



ANALISIS GEOSTATISTIK DAN ZONASI ALTERASI UNTUK OPTIMASI KERANGKA EKSPLOKASI ENDAPAN TIMAH PRIMER DI WILAYAH PANGKALAN BARU, PROVINSI KEPULAUAN BANGKA BELITUNG

A. ZAKY ADITYA¹, WENNY YUSVICKA¹, ANTON MURTONO², IDHAM ANDRI KURNIAWAN¹, ASTIN NURDIANA^{1*}

1. Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung

2. PT Timah Tbk, Jl. Jenderal Sudirman No.51 Pangkal Pinang 33121 Indonesia

*Korespondensi: astin.nurdiana@itb.ac.id

Sari - Kebutuhan terhadap timah meningkat signifikan dalam beberapa tahun terakhir, didorong oleh permintaan industri, terutama industri baterai sebagai salah satu komoditas utama dalam mendukung transisi energi. Pulau Bangka merupakan wilayah di Indonesia dengan tatanan geologi yang mendukung mineralisasi timah. Namun, eksplorasi dan eksploitasi timah di Bangka masih didominasi oleh endapan aluvial, sementara cadangannya terus menurun. Sebaliknya, eksplorasi endapan timah primer masih minim, sehingga potensinya belum dimanfaatkan secara optimal. Studi ini bertujuan untuk menyusun kerangka eksplorasi timah primer di wilayah Pangkalan Baru, Provinsi Kepulauan Bangka Belitung melalui analisis geostatistik dengan integrasi data geokimia dan zonasi alterasi. Studi ini memanfaatkan data sekunder dan data primer. Data primer terdiri atas deskripsi litologi dan *grab sample* dengan total 24 data pada Satuan Granit Teralterasi Kuat, Satuan Granit, dan urat. Deskripsi litologi digunakan untuk menentukan zonasi alterasi. Sampel dianalisis menggunakan *X-Ray Fluorescence (XRF) portable* untuk mendapatkan konsentrasi timah yang selanjutnya konsentrasi tersebut dianalisis menggunakan metode *Inverse Distance Weighting (IDW)*. Zonasi alterasi pada daerah studi didominasi oleh zona smektit-kaolinit berupa alterasi argilik rendah-menengah dan terbentuk melalui difusi fluida hidrotermal ke dalam batuan sampling. Mineralisasi timah terjadi melalui mekanisme *interstitial precipitation*, sehingga mineralisasi yang dijumpai pada Satuan Granit memiliki pola diseminasi. Urat terbentuk setelah mineralisasi timah, ketika fluida pembawa timah sudah hampir habis, sehingga konsentrasi timah cenderung rendah pada urat. IDW Satuan Granit di bagian timur memiliki konsentrasi timah yang lebih rendah, yaitu $\pm 49-141$ ppm. Terdapat anomali konsentrasi timah di Satuan Granit Teralterasi Kuat dengan kadar mencapai ± 7045 ppm. Konsentrasi timah teridentifikasi memiliki tren penurunan dari Satuan Granit Teralterasi Kuat > Satuan Granit > urat. Hasil analisis menunjukkan bahwa kerangka eksplorasi berprioritas pada Satuan Granit Teralterasi Kuat sebagai target utama, dengan rekomendasi analisis lanjutan berupa paragenesa untuk menentukan urutan mineralisasi, serta analisis *Analytical Spectral Device (ASD)* untuk mengidentifikasi zona alterasi secara detail.

Kata Kunci: Timah, *Inverse Distance Weighting (IDW)*, Alterasi, Kerangka Eksplorasi, Transisi Energi

Abstract - The demand for tin has increased significantly in recent years, driven by industrial demand, especially the battery industry as one of the main commodities in supporting the energy transition. Bangka Island is a region in Indonesia with a geological setting that supports tin mineralization. However, tin exploration and exploitation in Bangka are still dominated by alluvial deposits, while reserves continue to decline. Conversely, exploration of primary tin deposits is still minimal, so its potential has not been optimally utilized. This study aims to develop a framework for primary tin exploration in the Pangkalan Baru area, Bangka Belitung Islands Province through geostatistical analysis with the integration of geochemical data and alteration zoning. This study utilizes secondary and primary data. Primary data consists of lithology descriptions and grab samples with a total of 24 data on the Strongly Altered Granite Unit, Granite Unit, and veins. Lithology descriptions were used to determine alteration zoning. Samples were analyzed using portable X-Ray Fluorescence (XRF) to obtain tin concentrations, which then were analyzed using the Inverse Distance Weighting (IDW) method. Alteration zoning in the study area is dominated by smectite-kaolinite zones, consisting of low-to-medium argillic alteration, formed through the diffusion of hydrothermal fluids into the adjacent rocks. Tin mineralization occurs through interstitial precipitation mechanisms, resulting in a disseminated pattern of mineralization in the Granite Unit. Veins form after tin mineralization, when the tin-bearing fluid is nearly depleted, resulting in low tin concentrations in the veins. The IDW Granite Unit in the eastern part has a lower tin concentration, namely $\pm 49-141$ ppm. Tin concentration anomalies are found in the Strongly Altered Granite Unit, reaching ± 7045 ppm. Tin concentrations have been identified as showing a decreasing trend from the Strongly Altered Granite Unit > Granite Unit > veins. The analysis indicates that the exploration framework prioritizes the Strongly Altered Granite Unit as the primary target, with recommendations for further analysis in the form of paragenesis to determine the sequence of mineralization and Analytical Spectral Device (ASD) analysis to identify alteration zones in detail.

Keywords: Primary Tin, Inverse Distance Weighting (IDW), Alteration, Exploration Framework, Energy Transition

1. PENDAHULUAN

Permintaan global terhadap timah (Sn) menunjukkan peningkatan signifikan dalam beberapa dekade terakhir karena pergeseran teknologi dan kebutuhan industri yang semakin kompleks. Kenaikan ini tergambar jelas pada proyeksi Thunder Said Energy (2023) yang memperlihatkan bahwa konsumsi timah untuk paduan tembaga-timah, baterai, solder elektronik, serta berbagai aplikasi energi terbarukan diperkirakan terus berakselerasi hingga mencapai sekitar 1.000 kTpa pada tahun 2050. Tren tersebut menegaskan posisi timah sebagai komoditas strategis yang akan terus menjadi elemen kunci dalam mendukung teknologi modern serta transisi menuju energi bersih.

Indonesia, khususnya Provinsi Kepulauan Bangka Belitung, menjadi salah satu produsen timah terbesar di dunia dan memainkan peran penting dalam rantai pasok global (Ibrahim dkk., 2018). Sebagian besar produksi timah selama ini masih mengandalkan penambangan endapan aluvial, tetapi produksi timah dari endapan ini menunjukkan penurunan produksi (Safitra dkk., 2024). Sumber bijih timah lain yang memiliki potensi signifikan adalah endapan primer yang berasosiasi dengan granit teralterasi dan sistem hidrotermal (Lehmann, 2021). Oleh karena itu, pengembangan eksplorasi ke endapan primer perlu diprioritaskan, terutama dengan metode analisis lanjut agar potensi timah dapat diungkap secara optimal (Andini dkk., 2019).

Studi awal tentang endapan primer yang berkaitan dengan mineralisasi timah di Pulau Bangka telah dilakukan, terutama dengan metode pemetaan, petrografi, dan analisis geokimia (Aditya dkk., 2020; Restiko, 2024; Suharjo dkk., 2025). Endapan timah primer pada zona greisen di Bangka Tengah dan Bangka Barat mengandung Sn hingga >800 ppm (Aditya dkk., 2020). Namun, analisis spasial persebaran endapan serta interpretasi geokimia masih terbatas pada deskripsi geologi permukaan. Selain itu, hubungan antara fisikokimia, kandungan unsur, dan tahapan mineralisasi juga perlu diinvestigasi (Tampubolon dkk., 2024).

Dengan mempertimbangkan kesenjangan tersebut, penelitian ini difokuskan pada penerapan analisis geostatistik dan zonasi alterasi untuk mengoptimalkan kerangka eksplorasi endapan timah primer di wilayah Pangkalan Baru. Pendekatan terpadu melalui kombinasi analisis geokimia, pemodelan spasial, dan identifikasi mineral alterasi hidrotermal diharapkan mampu mengungkap mekanisme mineralisasi timah secara lebih mendalam. Hasil penelitian ini tidak hanya memperkuat pemahaman ilmiah mengenai sistem mineralisasi granit di Bangka, tetapi juga dapat menjadi dasar dalam penyusunan strategi eksplorasi yang lebih efektif guna mendukung kebutuhan industri nasional maupun global.

2. GEOLOGI REGIONAL DAN GEOLOGI DAERAH PENELITIAN

Pulau Bangka merupakan bagian dari *Southeast Asian Tin Belt* atau Jalur Timah Granit Asia Tenggara yang membentang dari Indocina, Semenanjung Thailand, Malaysia, hingga ke barat Indonesia, termasuk Kepulauan Riau, Bangka-Belitung, dan Kalimantan Barat (Cobbing dkk., 1986; 1992). Secara fisiografi, pulau ini didominasi intrusi granit Paleozoikum–Mesozoikum yang membentuk morfologi perbukitan hingga pegunungan rendah di bagian tengah dan barat, sedangkan wilayah pesisir dicirikan dataran aluvial serta rawa. Lanskap granit tersebut tidak hanya menjadi elemen fisiografi utama, tetapi juga pusat mineralisasi timah primer beserta mineral ikutan (Pramumijoyo dan Setijadji).

Keberadaan granit Bangka erat terkait evolusi tektonik Asia Tenggara barat akibat subduksi hingga kolisi blok Sibumasu dan Indocina pada Trias Akhir–Jura Awal yang menghasilkan zona sutur Bentong–Raub (Margono dkk., 1995; Nurdiana, 2015). Granitoid di pulau ini terdiri atas granit tipe I (*Eastern Range Granite*, Perem–Trias) yang mengandung logam dasar serta sebagian timah, dan granit tipe S (*Main Range Granite*, Trias) yang kaya timah (Ko, 1986; Cobbing dkk., 1986). Aktivitas magmatisme yang diikuti greisenisasi memperkaya granit dengan kasiterit dan mineral ikutan seperti zirkon, monasit, xenotim, serta apatit pembawa unsur tanah jarang dan radioaktif. Persebaran granit tersebut membentuk morfologi

resisten terhadap pelapukan dan erosi, kontras dengan dataran rendah sedimen di sekitarnya.

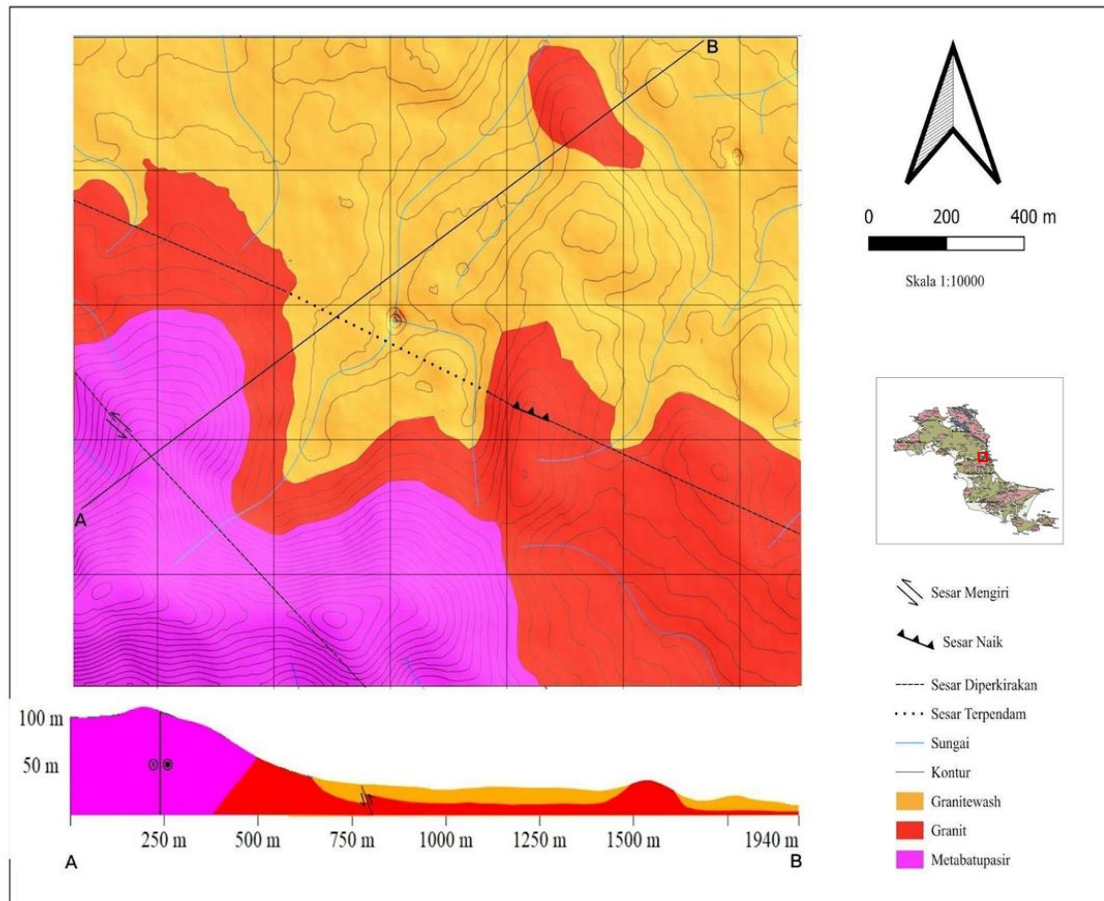
Secara tektonik, Pulau Bangka terkait erat dengan tumbukan Blok Sibumasu dan Indocina pada akhir Permian. Kehadiran *pebbly mudstone* dalam Grup Pemali di barat Laut Bangka, yang diinterpretasikan sebagai endapan laut dalam dari kompleks akresi Paleotethys dan memperkuat keterusan tektonik dengan Blok Sibumasu (Metcalf, 2017). Tumbukan ini menghasilkan zona sutur Bentong–Raub, batas penting antara granitoid tipe S hasil anateksis kerak benua dan granitoid tipe I produk magmatisme busur.

Setelah tumbukan Permian Akhir, aktivitas tektonik berlanjut dengan subduksi Mesotethys yang memicu intrusi granitoid Trias–Jura (Nurdiana, 2015). Granitoid tipe S di Belinyu diperkirakan terbentuk pada Jura Awal (~251 Ma), sedangkan tipe I di Kelapa muncul pada Trias Akhir (Cobbing dkk., 1992). Intrusi lebih muda tersebar di Pangkal Pinang, Pemali, dan Menumbing, membentuk tiga zona granitoid utama: utara (Permian–Trias), tengah (Trias–Kenozoikum), dan selatan (Trias–Jura). Evolusi magmatik ini terkait erat dengan dinamika subduksi dan kolisi blok mikro-benua Asia Tenggara. Sebagian besar granitoid kini tererosi dan teralterasi hidrotermal, ditunjukkan oleh keberadaan mata air panas. Posisi Bangka yang sepenuhnya berada pada Jalur Timah Granit Asia Tenggara menjadikannya wilayah penting bagi studi evolusi tektonik dan mineralisasi timah.

Daerah penelitian terletak di Kecamatan Pangkalan Baru, Kabupaten Bangka Tengah, dengan luas sekitar 2,68 km². Secara geologi, daerah penelitian tersusun oleh satuan batuan utama berupa Granit Klabat (TrJkg) yang merupakan intrusi granit berumur Trias Akhir–Jura Awal. Tekstur Granit Klabat bersifat holokristalin granular dengan mineral penyusun utama berupa kuarsa, ortoklas,

plagioklas, biotit, dan muskovit, serta mineral aksesoris seperti ilmenit, rutil, monasit, dan zirkon (Mangga dan Djamal, 1994). Granit Klabat berkembang luas dan sebagian telah mengalami alterasi hidrotermal dengan intensitas bervariasi. Berdasarkan karakteristik geokimia, granit di daerah penelitian termasuk ke dalam granit tipe S (Cobbing dkk., 2005; Nurdiana, 2015). Selain Granit Klabat, di bagian barat hingga barat laut daerah penelitian juga dijumpai satuan Kompleks Malihan Pemali (C_{PP}), yang tersusun atas batuan metamorf berupa filit dan sekis dengan sisipan kuarsit. Satuan ini tersingkap secara terbatas pada bagian barat hingga barat laut daerah penelitian, dan tidak menjadi fokus utama penelitian, namun tetap dilakukan pengamatan lapangan dan pengambilan contoh batuan sebagai bagian dari pemetaan geologi. Berdasarkan hasil pengamatan, satuan ini menunjukkan indikasi mineralisasi yang relatif lemah dan tidak berkembang signifikan dibandingkan dengan satuan granit.

Pemetaan geologi daerah penelitian dilakukan berdasarkan observasi pada 33 titik pengamatan yang memperlihatkan variasi litologi berupa metabatupasir, granit, dan Granit Teralterasi Kuat (*granitewash*) (**Gambar 1**). Struktur geologi yang teridentifikasi secara langsung di lapangan terdiri atas dua sesar utama, yaitu Sesar Naik Menganan Tanjung Gunung yang berorientasi N315°E dengan kemiringan sekitar 65° ke arah timur laut, serta Sesar Mengiri Naik Bukit Bebek Emas yang berorientasi N25°E dengan kemiringan sekitar 70° ke arah barat laut. Secara umum, orientasi struktur di daerah penelitian menunjukkan kecenderungan barat laut–tenggara (NW–SE), sejalan dengan pola struktur regional Pulau Bangka yang didominasi oleh arah NNW–SSE dan NNE–SSW (Ko, 1986 dalam Ng, 2017), sebagai respons terhadap pengaruh tektonik regional akibat tumbukan Blok Sibumasu dengan Indocina pada Trias Akhir.



Gambar 1 Peta geologi daerah penelitian di Pulau Bangka. Satuan betuan terdiri dari metabatupasir, granit, dan Granit Teralterasi Kuat.

3. DATA DAN METODE PENELITIAN

3.1. Jenis Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data primer hasil pengambilan sampel lapangan (*grab sampling*) dan data bawah permukaan (*bor*) agar analisis spasial terhadap distribusi mineralisasi Sn di daerah penelitian lebih komprehensif, baik lateral maupun vertikal. Sebanyak 33 sampel batuan diambil dengan metode *grab sampling* pada singkapan batuan di wilayah penelitian. Lokasi pengambilan ditentukan secara purposive pada area yang merepresentasikan variasi litologi dan indikasi mineralisasi timah (Sn). Sampel kemudian dianalisis kandungan geokimia utamanya untuk unsur Sn dan beberapa unsur pengikutnya.

Selain data permukaan, penelitian ini juga menggunakan data hasil pemboran dari 3 titik bor eksplorasi yang disediakan oleh PT Timah Tbk. Data yang digunakan berupa deskripsi litologi hasil

logging bor, difokuskan pada interval yang memperlihatkan mineralisasi Sn. Data bor ini penting untuk memberikan gambaran vertikal distribusi mineralisasi serta memperkuat hubungan antara geokimia sampel permukaan dengan kondisi bawah permukaan.

3.2. Metode

3.2.2. Analisis Mineralisasi Granit

Analisis mineralisasi granit dilakukan melalui pendekatan deskriptif dengan mengintegrasikan data lapangan dan data sekunder. Pengamatan lapangan dilakukan terhadap 33 sampel batuan yang diambil secara purposive dari berbagai satuan litologi dan tingkat alterasi untuk mengidentifikasi karakter makroskopis batuan serta sebaran alterasi. Analisis petrografi sayatan tipis menggunakan data dari Saputri (2018) pada lokasi yang sama dan mewakili satuan batuan sejenis. Identifikasi mineral primer dan mineral sekunder (alterasi) didasarkan

pada hasil analisis petrografi tersebut. Penentuan zonasi alterasi dilakukan berdasarkan asosiasi mineral hidrotermal serta estimasi temperatur pembentukannya mengacu pada klasifikasi Morrison (1997). Peta zonasi alterasi disusun dengan mengintegrasikan data pengamatan lapangan dan interpretasi petrografi menggunakan perangkat lunak Quantum GIS 3.36. Penarikan batas antar zona alterasi dilakukan berdasarkan kesamaan karakter mineralogi dan keterkaitannya secara spasial, dengan mempertimbangkan kontrol litologi dan struktur geologi. Selanjutnya, zonasi alterasi tersebut dikorelasikan dengan data kandungan Sn untuk mengevaluasi hubungan antara intensitas alterasi dan tingkat mineralisasi.

3.2.1. Analisis Penyebaran Konsentrasi Sn

Data geokimia didapatkan dengan pengukuran p-XRF Olympus pada permukaan sampel batuan utuh. Untuk mendapatkan hasil yang akurat dan menghindari potensi error secara sistematis, seluruh pengukuran dilakukan dengan prosedur yang konsisten, pada permukaan sampel yang dipersiapkan secara seragam, dan alat dikalibrasi sebelum akuisisi. Data p-XRF dari sampel permukaan dan bawah permukaan kemudian diinterpolasi dengan menggunakan *Inverse Distance Weighting* (IDW) menggunakan perangkat lunak Quantum GIS 3.36.

3.2.3. Analisis Asosiasi Mineral

Analisis asosiasi mineral dilakukan untuk mengidentifikasi hubungan geokimia antar unsur dan menentukan kelompok unsur yang berasosiasi dengan mineralisasi Sn. Asosiasi mineral ditentukan berdasarkan analisis statistik multivariat menggunakan *Principal Component Analysis* (PCA) terhadap data geokimia multi-unsur dari 33 data *grab sampling* di daerah penelitian. Data input PCA terdiri dari konsentrasi 8 unsur hasil analisis p-XRF, yaitu Sn, Mo, Rb, Nb, W, Th, Sr, dan Y. Unsur-unsur ini dipilih karena merepresentasikan unsur ekonomis (Sn), unsur *pathfinder* (Mo, W, Rb, Nb), dan unsur pembeda fase magmatik (Th, Sr, Y). Sebelum analisis, data dinormalisasi untuk menghindari bias akibat perbedaan skala konsentrasi antar unsur. Analisis PCA dilakukan menggunakan perangkat lunak berupa R Studio

dengan ekstraksi komponen utama hingga kumulatif varians mencapai minimal 70%.

Hasil PCA divisualisasikan dalam bentuk biplot yang menampilkan *loading plot* (posisi unsur) dan *score plot* (distribusi sampel). Interpretasi dilakukan dengan mengidentifikasi: (1) pengelompokan unsur berdasarkan kedekatan sudut vektor yang menunjukkan korelasi positif, (2) pemisahan kelompok unsur yang mengindikasikan asosiasi geokimia berbeda, dan (3) kontribusi setiap komponen (PC1 dan PC2) terhadap total varians data. Asosiasi geokimia yang teridentifikasi kemudian dikorelasikan dengan proses alterasi hidrotermal dan mineralisasi timah.

3.2.4. Analisis Univariat

Analisis univariat diterapkan guna menentukan nilai ambang batas (*threshold*) anomali geokimia bagi setiap unsur secara individual, terutama untuk unsur Sn sebagai target utama eksplorasi. Analisis ini dilakukan terhadap 33 data konsentrasi Sn dari *grab sampling* yang mencakup seluruh variasi litologi di daerah penelitian. Pendekatan statistik dalam menentukan nilai ambang menggunakan perhitungan mean + 2 standar deviasi ($\mu + 2\sigma$), dengan nilai anomali didefinisikan sebagai konsentrasi yang melebihi rata-rata ditambah dua kali simpangan baku. Nilai ambang batas digunakan untuk memisahkan populasi *background* (konsentrasi normal) dari populasi anomali (indikasi mineralisasi). Selain metode tersebut, penentuan kelas anomali juga dilakukan menggunakan pendekatan persentil (P5, P25, P50, P75, P95) untuk mengklasifikasikan tingkat anomali menjadi lima kategori, yaitu sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi.

Hasil analisis univariat berupa statistik deskriptif yang mencakup nilai minimum, nilai maksimum, mean, median, standar deviasi, *skewness* dan nilai *threshold* yang kemudian digunakan sebagai dasar klasifikasi zona prospek pada peta interpolasi. Distribusi frekuensi data juga dianalisis guna memahami pola sebaran konsentrasi dan mengidentifikasi kemungkinan adanya populasi geokimia ganda yang mengindikasikan proses mineralisasi berbeda.

3.2.5. Inverse Distance Weight (IDW)

Metode Inverse Distance Weight (IDW) diterapkan untuk memodelkan distribusi spasial konsentrasi Sn di daerah penelitian berdasarkan 33 titik pengamatan. IDW dipilih sebagai metode interpolasi dikarenakan jumlah data terbatas dan sebaran titik sampel yang tidak merata, sehingga pemodelan variogram untuk metode kriging belum dapat dilakukan secara optimal.

Data input IDW merupakan konsentrasi Sn (ppm) yang telah divalidasi dan dilakukan koreksi nilai *below detection limit* (BDL). Sebanyak 3 data BDL disubstitusi dengan nilai setengah dari konsentrasi minimum terukur (2,33 ppm) agar tetap dapat dianalisis tanpa menghasilkan bias signifikan. Parameter IDW yang digunakan adalah $power = 2$ dengan pertimbangan bahwa nilai ini memberikan keseimbangan antara *smoothing* dan pengaruh lokal titik sampel. Jumlah *nearest neighbors* yang digunakan dalam interpolasi adalah 12 titik untuk memastikan kontinuitas spasial yang baik.

Interpolasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Quantum GIS 3.36 dengan resolusi grid 10 x 10 meter untuk menghasilkan peta sebaran konsentrasi Sn yang detail. Hasil interpolasi kemudian diklasifikasikan berdasarkan nilai *threshold* dari analisis univariat untuk mengidentifikasi zona anomali geokimia. Peta IDW diintegrasikan dengan peta geologi dan peta zonasi alterasi untuk interpretasi kontrol geologi terhadap mineralisasi timah dan penentuan target eksplorasi selanjutnya.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

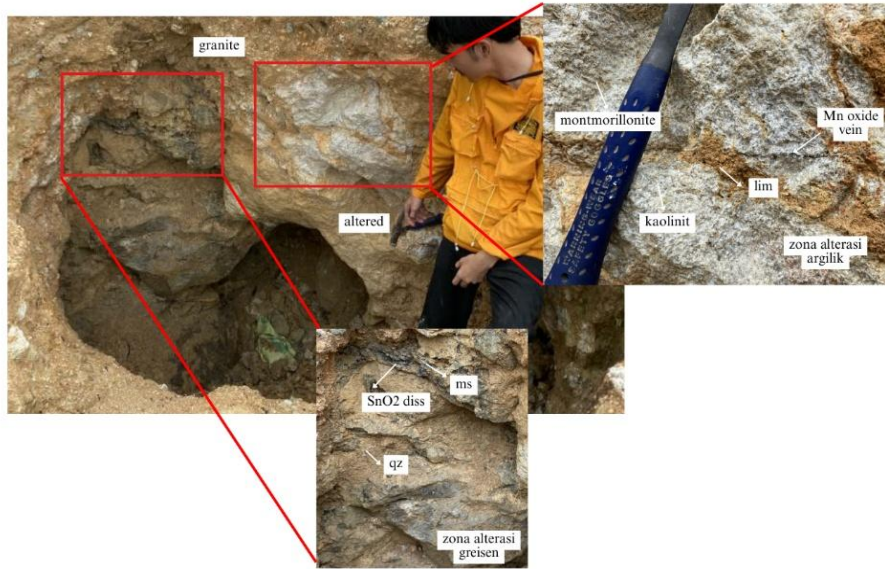
4.1. Mineralisasi Daerah Penelitian

Daerah penelitian tersusun atas tiga satuan batuan utama yang berurutan dari tua ke muda, yaitu Satuan Metabatupasir, Satuan Granit, dan Satuan Granit Teralterasi Kuat (*granitewash*; **Gambar 1**). Ketiga satuan ini menunjukkan karakter litologi yang

berbeda serta berperan penting dalam mengontrol perkembangan mineralisasi timah di daerah penelitian.

Satuan Metabatupasir mewakili sekitar 21% daerah penelitian dengan warna abu-abu kehijauan hingga kecoklatan dan berkandungan metabatupasir (klasifikasi menurut Pettijohn dkk., 1987). Metabatupasir terdiri dari mineral kuarsa (55%), feldspar (20%), mineral mika (15%), dan mineral opak (10%). Metabatupasir menunjukkan foliasi lemah hingga sedang dengan orientasi umum berarah barat-laut-tenggara. Satuan ini tidak menunjukkan indikasi mineralisasi signifikan dengan konsentrasi Sn relatif rendah dan masih dalam rentang latar belakang geokimia normal. Kehadiran satuan ini berperan sebagai batuan sampung yang berinteraksi dengan fluida hidrotermal.

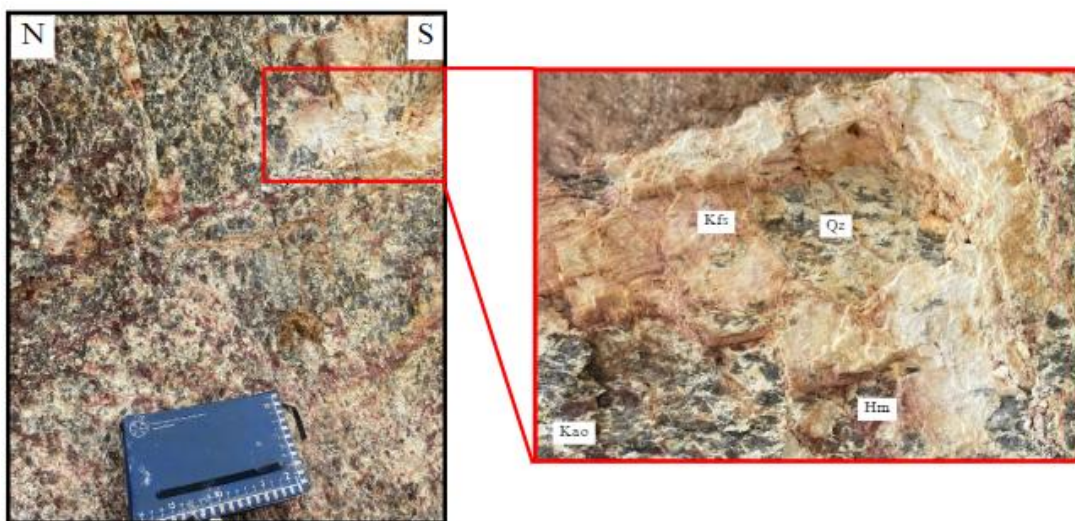
Pengayaan timah di daerah penelitian sangat dipengaruhi oleh evolusi alterasi hidrotermal yang memodifikasi tekstur dan komposisi mineral pada granit. Satuan Granit Teralterasi Kuat mewakili 53% daerah penelitian dan dicirikan dengan granit dengan alterasi lanjut berwarna coklat hingga putih kecoklatan. Tektur granit primer sebagian masih dapat dikenali namun dominasi telah terubahkan oleh mineral sekunder. Komposisi mineral primer yang masih tersisa berupa kuarsa (25%), K-feldspar (10%), plagioklas (8%), dan biotit (2%). Mineral sekunder hasil alterasi hidrotermal meliputi muskovit (25%), kuarsa sekunder (15%), kaolinit (8%), smektit (5%), dan limonit (2%). Zona greisen di Satuan Granit Teralterasi Kuat memperlihatkan alterasi intensif feldspar dan biotit menjadi muskovit dan kuarsa sekunder (Lehmann, 2021). Proses greisenisasi dan argilisasi pada **Gambar 2** bersifat tidak sempurna serta meninggalkan ruang antar butir (*interstitial voids*) yang kemudian dimanfaatkan sebagai jalur presipitasi Sn secara diseminasi.



Gambar 2 Zona alterasi greisen dan alterasi argilik pada Satuan Granit Teralterasi Kuat. Ms = muskovit, Qz = kuarsa, Lim = limonit, Kao = kaolinit.

Satuan Granit mewakili sekitar 26% daerah penelitian dengan warna abu-abu kemerahan hingga coklat muda dan berkomposisi granit (klasifikasi menurut Streckeisen, 1976). Granit terdiri dari mineral kuarsa (35%), K-feldspar (30%), plagioklas (20%), dan biotit (15%). Pada Satuan Granit, seperti terlihat pada **Gambar 3**, proses mikroklinisasi berperan penting dalam pengayaan Sn melalui rekristalisasi K-feldspar. Pada tahap ini, Sn^{4+} dapat menggantikan posisi Al^{3+} dalam struktur feldspar,

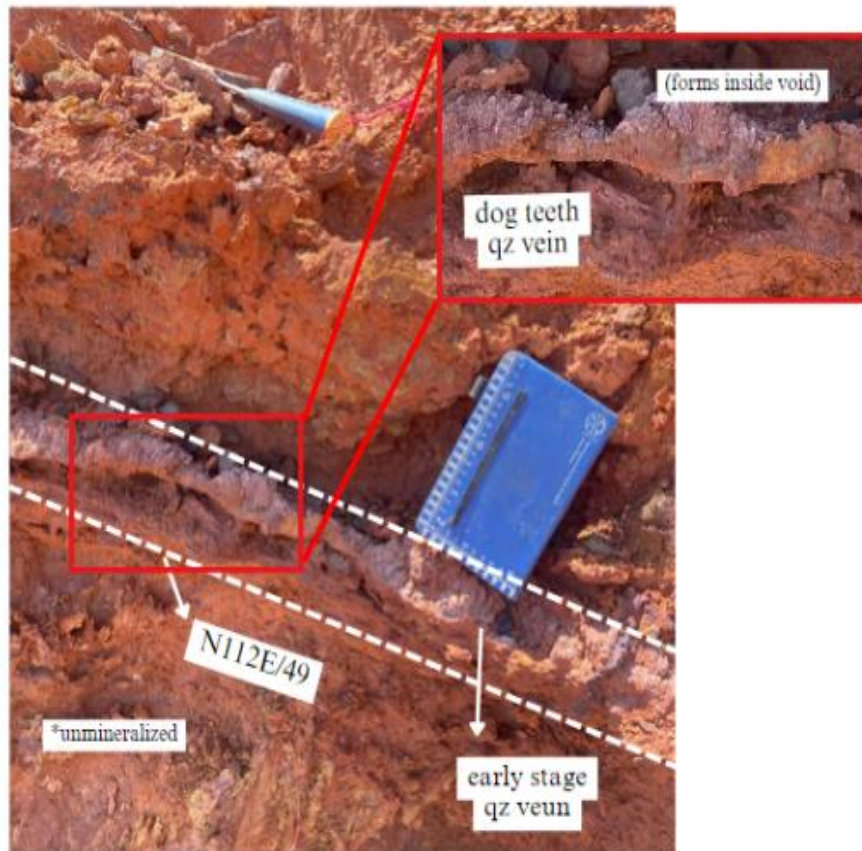
sementara Rb menggantikan K, sehingga zona mikroklin menjadi perangkap efektif bagi unsur-unsur inkompatibel tersebut (Codeço dkk., 2021). Sn kemudian terakumulasi pada zona mikroklinisasi sebagai hasil presipitasi dari fluida hidrotermal kaya logam yang mengalir selama fase alterasi potasik. Proses ini menjelaskan mengapa area yang didominasi mikroklin sering menunjukkan kadar Sn yang lebih tinggi dibanding zona alterasi lainnya.



Gambar 3 Singkapan Granit dengan alterasi mikroklinisasi. Kfs = K-feldspar, Kao = kaolinit, Ms = muskovit, Qz = kuarsa, Hm = Hematit.

Pada satuan granit teralterasi kuat, terdapat struktur berupa urat kuarsa awal (*early barren quartz vein*) dengan ketebalan mencapai 8 cm, berwarna putih susu, bertekstur *dog-teeth quartz*, dan berorientasi N112°E/49° (**Gambar 4**). Pembentukan urat ini diinterpretasikan bersumber dari fluida hidrotermal panas, *ductile*, kaya volatil, dan *overpressured*, yang mampu membuka ruang dan menghasilkan tekstur *dog-teeth quartz* (Müller dkk., 2023). Namun, Sn

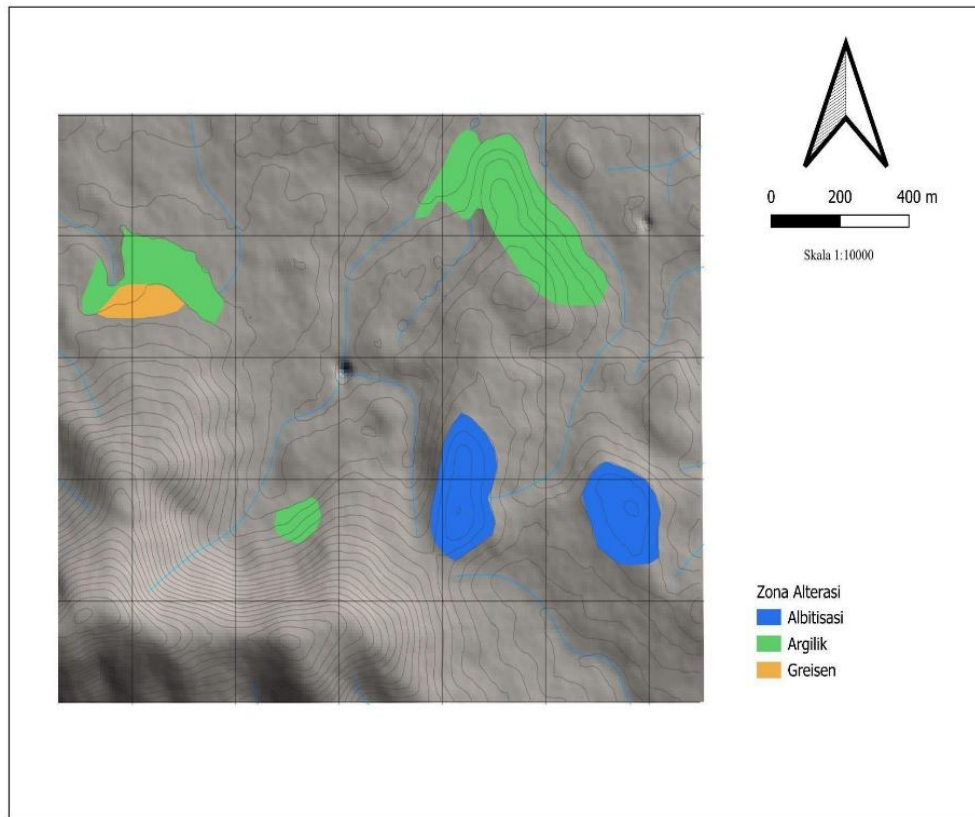
belum terpresipitasi signifikan pada tahap ini karena kondisi kimia dan fisik fluida belum optimal. Presipitasi Sn lebih efektif berlangsung ketika fluida mulai mendingin, lebih kaya unsur inkompatibel, dan berinteraksi dengan batuan sampling yang telah teralterasi, sehingga mineralisasi Sn muncul dalam bentuk diseminasi pada granit dan greisen (Pacák et al., 2019).



Gambar 4 *Early barren quartz vein* pada litologi Granit.

Dengan demikian, pengayaan Sn di daerah penelitian dapat diketahui merupakan hasil interaksi alterasi intensif (greisenisasi, argilik, mikroklinisasi; **Gambar 5**) yang meningkatkan ruang presipitasi dan menambahkan unsur inkompatibel (Rb, Nb, Mo), serta evolusi fluida hidrotermal dari fase *ductile-volatile rich*

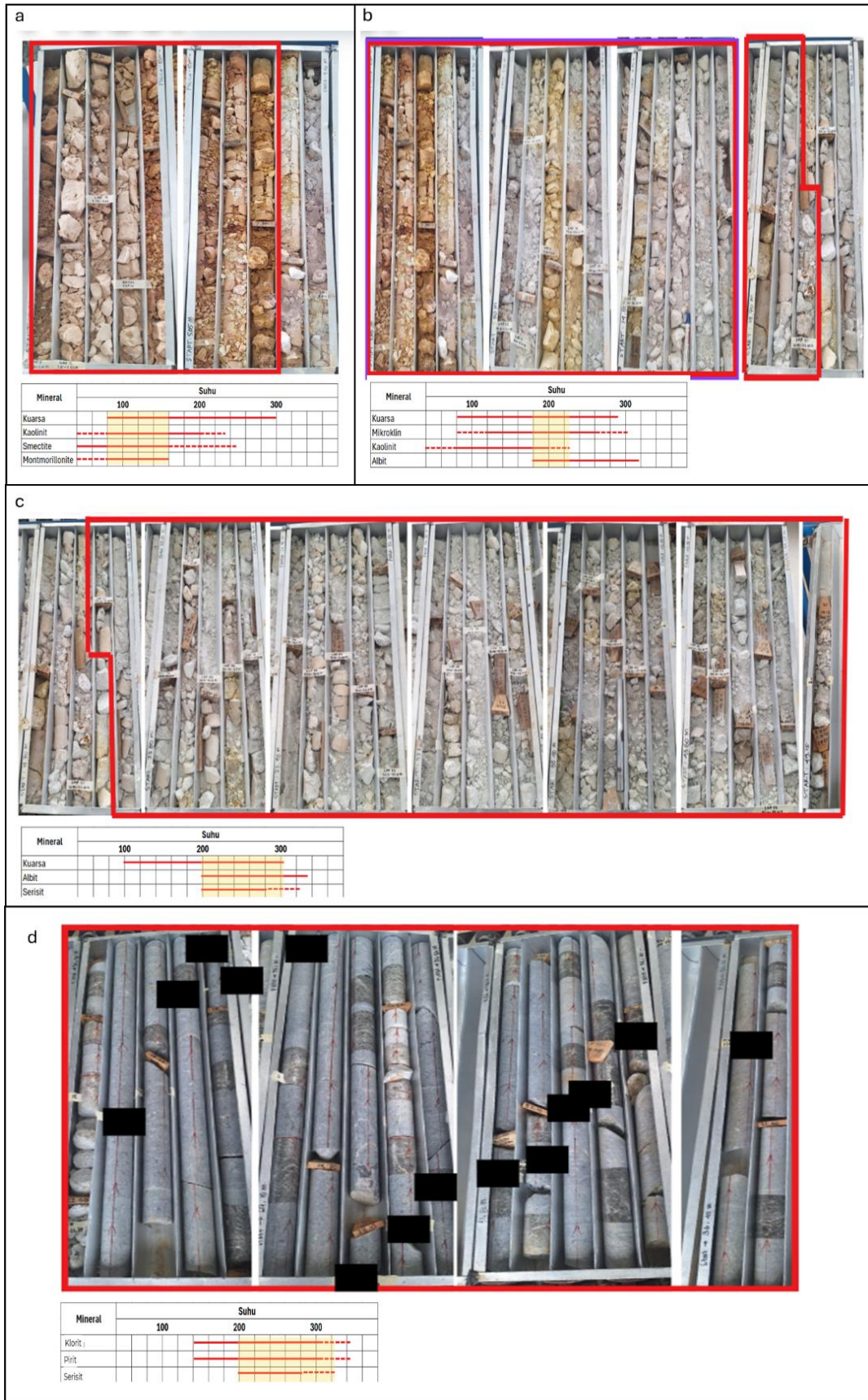
(pembentukan kuarsa awal) menuju fase *brittle-low volatile* (urat terlambat dengan Sn rendah). Kerangka ini menegaskan bahwa zona greisen-mikroklin pada Granit Teralterasi Kuat merupakan target utama eksplorasi timah primer karena menyediakan kondisi mineralogi dan geokimia paling menguntungkan untuk presipitasi Sn.



Gambar 5. Peta zonasi alterasi wilayah penelitian. Satuan batuan merujuk pada **Gambar 1**.

Berdasarkan deskripsi sampel inti, didapatkan empat zonasi alterasi bawah permukaan dari luar ke dalam ditunjukkan pada peta zonasi alterasi yang terdiri atas zona argilik, zona mikroklinisasi, zona albitisasi, dan zona serisitisasi. Zona alterasi argilik (**Gambar 6a**) merupakan zona alterasi yang paling dangkal di wilayah penelitian dengan asosiasi mineral kuarsa + kaolinit + smectite ± montmorillonite. Berdasarkan perajahan temperatur, zona alterasi ini memiliki rentang temperatur sekitar 90° hingga 130°C. Zona alterasi mikroklinisasi (**Gambar 6b**) memiliki asosiasi

mineral kuarsa + mikroklin + kaolinit ± albit. Berdasarkan perajahan temperatur, zona alterasi ini memiliki rentang temperatur 190° hingga >200°C. Zona alterasi albitisasi (**Gambar 6c**) memiliki asosiasi mineral kuarsa + albit ± serisit. Berdasarkan perajahan temperatur, zona ini memiliki rentang temperatur 200° hingga 300°C. Zona alterasi serisitisasi (**Gambar 6d**) memiliki asosiasi mineral serisit + klorit ± pirit. Berdasarkan perajahan temperatur menurut Reyes (2000), zona ini memiliki rentang temperatur 200° hingga lebih dari 300°C.

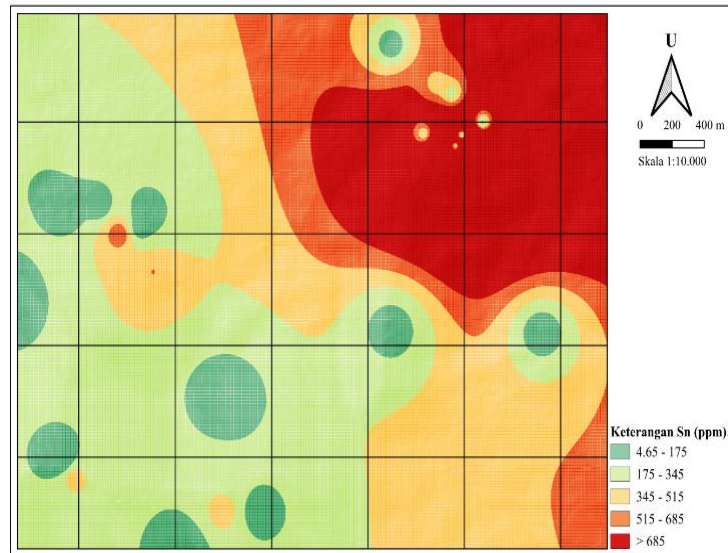


Gambar 6 Perajahan temperatur zona alterasi argilik (a), mikroklinisasi (b), albitisasi (c), dan serisitisasi (d).

4.2. Penyebaran Konsentrasi Sn

Berdasarkan 33 data grab sampling yang dianalisis, konsentrasi Sn menunjukkan kisaran antara 4,65 ppm hingga 7040,05 ppm. Hasil analisis statistik deskriptif memperlihatkan nilai rata-rata (*mean*) sebesar 494,47 ppm dengan standar deviasi 1256,98 ppm. Distribusi data memperlihatkan

sebaran yang sangat menyimpang ke kanan (*positively skewed*) dengan sebagian besar data berada pada rentang rendah hingga sedang, sementara hanya beberapa titik memperlihatkan nilai ekstrim tinggi. Pola sebaran spasial konsentrasi tersebut divisualisasikan pada **Gambar 7**.



Gambar 7 Peta interpolasi IDW kadar Sn. Daerah dengan konsentrasi Sn anomali (>685 ppm) berasosiasi dengan Satuan Granit Teralterasi Kuat. Satuan batuan merujuk pada **Gambar 1**.

Penentuan batas anomali dilakukan dengan pendekatan persentil. Nilai persentil 5% digunakan sebagai batas bawah (4,65 ppm), sedangkan nilai persentil 95% digunakan sebagai ambang anomali tinggi, yaitu 679,5 ppm. Dengan pendekatan ini, data dikelompokkan ke dalam lima kelas, yaitu:

- 4,65–175 ppm (sangat rendah),
- 175–345 ppm (rendah),
- 345–515 ppm (sedang),
- 515–685 ppm (tinggi),
- >685 ppm (anomali sangat tinggi).

Sebanyak 3 data yang berada di bawah batas deteksi disubstitusi dengan nilai setengah dari konsentrasi minimum terukur agar tetap valid dalam analisis statistik, yaitu sekitar 2,33 ppm. Hasil interpolasi spasial menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) pada Gambar 7 menghasilkan peta sebaran anomali Sn. Dari peta terlihat bahwa sebaran Sn tidak homogen, dengan konsentrasi relatif rendah hingga sedang mendominasi bagian

barat dan selatan daerah penelitian. Zona-zona ini memiliki nilai Sn dalam kisaran 4,65–515 ppm yang diinterpretasikan mencerminkan latar belakang geokimia regional (*background*) tanpa indikasi mineralisasi signifikan.

Sebaliknya, konsentrasi Sn anomali (>685 ppm) teridentifikasi terkonsentrasi pada bagian timur laut (NE) wilayah studi. Zona ini memperlihatkan nilai ekstrim dengan konsentrasi maksimum mencapai 7040,05 ppm, yang berarti sekitar 14 kali lipat lebih tinggi daripada nilai rata-rata (*mean*) dan lebih dari 5 kali standar deviasi. Lokasi anomali tinggi ini secara litologi berasosiasi dengan Granit Teralterasi Kuat pada zona argilik, yang menunjukkan peran penting litologi tersebut dalam proses pengayaan Sn. Kadar Sn yang sangat tinggi pada Granit Teralterasi Kuat berkaitan dengan tekstur pengayaan diseminasi berasosiasi dengan muskovit.

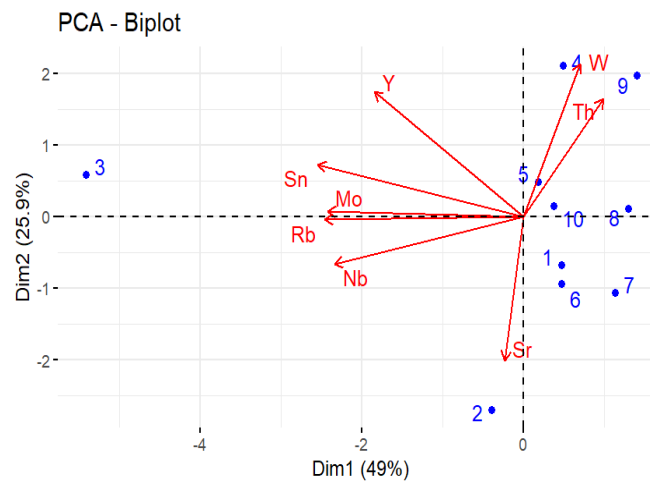
Secara spasial, distribusi anomali Sn membentuk pola klaster di sekitar Granit Teralterasi Kuat yang

mengindikasikan adanya kontrol geologi lokal terhadap mineralisasi. Hal ini dapat disebabkan oleh perbedaan permeabilitas litologi, intensitas alterasi hidrotermal, maupun kehadiran struktur geologi yang menjadi jalur pergerakan fluida mineralisasi. Dengan demikian, anomali Sn di timur laut tidak hanya bersifat statistik tetapi juga memiliki signifikansi geologi yang kuat sebagai indikator zona prospektif timah primer.

4.3. Asosiasi Mineral

Analisis PCA biplot pada **Gambar 8** menunjukkan bahwa komponen utama pertama (PC1)

menjelaskan 49% variansi, sedangkan komponen utama kedua (PC2) menjelaskan 25,9% variansi. Sepanjang sumbu PC1 terlihat adanya pemisahan yang jelas antara dua kelompok unsur. Sn, Mo, Rb, dan Nb terkumpul di sisi negatif PC1, sedangkan W, Th, dan Sr berada di sisi positif. Pola ini mengindikasikan adanya korelasi negatif antara kedua kelompok unsur tersebut. Sementara itu, PC2 memperlihatkan kontras yang lebih lemah, yakni antara Y dan W di bagian atas dengan Sr di bagian bawah, walaupun kontribusinya relatif kecil dibanding PC1.



Gambar 8 Analisis PCA biplot menunjukkan korelasi mineralisasi Sn dan unsur lain.

Berdasarkan distribusi unsur pada PCA, terlihat bahwa Sn secara konsisten berasosiasi dengan Mo, Rb, dan Nb. Keterkaitan Sn dengan Rb dapat dijelaskan melalui proses mikroklinisasi, di mana feldspar mengalami pengayaan unsur Rb sebagai substitusi K. Hal ini menandakan bahwa mobilitas Sn berlangsung bersamaan dengan fase alterasi potasik yang ditandai oleh perkembangan mikroklin. Keterkaitan Sn dengan Mo dan Nb menunjukkan keterlibatan fluida hidrotermal yang lebih kaya logam, sehingga mendukung interpretasi bahwa Sn tidak semata-mata terkait proses magmatik primer, tetapi lebih dikontrol oleh alterasi hidrotermal.

Sebaliknya, kelompok asosiasi REE (Th, Sr) cenderung membentuk kelompok berbeda yang

terpisah dari Sn. Hal ini mengindikasikan bahwa REE memiliki perilaku geokimia yang tidak sejalan dengan Sn, sehingga kehadirannya lebih tepat dipakai sebagai pembeda fase mineralisasi. Dengan demikian, analisis PCA ini menegaskan bahwa pengayaan Sn berhubungan erat dengan mikroklinisasi dan asosiasi unsur Mo–Rb–Nb, sedangkan REE menandai fase yang berbeda dan tidak berkorelasi langsung dengan mineralisasi Sn.

Lingkungan greisen menurut Shcherba (1970) menjelaskan bahwa fluida akhir magma yang kaya volatiles dan unsur inkompatibel membawa Sn dalam jumlah tinggi menuju zona atas intrusi. Interaksi fluida tersebut dengan granit yang secara mineralogi merupakan batuan aluminosilikat yang reaktif terhadap fluida asam kaya volatil dan

memicu proses greisenisasi yang ditandai oleh penggantian intensif feldspar–biotit menjadi muskovit dan kuarsa sekunder. Transformasi pada matriks aluminosilikat ini tidak hanya mengubah komposisi mineralogi, tetapi juga menghasilkan ruang antarbutir dan rekahan mikro yang meningkatkan permeabilitas lokal, sehingga menjadi kanal efektif untuk pemusatan fluida mineralisasi. Sesuai model Shcherba, zona greisen yang terbentuk berfungsi sebagai perangkap geokimia–fisik yang memfokuskan Sn hingga kemudian mengendap sebagai kasiterit.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil observasi fisik dan kimia, konsentrasi timah (Sn) pada daerah penelitian berkisar antara 4,65–7040,05 ppm dengan sebaran data menyimpang ke kanan (*positively skewed*). Zona anomali sangat tinggi (>685 ppm) terkonsentrasi di bagian timur laut wilayah studi, berasosiasi dengan litologi Granit Teralterasi Kuat. Zonasi alterasi bawah permukaan terdiri atas empat tipe utama, yaitu argilik (90–130 °C), mikroklinisasi (190–>200 °C), albitisasi (200–300 °C), dan serisitisasi (200–>300 °C). Alterasi greisenisasi dan mikroklinisasi berperan penting dalam menyediakan ruang presipitasi serta pengayaan unsur inkompatibel yang mendukung mineralisasi Sn.

Di area penelitian, Sn berasosiasi kuat dengan Mo, Rb, dan Nb, menandakan keterlibatan fase hidrotermal yang kaya logam serta hubungan erat dengan alterasi potasik (mikroklinisasi). Sebaliknya, unsur asosiasi REE membentuk kelompok berbeda yang menandai fase mineralisasi lain. Secara spasial, mineralisasi Sn menurun dari Satuan Granit Teralterasi Kuat > Granit > Urat. Mineralisasi terjadi dominan dalam bentuk diseminasi akibat presipitasi interstisial pada granit teralterasi, sedangkan urat terbentuk pada fase akhir dengan kandungan Sn rendah. Berdasarkan integrasi data geokimia, alterasi, dan analisis spasial, Granit Teralterasi Kuat dengan zona greisen–mikroklin ditetapkan sebagai target utama eksplorasi timah primer di daerah penelitian. Studi lanjutan berupa analisis paragenesa direkomendasikan untuk memperkuat pemahaman urutan mineralisasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Aditya, R., Setiawan, I., Nugraheni, R. D., Sihombing, F. M. H., dan Indra, T. L. (2020): Characteristics of primary tin mineralization in the Central and West Bangka Island. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 538, No. 1, p. 012016). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/538/1/012016>.
- Andini, D. E., Guskarnali, dan Rosita, A. (2019): Kajian unsur tanah jarang (LTJ) pada lahan bekas tambang timah dan tambang kaolin Kecamatan Merawang Kabupaten Bangka. *Promine Journal*, 7(1), 28–33.
- Barber, A. J., Crow, M. J., dan Milson, J. S. (2005): *Sumatra: Geology, Resource and Tectonic Evolution*. Geological Society of London, 31.
- Cobbing, J.. 2005. *Granites. Sumatera: Geology, Resources and Tectonic Evolution*. Geological Society, London, Memoir No. 31.
- Cobbing, E. J., Mallick, D. I. J., Pitfield, P. E. J., dan Teoh, L. H. (1986): *The granites of Southeast Asian tin belt*. Journal of the Geological Society, 143(3), 537–550.
- Cobbing, E.J., Pitfield, P.E.J., Darbyshire, D.P.F dan Mallick, D.I.J (1992): *The granites of the Southeast Asian Tin Belt*. Overseas Memoirs of the British Geological Survey, 10.
- Codeço, M. S., Weis, P., Trumbull, R. B., van Hinsberg, V., Pinto, F., Lecumberri-Sanchez, P., dan Schleicher, A. M. (2021): The imprint of hydrothermal fluids on trace-element contents in white mica and tourmaline from the Panasqueira W–Sn–Cu deposit, Portugal. *Mineralium Deposita*, 56(2), 481–508. <https://doi.org/10.1007/s00126-020-00984-8>.
- Corbett, G. J., dan Leach, T. M. (1997): Southwest Pacific rim gold-copper systems. structure, alteration, and mineralization, short course manual, 235

- Ko, U. K. (1986): Preliminary synthesis of the geology of Bangka Island, Indonesia. *GEOSEA V Proceedings: Volume II Geological Society Malaysia*, 20, 81-96.
- Lehmann, B. (2021): Formation of tin ore deposits: A reassessment. *Lithos*, 402–403. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105756>
- Ibrahim, ., Haryadi, D., dan Wahyudin, N. (2018): From Charm to Sorrow: The Dark Portrait of Tin Mining in Bangka Belitung, Indonesia. *PEOPLE: International Journal of Social Sciences*, 4(1), 360–382. <https://doi.org/10.20319/pijss.2018.41.360382>.
- Mangga, S. A., dan Djamal, B. (1994). Peta geologi lembar Bangka Utara, Sumatera. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Margono, U., Supandjono, R.J.B. dan Partoyo, E. (1995): Peta Geologi Lembar Bangka Selatan, Sumatra, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Metcalf, I. (2017): Tectonic Evolution of Sundaland. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 63, 27-60. <https://doi.org/10.7186/bgsm63201702>.
- Morrison, K. (1997): *Important Hydrothermal Minerals and Their Significance* (7th ed.). Kingston Morrison Limited.
- Müller, A., Kirwin, D., dan Seltmann, R. (2023): Textural characterization of unidirectional solidification textures related to Cu–Au deposits and their implication for metallogenesis and exploration. *Mineralium Deposita*, 58, 1211 - 1235. <https://doi.org/10.1007/s00126-023-01175-x>.
- Ng, S.W.P., Whitehouse, M.J., Roselee, M.H., Teschner, C., Murtadha, S., Oliver, G.J., Ghani, A.A. dan Chang, S.C., (2017): Late triassic granites from Bangka, Indonesia: A continuation of the main range granite province of the South-East Asian Tin Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 138, 548-561. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.03.002>
- Nurdiana, A., (2015): Evolusi Tektonik Pulau Bangka Bagian Selatan Berdasarkan Analisis Petrografi Dan Geokimia Granitoid (Tugas akhir sarjana). Institut Teknologi Bandung.
- Pacák, K., Zachariáš, J., dan Strnad, L. (2019). Trace-element chemistry of barren and ore-bearing quartz of selected Au, Au-Ag and Sb-Au deposits from the bohemian massif. *Journal of Geosciences (Czech Republic)*, 64(1), 19–35. <https://doi.org/10.3190/jgeosci.279>.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E., and Siever, R. (1987) Sand and Sandstone. 2nd Edition, Springer-Verlag, New York, 553 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1066-5>.
- Pramumijoyo, S., dan Setijadji, L. D. (2018, December). Alteration mineral mapping to identify primary tin potential using Landsat 8 images and geographic information system in Rimba Kulit Area, Southern of Bangka Island. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 212, No. 1, p. 012021). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/212/1/012021>.
- Restiko, F. A. (2024): Karakteristik Endapan Timah Primer Pada Daerah Paku, Bangka Selatan, Kepulauan Bangka Belitung. *Jurnal Ilmiah Geologi PANGEA*, 11(2), 73. <https://doi.org/10.31315/jigp.v11i2.13899>.
- Reyes, A. G. (2000): *Petrology and mineral alteration in hydrothermal systems: From diagenesis to volcanic catastrophes (Report No. 18)*. United Nations University, Geothermal Training Programme.
- Rickard (1972): Classification of Translational Fault Slip. *Geological Society of America*.
- Safitra, R. M., Heriawan, M. N., Anggayana, K., Rubiarto, R., dan Lubis, I. A. (2024): Drill Hole Spacing Analysis for Evaluation of Quartz Sand Resources as Residual Material from On-Land Alluvial Tin Processing

- based on Global Estimation Variance and Kriging Variance, with Case Study in the Bangka and Belitung Islands, Indonesia. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 56(5), 652-665. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.5.9>
- Saputri, R. R. Z. (2018). *Studi geologi, alterasi, dan mineralisasi timah primer di daerah Tanjung Gunung, Kecamatan Pangkalan Baru, Kabupaten Bangka Tengah, Provinsi Kepulauan Bangka Belitung* (Skripsi sarjana). Institut Teknologi Bandung.
- Shcherba G N (1970): Greisens. *Int Geol Rev* 12: 114–255
- Suharjo, E. G. W., Takahashi, R., Agangi, A., Syafrizal, Manalo, P., dan Nopeia, M. (2025): Apatite and Biotite Geochemistry Constraints on the Petrogenesis of the Granites in Bangka Island, Indonesia: Implications for Tin Mineralization. *Resource Geology*, 75(1), e70017. <https://doi.org/10.1111/rge.70017>.
- Tampubolon, A., Syafri, I., Rosana, M. F., dan Yuningsih, E. T. (2024): The correlation between Rare Earth Elements and tin in granite, quartz vein, and weathered granite samples, in South Bangka, Bangka Belitung Islands, Indonesia. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 77, 73–85. <https://doi.org/10.7186/bgsm77202408>.
- Thunder Said Energy. (2023): Global tin demand: upside in energy transition. Diakses 5 Juni 2025, dari <https://thundersaidenergy.com/downloads/global-tin-demand-upside-in-energy-transition/>