



**PETROGENESA BATUAN METAMORF PADA BLOK KEMUM DAERAH WARIORI
INDAH, DISTRIK MASNI, KABUPATEN MANOKWARI, PROVINSI PAPUA BARAT**

Ario Jamesbond¹, Ildrem Syafri¹, Aton Patonah¹

¹Fakultas Teknik Geologi Universitas Padjadjaran, Bandung
Email Korespondensi: ariojamesbond122@gmail.com

ABSTRACT

The Kemum Block is part of the bedrock high, bordered by the Sorong Fault in the north and the Ransiki Fault in the east. This block is characterized by present of metamorphic rocks, in some places, it was intruded by Permo-Triassic granite which is interesting to be studied. The research area is located at Wariori Indah area and its surroundings, Masni District, Manokwari Regency, West Papua Province which is a placer goldfield owned by PT. Tri Abadi Mineral. This study aims to identify lithology and geochemical characteristic of metamorphic rocks from the Kemum Block. The methods used in this research are petrology and petrographic analysis on 19 rock samples, as well as geochemical analysis using XRF (X-Ray Fluorescence) and ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry) methods on 3 selected rock samples. Based on the analysis, the data shows that the types of the metamorphic rocks which present in this study are metapelites and metafelsic. The protolith of metapelite rocks is originally from continental origin. The result of geochemical analysis, the magmatic affinity of these rocks included in High-K calc-alkaline series. Meanwhile, the protolith of metafelsic rock is derived from basaltic andesite associated with the calc-alkaline island arc and interacting with the continental crust.

Keywords: Kemum Block, petrogenesis, metapelite, metafelsic, calc alkaline

ABSTRAK

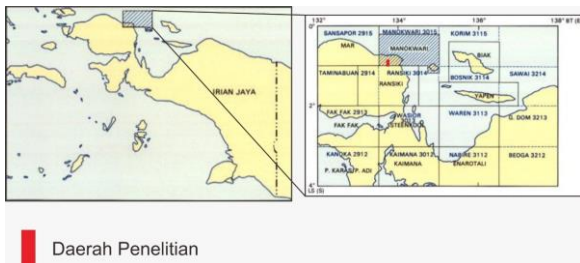
Blok Kemum merupakan bagian dari tinggian batuan dasar, dibatasi Sesar Sorong di utara dan Sesar Ransiki di timur. Blok ini dicirikan oleh batuan metamorf, pada beberapa tempat terdapat diintrusi oleh granit Permo-Trias. Daerah penelitian berada di daerah Wariori Indah dan sekitarnya, Distrik Masni, Kabupaten Manokwari, Provinsi Papua Barat yang merupakan lapangan emas placer milik PT. Tri Abadi Mineral. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi lithologi dan karakteristik geokimia batuan metamorf dari Blok Kemum. Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu analisis petrologi dan analisis petrografi pada 19 sampel batuan, serta analisis geokimia menggunakan metode XRF (*X-Ray Fluorescence*) dan ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry*) pada 3 sampel batuan terpilih. Berdasarkan analisis tersebut didapatkan data bahwa jenis batuan metamorf yang hadir di daerah penelitian merupakan metapelit dan metafelsik. Protolit metapelit daerah penelitian adalah asal kontinental margin. Hasil analisis geokimia, afinitas magmatiknya adalah *High-K calc-alkaline*. Protolith metafelsik daerah penelitian berasal dari andesit basaltik dengan lingkungan tektoniknya yang berasosiasi dengan *island arc calc-alkaline* dan berinteraksi dengan batuan dari kerak benua.

Kata kunci: Blok Kemum, petrogenesis, metapelite, metafelsik, *calc alkaline*

PENDAHULUAN

Keberadaan batuan metamorf yang tersingkap di permukaan bumi khususnya Indonesia tidak sebanyak batuan beku dan sedimen, mengingat dari proses keterbentukan batuan metamorf yang cukup kompleks. Salah satu pulau di Indonesia yang dapat dijumpai keberadaan batuan metamorfnya adalah Pulau Papua. Pulau ini merupakan daerah dengan keadaan geologi yang sangat kompleks karena terbentuk dari interaksi empat lempeng besar dunia.

Pulau Papua memiliki beberapa blok batuan yang terbentuk oleh batuan metamorf, salah satunya adalah Blok Kemum yang terdapat pada daerah penelitian. Blok Kemum terbentuk oleh Formasi Kemum (SDk) yang berumur Silur hingga Devon berupa endapan malih derajat rendah hingga menengah. Di beberapa tempat, Blok Kemum terintrusi oleh Granodiorit Wariki (TRw), yang umur K-Ar-nya berkisar dari 226 hingga 258 juta tahun (Bladon, 1988), tetapi sebagian besar menunjukkan Trias. Fokus penelitian adalah batuan metamorf di Blok Kemum yang terdapat di daerah Wariori Indah dan sekitarnya (Gambar 1) untuk mengidentifikasi litologi dan karakteristik geokimia batuan metamorf sehingga dapat diinterpretasi genesa pembentukannya.



Gambar 1. Peta Indeks Lokasi Penelitian.

TINJAUAN PUSTAKA

Daerah Wariori Indah termasuk ke dalam Peta Geologi Regional Lembar Manokwari, Irian Jaya (Ratman, Robinson dan Pieters, 1989), tersusun atas dua mandala geologi, yaitu Bongkah (Blok) Kemum dan Sistem Sesar Sorong dan Sesar Ransiki.

Bongkah Kemum terbentuk oleh Formasi Kemum (SDk) yang berumur Silur hingga Devon berupa endapan malih derajat-rendah hingga menengah, satuan turbidit dengan tebal paling tidak 2,5 km. Sepanjang perenggan utara bongkah itu dibatasi Sesar Sorong dan Rasiki, batuan endapan malih meliputi tubuh yang sedikit-banyak nampak memanjang dan buntal (*schlieren*) granitoids pejal dan terdaunkan.

Sistem Sesar Sorong dan Ransiki adalah ketaksinambungan kerakbumi yang besar, masing-masing mengikuti arah ke barat dan utara-baratlaut, Kedua struktur itu bersambung di Manokwari lewat endapan sesar yang terlengkungkan. Di Manokawri bagian barat sistem Sesar Sorong meliputi bantuh tak-terpisah-pisahkan (SFx); batuanannya terdiri dari klastika silikat gampingan dan tak gampingan yang tersesarkan dan batugamping mengandung fragmen (*rare*) tektonik berupa batuan malihan dan granit.

METODOLOGI PENELITIAN

Metode penelitian meliputi observasi litologi dan pengambilan sampel batuan di lapangan yang kemudian dianalisis secara petrologi, petrografi pada 19 sampel batuan, di Laboratorium Petrologi Universitas Padjajaran dan analisis geokimia di PT. Intertek pada 3 sampel yang mewakili dari setiap batuan metamorf dengan metode XRF (*X-Ray Fluorescence*) dan ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry*) untuk mengetahui kandungan senyawa oksida dan unsur jejak serta unsur tanag jarangnya (REE) batuan. Hasil analisis ini, selanjutnya dapat membantu dalam analisis protolith batuan metamorf, afinitas magma, dan lingkungan tektoniknya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Petrologi

Secara umum, batuan metamorf di daerah penelitian terbagi menjadi 2 macam berdasarkan protolithnya, yaitu metafelsik dan metapelit. Berikut uraian lebih detailnya:

1. Metafelsik.

Secara umum batuan ini memiliki warna abu-abu kehitaman hingga abu-abu kecoklatan, mesokratik. Batuan ini memiliki komposisi mineral serisit, epidot dan kuarsa yang termasuk ke dalam fasies Sub-sekis hijau. Berdasarkan tekstur, struktur dan komposisi mineralnya batuan ini merupakan batuan metafelsik (Robertson, 1999)

2. Kelompok Metapelit

Batuan ini berwarna abu-abu terang hingga abu-abu kecoklatan, sebagian besar mengalami pelapukan, memiliki struktur rata-rata *phyllitic* dan *slaty*. Batuan ini memiliki komposisi mineral plagioklas, muskovit, biotit dan kuarsa yang termasuk ke dalam batuan metapelit dengan protolit pelite dan semipelite (Robertson, 1999).

Petrografi

1. Sekis

Pengamatan petrografi dilakukan pada conto batuan yang diambil di sekitar Sungai Wariori dengan kode

sampel 21JB_5-C. Batuan ini memperlihatkan struktur foliasi *schistose* dan memiliki tekstur lepidoblastik-granoblastik.

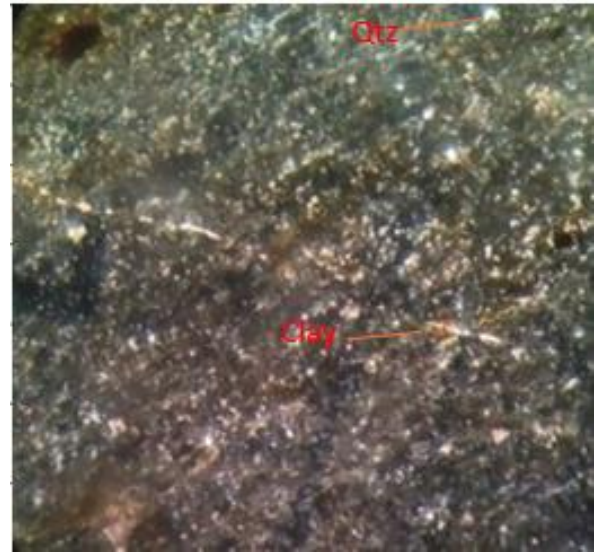
Komposisi mineral pada batuan ini didominasi oleh muskovit dan biotit. Kelimpahan mineral muskovit pada batuan adalah 40%, biotit (35%), kuarsa (10%), klorit (10%), dan serisit (5%) sebagai mineral ubahan dari plagioklas yang tersebar seperti bercak halus pada permukaan induknya. Selain itu muncul juga mineral opak sebanyak 5% yang bersifat isotrop. Berdasarkan Whitney dan Evans (2010) menyatakan batuan tersebut bernama Sekis Klorit – Biotit – Muskovit, penamaan ini berdasarkan tekstur, struktur dan komposisi mineral batuan (Gambar 2).



Gambar 2. Struktur *schistose* dengan komposisi muskovit (Musc), klorit (chl), serisit (Serc), dan biotit (bio).

2. Filit

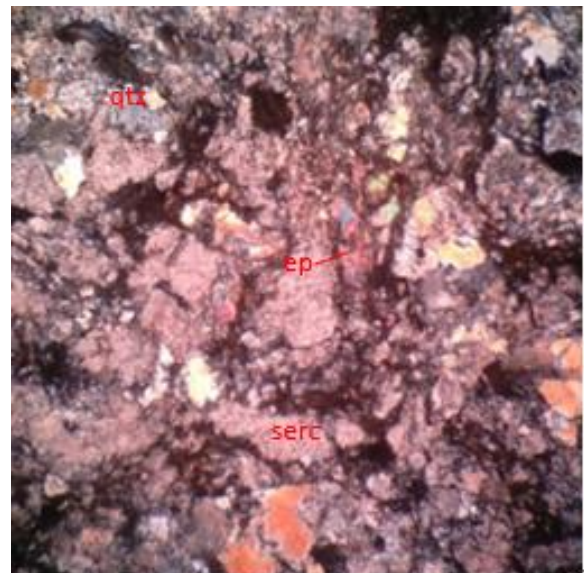
Pengamatan petrografi dilakukan pada conto batuan dengan kode sampel KCR20_02-B yang ditemukan di bukit si sekitar Sungai Wariori. Pada pengamatan nikol sejajar, batuan ini menunjukkan butiran yang sangat halus dan terlihat adanya pensejajaran mineral, tetapi tidak terlihat adanya pemisahan mineral pipih atau memiliki tekstur *phyllitic*. Komposisi batuan ini adalah kuarsa (30%), kalsit (15%), mineral lempung (35%), mineral opak (8%) dan oksida (12%). Berdasarkan Klasifikasi Huang (1962 dalam Yulianto, 1977), batuan tersebut diklasifikasikan sebagai filit (Gambar 3).



Gambar 3. Struktur *phyllitic* dengan komposisi kuarsa (Qtz), dan mineral lempung (clay).

3. Metaandesit

Metaandesit dijumpai di sekitar intrusi batuan Granodiorit Wariki yang terdapat di akhir lintasan penelitian. Pengamatan petrografi dilakukan pada sampel 21JB_16-D. Batuan ini memiliki tekstur granoblastik dengan struktur batuan berupa non foliasi. Komposisi mineral ini adalah kuarsa (45%), mineral opak (10%), epidot (15%), dan serisit (30%). Berdasarkan kenampakan batuanannya, maka batuan ini dinamakan metaandesite (Gambar 4).



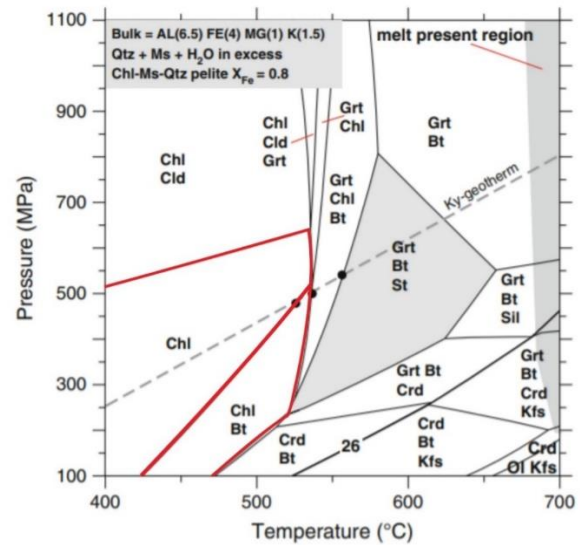
Gambar 4. Komposisi penyusun metaandesit yang terdiri dari kuarsa (qtz), epidot (ep), dan serisit (Serc)

Fasies Metamorf dan Termobarometri

Berdasarkan petrografi, batuan metamorf daerah penelitian termasuk ke dalam dua fasies metamorf yang mengikuti klasifikasi Bucher dan Grapes (2011), yaitu fasies sub-sekis hijau yang dicirikan dengan komposisi mineral yang hanya tersusun oleh mineral lempung, klorit dan plagioklas pada metapelit dan adanya mineral epidot dan serisit pada metafelsik dan sekis hijau yang dicirikan dengan adanya mineral biotit, muskovit dan mineral ubahan serisit pada metapelit.

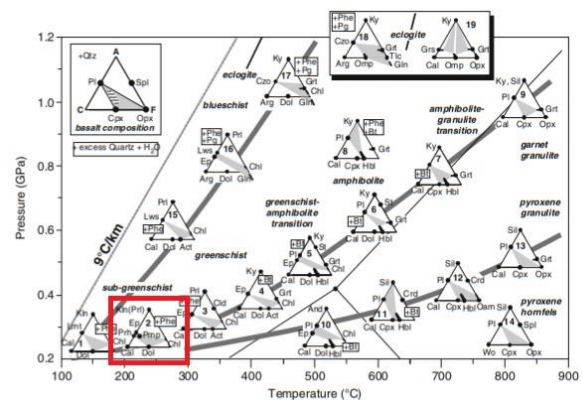
Berdasarkan plotting kumpulan mineral dari batuan metapelit ke diagram sistem KFMASH + Na + Ca (Carmichael 1989; Bucher dan Grapes 2011) diketahui bahwa terdapat 1 zona kumpulan mineral yaitu Chl+Pl+Bt yang dari zona tersebut mengandung muskovit dan kuarsa. Apabila dikaitkan dengan metamorfisme, zona yang diperoleh oleh batuan metapelit di daerah penelitian ini mengalami dua jenis metamorfisme yaitu metamorfisme P-T rendah dan P-T sedang. Berdasarkan diagram isobark T- X_{Fe} yang dibuat oleh Bucher dan Grapes (2011) pada batuan metapelit metamorfisme P-T rendah batuan tersebut tergolong pada metamorfisme yang terbentuk pada $P < 300$ Mpa dan $T < 400^{\circ}\text{C}$.

Selanjutnya, pada metamorfisme P-T sedang, berdasarkan plotting kumpulan mineral dari diagram KFMASH batuan metapelit dengan $X_{Fe}=0,8$ (Bucher dan Grapes 2011), diketahui bahwa batuan daerah penelitian yang berada pada metamorfisme P-T sedang terbagi ke dalam dua zona kumpulan mineral yaitu Chl dan Chl + Bt dimana muskovit dan kuarsa hadir pada masing masing zona tersebut. Dengan demikian batuan yang tergolong dalam P-T sedang terbentuk pada kisaran temperatur 420-530 $^{\circ}\text{C}$ dan tekanan 500-570 Mpa berdasarkan yang terdapat pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram P-T system KFMASH batuan metapelit dengan $X_{Fe}=0,8$ (Bucher dan Grapes 2011). Zona yang berwarna merah adalah zona yang ditemukan di daerah penelitian.

Sedangkan untuk termobarometri batuan metafelsik tidak menggunakan diagram sistem KFMASH, melainkan menggunakan diagram ACF untuk menggambarkan kondisi P dan T. Berdasarkan kumpulan mineral yang terdapat pada sampel dan di plot ke diagram P-T ACF yang dibuat oleh Bucher dan Grapes (2011), batuan metafelsik terjadi di metamorfisme P – T rendah dengan P 230-380 Mpa dan T 200-300 $^{\circ}\text{C}$. (Gambar 6).



Gambar 6. Diagram P-T ACF (Bucher dan Grapes 2011). Zona yang berwarna merah adalah zona yang ditemukan di daerah penelitian.

Paragenesa Mineral

Berdasarkan analisis petrografi, urutan pembentukan mineral dibagi menjadi prograde dan retrograde. Proses prograde metamorfisme metapelit dimulai dengan mineral lempung yang menjadi sumber pembentukan klorit, muskovit dan epidot pada Prograde I dan dilanjutkan dengan Prograde II yang ditandai pada kemunculan mineral biotit yang disebabkan oleh naiknya P dan T untuk metapelit. Proses retrograde metamorfisme dicirikan

dengan berubahnya biotit yang menjadi klorit dan munculnya mineral lempung dan ubahan seperti serisit pada Retrograde I untuk metapelit. Sedangkan untuk metafelsik, proses Retrograde I ditandai dengan kemunculan mineral ubahan serisit dan epidot yang menggantikan mineral plagioklas.

Geokimia

Metode XRF dan ICP-MS dilakukan di laboratorium PT. Intertek terhadap 3 sampel batuan terpilih di daerah penelitian. Berdasarkan presentase oksida, unsur jejak dan REE membantu dalam menentukan magma protolit, jenis protolit, dan lingkungan tektonik batuan metamorf.

Batuan metamorf yang berasal dari sedimen sebenarnya tidak dapat menggambarkan magma meskipun sebenarnya sedimen tersebut berasal dari batuan beku. Kalaupun bisa, maka magma tersebut menggambarkan lingkungan tektonik provenans sedimennya bukan lingkungan tektonik dari batuan metamorfnya. Meski demikian, satu diantara tiga sampel yaitu sampel 21JB_16-D merupakan batuan metafelsik yang berasal dari batuan beku yang dapat menggambarkan magma daerah penelitian.

Tabel 1. Kandungan senyawa oksida pada daerah penelitian berdasarkan uji XRF.

Kode Komposisi Senyawa Oksida (wt%)	KCR20_02 -B	21JB_5-C	21JB_16- D
SiO ₂	71,63	58,13	54,41
Al ₂ O ₃	14,03	19,11	18,55
TiO ₂	0,31	0,78	0,81
Fe ₂ O ₃	3,36	4,99	5,96
Cr ₂ O ₃	0,03	0,02	0,01
MgO	1,05	14,35	1,97
CaO	2,95	0,38	10,37
NaO ₂	2,75	0,71	1,58
K ₂ O	2,76	5,67	2,48
MnO	0,06	0,05	0,09
P ₂ O ₅	0,087	0,163	0,177
S	0,073	0,995	0,345
LOI	1,05	4,76	3,33

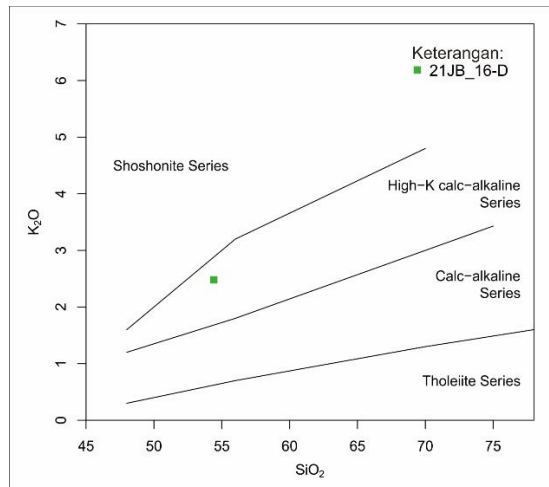
Tabel 1. Kandungan Unsur Jejak pada daerah penelitian berdasarkan uji ICP-MS.

Trace element	Concentration (ppm)		
	KCR20_02-B	21JB_5-C	21JB_16-D
V	19	132	52
Ag	0.05	0,2	0,2
As	2	21	2

Trace element	Concentration (ppm)		
	KCR20_02-B	21JB_5-C	21JB_16-D
Ba	547	1550	447
Be	2	2,8	4
Bi	0,08	0,71	0,18
Cd	0.05	0,07	0.05
Co	5	23	10
Cs	3,1	19,6	3,7
Ga	15,6	27,6	24,1
Ge	2,3	2,3	4,8
Hf	0,2	0,2	<0.1
In	0,08	0,14	0,06
Li	39,7	64,1	65,7
Mo	2	0,5	1,1
Nb	16	14,1	13,3
Pb	16	3	9
Rb	84,4	183	148
Re	0,05	0,05	0,05
Sb	0,2	0,5	0,2
Se	0,5	1	1
Sn	2,1	10,8	4,7
Sr	273	72,6	129
Ta	1,04	1,11	0,63
Te	0,1	0,1	0,1
Th	8,3	19,6	6,72
Ti	0,44	1,66	0,25
U	2,14	3,75	0,87
W	0,9	4,8	4,2
Y	18,9	37,3	37,3
Zr	4	5,5	5,5
Ce	40,2	111	45,8
Dy	3,6	7,3	4
Er	1,8	3,4	2,6
Eu	1,2	1,9	1,8
Gd	3,3	8,7	4,5
Ho	0,6	1,5	1
La	23,8	62,9	26,7
Lu	0,3	0,41	0,36
Nd	16,9	51	21,2
Pr	4,53	13	5,35
Sm	3,4	8,6	4,1
Tb	0,53	1,19	0,77
Tm	0,3	0,5	0,4
Yb	1,9	3,1	2,5

Afinitas Magma Protolith Batuan Metafelsik

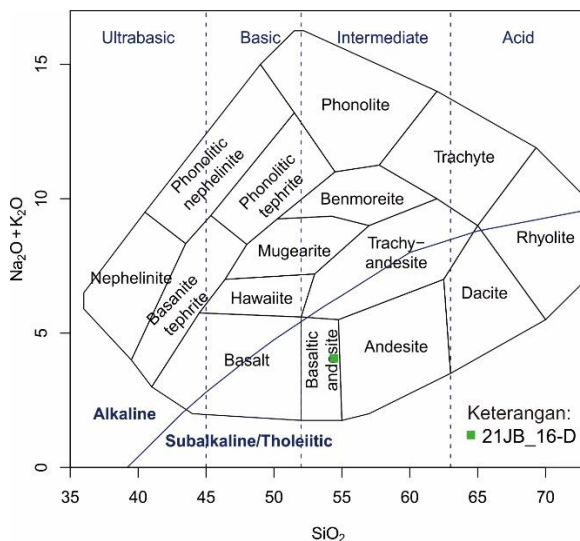
Penentuan magma protolit batuan dilakukan dengan menggunakan diagram biner oleh Peccerillo dan Taylor (1976) yang membandingkan SiO_2 dengan K_2O . Berdasarkan hasil plotting ke diagram biner Peccerillo dan Taylor (1976) diketahui bahwa seri magma sampel batuan termasuk kedalam seri *high K calc-alkaline* (Gambar 7).



Gambar 7. Magma protolit batuan daerah penelitian berdasarkan diagram oleh Peccerillo dan Taylor (1976)

Jenis Protolit Batuan Metafelsik

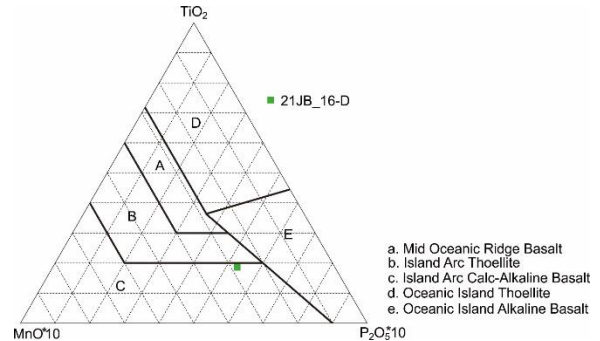
Penentuan jenis protolit batuan menggunakan klasifikasi oleh Cox et al. (1979) menggunakan perbandingan $[\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}]$ dengan SiO_2 yang kemudian di plot kedalam diagram biner. Berdasarkan hasil plotting (Gambar 8) diketahui bahwa batuan metamorf daerah penelitian berasal dari andesit basaltik.



Gambar 8. Jenis protolit batuan daerah penelitian berdasarkan diagram oleh Cox et al. (1979)

Lingkungan Tektonik Batuan

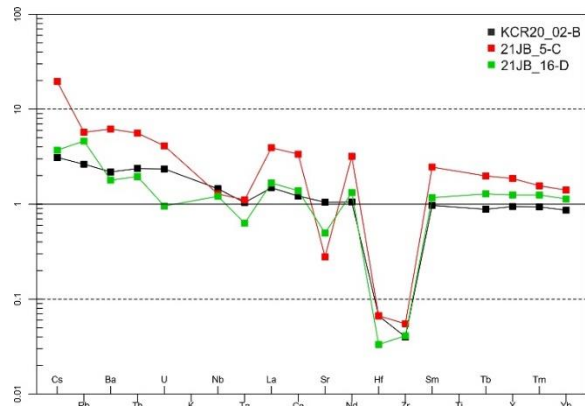
Penentuan lingkungan tektonik batuan menggunakan klasifikasi oleh Mullen (1983) menggunakan diagram terner dari unsur utama yaitu $\text{TiO}_2\text{-MnOx10-P}_2\text{O}_5\text{x10}$. Berdasarkan hasil plotting (Gambar 9) batuan metamorf daerah penelitian terbentuk pada tatanan lingkungan tektonik busur kepulauan dengan deret magma kalk-alkali.



Gambar 9. Lingkungan tektonik batuan daerah penelitian berdasarkan diagram oleh Mullen (1983)

Provenans Sedimen dari Unsur Jejak dan REE

Penentuan provenans sedimen batuan metapelite dilakukan pada diagram spider Taylor dan McLennan (1981), karena unsur jejak bersifat inkompatibel atau *litophile*. Berdasarkan diagram spider (Gambar 10), ketiga sampel tersebut menggambarkan pola yang relatif sama dengan pola busur kepulauan kalk-alkali.



Gambar 10. Diagram spider unsur jejak batuan metamorf daerah penelitian yang dibuat berdasarkan Taylor dan McLennan (1981).

PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis petrografi, dapat diinterpretasikan batuan dengan ciri asal darat seperti batulanau dan batulempung untuk metapelit dan andesit untuk metafelsik. Hal ini koheren dengan hasil analisis geokimia yang di plot ke dalam diagram biner klasifikasi Cox et al. (1979) yang

menunjukkan jenis protolit batuan metafelsik daerah penelitian berasal dari andesit basaltik.

Pada diagram Peccerillo dan Taylor (1976) seri magma batuan metafelsik menunjukkan kedalam seri *high K calc-alkaline*. Menurut Yuwono (2004), deret kalk-alkali merupakan jenis magma yang khas yang hanya ditemukan di zona orogenesis (subduksi) yang bisa ditemukan pada busur kepulauan (*island arc*) atau pada tepi benua aktif (*active margin*).

Hal ini juga didukung oleh penentuan lingkungan tektonik batuan menggunakan klasifikasi oleh Mullen (1983) menggunakan diagram terner dari unsur utama yaitu TiO_2 - MnO - $10-P_2O_5$ - 10 yang menunjukkan daerah penelitian terbentuk pada tatanan lingkungan tektonik busur kepulauan dengan deret magma kalk-alkali dan penentuan provenans protolith batuan metapelite menggambarkan pola yang relatif sama dengan pola busur kepulauan kalk-alkali Taylor dan McLennan (1981).

Lokasi penelitian terletak pada zona Sesar Sorong yang disebabkan oleh proses *oblique subduction* antara Lempeng Australia dengan Lempeng Pasifik (Satyana, 2003). Hasil analisis geokimia membuktikan tatanan umum geologi daerah dari penelitian sebelumnya.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis petrologi, petrografi, dan analisis geokimia didapatkan bahwa batuan metamorf daerah penelitian terbagi menjadi fasies sub-sekis hijau dan fasies sekis hijau dengan metapelite metamorfisme P-T rendah pada $P < 300$ Mpa dan $T < 400^\circ C$ dan metamorfisme P – T sedang pada kisaran temperatur $< 500^\circ C$ dan tekanan 500-570 Mpa dan metafelsik dengan metamorfisme P – T rendah dengan P 230-380 Mpa dan T 200-300°C. Jenis protolit batuan metapelite pada daerah penelitian pada daerah penelitian berasal dari pelit dan semipelit. Sedangkan untuk metaandesit berasal dari andesit basaltik. Karakteristik magma protolit batuan metafelsik diketahui melalui analisis geokimia termasuk ke dalam seri *high K calc-alkaline*. Batuan asal daerah penelitian diketahui

berasal dari tatanan tektonik *island arc calc-alkaline basalt* yang berasosiasi dengan kerak benua.

DAFTAR PUSTAKA

- Bladon, G.M., 1988. Catalogue, appraisal, and significance of K-Ar isotopic ages determined for igneous and metamorphic rock in Irian Jaya. Geological Research and Development Centre (PSG). Indonesia.
- Bucher, K., Grapes, R. 2011. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*, 8th Edition. Springer, Berlin, Germany.
- Cox, K.G., Bell, J.D., Prankhurst, R.J. 1979. *The Interpretation of Igenous Rocks*. Chapman & Hall, UK.
- Dow, D.B., Sukanto, R. (1984) : Western Irian Jaya: the end-product of oblique plate convergence in the Late Tertiary, Tectonophysics, 106, p.109-139.
- Mullen, E.D. 1983. *MnO/TiO₂/P₂O₅. A Minor Element Discriminant for Basaltic Rocks of Oceanic Environments and Its Implications for Petrogenesis*. Earth and Planetary Science Letters, 62, p. 53-62.
- Peccerillo, A., Taylor, S.R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. Contr. Mineral. and Petrol. 58, 63–81 (1976).
- Robinson GP, Ratman N, dan Pieters PE. 1990. Geologi Lembar Manokwari, Irian Jaya. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Departemen Pertambangan dan Energi.
- Satyana, A.H., 2003. Re-evaluation of the sedimentology and evaluation of the Kais Carbonate Platform, Salawati Basin, Eastern Indonesia: Exploration significance. Proceedings, Indonesian Petroleum Association, Twenty-ninth Annual Convention & Exhibition, October 2003.
- Taylor, S.R. dan McLennan, S.M. 1981. *The Composition and Evolution of the Continental-Crust-Rare-Earth Element Evidence from Sedimentary-Rocks*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 301 (1461), pp. 381-399.