram bagian utara terdapat kompleks dupleks batugamping Formasi Manusela. Sumur *East Nief* secara jelas menunjukkan adanya *Kola shale* (Jura Akhir) dan *Nief Beds* (Kapur) dan beberapa ratus meter campuran *Nief Beds* dengan Formasi Kanikeh (Trias) menindih Batugamping Manusela (Kemp & Mogg 1992). Seluruh urutan tersebut berada di bawah imbrikasi Formasi Kanikeh. Formasi Kanikeh dilaporkan terendapkan pada lingkungan laut dalam, namun terdapat batubara tipis. Formasi Kanikeh diinterpretasikan telah mengalami sesar anjak ke atas Formasi Manusela, sedangkan pada Formasi Manusela terbentuk struktur dupleks dan bagian atasnya terdapat sesar atap dari sistem sesar anjak Formasi Kanikeh. Batas paling selatan Formasi Manusela adalah batas perubahan fasies yang setara waktu dengan Formasi Kanikeh. Dengan adanya sejarah tektonik kompresi menyebabkan terjadinya sesar-sesar anjak yang kemudian menambah ketebalan timbunan hingga 4.000 m. Hal tersebut mengakibatkan kenaikan suhu dan meningkatkan kompaksi pada batupasir Formasi Kanikeh.



**Gambar 6.** Penampang rekonstruksi tektonik dari umur Miosen Akhir hingga sekarang pada daerah Seram, dengan eksagerasi vertikal 2,5; lihat Gambar 1 untuk lokasi penampang (Modifikasi dari Hill, 2012).

**Tabel 2.** Hubungan antara tingkat diagenesis dengan kedalaman timbunan (Modifikasi Burley dkk., 1987)

Temperatur (°C)	Tahapan Batupasir Burley dkk., (1987)	Schmid dan McDonald (1979)	Perubahan Mineral Lempung	Material Organik	Pengaruh Diagenesis pada Batupasir	Kedalaman (Met)
10	la	Bekas matang, secara umum pengurangan porositas oleh kompaksi mekanis	Sedikit perubahan	CO <sub>2</sub> Mikrobial SO <sub>4</sub> Formasi Mikrobial CH <sub>4</sub>	Pendehidrasian senyawa karbonat	0
65	II	Semi matang, secara umum pengurangan porositas secara kinemat	Smektit → Illit	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O Pengurangan jenuh	Presipitasi hidroksi karena peningkatan pH	1
80	III	Matang 'A', pembentukan porositas sekunder	Klinit	Oil	Perusakan	2
90-95	III	Matang 'B', pengurangan porositas sekunder	Peningkatan kristinitas lempung	Gas	Karbonat Porsin Kuarsa Osmiumit	3
120-160	IV	Suatu Matang, hanya terjadi sedikit porositas	Illit → Mesgilit	Gas	Klinit mengantikan kaolinit Pengurangan porositas tertunda	4-6
220	METAMORFISME AWAL					
Pembentukan fasies silika lepas dengan rekristalisasi dengan kumpulan mineral muskovit-illit-kuarsa						

Selanjutnya, porositas batuan dikontrol oleh kompaksi dan sementasi. Dalam hal ini porositas umumnya berkurang oleh kompaksi dan sementasi oksida besi, kuarsa, kalsit, dan kaolinit. Porositas sekunder terbentuk dari disolusi feldspar dan kalsit sebagai respon dari *progressive burial*. Kehadiran mineral lempung yang melapisi atau mengisi pori-pori menyebabkan berkurangnya porositas dan permeabilitas. Permeabilitas dipengaruhi oleh kehadiran *authigenic clays* seperti kaolinit, smektit, dan illit. Disolusi semen kalsit pada beberapa sampel berkontribusi mempengaruhi besarnya porositas sekunder. Kelimpahan autigenik kaolinit juga

membawa pengaruh terhadap porositas mikro (Gambar 5.D). Dari hasil observasi petrografi menunjukkan batupasir memiliki tekstur yang *immature*, berdasarkan banyaknya jumlah butiran menyudut, ketidakseragaman ukuran butir, banyak mengandung mineral lempung sebagai matriks, dan banyak mengandung butiran feldspar. Kondisi tersebut menyebabkan nilai porositas dalam batupasir Formasi Kanikeh menjadi buruk.

**KESIMPULAN**

Ativitas tektonik konvergensi sejak Miosen Akhir di Pulau Seram sangat berpengaruh terhadap proses diagenesis batupasir Formasi Kanikeh. Tingkat diagenesis batupasir Formasi Kanikeh termasuk ke dalam *late deep subsurface* (Grup C), atau termasuk ke dalam mesogenetik matang B. Batupasir ini termasuk dalam bagian bawah dari tingkat III dengan temperatur 95°-120°C, dan kedalaman timbunan berkisar antara 3.000 m hingga 4.000 m. Pengaruh diagenesis tersebut menjadikan kualitas reservoir yang kurang baik.

**UCAPAN TERIMAKASIH**

Penulis berterimakasih kepada Kepala Pusat Suvei Geologi yang telah memberi kesempatan untuk memfasilitasi penulis ketika pengambilan data lapangan dan analisis laboratorium. Penulis juga berterimakasih kepada rekan-rekan dosen dari Jurusan Teknik Geologi Universitas Jenderal Soedirman yang selalu memberikan masukan dan kritik yang membangun dalam penulisan artikel ini.

**ACUAN**

Adlan, R., Wahyudiono, J., Susilo, A., Salimudin, B., Gibran, A.K., dan Wiratmoko, E.S., 2018. Petroleum system potential of Lofin and Banggoi area, Seram Island. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association*, 42. IPA18-250-G

Boggs, S.Jr. 2009. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Cambridge University Press, Cambridge.

Burley, S.D. and Kantorowicz, J.D., 1987. Thin Section and SEM Textural Criteria for the Recognition of Cementation Dissolution Porosity in Sandstones. *Sedimentology*, 33: 587-604.

Chandra, B. Y. and Kusworo, A., 2019. Palyno-stratigraphy and Paleo-environment of the Triassic Kanikeh Formation, Seram Island, Indonesia. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association*, 43. IPA19-G-280

Dunoyer de Segonzac G., 1968. The Birth and Development of the Concept of Diagenesis. *Earth Science Reviews*, 4: 153-201.

Dutton, S.P. and Diggs, T.N., 1990. History of Quartz Cementation in the Lower Cretaceous Travis Peak Formation, East Texas. *Sedimentary Petroleum*, 60: 191-202.

Dutton, S.P., 1993. Influence of Provenance and Burial History on Diagenesis of Lower Cretaceous Frontier Formation Sandstones, Green River Basin, Wyoming. *Sedimentary Petroleum*, 63: 665-667.

Gafoer, S., Suwitodirdjo, K., dan Suharsono, 1993. *Peta Geologi Lembar Bula dan Watubela, Maluku, skala 1:250.000*. Pusat Survei dan Pengembangan Geologi, Bandung.



- Gibran, A.K., Kusworo A., Wahyudiono, J., Sunan, H.L., Aeni, D.N., dan Alghazali, A., 2020. Reservoir Characteristic of Triassic Sandstone, Eastern Seram, Maluku, Indonesia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 982 (2020) 012045 doi:10.1088/1757-899X/982/1/012045
- Gibran A.K. dan Kusworo A., 2020. Fasies dan Lingkungan Pengendapan Formasi Kanikeh, Cekungan Bula, Maluku. *Jurnal Riset Geologi dan Pertambangan*, 30(1): 171-186 doi: 10.14203/risetgeotam2020.v30.1108
- Hawkins, P. J., 1978. Relationship Between Diagenesis, Porosity Reduction and Oil Replacement in Late Carboniferous Sandstone Reservoirs, Bothamsall Oil Field, E. Midlands. *Journals of Geological Society London*, 135: 7-24.
- Helmod, K.P. and van de Kamp, P.C., 1984. Diagenetic Mineralogy and Controls on a Albitization and Laumontite Formation in Paleogene Arkose, Santa Yenz Mountains, California, In: McDonald, D.A. and Surdam, R.C. (Eds), *Clastic Diagenesis. American Association of Petroleum Geologist, Memoir*, 37: 239-276
- Hill, K.C., 2012. Tectonic and Regional Structure of Seram and the Banda Arc. *Berita Sedimentologi, Indonesian Journal of Sedimentary Geology*, 23: 6-16.
- Houseknecht, D.W., 1988. Intergranular Pressure Solution in Four Quartzose Sandstones. *Sedimentary Petroleum*, 58: 228-246.
- Hower, J., Eslinger, E.V., Hower, M.E., and Perry, E.A., 1976. Mechanism of Burial Metamorphism of Argillaceous Sediments, 1-Mineralogical and Chemical Evidence. *Bulletin of Association Petroleum Geologist*, 87: 725-737.
- Kemp, G., and Mogg, W., 1992. A Re-appraisal of the Geology, Tectonics, and Prospectivity of Seram Island, Eastern Indonesia. *Proceeding of Indonesian Petroleum Association*, 21: 521-552.
- Mathisen, M.E., 1984. Diagenesis of Plio-Pleistocene Non-Marine Sandstones, Cagayan Basin, Philippines, Early Development of Secondary Porosity in Volcanic Sandstones, dalam: Surdam, R., McDonald, D.A., Eds., *Clastic Diagenesis. Association of Petroleum Geologists, Memoir*, 37: 177-193.
- Pairault, A.A., Hall, R., dan Elders, C.F. 2003. Structural Styles and Tectonic Evolution of the Seram Trough, Indonesia. *Marine Geology*, 20: 1141-1160.
- Pettijohn, F.J., 1957. *Sedimentary Rocks, 2nd eds.* Harper Geoscience, New York.
- Pettijohn, F.J., 1975. *Sedimentary Rocks, 3rd eds.* Harper and Row, New York.
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., and Siever, R., 1987. *Sand and Sandstone, 2nd eds.* SpringerVerlag, New York.
- Powers, M.C. 1953. A New Roundness Scale for Sedimentary Particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 23(2): 117-119.
- Salem, A.M., Abdel W.A., and McBride, E.F., 1998. Diagenesis of Shallowly Buried Cratonic Sandstone Southwest Sinai, Egypt. *Sedimentary Geology*, 119: 311-335.
- Santy, L.D., 2014. Diagenesis Batupasir Eosen di Cekungan Ketungau dan Melawi, Kalimantan Barat. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 15(3): 117-131
- Schmidt, V. and McDonald, D.A., 1979. The Role of Secondary Porosity in the Course of Sandstone Diagenesis, In: Scholle, P.A. and Schluger, P.R., (Eds), *Aspect of Diagenesis. Society of Economic Paleontologist and Mineralogist, Special Publication*, 26: 175-207
- Selley, R.C., 2005. *Diagenesis: Overview.* Encyclopedia of Geology, 393-395. doi:10.1016/b0-12-369396-9/00289-6
- Siever, R., 1957. Pennsylvanian Sandstones of the Eastern Interior Coal Basin. *Sedimentary Petroleum*, 27: 227-250.
- Taylor, J.M. 1950. Pore-space Reduction in Sandstone. *American Association of Petroleum Geology Bulletin*, 34: 701-16.
- Tjokrosoepetro, S. and Budhitrisna, T., 1982. Geology and Tectonics of Northern Banda Arc. *Bulletin Geological Research and Development Centre*, 6: 1-17.
- Von Gumbel, C.W., 1888. *Grundzüge der Geologie.* Fischer, Kassel, 1144 p.
- Wahyudiono, J., Adlan, R., Permanadewi, S., dan Gibran, A.K. 2018a. Karakteristik Minyak Bumi di Blok Bula dan Blok Oseil, Pulau Seram, Maluku. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 19: 233-241.

- 
- Wahyudiono, J., Susilo, A., Adlan, R., Salimudin, B., Gibran, A.K., dan Wiratmoko, E.S., 2018b. Integrated Field Mapping, Organic Chemistry and Subsurface Geological Interpretation of Kanikeh Formation as Potential Source Rock in Seram Island. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association* 42: IPA18-247-G
- Walderhaug, O., 1994. Temperatures of Quartz Cementation in Jurassic Sandstones from the Norwegian Continental Shelf – Evidence from Fluid Inclusions. *Sedimentary Reservoir*, A64: 311-323.
-