

PROVENANS DAN PELAPUKAN SEDIMEN DASAR LAUT PULAU SALAHNAME DAN PULAU PANDANG, SUMATRA UTARA: ANALISIS MINERALOGI DAN GEOKIMIA

(PROVENANCE AND WEATHERING PROCESSES OF SEAFLOOR SEDIMENTS AROUND SALAHNAME AND PANDANG ISLANDS, NORTH SUMATRA: INSIGHTS FROM MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL ANALYSES)

Eko Saputro^{1*}, Ali Albab¹, Muhammad Zulfikar¹, Faris Nauval Rasyid¹ dan Riza Rahardiawan¹

¹ Balai Besar Survei dan Pemetaan Geologi Kelautan, Jl. Dr. Djunjunan No. 236

*eko.saputro@esdm.go.id

Diterima : 10 Juni 2025 Disetujui : 25 November 2025

ABSTRAK

Studi ini menyelidiki asal usul dan proses pelapukan purba pada sedimen dasar laut di sekitar Pulau Salahname dan Pulau Pandang berdasarkan analisis data mineralogi dan geokimia. Sedimen di wilayah ini dicirikan oleh pasir halus hingga sedang, dengan komposisi mineral yang didominasi oleh kuarsa, K-feldspar, plagioklas, muskovit, biotit, fragmen litik vulkanik, dan mineral lempung. Analisis unsur utama dan unsur jejak menunjukkan bahwa sedimen tersebut berasal dari batuan felsik hingga mafik. Indeks pelapukan yang meliputi Indeks Alterasi Kimia, Indeks Alterasi Plagioklas, Indeks Pelapukan Kimia, dan Indeks Variasi Komposisi, secara konsisten mengindikasikan tingkat pelapukan kimia yang rendah di daerah sumber, serta kematangan sedimen yang belum berkembang.

Kata kunci: Sedimen dasar laut, geokimia, mineralogi, Pulau Salahname, Pulau Pandang, Tanjung Tiram

ABSTRACT

This study investigates the origin and paleo-weathering process of marine sediments around Salahname Island and Pandang Island, based on mineralogical and geochemical data analysis. The sediments in this

area are characterized by fine to medium sand, with mineral compositions dominated by quartz, K-feldspar, plagioclase, muscovite, biotite, volcanic lithic fragments, and clay minerals. Analysis of major and trace elements indicates that the sediments were derived from felsic to mafic source rocks. Weathering indices, including the Chemical Index of Alteration (CIA), Plagioclase Index of Alteration (PIA), Chemical Index of Weathering (CIW), and Index of Compositional Variability (ICV), consistently suggest low chemical weathering intensity in the source area, along with immature sediment composition.

Keyword: Seabed sediments, geochemistry, mineralogy, Salahnamo Island, Pandang Island, Tanjung Tiram

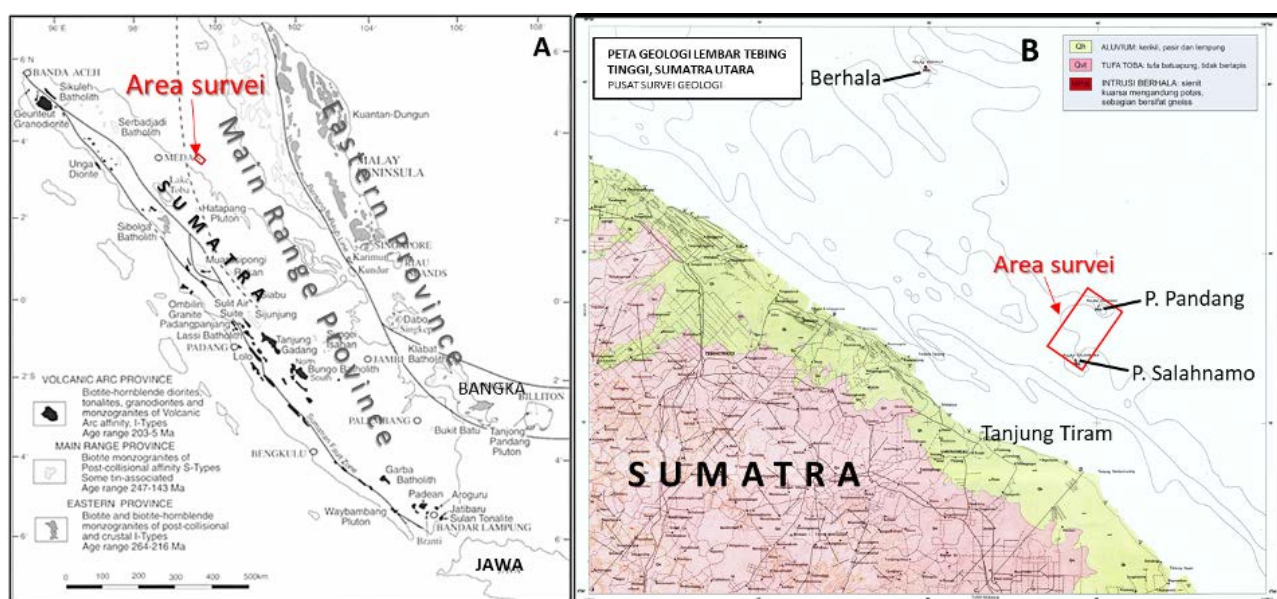
PENDAHULUAN

Partikel atau zat yang masuk ke lingkungan laut akan mengalami transformasi menjadi sedimen melalui serangkaian proses kompleks yang melibatkan aspek biologis, kimiawi, dan fisika. Sedimentasi merupakan proses pengendapan material sedimen daratan atau akumulasi partikel dalam suatu cekungan setelah melalui berbagai tahapan proses sebelumnya. Menurut Pipkin (1977), sedimen terdiri dari fragmen batuan, mineral, atau bahan organik yang tertransportasi dari berbagai sumber melalui media udara, angin, es, atau air, termasuk material yang tersuspensi dalam air maupun yang terendapkan dari larutan kimia. Gross (1990) memperluas definisi ini dengan menyatakan bahwa sedimen laut merupakan akumulasi mineral-mineral dan pecahan batuan yang bercampur dengan fragmen cangkang serta tulang organisme laut, ditambah partikel-partikel hasil proses kimiawi dalam laut. Konteks penelitian geologi, Rollison (1993) mengemukakan bahwa terdapat empat jenis data geokimia yang esensial untuk merekonstruksi sejarah pembentukan batuan, yaitu data unsur utama, unsur jejak, isotop radiogenik, dan isotop stabil.

Studi ini secara khusus memanfaatkan data geokimia dan mineralogi sebagai dasar analisis.

Komposisi sedimen permukaan dasar laut merupakan hasil interaksi berbagai faktor kompleks yang meliputi kondisi geologi setempat, karakteristik morfologi, pengaruh iklim, serta dinamika proses geologi yang aktif. Wilayah pesisir dan perairan dangkal, proses sedimentasi utamanya dikendalikan oleh faktor-faktor seperti suplai sedimen dari aliran sungai, dinamika gelombang, siklus pasang-surut, pola arus sejajar pantai, dan arus yang bergerak tegak lurus garis pantai, sebagaimana dijelaskan oleh Komar (1998) dalam Zuraida, dkk. (2017).

Pulau Salahnamo dan Pulau Pandang merupakan dua pulau kecil yang terletak di Selat Malaka, di lepas pantai timur laut Sumatra, Indonesia. Kedua pulau ini termasuk dalam perairan Tanjung Tiram, Kabupaten Batu Bara, Provinsi Sumatra Utara, dan dikenal lokal sebagai “Saudara Bersaudara” (Gambar 1). Pulau Salahnamo terletak sekitar 40 kilometer dari Tanjungbalai (Gambar 2.A-B). Pulau yang berhutan lebat ini memiliki tebing batu terjal yang menjulang dari laut, dengan titik tertinggi 89 meter di atas permukaan laut. Koordinat



Gambar 1. Lokasi daerah studi perairan Tanjung Tiram, kabupaten Batubara, Provinsi Sumatra Utara. A. Persebaran granitoid di Sundaland (Cobbing, 2005) B. Peta geologi regional oleh Cameron, dkk. (1981)



Gambar 2. Pulau Salahnamo (A-B) dan Pulau Pandang (C-D) di perairan Tanjung Tiram, Sumatra Utara

geografisnya kira-kira $3^{\circ}20'30''\text{LU}$ dan $99^{\circ}43'22''\text{BT}$. Pulau Pandang, yang terletak sekitar 47 kilometer dari Tanjungbalai (Gambar 2.C-D), memiliki panjang sekitar 500 meter dan lebar 250 meter. Hampir seluruh pulau dikelilingi terumbu karang dengan beberapa formasi batuan yang muncul di permukaan. Terdapat lampu navigasi di pulau ini yang memiliki ketinggian maksimum 64 meter di atas permukaan laut pada koordinat $3^{\circ}25'49''\text{LU}$ dan $99^{\circ}45'18''\text{BT}$.

Kedua pulau berjarak sekitar 10 kilometer dan berada di perairan Tanjung Tiram. Kawasan ini merupakan bagian dari Daratan Sunda pada masa Kuartar dan diduga terisi oleh sedimen aluvial dan fluvial, sehingga berpotensi mengandung mineral plaser. Daerah ini juga diduga dilalui jalur granitoid yang membentang dari Burma hingga Kalimantan Barat, yang memperkuat potensi deposit mineralnya. Menurut Subarsyah (2008), terdapat batuan granit intrusif sampai ke dasar laut yang kemungkinan merupakan bagian dari jalur granit pembawa mineral ekonomis.

Geologi daerah penyelidikan di kawasan ini sangat dipengaruhi oleh keberadaan dua kelompok granitoid besar yang terletak di Semenanjung Malaysia dan Kepulauan Riau. Cobbing (2005) membagi kedua kelompok granitoid tersebut menjadi *Granitoid Main Range Province* dan *Granitoid Eastern Province* (Gambar 1A). *Granitoid Main Range Province* termasuk dalam tipe S dan IS, yang terbentuk dari batuan sedimen (suprakrustal) yang terubah oleh proses geologi seperti metamorfosis dan pengaruh magmatik. Granitoid tipe S umumnya terbentuk dari batuan asal sedimen yang mengalami pemanasan dan tekanan tinggi yang

menyebabkan terjadinya rekristalisasi mineral, *Granitoid Eastern Province* (Tipe I): merupakan granitoid tipe I yang terbentuk dari batuan beku (infrakrustal). Granitoid tipe I ini berasal dari magma yang mendingin di bawah permukaan bumi, menghasilkan batuan yang lebih keras dan tahan lama.

Berdasarkan peta geologi skala 1:250.000 yang disusun oleh Cameron, dkk (1981), daerah penyelidikan terletak pada lembar Tebingtinggi Sumatra (Gambar 1B). Pulau-pulau di Selat Malaka, seperti Pulau Berhala, Pulau Salahnamo, dan Pulau Pandang termasuk ke dalam satuan batuan Intrusi Berhala (Mpib) yang merupakan formasi batuan yang terdiri dari sienit kuarsa mengandung potas dan sebagian bersifat genes. Berdasarkan interpretasi Cameron, dkk. (1981), batuan ini diperkirakan berumur Permian, yang menunjukkan bahwa batuan ini terbentuk pada periode Paleozoikum. Satuan ini mengandung potensi mineral logam yang terkonsentrasi di sekitar daerah intrusi ini.

Wilayah studi menunjukkan variasi kedalaman laut yang signifikan, dengan kedalaman maksimum mencapai 68 meter dan perairan dangkal yang mengelilingi kedua pulau. Kondisi batimetri ini mendukung akumulasi mineral hasil proses sedimentasi geologi lokal. Area transisi dengan gradien kedalaman moderat antara zona dangkal dan dalam berpotensi menjadi lokasi konsentrasi mineral ekonomis. Keberadaan lereng curam di sekitar Pulau Salahnamo dan Pulau Pandang menunjukkan aktivitas geodinamika yang intensif di wilayah studi. Karakteristik morfologi ini tidak hanya memengaruhi pola sedimentasi, tetapi juga menjadi

indikator penting proses geologi yang masih aktif di kawasan ini (Albab, dkk., 2024).

Pemahaman geokimia mengenai distribusi dan migrasi unsur-unsur merupakan aspek fundamental dalam penelusuran asal-usul material geologi/provenans. Penelusuran tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan pendekatan geokimia unsur oksida utama (Armstrong-Altrin dkk., 2018; Eko Bessa dkk., 2020; Mbale Ngama dkk., 2019; Cruz dkk., 2021) dan unsur tanah jarang/REE (Eko Bessa dkk., 2021). Namun, penelitian berbasis data geokimia untuk mengidentifikasi provenans sedimen dasar laut di sekitar Pulau Salahnamo dan Pulau Pandang masih merupakan kajian yang belum pernah dilakukan sebelumnya. Pendekatan geokimia seperti yang akan digunakan dalam studi ini telah terbukti efektif dalam berbagai studi sebelumnya untuk memahami korelasi antara sedimen pantai dengan satuan batuan di sekitarnya serta menelusuri potensi bahan geologi ekonomis suatu wilayah (Caranza-Edwards dkk., 2009; Kim dkk., 2010; Armstrong-Altrin dkk., 2012). Berdasarkan pertimbangan tersebut, studi ini secara khusus bertujuan untuk menganalisis komposisi geokimia yang meliputi senyawa utama (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , MnO) dan unsur jejak (Ba, Co, Cr, Cu, Nb, Ni, Pb, Rb, Sr, Th, V, Zn, Zr) guna mengungkap asal-usul sedimen dasar laut di Perairan Tanjung Tiram, dengan fokus utama pada wilayah sekitar Pulau Salahnamo dan Pulau Pandang. Analisis komprehensif terhadap parameter-parameter geokimia ini diharapkan dapat memberikan pemahaman baru mengenai proses-proses geologi yang membentuk karakteristik sedimen di wilayah tersebut.

METODE

Metode Pengambilan dan Analisis Sampel

Sebanyak 15 sampel sedimen dasar laut dikumpulkan dari wilayah studi, terdiri atas 8 sampel di sekitar Pulau Salahnamo (kedalaman 26–53 m) dan 7 sampel di sekitar Pulau Pandang (kedalaman 22–54 m) (Gambar 3A). Seluruh sampel kemudian dianalisis besar butirnya untuk keperluan studi. Analisis ini meliputi pemisahan berat asal (rata-rata 100 g), berat cangkang, dan berat kumulatif. Pemisahan fraksi butir dilakukan mulai dari -2,0 phi hingga 4,0 phi, sedangkan fraksi lebih halus (4,0 phi hingga 8,0 phi) dihitung secara terpisah. Data tersebut selanjutnya diolah menggunakan perangkat lunak Gradistat v9.1 (Blott & Pye, 2001) untuk memperoleh parameter statistik butir, meliputi nilai X (phi), *sortasi*, *skewness*, *kurtosis*, serta komposisi

tekstur sedimen. Klasifikasi sedimen kemudian mengacu pada klasifikasi Folk (1980) guna memberikan gambaran pola sebaran sedimen permukaan di daerah studi.

Analisis Geokimia dan Mineralogi

Analisis geokimia sedimen dasar laut dilakukan di dua laboratorium terakreditasi: PT. Intertek Utama Services (IUS) dan PT. Geoservices. Sebanyak 13 sampel dianalisis menggunakan *Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry/Optical Emission Spectrometry (ICP-MS/OES)*, sementara 15 sampel diperiksa dengan *Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence (ED-XRF)* di Laboratorium milik PT. Intertek Utama Services (IUS), Jakarta. Selain itu, analisis mineral butir dilakukan pada 6 sampel sedimen dasar laut dengan dua fraksi ukuran: $>600\ \mu\text{m}$ (kasar) dan $<600\ \mu\text{m}$ (halus) di laboratorium milik PT. Geoservices untuk mengidentifikasi komposisi mineralogi sedimen.

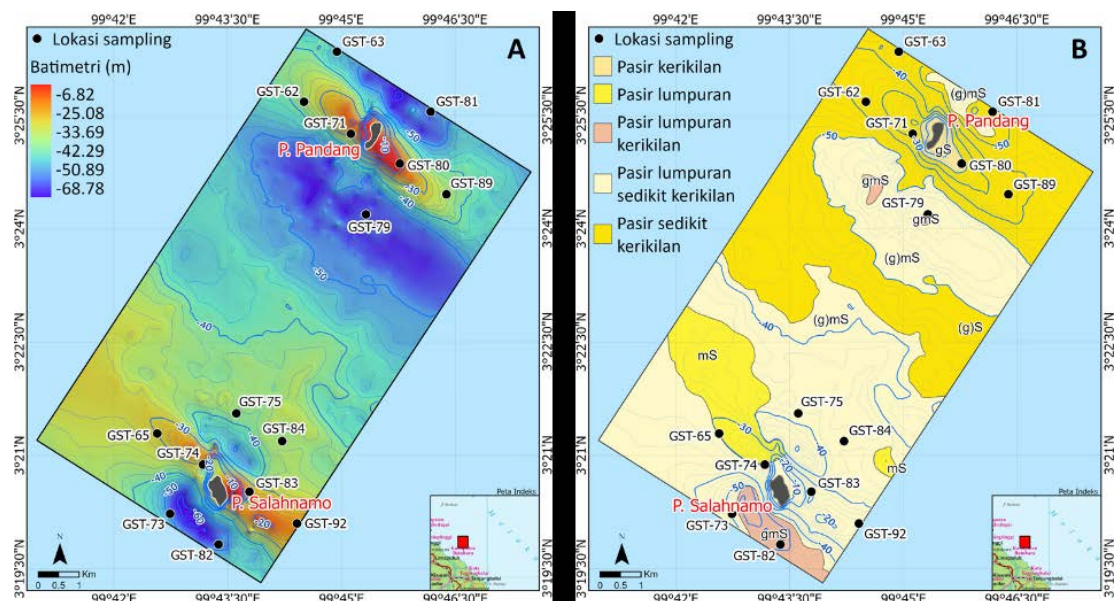
HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Besar Butir

Hasil dari analisis besar butir terhadap 15 sampel sedimen dasar laut (Tabel 1) dihubungkan dengan pola batimetri yang berkembang di perairan sekitar Pulau Salahnamo dan Pulau Pandang, terlihat bahwa terdapat 4 tipe sedimen dasar laut yang berkembang di sekitar Pulau Salahnamo yaitu pasir lumpuran (*muddy sand/mS*), pasir lumpuran sedikit kerikilan (*slightly gravelly muddy sand/(g)mS*), pasir lumpuran kerikilan (*gravelly muddy sand/gmS*) dan pasir sedikit kerikilan (*slightly gravelly sand/(g)S*), sedangkan di sekitar Pulau Pandang terlihat 3 tipe sedimen dasar laut yang berkembang yaitu pasir lumpuran kerikilan (*gravelly muddy sand/gmS*), pasir sedikit kerikilan (*slightly gravelly sand/(g)S*) dan pasir kerikilan (*gravelly sand/gS*) dapat terlihat pada Gambar 3B.

Analisis statistik butir sedimen menunjukkan perbedaan karakteristik antara kedua lokasi studi. Di sekitar Pulau Salahnamo, parameter statistik menunjukkan rentang nilai *mean* 1,07-3,08 phi, *sortasi* 1,15-3,18, *skewness* -0,10-0,49, dan *kurtosis* 0,73-1,49. Komposisi sedimennya terdiri dari kerikil (3,58%), pasir (77,27%), lanau (19,06%), dan lempung (0,09%). Sementara di Pulau Pandang, nilai parameter statistik menunjukkan rentang yang lebih sempit dengan *mean* 0,86-1,74 phi, *sortasi* 1,14-2,43, *skewness* -0,10-0,47, dan *kurtosis* 0,86-1,81, dengan komposisi kerikil (9,33%), pasir (83,28%), lanau (7,38%), dan lempung (0,03%).

Berdasarkan klasifikasi ukuran butir Folk (1980), sedimen di kedua lokasi didominasi oleh



Gambar 3. Peta lokasi pengambilan sampel (A) dan peta sebaran sedimen permukaan dasar laut (B) perairan Tanjung Tiram, Sumatra Utara (modifikasi dari Albab, dkk., 2024)

Tabel 1. Hasil analisis besar butir sampel sedimen dasar laut di sekitar Pulau Salahnamo dan Pulau Pandang, perairan Tanjung Tiram, Sumatra Utara

Analisis Besar Butir (Grainsize Analysis)										
ID	Mean	Sortasi	Skewness	Kurtosis	Kerikil	Pasir	Lumpur	Klasifikasi	Simbol	
Sampel	(Phi)				(%)			Ward & Folk , 1980		
SALAHNAMO										
GST-65	2.61	1.29	0.34	1.31	0.00	84.97	15.03	Pasir lumpuran	mS	
GST-73	3.08	2.47	-0.10	0.82	3.31	75.69	21.00	Pasir lumpuran sedikit kerikilan	(g)mS	
GST-74	2.01	2.46	0.34	1.49	8.06	72.28	19.65	Pasir lumpuran kerikilan	gmS	
GST-75	2.34	2.21	0.49	0.90	0.76	75.81	23.43	Pasir lumpuran sedikit kerikilan	(g)mS	
GST-82	2.58	3.18	0.15	0.73	13.82	47.64	38.53	Pasir lumpuran kerikilan	gmS	
GST-83	2.27	1.47	0.30	1.33	0.03	86.19	13.77	Pasir lumpuran sedikit kerikilan	(g)mS	
GST-84	2.08	1.80	0.45	1.32	0.54	82.68	16.78	Pasir lumpuran sedikit kerikilan	(g)mS	
GST-92	1.07	1.15	0.14	1.49	2.14	92.86	5.00	Pasir sedikit kerikilan	(g)S	
PANDANG										
GST-62	0.86	1.71	-0.19	0.93	18.89	76.77	4.34	Pasir kerikilan	gS	
GST-63	1.04	1.16	0.47	1.59	0.89	91.85	7.26	Pasir sedikit kerikilan	(g)S	
GST-71	1.74	1.14	0.02	1.61	4.10	90.53	5.51	Pasir sedikit kerikilan	(g)S	
GST-79	1.16	2.43	0.26	0.86	21.25	62.93	15.75	Pasir lumpuran kerikilan	gmS	
GST-80	1.31	1.54	-0.10	1.25	11.14	83.78	5.08	Pasir kerikilan	gS	
GST-81	1.24	1.66	0.33	1.81	8.03	83.50	8.48	Pasir kerikilan	gS	
GST-89	0.98	1.18	0.29	1.55	1.03	93.57	5.39	Pasir sedikit kerikilan	(g)S	

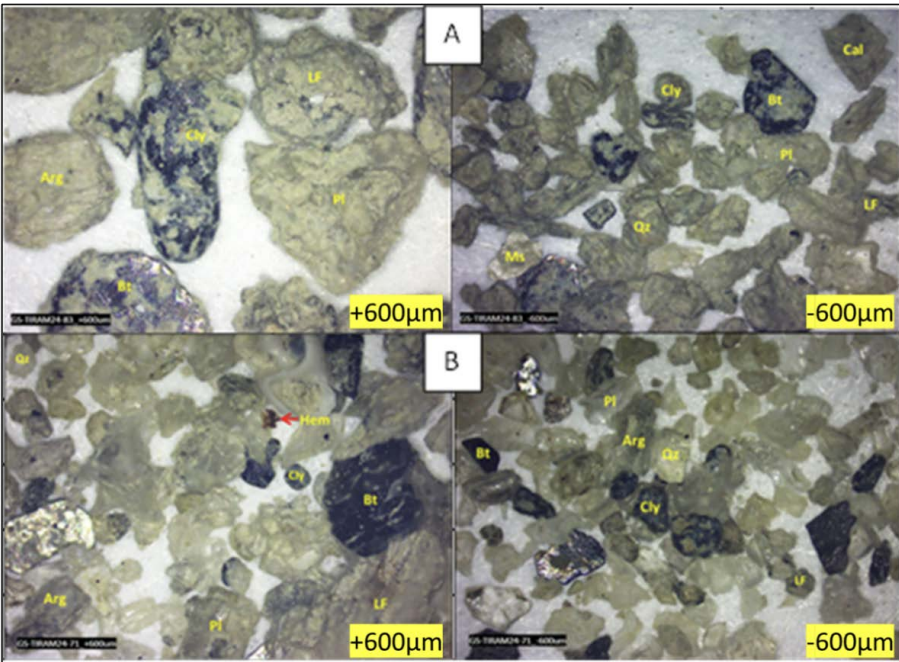
fraksi pasir, namun dengan karakteristik yang berbeda. Pulau Salahnamo didominasi oleh pasir halus, sedangkan Pulau Pandang didominasi oleh pasir sedang. Nilai sortasi yang termasuk dalam kategori buruk hingga sangat buruk di kedua lokasi mengindikasikan energi pengendapan yang tidak teratur, yang disebabkan oleh pengaruh arus dan gelombang yang cukup kuat. Kondisi ini konsisten dengan letak perairan studi yang berada di Selat Malaka yang bersifat terbuka dan sangat dipengaruhi

oleh pola musim tanpa adanya penghalang signifikan.

Analisis *skewness* menunjukkan kecenderungan distribusi butir ke arah ukuran yang lebih kasar, mengindikasikan adanya proses transportasi dan pengendapan yang intensif. Fenomena ini diduga kuat berkaitan dengan dinamika gelombang laut yang dominan dan pola arus yang tidak stabil di kawasan tersebut. Sementara itu, nilai kurtosis yang bersifat *leptokurtic* (sangat runcing) menunjukkan

Tabel 2. Analisis mineralogi sedimen dasar laut di sekitar Pulau Salahnamo dan Pulau Pandang, perairan Tanjung Tiram, Sumatra Utara

Analisis Mineralogi Butir (Grain Counting Analysis) (%)																						
ID Sampel	Ukuran Butir (+600um)												Ukuran Butir (-600um)									
	Arg	Bt	Cal	Cly	Hem	Kf	LF	Mag	Ms	Pl	Qz	Arg	Bt	Cal	Cly	Hem	Kf	LF	Mag	Ms	Pl	Qz
SALAHNAMO																						
GST-65	1,30	-	-	-	-	-	97,40	-	-	1,30	-	6,30	4,50	1,80	4,90	0,40	1,30	74,10	-	-	5,80	0,90
GST-74	1,30	6,00	3,70	13,00	1,30	1,60	30,90	-	-	32,50	9,70	-	7,60	2,40	16,20	0,50	2,40	15,40	-	-	38,20	17,30
GST-83	11,60	9,30	-	7,10	-	0,90	55,10	-	0,90	12,40	2,70	6,30	7,20	1,30	5,50	-	-	32,10	0,40	0,80	30,80	15,60
X̄	4,73	7,65	3,70	10,05	1,30	1,25	61,13	-	0,90	15,40	6,20	6,30	6,43	1,83	8,87	0,45	1,85	40,53	0,40	0,80	24,93	11,27
PANDANG																						
GST-71	1,60	15,20	1,30	3,40	0,30	-	2,90	-	-	43,00	32,30	0,50	16,60	1,40	5,90	-	-	1,70	-	-	40,30	33,70
GST-79	-	1,70	0,90	4,70	-	2,60	72,80	-	-	10,20	7,20	-	7,80	1,70	10,40	0,40	3,50	19,60	1,30	0,40	35,70	19,10
GST-80	5,60	15,50	1,20	4,80	0,40	3,20	9,60	1,20	1,20	44,20	13,10	4,80	10,00	3,90	13,50	1,30	1,70	14,80	0,40	1,30	36,20	11,80
X̄	3,60	10,80	1,13	4,30	0,35	2,90	28,53	1,20	1,20	32,47	17,53	2,65	11,47	2,33	9,93	0,85	2,60	12,03	0,85	0,85	37,40	21,53



Gambar 4. Mineralogi butir sedimen disekitar Pulau Salahnamo (A) dan Pulau Pandang (B)

bahwa sumber sedimen kemungkinan berasal dari lokasi yang relatif dekat. Keberadaan pulau-pulau di sekitar wilayah studi diduga menjadi penyuplai utama material sedimen di perairan Tanjung Tiram.

Analisis Mineralogi

Analisis mineral butir pada sedimen dasar laut di sekitar Pulau Salahnamo dan Pulau Pandang dilakukan dengan membagi sampel menjadi dua fraksi ukuran (Tabel 2), yaitu lebih kasar dari 600 mikron (+600 µm) dan lebih halus dari 600 mikron (-600 µm). Hasil analisis (Gambar 4) mengidentifikasi berbagai mineral, meliputi aragonit (arg), biotit (bt), kalsit (cal), lempung (cly), hematit (hem), K-feldspar (kf), fragmen batuan (lf), magnetit (mag), muskovit (ms), plagioklas (pl), dan kuarsa (qz). Komposisi mineral utama di sekitar Pulau Pandang menunjukkan nilai yang lebih tinggi untuk kuarsa (17,53–21,53%), K-feldspar (2,6–2,9%),

plagioklas (32,47–37,40%), muskovit (0,85–1,2%), dan biotit (10,8–11,47%). Sebaliknya, di sekitar Pulau Salahnamo, kandungan mineral-mineral tersebut lebih rendah, dengan kuarsa (6,20–11,27%), K-feldspar (1,25–1,85%), plagioklas (15,4–24,93%), muskovit (0,8%), dan biotit (6,43–7,65%). Namun, mineral lempung (8,87–10,05%) dan fragmen batuan (40,53–61,13%) justru lebih dominan di Pulau Salahnamo dibandingkan di Pulau Pandang (lempung: 4,3–9,93%; fragmen batuan: 12,03–28,43%).

Mineral-mineral tersebut diduga berasal dari pelapukan batuan beku felsik hingga mafik. Aragonit dan kalsit, yang lebih tinggi di Pulau Salahnamo (aragonit: 4,73–6,3%; kalsit: 1,83–3,7%) dibandingkan di Pulau Pandang (aragonit: 2,65–3,6%; kalsit: 1,13–2,33%), menunjukkan pengaruh aktivitas marin dan pelapukan batugamping terumbu. Secara keseluruhan, sedimen di sekitar

Pulau Salahnamo didominasi oleh fragmen litik vulkanik/sedimen terubah (30,9–97,4% pada fraksi kasar dan 32,1–74,1% pada fraksi halus), dengan kehadiran plagioklas sekunder (32,5%) dan mineral lempung (16,2%) yang mengindikasikan alterasi hidrotermal atau metasomatisme dalam lingkungan busur vulkanik atau cekungan sedimen aktif. Rendahnya kuarsa (0,9–17,3%) dan keberadaan biotit (9,3%) memperkuat dugaan sumber batuan intermediate-alkalin dengan transportasi terbatas.

Pulau Pandang menunjukkan komposisi yang lebih kompleks, didominasi oleh plagioklas (44,2%) dan kuarsa (33,7%) pada fraksi halus, serta peningkatan biotit (16,6%) dan mineral lempung (13,5%). Hal ini mengindikasikan sumber batuan campuran granitik-mafik dengan alterasi lebih intensif dan transportasi yang lebih panjang. Perbedaan komposisi ini mencerminkan lingkungan geologi yang berbeda: Pulau Salahnamo merupakan bagian dari sistem vulkanik-sedimen, sedangkan Pulau Pandang terkait dengan kompleks batuan beku terubah yang dipengaruhi fluida hidrotermal. Untuk memperjelas proses pembentukannya, studi lanjutan seperti analisis XRD diperlukan guna mengidentifikasi fase alterasi secara lebih rinci.

Analisis Geokimia

Analisis geokimia terhadap unsur utama dan unsur jejak dalam sedimen dasar laut di sekitar Pulau Salahnamo dan Pulau Pandang memberikan informasi penting mengenai karakteristik dan asal-usul sedimen tersebut. Berdasarkan hasil pengujian 15 sampel, komposisi unsur utama menunjukkan pola yang khas di kedua lokasi. Di sekitar Pulau Salahnamo, senyawa oksida utama secara berurutan dari yang tertinggi adalah SiO_2 (60,03%), Al_2O_3 (13%), CaO (7,99%), dan Na_2O (3,40%). Sementara itu, sedimen di sekitar Pulau Pandang memiliki komposisi serupa dengan urutan SiO_2 (57,31%), Al_2O_3 (12,28%), CaO (9,63%), Fe_2O_3 (3,14%), dan Na_2O (3,40%).

Perbandingan antara kedua lokasi menunjukkan beberapa perbedaan signifikan. Kandungan SiO_2 , Al_2O_3 , dan Na_2O lebih tinggi di Pulau Salahnamo, sedangkan CaO dan Fe_2O_3 lebih dominan di Pulau Pandang. Senyawa-senyawa oksida dengan kadar di bawah 3% seperti K_2O , MgO , TiO_2 , P_2O_5 , dan MnO menunjukkan variasi kecil, dengan MgO dan MnO yang lebih tinggi di Pulau Pandang (2,25% dan 0,08%) dibandingkan di Pulau Salahnamo (1,71% dan 0,06%).

Analisis unsur jejak berdasarkan 13 sampel mengungkapkan pola distribusi yang berbeda. Di Pulau Salahnamo, unsur jejak dominan secara

berurutan adalah Cr (336,17 ppm), Sr (301,78 ppm), dan Ba (146,5 ppm), sedangkan di Pulau Pandang didominasi oleh Sr (485,57 ppm), Cr (284,57 ppm), dan Ba (130,71 ppm). Perbedaan paling mencolok terlihat pada kandungan Sr yang jauh lebih tinggi di Pulau Pandang, sementara Cr dan Ba lebih tinggi di Pulau Salahnamo. Unsur-unsur lain seperti Rb, Zn, dan V menunjukkan nilai yang relatif sebanding di kedua lokasi.

Unsur-unsur jejak dengan kadar di bawah 10 ppm seperti Pb, Th, Co, Cu, Zr, dan Nb menunjukkan variasi kecil antara kedua lokasi. Namun, perlu dicatat bahwa Pb menunjukkan nilai yang lebih tinggi di Pulau Pandang (11,4 ppm) dibandingkan di Pulau Salahnamo (7,48 ppm).

Data hasil analisis ini telah divisualisasikan dalam bentuk grafik (Gambar 5) untuk mempermudah perbandingan komposisi antar sampel. Pola distribusi unsur utama dan unsur jejak ini memberikan indikasi tentang perbedaan proses geokimia dan sumber batuan asal yang mempengaruhi komposisi sedimen di kedua lokasi tersebut. Perbedaan kandungan CaO dan Sr yang lebih tinggi di Pulau Pandang mungkin berkaitan dengan pengaruh sumber karbonat yang lebih kuat, sementara tingginya SiO_2 dan Cr di Pulau Salahnamo dapat mencerminkan pengaruh sumber batuan beku yang lebih dominan.

Korelasi Geokimia Sampel Sedimen Dasar Laut Pulau Salahnamo dan Pulau Pandang

Diagram Harker, yang umum digunakan untuk mempelajari korelasi antar batuan beku maupun sedimen (Irzon, 2015; Armstrong-Altrin, dkk., 2012; Irzon, 2018), diterapkan dalam studi ini dengan memanfaatkan SiO_2 sebagai pembanding karena dominasi komposisinya dan penggunaannya yang luas dalam berbagai studi (Armstrong-Altrin, dkk., 2012; Irzon, 2015; Wijaya dan Hendratno, 2015; Irzon, 2018). Analisis korelasi unsur utama pada sedimen dasar laut di sekitar Pulau Salahnamo dan Pulau Pandang dilakukan untuk menentukan derajat keterkaitan antar unsur. Dalam batuan sedimen, SiO_2 menjadi dasar penentuan korelasi (Abedini dan Calagari, 2015; Irzon, dkk., 2016; Irzon, 2018), dengan hubungan kuat terhadap oksida lain ditandai oleh koefisien korelasi (r) $>0,9$ (positif) atau $<-0,9$ (negatif). Semakin banyak oksida utama yang berkorelasi kuat dengan SiO_2 , semakin kuat indikasi bahwa sampel berasal dari sumber yang sama.

Plotting diagram Harker untuk sedimen di Pulau Salahnamo (Gambar 6A) menunjukkan bahwa hampir semua oksida (Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , Fe_2O_3 , TiO_2) berkorelasi sangat baik hingga baik dengan

SiO₂ (r >0,7), sementara CaO menunjukkan korelasi negatif. Pola serupa terlihat di Pulau Pandang (Gambar 6B), dengan Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O, dan K₂O berkorelasi positif terhadap SiO₂, sedangkan CaO tetap negatif. Perbedaan utama terletak pada TiO₂ yang memiliki nilai lebih tinggi di Salahnamo.

Perhitungan koefisien korelasi (r) lebih lanjut mengungkapkan korelasi kuat positif (>0,7) antara SiO₂ dengan Al₂O₃, Na₂O, dan K₂O di kedua pulau (Tabel 4), mengindikasikan dominasi mineral feldspar alkali (K-feldspar, albite) atau mineral lempung, yang khas pada batuan felsik (granit/riolit)

Tabel 4. Kandungan senyawa utama, unsur jejak dan beberapa rasio unsur pada sedimen dasar laut di sekitar Pulau Salahnamo dan Pulau Pandang, perairan Tanjung Tiram, Sumatra Utara

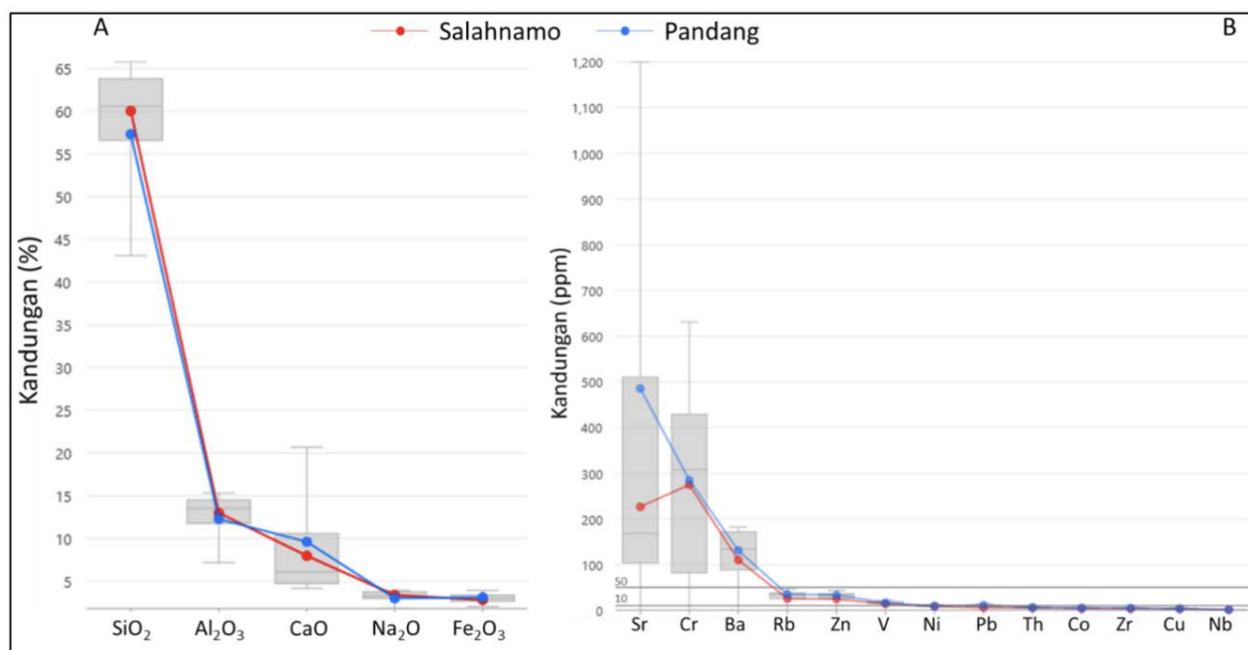
Parameter	PULAU SALAHNAMO									PULAU PANDANG								
	GST-65	GST-73	GST-74	GST-75	GST-82	GST-83	GST-84	GST-92	Rata-rata	GST-62	GST-63	GST-71	GST-79	GST-80	GST-81	GST-89	Rata-rata	
Unsur Utama (wt%)																		
SiO ₂	62,24	64,71	43,86	63,81	53,99	62,07	63,78	65,78	60,03	55,22	60,59	59,05	43,09	57,96	60,27	65,00	57,31	
Al ₂ O ₃	13,35	14,92	9,64	14,81	7,19	13,98	15,33	14,77	13,00	12,09	14,27	13,32	7,28	11,43	14,03	13,56	12,28	
Fe ₂ O ₃	2,55	3,37	2,23	3,43	2,04	3,37	2,85	2,76	2,83	3,07	3,94	3,01	2,1	2,96	3,70	3,19	3,14	
CaO	4,31	4,18	19,6	4,42	16,9	4,92	4,56	4,99	7,99	11,16	6,11	7,60	20,68	10,04	6,87	4,92	9,63	
MgO	2,05	1,5	1,8	1,67	1,5	2,07	1,57	1,51	1,71	2,35	2,75	1,93	2,24	1,82	2,51	2,17	2,25	
Na ₂ O	3,77	3,85	2,65	3,87	1,81	3,75	3,91	3,6	3,40	3,09	3,30	3,44	1,88	2,90	3,18	3,29	3,01	
K ₂ O	2,92	2,73	1,86	2,85	1,58	2,76	2,92	3,05	2,58	2,45	2,72	2,84	1,63	2,50	2,69	2,81	2,52	
TiO ₂	0,29	0,33	0,19	0,33	0,19	0,33	0,29	0,25	0,28	0,27	0,27	0,23	0,20	0,23	0,22	0,24	0,24	
MnO	0,06	0,06	0,04	0,05	0,07	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,10	0,12	0,07	0,08	0,07	0,06	0,08	
P ₂ O ₅	0,11	0,10	0,16	0,08	0,11	0,10	0,07	0,05	0,10	0,13	0,07	0,05	0,24	0,09	0,05	0,05	0,10	
S	0,18	0,17	0,17	0,14	0,15	0,18	0,15	0,06	0,15	0,15	0,12	0,14	0,26	0,13	0,09	0,10	0,14	
LOI	8,16	4,32	17,38	4,40	14,29	6,16	4,22	3,16	7,75	10,33	5,40	7,90	18,94	8,75	5,88	4,19	8,77	
Unsur jejak (ppm)																		
Ba	75,00	182,00	101,00	169,00	-	174,00	-	178,00	146,50	148,00	178,00	128,00	55,00	116,00	134,00	156,00	130,71	
Nb	1,10	2,00	1,70	1,90	-	1,50	-	1,30	1,58	1,40	1,10	1,90	1,00	1,00	1,60	1,10	1,34	
Sr	152,00	83,90	1200,00	96,80	-	168,00	-	110,00	301,78	548,00	212,00	472,00	1160,00	585,00	284,00	138,00	486,57	
Th	6,90	7,20	4,46	8,33	-	8,16	-	4,87	6,65	7,75	5,48	5,33	6,54	7,26	5,30	4,57	6,03	
Co	4,10	5,20	3,40	5,20	-	5,40	-	4,10	4,57	5,00	7,00	5,50	3,60	4,70	5,60	5,10	5,21	
Cr	38,00	590,00	308,00	631,00	-	502,00	-	128,00	366,17	370,00	315,00	289,00	35,00	475,00	382,00	126,00	284,57	
Ni	11,00	13,00	8,00	13,00	-	12,00	-	7,00	10,67	10,00	11,00	9,00	8,00	9,00	10,00	8,00	9,29	
Zn	33,00	37,00	23,00	36,00	-	37,00	-	32,00	33,00	30,00	43,00	34,00	24,00	28,00	36,00	38,00	33,29	
Cu	5,00	5,00	3,00	6,00	-	6,00	-	2,00	4,50	4,00	2,00	3,00	4,00	3,00	3,00	3,00	3,14	
V	18,00	21,00	13,00	22,00	-	22,00	-	16,00	18,67	17,00	19,00	15,00	14,00	16,00	17,00	16,00	16,29	
Zr	6,10	4,30	3,70	4,20	-	4,80	-	3,00	4,35	4,20	5,90	5,30	3,90	3,50	6,10	4,00	4,70	
Pb	8,40	6,30	7,50	7,40	-	7,90	-	7,40	7,48	10,00	14,10	10,40	11,00	11,60	11,90	10,80	11,40	
Rb	29,20	34,20	22,30	35,50	-	45,00	-	37,80	34,00	34,90	46,50	31,30	22,70	27,80	42,70	38,20	34,87	
CIA	56,07	58,86	57,38	58,31	58,03	57,67	58,80	59,03	58,02	58,35	60,49	57,81	57,46	57,93	60,79	59,08	58,85	
PIA	58,04	61,29	59,48	60,71	60,78	59,94	61,34	61,94	60,44	60,94	63,64	60,37	60,04	60,62	64,07	62,03	61,67	
CIW	63,91	65,96	64,52	65,68	66,51	65,08	66,22	67,23	65,64	66,17	68,38	65,94	65,94	66,34	68,81	67,33	66,99	
ICV	1,15	1,05	1,18	1,08	1,25	1,15	1,01	1,00	1,11	1,19	1,15	1,13	1,37	1,17	1,11	1,11	1,18	

CIA (%) = $[(Al_2O_3)/(Al_2O_3+CaO+Na_2O+K_2O)] \times 100$ from Nesbitt dan Young (1984)

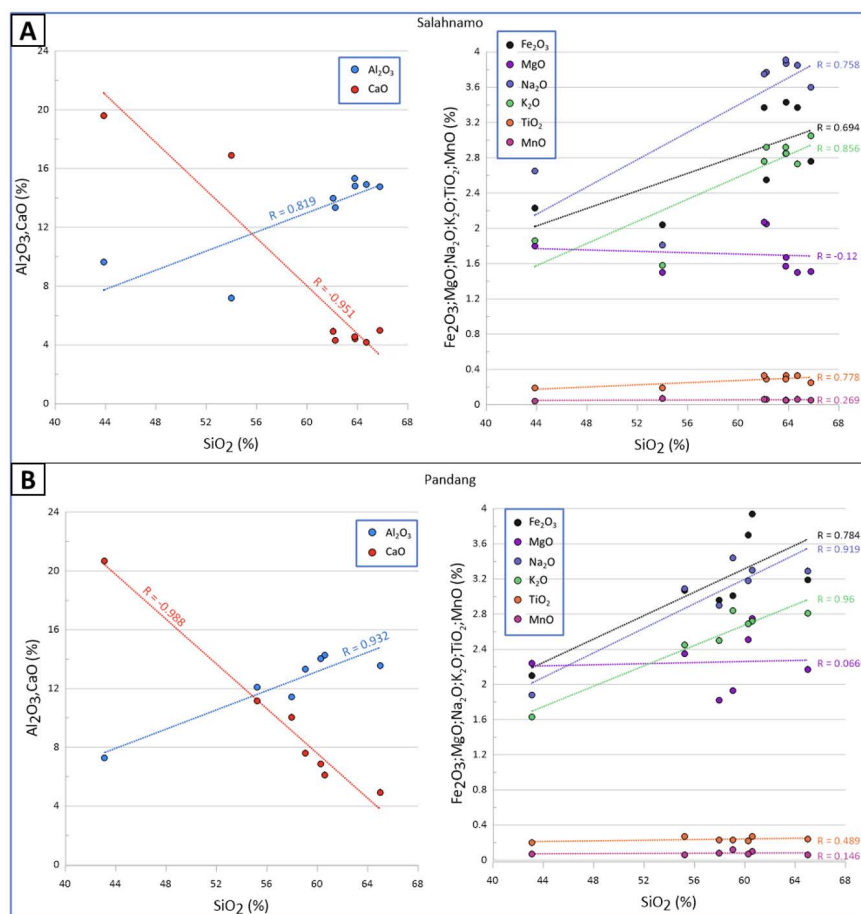
PIA (%) = $[(Al_2O_3-K_2O)/(Al_2O_3+CaO+Na_2O-K_2O)] \times 100$ from Fedo dkk (1995)

CIW (%) = $[Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO+Na_2O)] \times 100$ from Harnois (1988)

ICV (%) = $(Fe_2O_3+K_2O+CaO+Na_2O+MgO+MnO+TiO_2)/Al_2O_3$ from Cox dkk. (1995). Dimana CaO* dikoreksi menggunakan prosedur dari McLennan dkk. (1990)



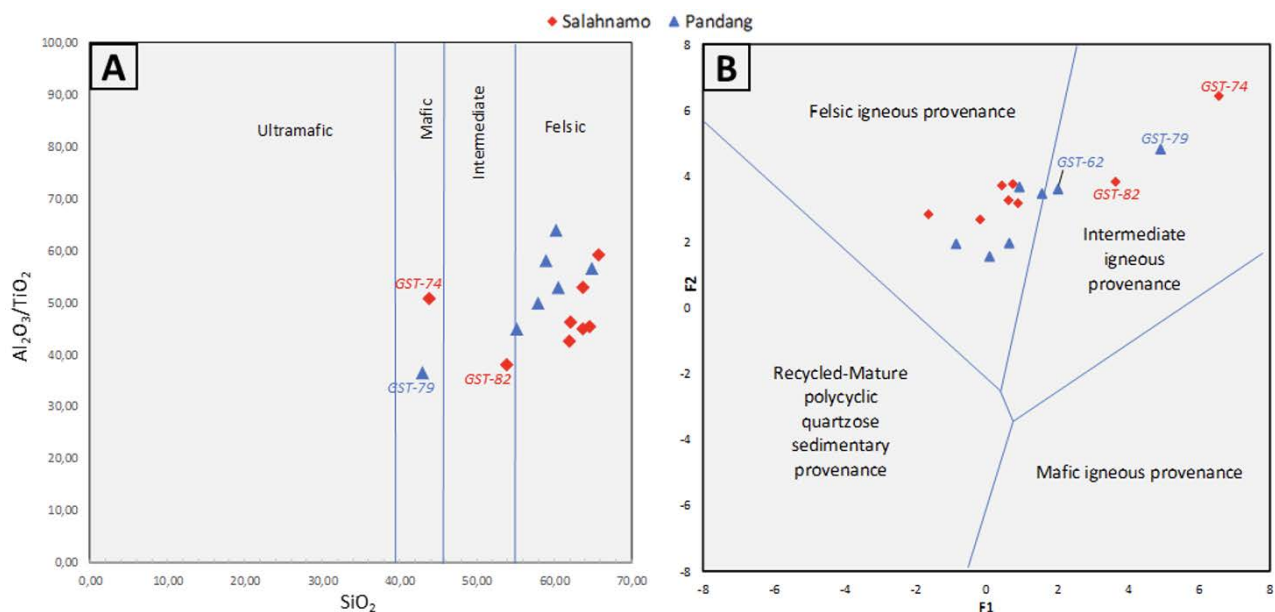
Gambar 5. Perbandingan komposisi : A. Unsur oksida; B. Unsur Jejak yang terdapat pada sedimen dasar laut di sekitar Pulau Salahnamo dan Pulau Pandang, perairan Tanjung Tiram, Sumatra Utara



Gambar 6. Diagram perbandingan terhadap oksida silika: A. Pada Sedimen di sekitar Pulau Salahnamo; B. Pada Sedimen di sekitar Pulau Pandang, perairan Tanjung Tiram, Sumatra Utara

Tabel 4. Kandungan senyawa utama, unsur jejak dan beberapa rasio unsur pada sedimen dasar laut di sekitar Pulau Salahnamo dan Pulau Pandang, perairan Tanjung Tiram, Sumatra Utara

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	Cu	Pb	Zn	Ni	Co	Th	Sr	V	Cr	Ba	Nb	Rb	Zr
SiO ₂		0,82	0,69	-0,95	-0,12	0,76	0,86	0,78	0,27	0,33	-0,13	0,88	0,43	0,66	0,56	-0,99	0,70	0,12	0,56	-0,11	0,72	0,16
		0,93	0,78	-0,99	0,07	0,92	0,96	0,49	0,15	-0,68	0,23	0,79	0,30	0,69	-0,55	-0,97	0,56	0,42	0,85	0,28	0,72	0,35
Al ₂ O ₃			0,82	-0,92	0,05	0,98	0,96	0,84	-0,26	0,35	-0,27	0,91	0,48	0,74	0,59	-0,97	0,75	0,28	0,68	0,07	0,75	0,05
			0,91	-0,97	0,30	0,96	0,96	0,58	0,28	-0,71	0,33	0,88	0,57	0,86	-0,52	-0,96	0,70	0,49	0,91	0,42	0,86	0,63
Fe ₂ O ₃				-0,78	0,09	0,81	0,70	0,94	-0,05	0,70	-0,41	0,90	0,78	0,98	0,83	-0,71	0,94	0,79	0,79	0,51	0,77	0,05
				-0,85	0,58	0,79	0,78	0,61	0,20	-0,78	0,63	0,89	0,78	0,93	-0,41	-0,88	0,90	0,53	0,88	0,20	0,96	0,73
CaO					-0,11	-0,91	-0,95	-0,89	-0,11	-0,47	0,03	-0,92	-0,54	-0,71	-0,67	1,00	-0,77	-0,13	-0,46	0,14	-0,72	-0,33
					-0,15	-0,95	-0,98	-0,52	-0,24	0,73	-0,29	-0,85	-0,41	-0,78	0,56	0,98	-0,62	-0,44	-0,88	-0,35	-0,78	-0,48
MgO						0,23	0,15	0,24	-0,01	0,44	0,83	-0,03	0,15	-0,03	0,29	0,13	0,08	-0,25	-0,57	-0,52	0,04	0,74
						0,09	0,04	0,42	-0,13	-0,31	0,62	0,56	0,67	0,57	-0,22	-0,30	0,71	-0,06	0,43	-0,30	0,74	0,64
Na ₂ O							0,95	0,87	-0,26	0,59	-0,07	0,96	0,67	0,78	0,77	-0,98	0,85	0,25	0,46	-0,02	0,69	0,38
							0,99	0,61	0,36	-0,61	0,14	0,77	0,48	0,61	-0,18	-0,82	0,34	0,27	0,88	0,53	0,71	0,50
K ₂ O								0,78	-0,18	0,24	0,09	0,78	0,28	0,51	0,68	-0,96	0,57	-0,10	0,05	-0,34	0,67	0,21
								0,51	0,35	-0,67	0,17	0,78	0,39	0,75	-0,50	-0,93	0,54	0,49	0,85	0,50	0,69	0,47
TiO ₂									0,10	0,83	-0,16	0,97	0,89	0,95	0,94	-0,83	0,98	0,57	0,51	0,26	0,69	0,43
									0,06	-0,35	0,25	0,56	0,68	0,67	0,13	-0,57	0,79	0,40	0,85	-0,05	0,61	0,19
MnO										0,60	0,05	0,83	0,63	0,65	0,67	-0,78	0,71	0,09	0,19	-0,19	0,58	0,65
										-0,54	0,29	0,30	0,27	0,48	-0,27	-0,11	0,045	0,18	0,14	0,51	0,06	0,47
Cu											0,10	0,68	0,94	0,78	0,96	-0,43	0,86	0,61	0,12	0,30	0,39	0,65
											-0,80	-0,83	-0,50	-0,85	0,57	0,71	-0,65	-0,31	-0,65	-0,03	-0,69	-0,58
Pb												-0,18	-0,20	-0,31	0,03	0,07	-0,17	-0,59	-0,63	-0,80	-0,03	0,54
												0,60	0,61	0,67	-0,28	-0,34	0,69	0,19	0,38	-0,34	0,59	0,53
Zn													0,76	0,92	0,85	-0,92	0,94	0,46	0,60	0,15	0,79	0,32
													0,54	0,92	-0,70	-0,89	0,75	0,14	0,87	0,07	0,92	0,69
Ni														0,83	0,93	-0,51	0,89	0,70	0,26	0,48	0,34	0,55
														0,80	0,11	-0,44	0,88	0,64	0,64	0,19	0,72	0,69
Co															0,89	-0,71	0,98	0,75	0,70	0,74	0,78	0,19
															-0,43	-0,80	0,86	0,42	0,86	0,21	0,89	0,80
Th																-0,64	0,96	0,61	0,33	0,27	0,58	0,54
																0,58	-0,09	0,37	-0,33	-0,10	-0,50	-0,52
Sr																	-0,75	-0,14	-0,51	0,11	-0,73	-0,26
																	-0,70	-0,37	-0,92	-0,21	-0,86	-0,49
V																		0,67	0,56	0,34	0,72	0,36
																		0,52	0,84	-0,09	0,88	0,55
Cr																			0,63	0,89	0,34	-0,16
																			0,43	0,48	0,29	0,22
Ba																				0,49	0,75	-0,54
																				0,12	0,87	0,46
Nb																					-0,04	-0,35
																					0,05	0,43
Rb																						-0,03
																						0,74



Gambar 7. Diagram klasifikasi kimia (Al_2O_3/TiO_2) vs SiO_2 (%) Le Bas dkk, 1986 (A); Diagram fungsi diskriminan (F) menurut Roser dan Korsch (1986) dimana $F1 = (-1,773 \times TiO_2) + (0,607 \times Al_2O_3) + (0,76 \times Fe_2O_3) + (-1,5 \times MgO) + (0,616 \times CaO) + (0,509 \times Na_2O) + (-1,22 \times K_2O) + (-9,09)$. $F2 = (0,445 \times TiO_2) + (0,07 \times Al_2O_3) + (-0,25 \times Fe_2O_3) + (-1,142 \times MgO) + (0,438 \times CaO) + (1,475 \times Na_2O) + (1,426 \times K_2O) + (-6,861)$ (B).

atau sedimen kaya kuarsa-lempung. Korelasi sangat tinggi antara Al_2O_3 dengan Na_2O dan K_2O (0,96-0,98) memperkuat peran feldspar ($NaAlSi_3O_8$ dan $KAlSi_3O_8$) sebagai pembawa utama unsur-unsur tersebut. Selain itu, korelasi hampir sempurna antara Na_2O dan K_2O (0,95-0,99) menunjukkan keterkaitan kuat kedua unsur alkali, mungkin berasal dari sumber magma teralkali atau metasomatisme oleh fluida kaya Na-K, fenomena yang umum pada batuan granitik pegmatit atau teralterasi alkali.

Korelasi tinggi antara Fe_2O_3 dan TiO_2 (0,94) di Salahnamo menunjukkan asosiasi erat besi dan titanium, diduga dari mineral ilmenit ($FeTiO_3$) atau titanomagnetite, sementara di Pandang korelasinya lebih rendah (0,61). Sebaliknya, korelasi negatif kuat antara SiO_2 dan CaO (-0,95 hingga -0,98) mencerminkan perilaku berlawanan silika (felsik) dan kalsium (mafik), khas dalam diferensiasi magmatik. Pola serupa terlihat pada korelasi negatif Al_2O_3 dan CaO (-0,92 hingga -0,97), mengindikasikan asosiasi aluminium dengan plagioklas natrium (albite), sedangkan kalsium dominan pada plagioklas kaya kalsium (anorthite). Korelasi MgO dan MnO tidak dibahas secara rinci karena menunjukkan hubungan yang lemah dan tidak signifikan dengan unsur lainnya.

Analisis lanjutan dilakukan dengan menggunakan diagram hubungan antara SiO_2 , Al_2O_3 , dan TiO_2 melalui pendekatan diagram (Al_2O_3/TiO_2)– SiO_2 dari Le Bas, dkk. (1986). Hasil analisis

menunjukkan bahwa sedimen di sekitar Pulau Salahnamo sebagian besar termasuk dalam kelompok batuan felsik, kecuali sampel GST-82 yang tergolong sebagai batuan *intermediate* dan sampel GST-74 yang termasuk dalam kelompok batuan mafik. Sementara itu, sedimen di sekitar Pulau Pandang juga didominasi oleh batuan felsik, dengan pengecualian pada sampel GST-79 yang termasuk dalam kelompok batuan mafik (Gambar 7A).

Selanjutnya, analisis menggunakan diagram diskriminan elemen utama Roser dan Korsch (1986) mengungkapkan bahwa sedimen di sekitar Pulau Salahnamo sebagian besar berasal dari *provenans* batuan felsik (*Felsic Igneous Provenance*), kecuali sampel GST-74 dan GST-82 yang termasuk dalam kelompok *provenans intermediate* (*Intermediate Igneous Provenance*). Pola serupa terlihat pada sedimen di sekitar Pulau Pandang, yang didominasi oleh batuan felsik, namun dengan pengecualian pada sampel GST-62 dan GST-79 yang termasuk dalam kelompok batuan beku *intermediate* (Gambar 7B). Batuan felsik yang dimaksud dapat dibandingkan dengan batuan Syenit Kuarsa bagian dari Intrusi Berhala (Cameron, 1981)(Gambar 1).

Analisis korelasi unsur geokimia, khususnya unsur jejak, pada sampel dari Pulau Salahnamo dan Pulau Pandang mengungkapkan pola asosiasi unsur yang khas serta perbedaan signifikan dalam karakteristik geokimia kedua lokasi (Tabel 4). Di

Pulau Salahnamo, teridentifikasi kelompok logam mafik (Ba-Cr-Ni-V) dengan korelasi sangat kuat ($>0,85$), menunjukkan dominasi sumber batuan dasar bersifat mafik, sementara Nb menunjukkan anti-korelasi kuat dengan Rb ($-0,83$). Sebaliknya, Pulau Pandang tidak hanya mempertahankan kelompok logam mafik serupa ($>0,82$), tetapi juga mengembangkan jaringan korelasi baru antara Zn-Pb-Zr-Rb-Cu dengan koefisien $0,71-0,85$, mengindikasikan proses mineralisasi tambahan yang mungkin terkait aktivitas hidrotermal. Perbedaan mencolok terlihat pada perilaku Nb yang berkorelasi positif dengan Rb ($0,75$) di Pandang, bertolak belakang dengan pola di Salahnamo.

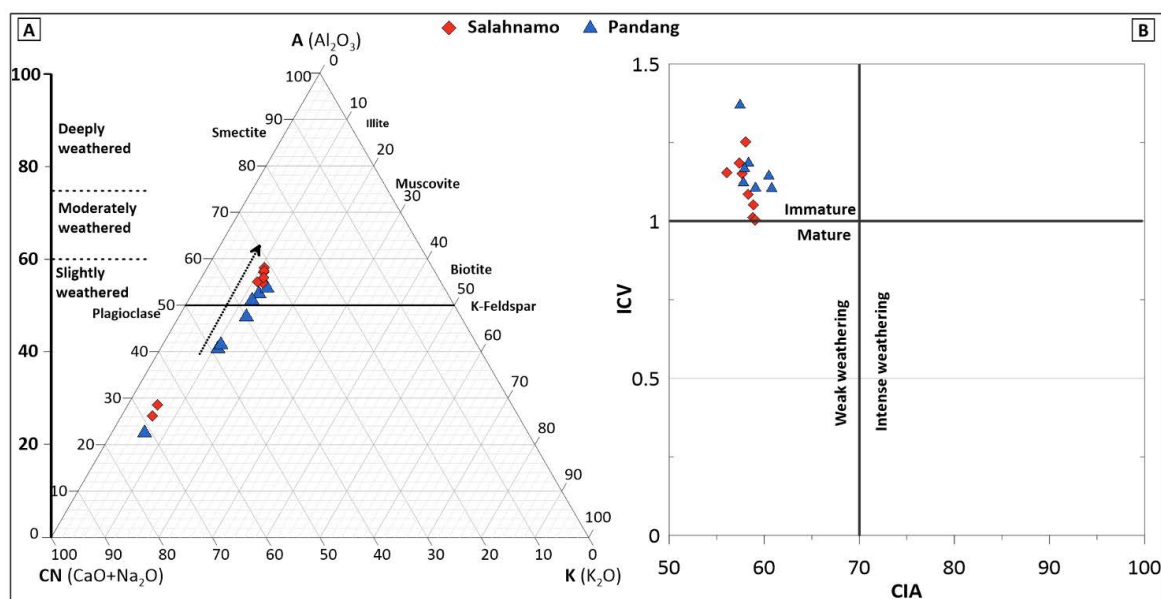
Kedua pulau sama-sama menunjukkan korelasi negatif Sr dengan unsur utama, namun Pulau Pandang menampilkan peran Th yang lebih sentral dalam berasosiasi dengan berbagai unsur (Rb $0,82$, Zr $0,76$, Cu $0,74$). Data *outlier*, seperti sampel dengan Sr sangat tinggi (1200 ppm di Salahnamo dan 1160 ppm di Pandang), serta karakteristik Cr yang berlawanan antara kedua lokasi, menguatkan dugaan perbedaan proses geokimia yang berperan. Temuan ini menunjukkan bahwa meskipun memiliki dasar geologi yang mirip dalam hal asosiasi logam mafik, Pulau Pandang mengalami proses pembentukan mineral yang lebih kompleks dengan kemungkinan multi-sumber batuan dan pengaruh fluida hidrotermal, sementara Pulau Salahnamo cenderung lebih homogen dengan sistem geokimia yang relatif sederhana.

Kondisi Pelapukan Batuan dan Kematangan Sedimen

Berbagai indeks pelapukan dan rasio unsur telah digunakan untuk mengkaji proses pelapukan purba dan tingkat pelapukan batuan induk (Bhattacharjee, dkk. 2018; Eko Bessa, dkk. 2018; Carranza-Edwards, dkk. 2019; Ongboye, dkk. 2019; Eko Bessa, dkk. 2021). Dalam studi ini, indeks CIA (*Chemical Index of Alteration*), PIA (*Plagioclase Index of Alteration*), dan CIW (*Chemical Index of Weathering*) digunakan untuk mengevaluasi intensitas pelapukan kimia di daerah sumber. Perhitungan indeks ini mengikuti asumsi McLennan dkk. (1990), dimana nilai CaO hanya dipertimbangkan jika $\text{CaO} < \text{Na}_2\text{O}$, ketika $\text{CaO} > \text{Na}_2\text{O}$ maka diasumsikan bahwa konsentrasi CaO mirip dengan Na_2O .

Analisis menunjukkan nilai CIA sedimen di sekitar Pulau Salahnamo berkisar $56,07-59,03\%$ ($\bar{x}=58,08\%$), sementara di Pulau Pandang $57,46-60,79\%$ ($\bar{x}=58,85\%$). Menurut kriteria Price dan Velbel (2003 dalam Irzon, 2018), nilai CIA $<50\%$ mengindikasikan bahan sumber relatif segar, sehingga dapat disimpulkan sedimen di kedua pulau berasal dari sumber dengan tingkat pelapukan kimia rendah. Hal ini juga dikonfirmasi dari nilai PIA ($58,04-61,95\%$ di Salahnamo; $60,04-64,07\%$ di Pandang) dan CIW ($63,91-67,23\%$ di Salahnamo; $66,17-68,81\%$ di Pandang) yang konsisten menunjukkan pelapukan kimia rendah (Tabel 3).

Data mineralogi mengungkapkan kandungan mineral lempung dan oksida besi yang rendah



Gambar 8. Diagram Pelapukan dan kematangan sedimen dasar laut di sekitar Pulau Salahnamo dan Pulau Pandang, perairan Tanjung Tiram, Sumatra Utara. (A). Diagram ternary A-CN-K. (B). Diagram ICV vs CIA (Nesbitt dan Young 1984; Cox, dkk. 1995) menunjukkan tingkat kematangan sedimen.

(<10%), kemungkinan terbentuk melalui alterasi diagenesis atau mencerminkan pelapukan rendah di daerah sumber. Kehadiran mineral lempung menunjukkan pelapukan kimia feldspar yang merupakan fase mineral dari area sumber batuan beku. Pola ini terkonfirmasi dalam diagram A-CN-K yang menunjukkan dominasi plagioklas terhadap K-feldspar dengan intensitas pelapukan dalam zona rendah (Gambar 8A).

Secara umum, tingkat pelapukan kimia meningkat seiring dengan kandungan Al_2O_3 , dan sering kali dapat mencerminkan kematangan sedimen, yang dievaluasi menggunakan perhitungan ICV. Nilai ICV > 1 memiliki banyak mineral detrital yang tidak terlapukkan dan secara komposisi belum matang, sedangkan ICV < 1 biasanya berasal dari mineral yang terlapukkan (misalnya mineral lempung) dan menunjukkan sedimen yang secara komposisi matang (Cox, dkk. 1995; Mansour, dkk. 2024; Qi, dkk. 2025). Nilai ICV 1,00-1,25 ($\bar{x}$ =1,11) di Salahnamo dan 1,11-1,37 ($\bar{x}$ =1,18) di Pandang secara jelas mengindikasikan ketidakmatangan sedimen (Tabel 3). Hasil ini sejalan dengan analisis besar butir yang menunjukkan dominasi pasir dengan bentuk butir sangat runcing, serta hasil mineralogi yang menunjukkan kandungan mineral lempung < 10 %.

Diagram biner ICV versus CIA (Nesbitt dan Young 1984; Cox dkk. 1995) memperkuat interpretasi pelapukan lemah dan kematangan sedimen rendah (Gambar 8B). Dengan demikian, variasi tingkat pelapukan kimia merefleksikan pengaruh kondisi iklim dan dinamika erosi di daerah sumber selama proses pembentukan sedimen.

KESIMPULAN

Terdapat empat tipe sedimen dasar laut yang berkembang di sekitar Pulau Salahnamo dan Pulau Pandang, yaitu pasir lumpuran, pasir lumpuran sedikit kerikilan, pasir lumpuran kerikilan, dan pasir sedikit kerikilan. Ukuran butir sedimen bervariasi dari pasir halus di Pulau Salahnamo hingga pasir sedang di Pulau Pandang, dengan distribusi mengarah ke partikel lebih kasar dan bentuk butir sangat runcing yang mengindikasikan sumber sedimen lokal.

Secara mineralogi, sedimen didominasi oleh kuarsa, K-feldspar, plagioklas, muskovit, dan biotit dengan kandungan lebih tinggi di Salahnamo dibanding Pandang. Pulau Salahnamo menunjukkan dominasi fragmen litik vulkanik/sedimen terubah dengan plagioklas sekunder dan mineral lempung yang mencerminkan alterasi hidrotermal dalam

lingkungan busur vulkanik, sementara Pulau Pandang memiliki komposisi lebih kompleks dengan peningkatan biotit yang mengindikasikan sumber batuan campuran granitik-mafik.

Analisis geokimia unsur utama menunjukkan korelasi kuat antara silika dengan unsur lain serta hubungan erat Na_2O-K_2O yang mencerminkan sumber magma teralkali atau proses metasomatisme. Unsur jarang mengungkap perbedaan signifikan dimana Salahnamo didominasi logam mafik (Ba-Cr-Ni-V) yang homogen, sedangkan Pandang menunjukkan asosiasi tambahan Zn-Pb-Zr-Rb-Cu yang mengindikasikan proses hidrotermal lebih kompleks.

Perhitungan indeks pelapukan (CIA, PIA, CIW, ICV) menunjukkan sedimen berasal dari sumber dengan tingkat pelapukan kimia rendah dan kematangan sedimen yang belum matang. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sedimen yang terendapkan di sekitar Pulau Salahnamo dan Pandang masih mencerminkan kontribusi langsung dari batuan sumber yang relatif segar, tanpa mengalami transportasi panjang atau proses alterasi yang intensif.

Rendahnya tingkat pelapukan kimia membuka peluang bahwa mineral berat ekonomis seperti zirkon, ilmenit, atau monasit dapat terawetkan dengan baik, sebagaimana umum dijumpai pada endapan plaser di jalur granitoid Sundaland.

Keterkaitan *provenans* dengan jalur granitoid regional—yang membentang dari Semenanjung Malaysia hingga Sumatra bagian timur—menunjukkan bahwa wilayah ini berpotensi menjadi bagian dari sistem mineralisasi granit yang lebih luas, serupa dengan yang telah dilaporkan di Belitung, Bangka, dan Kalimantan Barat. Dengan demikian, data mineralogi dan geokimia tidak hanya memberikan pemahaman ilmiah mengenai evolusi sedimen, tetapi juga mendukung prospek eksplorasi mineral strategis di kawasan Tanjung Tiram.

Secara keseluruhan, karakteristik sedimen dasar laut di kedua pulau ini memiliki kemiripan dengan Formasi Sienit Kuarsa yang dapat dikorelasikan dengan Intrusi Berhala (Mpib) di utara wilayah studi, meskipun diperlukan studi lebih mendalam untuk memastikan hubungan sumber batuan ini mengingat terbatasnya data geologi pulau-pulau tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Kepala Balai Besar Survei dan Pemetaan Geologi Kelautan yang telah memberikan kesempatan pada

penulis untuk mempublikasikan bagian dari hasil survei prospeksi mineral perairan Tanjung Tiram dan Sekitarnya, Sumatra Utara. Tidak lupa ucapan terima kasih ini kami sampaikan kepada rekan-rekan semua yang telah memberikan masukan dan kritik pada tulisan ini.

DAFTAR ACUAN

- bedini, A., dan Calagari, A.A. (2015). Rare earth element geochemistry of the Upper Permian limestone: the Kanigorgeh mining district, NW Iran. *Turkish Journal of Earth Sciences*, v.24:365-382
- Albab, A., Zulivandama, S. R., Djaja, A. W., Saputro, E., Subarsyah, Setiadi, I., Ali, A., Zulfikar, M., Rasyid, F. N., Rahmayadi, A. (2024). *Survei prospeksi mineral perairan Tanjung Tiram dan sekitarnya, Sumatra Utara*. Balai Besar Survei dan Pemetaan Geologi Kelautan, Laporan internal, tidak dipublikasikan.
- Armstrong-Altrin, J.S., Leeb, Y.I., Kasper-Zubillagaa, J.J., Carranza-Edwards, A., Garcia, D., Ebye, G.N., Balaram, V. and Cruz-Ortiz, N.L. (2012). Geochemistry of beach sands along the western Gulf of Mexico, Mexico: Implication for provenance. *Chemie der Erde*, v.72, hal.345–362.
- Armstrong-Altrin, J. S., Ramos-Vazquez, M. A., Zavala-Leon, A. C., dan Montiel-García, P. C. (2018). Provenance discrimination between Atasta and Alvarado beach sands, western Gulf of Mexico, Mexico: Constraints from detrital zircon chemistry and U-Pb geochronology. *Geological Journal*, 53(6), 2824–2848. <https://doi.org/10.1002/gj.3113>
- Bhattacharjee J, Ghosh KK, Bhattacharya B (2018) Petrography and geochemistry of sandstone-mudstone from Barkar Formation (early Permian), Raniganj Basin, India: implications for provenance, weathering and marine depositional conditions during Gondwana sedimentation. *Geol J* 53:1102–1122
- Blott, S. J., dan Pye, K. (2001). Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), 1237–1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Cameron, N. R., Aspden, J. A., Miswar, dan Syah, H.H. (1981). Peta Geologi Tebingtinggi, Sumatra. Pusat Survei Geologi.
- Carranza-Edwards, A., Kasper-Zubillaga, J.J., Rosales-Hoz, L., Morales-de la Garza, E.A., dan Lozano-Santa Cruz, R., 2009. Beach sand composition and provenance in a sector of the southwestern Mexican Pacific. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 26(2), hal. 433-447.
- Carranza-Edwards A, Kasper-Zubillaga JJ, Martínez-Serrano RG, Cabrera-Ramírez M, Rosales-Hoz L, Mendieta MAA, Márquez-García AZ, Santa-Cruz RL (2019) Provenance inferred through modern beach sands from the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Geol J* 54:552–563
- Cobbing, E. J. (2005). *Granitoid rocks of Southeast Asia*. Geological Society Memoir.
- Cox, R., Lowe, D. R., dan Cullers, R. L. (1995). The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14), 2919–2940. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00185-9)
- Cruz, A., Dinis, P. A., Gomes, A., dan Leitte, P. (2021). Influence of sediment cycling on the rare-earth element geochemistry of fluvial deposits. *Geosciences*, 11(9), 384. <https://doi.org/10.3390/geosciences11090384>
- Ekoka Bessa AZ, Ngueutchoua G, Ndjigui PD (2018) Mineralogy and geochemistry of sediments from Simbock Lake, Yaoundé area (southern Cameroon): provenance and environmental implications. *Arab J Geosci* 11:710
- Ekoka Bessa, A. Z., Ngueutchoua, G., Ekomane, E., Bissé, S. B., Eric, B. E., Chougong, D., Kam, J. A., & Teutsong, T. (2020). Provenance and weathering conditions of the Moloundou swamp sediments, southeast Cameroon: Evidence from mineralogy and geochemistry. *Solid Earth Sciences*, 5(3), 169–181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sesci.2020.06.002>
- Ekoka Bessa, A. Z., Ndjigui, P. D., Fuh, G. C., Armstrong-Altrin, J.S., dan Betsi, T.B. (2021). Mineralogy and geochemistry of the Ossa Lake Complex sediments, southern Cameroon: Implication for paleoweathering and provenance. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 322. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06565-w>

- Folk, R. L. (1980). *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Company.
- Gross, M. G. (1990). *Oceanography: A view of Earth*. Prentice Hall.
- Irzon, R. (2015). Contrasting Two Facies of Muncung Granite in Lingga Regency Using Major, Trace, and Rare Earth Element Geochemistry. *Indonesian Journal on Geoscience*, v.2(1), hal.23-33.
- Irzon, R., Maryanto, S. dan Kurnia (2016). Geokimia Batugamping Formasi Gumai dan Formasi Baturaja di Wilayah Muaradua, Ogan Komering Ulu Selatan, Provinsi Sumatra Selatan. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, v.17(3), hal.125-138.
- Irzon, R. (2018). Komposisi kimia pasir pantai di selatan Kulon Progo dan implikasi terhadap provenance. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 19(1), 31–45. <https://doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v19i1.31-45>
- Kim, K.T., Kim, E.S., Cho, S.R., Park, J.K., Ra, K.T. and Lee, J.M., 2010. Distribution of Heavy Metals in the Environmental Samples of the Saemangeum Coastal Area, Korea. *Coastal Environmental and Ecosystem Issues of the East China Sea*. Terrapub and Nagasaki University, hal. 71-90.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., dan Zanettin, B. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3), 745–750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>
- Mansour, A., Martizzi, P., Ahmed, M. S., Chiyonobu, S., dan Gentzis, T. (2024). Weathering Intensity, Paleoclimatic, and Progressive Expansion of Bottom-Water Anoxia in the Middle Jurassic Khatatba Formation, Southern Tethys: Geochemical Perspectives. *Minerals*, 14(3), 281. <https://doi.org/10.3390/min14030281>
- Mbale Ngama, E., Sababa, E., Bayiga, E. C., Ekoa Bessa, A. Z., Ndjigui, P. D., dan Bilong, P. (2019). Mineralogical and geochemical characterization of the unconsolidated sands from the Mefou River terrace, Yaounde area, southern Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 159, 103570. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103570>
- McLennan, S. M., Taylor, S. R., McCulloch, M. T., dan Maynard, J. B. (1990). Geochemical and Nd/Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(7), 2015–2050. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90269-Q](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90269-Q)
- Nesbitt HW, Young GM (1984). Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochim Cosmochim Acta* 48:1523–1534
- Ongboye PRB, Sababa E, Bidzang FN, Ndjigui PD (2019) Geochemical characterization of surface sediments from Tongo Gandima (Eastern Cameroon): implications for gold exploration. *Arab J Geosci* 12:598
- Pipkin, B. W. (1977). *Laboratory exercise in oceanography*. W. H. Freeman and Company.
- Qi, H., Chi, Y., Sun, L., Meng, J., Wu, P., Wei, Z., Xie, Y. (2024). The effect of parent rocks on river sediment composition and implication for regional tectono-magmatic events: A case from two tributaries of the Songhua River, NE China. *Geological Magazine*, 161, e24. <https://doi.org/10.1017/S0016756824000517>
- Rollinson, H. R. (1993). *Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation*. Longman Group Limited.
- Roser, B. P., dan Korsch, R. J. (1986). Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *The Journal of Geology*, 94(5), 635–650. <https://doi.org/10.1086/629071>
- Subarsyah (2008). Laporan pemetaan geologi dan potensi energi dan sumberdaya mineral bersistem lembar peta 0718 dan 0719 Tebing Tinggi perairan selat malaka, Sumatra Utara. Tahun 2008 . Bandung: P3GL. Laporan internal, tidak dipublikasikan.
- Wijaya, D. R. P. dan Hendratno, A. (2015). Petrogenesis Andesit Basaltik di Daerah Kali Wader dan Sekitarnya, Kecamatan Bener, Kabupaten Purworejo, Provinsi Jawa Tengah. *Proceeding Seminar Nasional Kebumihan ke5, Academia-Industry Linkage*, hal.53-64.
- Zuraida, R., Gerhaneu, N. Y., dan Sulistyawan, I. H. (2017). Karakteristik sedimen pantai dan dasar laut di Teluk Papela, Kabupaten Rote, Provinsi NTT. *Jurnal Geologi Kelautan*, 15(2), 81–94. <https://doi.org/10.32693/jgk.15.2.2017.331>