

GENESIS BATULEMPUNG DI PULAU NUNUKAN PROVINSI KALIMANTAN UTARA

Mutiara Effendi¹, Sutikno Bronto², Pudjo Asmoro²

^{1,2} Pusat Survei Geologi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral
Jl. Diponegoro No. 57, Bandung 40122

^{1*} Email : effendi.mutiara@gmail.com

INTISARI

Di Pulau Nunukan Provinsi Kalimantan Utara, daerah Tanjungbatu, tersingkap batulempung yang berselang-seling dengan batu pasir kuarsa. Batuan berbutir lempung juga dijumpai sebagai hasil pelapukan batuan gunung api berkomposisi basal, yang terdiri dari lava, aglomerat, dan tuf. Selain itu ditemukan juga tanah lempung argilik sebagai produk ubahan hidrotermal di dalam fasies pusat gunung api purba Sei Apok. Melimpahnya batu lempung di daerah Nunukan mengindikasikan terjadinya perulangan proses vulkanisme berkomposisi basal yang lapuk menjadi tanah, mengalami erosi, dan terendapkan kembali sebagai batuan ubahan batulempung. Selain pengamatan lapangan, dilakukan juga analisis geokimia di laboratorium untuk mengetahui komposisi kimia batuan. Analisis geokimia dilakukan dengan metode Fluoresensi Sinar-X. Hasil analisis komposisi kimia menunjukkan bahwa sampel batulempung berhubungan dengan batuan gunung api basal. Artinya, pelapisan sedimen lempung Nunukan yang berselang-seling dengan batu pasir kuarsa merupakan rombakan dari pelapukan batuan gunung api basal dan ubahan hidrotermal. Namun, hasil menunjukkan bahwa pengaruh pelapukan lebih dominan daripada alterasi. Komposisi kimia batulempung memiliki kemiripan dengan mineral lempung ilite dan montmorillonite, terutama karena kaya unsur Al, Fe, K, dan Mg. Kedua mineral lempung tersebut terbentuk pada kondisi basa dan biasa terjadi pada shales. Hal ini bersesuaian dengan pengamatan lapangan bahwa batulempung Nunukan bercampur dengan material serpihan dan batu lumpur berukuran lanau sampai lempung. Komposisi kimia yang masih cukup berbeda menunjukkan bahwa sampel belum sepenuhnya membentuk mineral lempung.

Kata kunci: batulempung, genesis, geokimia, XRF

1. PENDAHULUAN.

1.1 Latar Belakang dan Tujuan

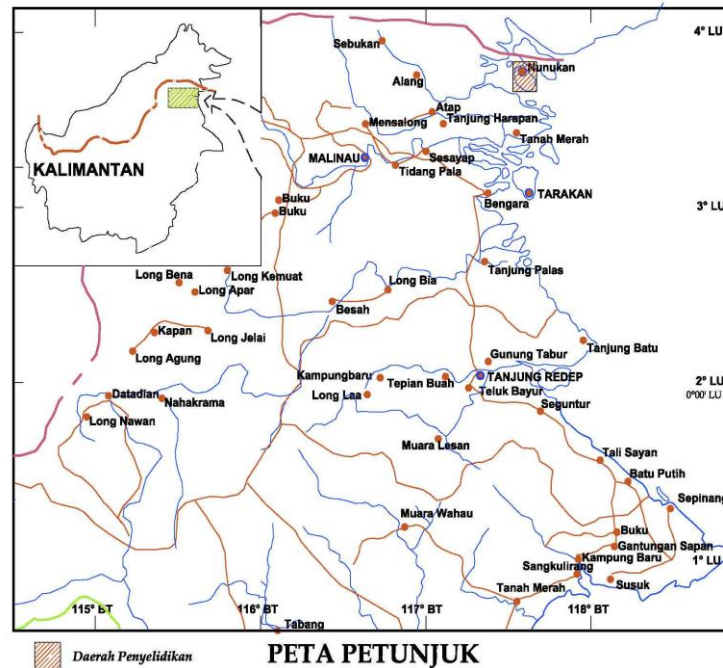
Di dalam peta geologi regional daerah Nunukan dan Sebatik (Hidayat, dkk., 2011) Pulau Nunukan tersusun oleh batuan sedimen dan batuan terobosan. Batuan sedimen terdiri atas batupasir dan batulempung, yang dikelompokkan ke dalam Formasi Meliat (Tmm), Formasi Tabul (Tmt), Formasi Sajau (TQps) dan Aluvium (Qa). Batuan beku terobosan berupa sumbat dan retas berkomposisi andesit (a) serta dasit (c). Dari hasil penelitian terbaru Asmoro dkk. (2016) melaporkan bahwa di Pulau Nunukan terdapat gunung api purba, yang produknya berupa lava, aglomerat dan tuf. Sebagian batuan gunung api tersebut sudah mengalami ubahan hidrotermal dan sebagian lagi telah lapuk karena cuaca.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui hubungan antara batuan sedimen batulempung dengan bahan ubahan dan pelapukan yang berasal dari batuan gunung api setempat. Ruang lingkup penelitian dibatasi pada analisis geokimia saja. Penelitian dilakukan terhadap contoh batuan segar (*fresh rocks*), batuan ubahan hidrotermal (*hydrothermally altered rocks*), hasil pelapukan (*weathered rocks*), serta sedimen batulempung. Analisis kimia yang digunakan adalah metode Fluoresensi Sinar-X (XRF). Metode tersebut memiliki banyak keunggulan, seperti waktu analisis cepat, tidak merusak sampel, mampu menganalisis berbagai tipe sampel, preparasi mudah, serta syarat jumlah sampel sedikit. Berbagai keunggulan tersebut menjadikan metode analisis XRF bernilai ekonomis dan mudah digunakan. Tidak hanya di bidang geologi saja, XRF juga digunakan secara luas di berbagai bidang lainnya, seperti ekologi, arkeometrik, forensik, juga di industri semen, baja, plastik, dan lain-lain.

1.2 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian terletak di Pulau Nunukan, Kabupaten Nunukan, Provinsi Kalimantan Utara (Gambar 1). Pulau Nunukan merupakan salah satu garda terdepan pada perbatasan Indonesia dengan Malaysia, bersamaan dengan Pulau Sebatik. Lokasi penelitian ditempuh menggunakan pesawat dari Bandung menuju ibukota Provinsi Kalimantan Utara, yaitu Tarakan. Perjalanan

dilanjutkan menggunakan mobil menuju pelabuhan, lalu *speedboat* untuk menyeberang ke Pulau Nunukan.



Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian; bagian kotak berwarna hijau (Asmoro, 2016)

1.3 Hipotesis

Batuan segar berkomposisi basal mengalami ubahan hidrotermal dan pelapukan cuaca sehingga berubah menjadi mineral lempung atau setidaknya menjadi bahan berukuran butir lempung. Hasil ubahan hidrotermal dan atau pelapukan cuaca tersebut mengalami pengikisan (erosi) kemudian tertransportasi, yang pada akhirnya terendapkan sebagai batuan sedimen batulempung. Proses perubahan mulai dari batuan segar, ubahan hidrotermal, pelapukan dan kemudian pengendapan sebagai batulempung menyebabkan perubahan komposisi kimia batuan. Perubahan komposisi dapat berupa penambahan dan pengurangan unsur kimia yang ada, atau hilangnya unsur kimia yang lama dan munculnya yang baru.

2. METODOLOGI

Penelitian yang dilakukan meliputi pengamatan dan pengambilan sampel di lapangan diikuti dengan analisis kimia di laboratorium. Sampel yang diambil di lapangan terdiri dari batuan segar (*fresh rocks*), batuan ubahan hidrotermal (*hydrothermally altered rocks*), hasil pelapukan (*weathered rocks*), serta sedimen batulempung. Daftar sampel disajikan dalam Tabel 1.

Sampel *Nnk-03* berwarna segar abu gelap kehitaman, tekstur porfiritik. Sampel *Nnk-02* berwarna abu gelap, tekstur halus, struktur berlapis. Sampel *Nnk-18* adalah bom aglomerat lapuk berdiameter 20-60 cm. Sampel *Nnk-10* adalah batuan alterasi di Sei Apok hulu (Desa Binusan) yang tersingkap bersama batu pasir di bawah (warna putih) dan lempung di atas (warna merah kecokelatan). Sampel *Nnk-21* adalah lempung berwarna merah kecokelatan dari Gang Limau. Sampel *Nnk-26* adalah lempung karbonan berwarna merah kecokelatan dari Desa Binusan (terusan dari Kodim).

Sampel batuan dianalisis menggunakan metode kimia XRF cara *press* di laboratorium kuarter Pusat Survei Geologi. Tahapan analisis terdiri dari penyiapan batuan, preparasi sampel, dan analisis dengan XRF. Analisis juga dilengkapi dengan pengujian untuk menentukan *Loss of Ignition* (LOI) dan H_2O^+ serta H_2O^- selaku senyawa volatil dalam sampel.

Bagian sampel yang telah dipilih dipotong dengan pemotong batuan. Selanjutnya, potongan batu dihancurkan menjadi bongkahan lebih kecil dengan *jaw crusher*. Bila basah, bongkahan batu dikeringkan dengan oven selama ± 24 jam. Bongkahan kering dihaluskan menggunakan *pulverizer*.

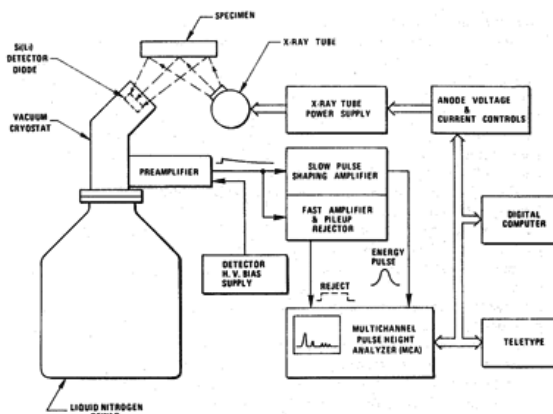
Sampel yang telah halus diayak dengan *sieving* untuk mendapatkan butiran halus berukuran 200 mesh.

Tahapan preparasi diawali dengan mencampurkan sampel dengan selulosa sebagai material pengikat, lalu ditumbuk menggunakan mortar *agate* hingga homogen. Campuran dimasukkan ke dalam *ring* yang telah dialasi dengan butiran asam borat. Sampel dimasukkan ke dalam alat *press Herzog tipe HTP 40* dengan gaya (F) 110 kN selama 10 detik. Sampel akan menjadi kompak di dalam *ring*. Permukaan pelet yang ideal adalah datar, homogen, dan memiliki stabilitas fisik yang baik (Jenkins, 1995).

Tabel 1. Daftar sampel penelitian

Kode sampel	Jenis	Lokasi
Nnk-03	Bom gunung api segar	Tanjung Batu
Nnk-02	Tuff hitam lapuk	Desa Sungai Bilal
Nnk-18	Aglomerat lapuk	Tanjung Batu
Nnk-10	Lempung alterasi	Sei Apok hulu
Nnk-21	Batulempung	Gang Limau
Nnk-26	Batulempung	Desa Binusan

Analisis kimia XRF dilakukan menggunakan peralatan *XRF ARL 9900* yang dilengkapi dengan *software OXSAS*. Prinsip kerja XRF berlandaskan pada teori bahwa atom individual akan mengeluarkan foton sinar-X dengan energi tertentu, juga tentunya panjang gelombang tertentu, bila tereksitasi akibat paparan energi eksternal. Dengan menghitung jumlah foton yang keluar setiap pelepasan energi, komposisi sampel dapat diidentifikasi dan dikuantifikasi. Analisis dilakukan dengan gaya (F) sebesar 30 kV pada arus 20 mA. Jenis spektrometer yang digunakan dalam penelitian adalah spektrometer tipe *Energy Dispersive* (Gambar 2).



Gambar 2. Bagan spektrometer XRF tipe *Energy Dispersive*. Gambar diambil dari penelitian oleh Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis kimia dengan XRF menghasilkan komposisi kimia utama (*major elements*) pada sampel, seperti SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 (total), MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 . Analisis tambahan menghasilkan data nilai H_2O^+ , H_2O^- , dan LOI. Hasil analisis kimia sampel Nunukan dengan metode XRF disajikan pada Tabel 2.

Pengolahan bebas volatil dilakukan untuk mengoreksi data agar lebih menyerupai komposisi sebenarnya. Meskipun lelehan beku mengandung sejumlah H_2O , CO_2 , SO_2 , dan gas terlarut lainnya, namun zat-zat volatil ini akan segera menguap ketika erupsi terjadi ke permukaan. Jadi, jumlah volatil yang terukur pada batuan vulkanik masa sekarang disebabkan oleh sisipan alterasi hidrotermal atau pelapukan; yang merupakan proses *post-magmatic* pada mineral, bukan komposisi kimia magma asal. Oleh karena itu, penting sekali untuk mengambil sampel segar untuk investigasi geokimia. Untuk hal-hal yang tak bisa dihindari, perlu dilakukan koreksi. Meskipun dalam analisis

XRF telah dilakukan koreksi dari nilai *Lost of Ignition* (LOI) atau perkiraan kandungan volatil total (untuk mengamati derajat alterasi), koreksi data bebas volatil tetap perlu dilakukan sebelum melakukan *plotting* data geokimia untuk batuan vulkanik (Gill, 2010). Sedangkan normalisasi menjadi 100% dilakukan untuk memudahkan perbandingan.

Tabel 2. Komposisi kimia sampel menggunakan metode analisis XRF. Semua data telah dinormalisasi menjadi 100% setelah diolah bebas volatil.

Senyawa Oksida	Kode sampel					
	<i>Nnk-03</i>	<i>Nnk-02</i>	<i>Nnk-18</i>	<i>Nnk-21</i>	<i>Nnk-26</i>	<i>Nnk-10</i>
SiO ₂	51.52	57.17	60.05	65.33	63.25	54.71
TiO ₂	1.03	0.96	0.95	0.84	0.99	0.24
Al ₂ O ₃	17.05	17.41	17.66	19.89	20.56	7.75
Fe ₂ O ₃	16.99	11.27	11.93	8.16	8.37	36.36
MnO	0.06	0.14	0.13	0.05	0.03	0.09
MgO	7.01	7.86	4.27	1.76	1.10	0.06
CaO	3.85	3.49	3.45	0.23	0.10	0.29
Na ₂ O	1.59	0.18	0.07	0.56	0.32	0.00
K ₂ O	0.68	1.38	1.34	3.09	5.20	0.45
P ₂ O ₅	0.21	0.12	0.15	0.10	0.08	0.05
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Magma silikat memiliki variasi komposisi yang sangat luas, tergantung pada komposisi sumber dan mineraloginya (kerak atau mantel), kedalaman pelelehan, derajat pelelehan (%), dan fraksionasi ruang magma yang dangkal seperti kristalisasi fraksional (Gill, 2010). Faktor tersebut menyebabkan batuan vulkanik dan magma alami memiliki sebaran komposisi total alkali – SiO₂ yang luas. Secara teori, magma silikat alami memiliki variasi komposisi SiO₂ 31% - 76% dan variasi total alkali 1% - 15%. Untuk memudahkan penamaan, dilakukan klasifikasi berdasarkan komposisi kimia tertentu. Klasifikasi yang umum digunakan ada 2, yaitu melalui Diagram TAS dan Diagram K₂O-SiO₂.

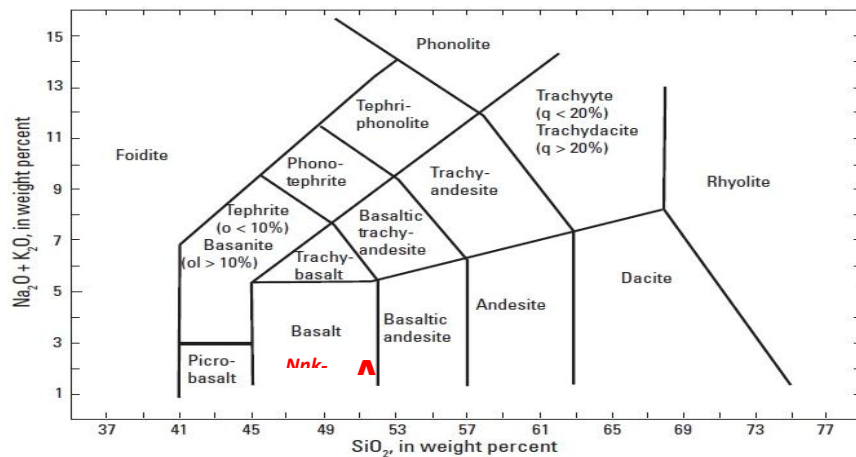
Diagram TAS (Gambar 3) menggambarkan hubungan total alkali (K + Na) dengan SiO₂. Pengeplotan sampel pada diagram TAS menunjukkan bahwa sampel bom gunung api segar *Nnk-03* termasuk ke dalam grup subalkali basal (total alkali 2.27%, SiO₂ 51.52%) dan bersifat basa (mendekati *intermediate*). Subalkali basal cenderung terfraksionasi menjadi lelehan rendah alkali seperti dasit dan rhyolite, tergantung pada lingkungan tektoniknya.

Diagram klasifikasi lainnya adalah berdasarkan jumlah K₂O terhadap SiO₂ (Gambar 4). Diagram ini biasanya digunakan untuk klasifikasi batuan vulkanik terkait masalah subduksi. Pada kebanyakan busur pulau, kandungan K batuan vulkanik meningkat secara sistematis terhadap jarak tempat erupsi atau lebih akuratnya terhadap kedalaman zona subduksi di bawah titik erupsi. Pengeplotan sampel *Nnk-03* pada diagram K₂O-SiO₂ menunjukkan bahwa sampel bom gunung api segar *Nnk-03* termasuk ke dalam kategori *medium-K*, yang mencerminkan bahwa sampel memiliki jumlah potassium sedang (K₂O 0.68%; SiO₂ 51.52%). Kesimpulan lainnya yang dapat ditarik adalah bahwa lokasi pengambilan sampel *Nnk-03*, yaitu Tanjungbatu, tidak terlalu jauh dari pusat erupsi gunung api atau dengan kata lain zona subduksi di bawah titik erupsi tidak terlalu jauh dari lokasi tersebut.

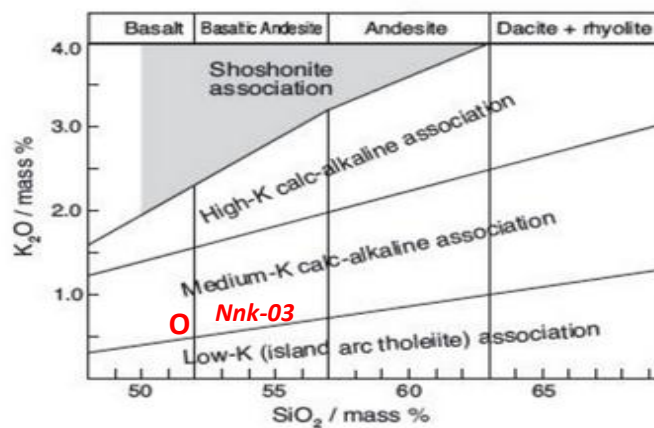
Data komposisi kimia sampel alterasi *Nnk-10* pada Tabel 2 memperlihatkan anomali dari data-data lainnya. Perbedaannya sangat signifikan dibandingkan dengan sampel hasil pelapukan. Jumlah

singkatan alterasi yang dijumpai di lapangan pun relatif sedikit. Oleh karena itu, ditarik kesimpulan bahwa sampel batulempung *Nnk-21* dan *Nnk-26* dominan berasal dari rombakan hasil pelapukan sampel gunung api berkomporsi basal, dan hanya sebagian kecil yang berasal dari ubahan hidrotermal atau alterasi.

Proses perubahan mulai dari batuan gunung api segar, pelapukan, dan kemudian pengendapan sebagai batulempung menyebabkan perubahan komposisi kimia batuan. Perubahan dapat berupa penambahan maupun pengurangan unsur kimia yang ada, atau hilangnya unsur kimia yang lama dan munculnya yang baru. Pada umumnya, perubahan batuan beku/gunung api dari basa ke asam, baik melalui proses pelapukan, rombakan, maupun pengendapan, akan menghasilkan peningkatan unsur Si, Al, dan K, serta penurunan unsur Fe, Mg, Ca, Na, Mn, Ti, juga P_2O_5 .



Gambar 3. Diagram TAS (Gill, 2010). Pertama kali dipublikasikan oleh IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks (Le Maitre, 2002)



Gambar 4. Diagram $K_2O - SiO_2$ (Gill, 2010). Batas area pertama kali didefinisikan oleh Le Maitre (2002), kecuali *shoshonite association* oleh Peccerillo dan Taylor (1976)

Pola perubahan komposisi kimia pada sampel batuan gunung api segar, produk lapuk, serta sedimen batulempungnya disajikan dalam Grafik 1, Grafik 2, dan Grafik 3.

Grafik 1 menunjukkan perubahan senyawa SiO_2 , Al_2O_3 , dan K_2O pada sampel Nunukan, secara berurutan dari batuan gunung api segar, tuf lapuk dan aglomerat lapuk, hingga batulempung. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa unsur Si, Al, dan K pada sedimen batulempung lebih tinggi bila dibandingkan dengan jumlahnya di batuan gunung api segar.

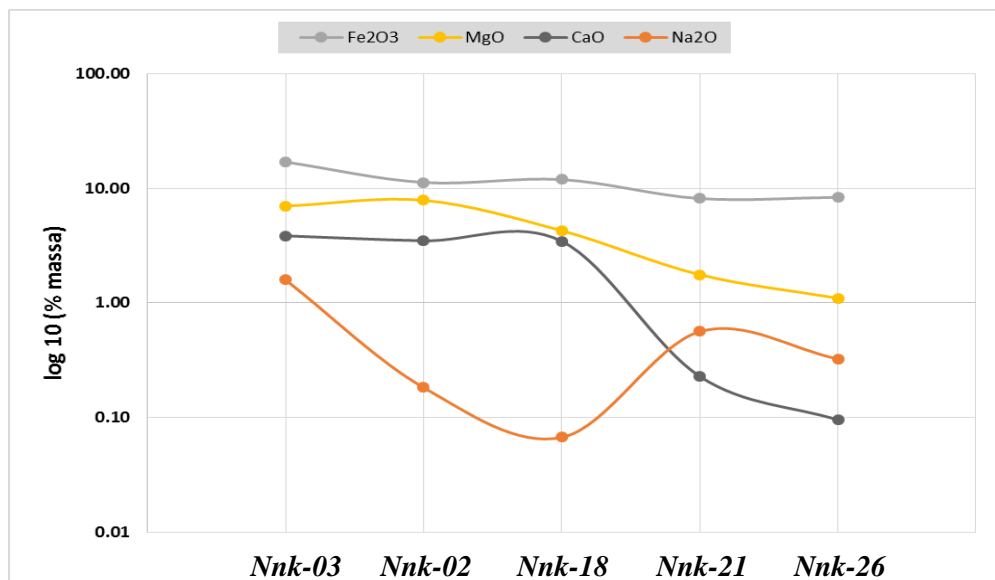
Grafik 2 menunjukkan bahwa secara umum senyawa Fe_2O_3 , MgO, CaO, dan Na_2O mengalami penurunan sehingga jumlahnya di dalam sedimen batulempung lebih sedikit daripada jumlah di

batuan gunung api segarnya. Unsur Na memperlihatkan peran yang cukup signifikan pada proses pelapukan karena turun drastis lalu mengalami pengayaan ketika menjadi batulempung, meskipun jumlah akhirnya tidak sebanyak nilai di batuan segar basal. Dari Grafik 3 terlihat bahwa secara umum nilai Mn dan P_2O_5 pada sampel mengalami penurunan, meskipun Ti tidak mengalami perubahan yang signifikan. Unsur Mn juga sempat mengalami sedikit peningkatan ketika terjadi pelapukan, namun jumlah akhirnya tetap lebih rendah dibandingkan batuan segar asalnya.

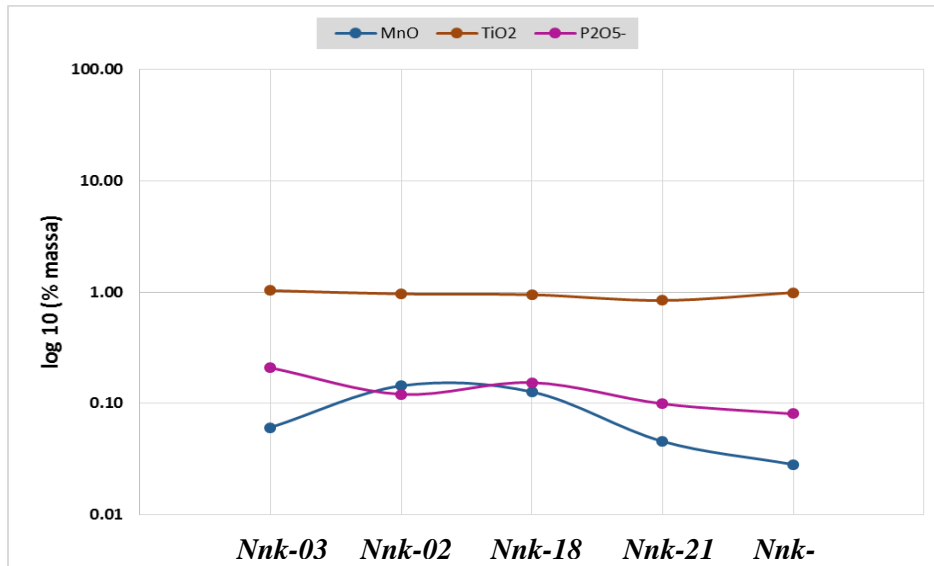
Batulempung merupakan produk pelapukan maupun ubahan hidrotermal (alterasi). Komposisinya sangat bervariasi, tergantung pada kondisi fisik dan kimia, juga sifat senyawa sumbernya. Meskipun demikian, kandungan utama dari batulempung adalah silika (Bronto, 1999). Spesi lain yang terdapat di dalam batulempung adalah mineral lempung, juga mineral non-lempung. Secara kimia, mineral lempung terdiri dari silikat hidrat (persenyawaan Al atau Mg) yang ketika dipanaskan akan kehilangan hidratnya. Strukturnya berupa lembaran yang menerus. Mineral lempung dapat dibedakan menjadi 4 grup utama, yaitu kaolinite, illite, montmorillonite, dan vermiculite (Bronto, 1999). Deer (1978) maupun Brownlow (1996) membahas komposisi kimia mineral lempung tersebut secara lebih detail.



Grafik 1. Perubahan komposisi kimia sampel Nunukan; pengayaan unsur Si, Al, dan K



Grafik 2. Perubahan komposisi kimia sampel Nunukan; degradasi unsur Fe, Mg, Ca, dan Na



Grafik 3. Perubahan unsur Mn, Ti, dan (P₂O₅) pada sampel Nunukan

Komposisi kimia dari sampel batulempung *Nnk-21* dan *Nnk-26* memiliki kemiripan dengan endapan lumpur gunung api Sidoarjo (Lusi) dan Sangiran (Bronto, dkk., 2016). Selain itu, sampel juga dibandingkan dengan mineral lempung (Brownlow, 1996; Deer, 1978). Data-data tersebut disajikan pada Tabel 4. Secara umum, kedua sampel memiliki kemiripan dengan mineral lempung ilite dan montmorillonite, terutama karena kaya unsur Al, K, Fe, dan Mg. Menurut Weaver, pembentukan ilite secara hidrotermal maupun sedimen lebih mudah terjadi pada kondisi konsentrasi basa (tinggi Al dan K). Pembentukan montmorillonite juga terjadi pada kondisi basa (tinggi Ca dan K), namun dengan adanya sejumlah Mg (Deer, 1978). Ilite dapat terbentuk dari proses pelapukan silikat, khususnya feldspar, dan dominan terjadi pada lingkungan *shales* dan *mudstones*. Montmorillonite terbentuk dari alterasi batuan beku hasil erupsi, biasanya tuf atau abu vulkanik, dan sering terjadi pada *shales* hasil pelapukan batuan basa dengan kehadiran Mg akibat aliran air yang rendah. Bila aliran air tinggi dan sedang, Mg cenderung hilang sehingga biasanya yang terbentuk adalah mineral gipsit dan kaolinite.

Meskipun demikian, komposisi batulempung sampel *Nnk-21* dan *Nnk-26* masih cukup berbeda dengan komposisi mineral lempung, seperti masih adanya unsur Ti dan Mn, kadar Al, Mg, Ca masih rendah, dan kadar Fe masih lebih tinggi. Sampel batulempung Nunukan memang berasal dari material gunung api yang mengalami pelapukan, namun belum membentuk mineral lempung seutuhnya.

Tabel 4. Komposisi mineral lempung dan endapan lumpur gunung api berbagai literatur (¹Brownlow, ²Deer, ³Bronto).

	Kaolinite ¹	Ilite ¹	Montmorillonite ¹	Kaolinite ²	Ilite ²	Montmorillonite ²	Lusi ³	Sangiran ³
SiO ₂	53.01	54.30	66.66	52.8	62.77	66.66	62.93	63.43
TiO ₂	-	-	-	-	0.89	-	0.93	0.95
Al ₂ O ₃	44.94	31.93	25.76	45.63	20.40	25.76	20.35	21.45
Fe ₂ O ₃	0.93	3.20	1.08	0.86	5.79	1.08	7.71	7.22
FeO	-	-	-	-	-	-	-	-
MnO	-	-	-	-	-	-	0.13	0.09
MgO	0.09	1.45	4.20	0.16	2.28	4.20	2.60	2.18
CaO	0.09	0.74	2.11	0.47	1.75	2.11	2.35	1.59
Na ₂ O	0.77	0.14	0.05	-	0.47	0.14	0.70	0.64
K ₂ O	0.17	8.24	0.14	0.03	5.62	0.05	1.93	2.45
P ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-	0.37	-
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

4. KESIMPULAN

Dari analisis geokimia terhadap sampel batuan dari Nunukan, Provinsi Kalimantan Utara dapat disimpulkan bahwa pelapukan sedimen lempung dominan terjadi karena proses rombakan dari pelapukan batuan gunung api basal. Faktor lainnya yaitu rombakan dari proses ubahan hidrotermal memiliki peranan yang sangat kecil. Komposisi kimia yang menunjukkan kemiripan sampel dengan mineral lempung grup ilite dan montmorillonite turut mendukung hipotesis penelitian. Meskipun demikian, mineral lempung tersebut belum terbentuk secara sempurna.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Wida, Chitra O.H., Indah Y.P., dan Melna R., untuk penyiapan bahan, peralatan preparasi, serta hal-hal teknis laboratorium lainnya. Penulis juga berterima kasih pada Irfany, A. selaku penyelia laboratorium XRF. Selain itu, terima kasih juga penulis sampaikan pada Ryandi A. atas saran dan masukannya dalam diskusi yang kami lakukan terkait studi ini. Penelitian ini didukung secara finansial oleh Pusat Survei Geologi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia pada Tahun Anggaran 2016.

DAFTAR PUSTAKA

- Asmoro, P., dkk., 2016, Vulkanism for Petroleum System, *Laporan akhir penelitian lapangan*, Cekungan Migas, Pusat Survei Geologi, Bandung.
- Asmoro P., Bronto, S., Effendi, M., dan Zaennudin, A., 2016, Gunung Api Purba Pulau Nunukan, Kalimantan Utara, *Prosiding Seminar Nasional ISTA*, Yogyakarta, 25 November.
- Bronto, S., 1999, Geokimia, *Diktat mata kuliah geokimia*, STTNAS, Yogyakarta.
- Bronto, S., Asmoro, P. dan Effendi, M., 2016. Gunung Api Lumpur di Daerah Cengklik dan sekitarnya, Kabupaten Boyolali Provinsi Jawa Tengah, *Prosiding Seminar Nasional ISTA*, Yogyakarta, 25 November.
- Brownlow, A.H., 1996, *Geochemistry*, Prentice Hall Ltd London.
- Deer, H., Zussman, 1978, *An Introduction to the Rock Forming Minerals*, edisi 11, The Chaucer Press Great Britain.
- Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, 2016, XRF Spectroscopy, <http://www.desy.de/research/>, diakses tanggal 5 Oktober 2016.
- Gill, R., 2010, *Igneous Rocks and Processes a practical guide*, Wiley & Sons, Ltd. London.
- Hidayat, S., Amiruddin dan Satrisnas, D., 2011, *Peta Geologi Lembar Tarakan dan Sebatik, Kalimantan skala 1 : 250.000*, Pusat Survei Geologi, Bandung.
- Jenkins, R., Gould, R.W., Gedcke, D., 1995, *Quantitative X-Ray Spectrometry*, edisi 2, Marcel Dekker, Inc.
- Lackschewitz, K.S., et al., 2000, Mineralogy and Geochemistry of Clay Minerals Near a Hydrothermal Site in the Escanaba Trough, Gorda Ridge, Northeast Pacific Ocean, http://www-odp.tamu.edu/publications/169_SR/chap_06/chap_06.htm, diakses tanggal 5 Oktober 2016.
- Nelson, S.A., 2013, Geology 212 Occurrence, Mineralogy, Textures, and Structures of Sedimentary Rocks, <http://www.tulane.edu>, diakses tanggal 7 Oktober 2016.
- University of Missouri–Columbia, 2015, Overview of XRF, <http://archaeometry.missouri.edu/>, diakses tanggal 5 Oktober 2016.
- Weaver, C.E., *A Discussion on the Origin of Clay Minerals in Sedimentary Rocks*, Shell Oil Company, Houston, Texas.