

Evaluasi Pencucian dan Pengolahan terhadap Kualitas Pasir Silika di PT Bupolo Indonesia

¹Wili Yohanes Batara, ²Hepriyandi L. Djanas Usup, ³Ferdinandus, ⁴Novalisae, ⁴Yos David Inso

Universitas Palangkaraya, Indonesia

*Corresponding Author e-mail: Wiliyohanesbatara10@gmail.com

Received: August 2025; Revised: October 2025; Published: November 2025

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi perubahan komposisi kimia pasir silika antara material pada front penambangan (pit) dan produk setelah pencucian serta pengolahan di PT Bupolo Indonesia, Kalimantan Tengah. Studi menggunakan desain observasional-komparatif deskriptif, bukan eksperimen kausal. Dua titik sampel diambil secara manual pada pit dan dua titik pada stockpile; sampel kemudian diuji di laboratorium PT Sucofindo menggunakan metode Inductively Coupled Plasma (ICP). Naskah sumber melaporkan hasil pit secara individual, sedangkan hasil stockpile tersedia sebagai satu nilai gabungan untuk dua titik sehingga statusnya sebagai sampel komposit atau rerata perlu diverifikasi. Rata-rata pit menunjukkan Fe_2O_3 0,016%, TiO_2 0,0385%, dan SiO_2 99,62%. Pada stockpile, nilai yang dilaporkan adalah Fe_2O_3 0,018%, TiO_2 0,140%, dan SiO_2 99,45%. Dengan demikian, Fe_2O_3 meningkat 0,002 poin persentase, TiO_2 meningkat 0,1015 poin persentase, sedangkan SiO_2 menurun 0,17 poin persentase. Data ini belum mendukung klaim bahwa pencucian dan screening meningkatkan kualitas kimia atau menyebabkan perubahan tersebut karena sampel tidak terdokumentasi sebagai pasangan material yang sama dan tidak tersedia replikasi analitik maupun neraca massa. Proses plant tetap berfungsi untuk klasifikasi ukuran dan penghilangan pengotor fisik yang dapat terpisah melalui air dan pengayakan, tetapi efektivitasnya terhadap mineral pembawa Fe-Ti perlu diuji melalui sampling berpasangan, karakterisasi mineralogi, dan evaluasi recovery-grade.

Kata kunci: pasir silika; pencucian; pengolahan mineral; Fe_2O_3 dan TiO_2 ; ICP

Evaluation of Washing and Processing on Silica Sand Quality at PT Bupolo Indonesia

Abstract

This study evaluates changes in the chemical composition of silica sand between mine-front (pit) material and product after washing and processing at PT Bupolo Indonesia, Central Kalimantan. The study applies a descriptive observational-comparative design rather than a causal experiment. Two sampling points were collected manually from the pit and two from the stockpile, followed by laboratory analysis at PT Sucofindo using an Inductively Coupled Plasma (ICP) method. The source manuscript reports pit results individually, whereas the stockpile is represented by one combined value for two sampling points; whether this value represents a composite sample or an average requires verification. The pit averages were 0.016% Fe_2O_3 , 0.0385% TiO_2 , and 99.62% SiO_2 . The reported stockpile values were 0.018% Fe_2O_3 , 0.140% TiO_2 , and 99.45% SiO_2 . Thus, Fe_2O_3 increased by 0.002 percentage points, TiO_2 by 0.1015 percentage points, while SiO_2 decreased by 0.17 percentage points. These data do not demonstrate that washing and screening improved chemical quality or caused the observed changes because the samples were not documented as paired material from the same batch and no analytical replication or mass balance was reported. The plant process can still support size classification and removal of physically separable impurities, but its performance for Fe-Ti-bearing minerals requires paired sampling, mineralogical characterization, and recovery-grade evaluation.

Keywords: silica sand; washing; mineral processing; Fe_2O_3 and TiO_2 ; ICP

How to Cite: Batara, W. Y., Usup, H. L. D., Ferdinandus Ferdinandus, Novalisae, & Inso, Y. D. (2025). Evaluasi Pencucian dan Pengolahan terhadap Kualitas Pasir Silika di PT Bupolo Indonesia. *Multi Discere Journal*, 4(2), 92-105. <https://doi.org/10.36312/mj.v4i2.5323>



<https://doi.org/10.36312/mj.v4i2.5323>

Copyright© 2025, Batara et al.
This is an open-access article under
the CC-BY-SA License.



PENDAHULUAN

Pasir silika merupakan bahan baku penting untuk industri kaca, keramik, semen, pengecoran, dan berbagai aplikasi berbasis silika. Mutu bahan ini ditentukan tidak hanya oleh kadar SiO_2 , tetapi juga oleh jenis, kadar, dan mode keterdapatan pengotor, khususnya mineral pembawa Fe dan Ti yang dapat memengaruhi warna, transparansi, serta kesesuaian produk untuk aplikasi tertentu. Pasir silika alam umumnya mengandung kuarsa sebagai mineral dominan disertai Fe_2O_3 , TiO_2 , Al_2O_3 , dan oksida lain dalam kadar yang bervariasi (Othman et al., 2025). Pengotor Fe dapat hadir sebagai noda pada permukaan kuarsa, mineral bebas, inklusi, atau substitusi dalam kisi, sehingga efektivitas pemisahannya bergantung pada karakter mineralogi dan liberasi (Liu et al., 2023). Karena itu, pencucian dan pengayakan terutama efektif terhadap partikel yang mudah terdispersi atau berbeda ukuran, sedangkan pengotor berat atau yang terikat pada kuarsa sering memerlukan attrition, pemisahan gravitasi, pemisahan magnetik, flotasi, atau pelindian (Abdullah, 2023; Alali, 2023). Di Indonesia, peningkatan mutu pasir silika melalui pemisahan magnetik juga telah dilaporkan untuk memenuhi kebutuhan industri kaca (Syahrani et al., 2024). Karakterisasi kimia dan mineralogi juga penting karena pasir dari lokasi berbeda dapat menunjukkan variasi impurity dan respons proses yang berbeda (Bakri et al., 2023; Meechoowas et al., 2021; Popa et al., 2022; Wuletaw & Mihret, 2024). Tinjauan mutakhir menempatkan karakterisasi impurity, scrubbing, klasifikasi, pemisahan gravitasi, pemisahan magnetik, flotasi, dan proses kimia sebagai rangkaian yang dipilih sesuai sifat bahan (Long et al., 2024; Li et al., 2024; Mohanty et al., 2025; Zhang et al., 2023). Kerangka ini menempatkan evaluasi komposisi Fe_2O_3 , TiO_2 , dan SiO_2 sebagai dasar untuk menilai apakah rangkaian pengolahan yang berjalan menghasilkan perubahan mutu kimia yang sesuai dengan spesifikasi produk.

PT Bupolo Indonesia mengolah pasir silika dari front penambangan melalui pengangkutan ke washing plant, pencucian dengan water jet, screening, trommel screen, penyaringan lanjutan, penampungan, dan pengangkutan menuju stockpile. Rangkaian tersebut dirancang untuk membersihkan material dan mengendalikan ukuran produk, tetapi kemampuan setiap tahap untuk menurunkan Fe dan Ti belum dapat diasumsikan tanpa data proses dan karakterisasi mineral. Studi lain menunjukkan bahwa wet screening dan attrition dapat melepaskan slime atau pelapis permukaan, sedangkan mineral berat memerlukan pemisahan gravitasi atau magnetik yang lebih selektif (Alali, 2023; Thio et al., 2021). Permasalahan praktis penelitian ini adalah adanya perbedaan komposisi antara material pit dan produk stockpile, terutama pada TiO_2 , sehingga kualitas produk perlu dievaluasi berdasarkan data yang benar-benar terukur. Tanpa verifikasi tersebut, kepatuhan produk terhadap spesifikasi hanya dapat dibahas secara terbatas. Selain itu, heterogenitas feed, segregasi ukuran pada stockpile, pencampuran antarbatch, dan cara pembentukan sampel dapat menghasilkan perbedaan kadar yang tidak semata-mata berasal dari unit pengolahan.

Penelitian terdahulu umumnya menguji kondisi pemrosesan yang terkendali, misalnya attrition untuk meningkatkan kemurnian silika (Thio et al., 2021), flotasi mineral pembawa Fe setelah attrition (Ibrahim et al., 2021), pemisahan magnetik untuk menurunkan mineral pengotor (Syahrani et al., 2024), dan optimasi parameter spiral concentrator terhadap grade dan recovery (Sinaiyah et al., 2024). Kajian-kajian tersebut memberi bukti bahwa efektivitas beneficiation sangat bergantung pada

ukuran butir, tingkat liberasi, karakter mineral pembawa pengotor, serta parameter operasi. Namun, informasi mengenai performa aktual rangkaian washing–screening pada operasi pasir silika PT Bupolo Indonesia belum tersedia secara sistematis. Kesenjangan penelitian ini adalah belum adanya baseline process-performance yang membandingkan komposisi kimia material pit dan produk stockpile pada rangkaian operasi aktual perusahaan, sekaligus mengidentifikasi batas inferensi ketika material sebelum dan sesudah proses tidak terdokumentasi sebagai pasangan batch yang sama. Kebaruan studi karena itu bersifat kontekstual dan diagnostik, bukan pembuktian sebab-akibat. Studi ini memanfaatkan data lapangan aktual untuk menilai konsistensi mutu, mengidentifikasi parameter proses dan sampling yang perlu diperbaiki, serta menyusun kebutuhan pengujian lanjutan. Posisi ini berbeda dari eksperimen optimasi yang menggunakan replikasi, kontrol parameter, dan perhitungan recovery secara eksplisit; karena itu istilah “pengaruh” dan “signifikan” tidak digunakan untuk menyimpulkan hubungan kausal.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi dan membandingkan perubahan kadar Fe_2O_3 , TiO_2 , dan SiO_2 antara sampel pit dan sampel stockpile setelah rangkaian pencucian serta pengolahan yang dilaporkan perusahaan; mendeskripsikan alur unit operasi; dan mengidentifikasi implikasi hasil terhadap pengendalian mutu serta kebutuhan proses lanjutan. Ruang lingkup evaluasi dibatasi pada data kimia yang tersedia dari dua titik pit dan dua titik stockpile serta informasi proses yang tercatat selama penelitian. Fe_2O_3 dan TiO_2 diperlakukan sebagai indikator mineral pengikut, sedangkan SiO_2 sebagai indikator utama kemurnian kimia produk. Studi ini tidak mengukur kadar lempung, bahan organik, distribusi ukuran butir secara kuantitatif, mass flow setiap stream, recovery, atau mineralogi pembawa Fe–Ti. Karena sampel pit dan stockpile tidak didokumentasikan sebagai material berpasangan dari batch yang sama dan hasil individual stockpile belum tersedia dalam naskah sumber, penelitian diposisikan sebagai studi observasional-komparatif deskriptif. Konsekuensinya, temuan digunakan untuk menunjukkan pola perbedaan komposisi dan kebutuhan verifikasi proses, bukan untuk menyatakan bahwa unit pencucian menyebabkan perubahan kadar tertentu. Pendekatan ini sejalan dengan kebutuhan audit proses awal sebelum pengujian unit pemisahan yang lebih selektif, seperti spiral concentrator atau magnetic separator, yang sebaiknya dievaluasi berdasarkan grade, recovery, dan mass balance pada studi berikutnya.

METODE

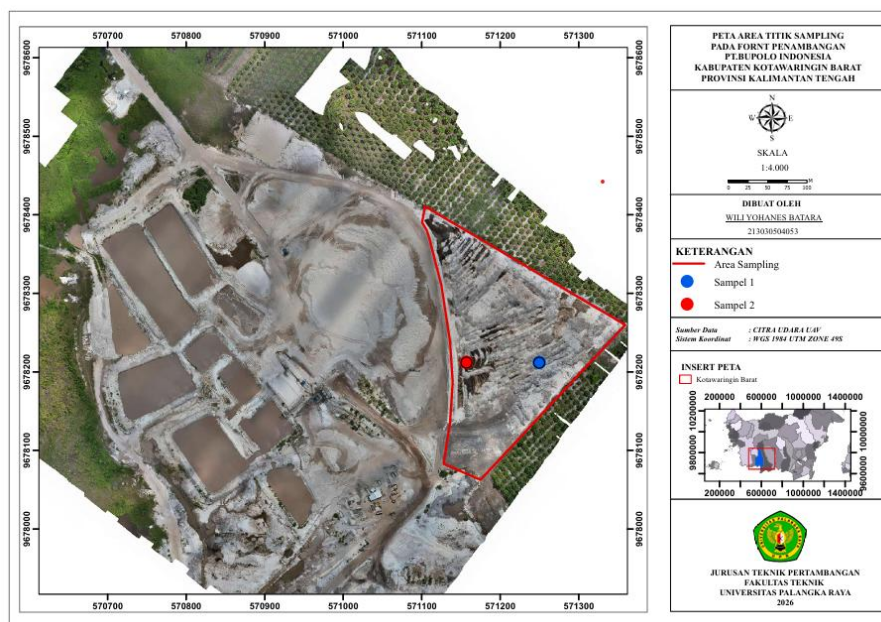
Jenis dan Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain observasional-komparatif deskriptif untuk membandingkan komposisi kimia material pasir silika pada dua kondisi operasi, yaitu material pada front penambangan (pit) dan produk yang telah melalui rangkaian pencucian serta pengolahan dan ditempatkan di stockpile. Penelitian dilaksanakan di PT Bupolo Indonesia, Desa Kubu, Kecamatan Kumai, Kabupaten Kotawaringin Barat, Provinsi Kalimantan Tengah. Unit analisis penelitian adalah sampel pasir silika yang diuji untuk Fe_2O_3 , TiO_2 , dan SiO_2 . Kondisi pit diperlakukan sebagai baseline material sebelum rangkaian plant, sedangkan kondisi stockpile sebagai representasi produk setelah pengolahan. Desain ini tidak dianggap sebagai eksperimen before–after berpasangan karena naskah tidak mendokumentasikan bahwa sampel stockpile berasal dari batch atau material pit yang sama. Oleh sebab

itu, penelitian tidak menggunakan istilah efek kausal atau signifikansi statistik. Data primer terdiri atas sampel lapangan, hasil uji laboratorium, dokumentasi kegiatan, dan observasi alur proses. Data sekunder meliputi peta geologi/area penelitian dan informasi operasional yang diberikan perusahaan. Studi literatur digunakan untuk mendukung interpretasi mekanisme pemisahan dan membandingkan temuan dengan penelitian beneficiation pasir silika yang relevan.

Sampel dan Unit Analisis

Pengambilan sampel dilakukan secara manual pada dua titik pit dan dua titik stockpile. Pada pit, titik sampling ditentukan bersama tim quality control pada area yang sedang dikerjakan, kemudian material diambil menggunakan sekop dan dimasukkan ke plastik sampel dengan massa sekitar 5 kg per titik. Prosedur serupa digunakan di stockpile. Sampel diberi kode dan dikirim ke laboratorium PT Sucofindo. Nilai pit tersedia secara individual: Sampel 1 dan Sampel 2. Sebaliknya, naskah sumber hanya menampilkan satu nilai stockpile dengan label "Sampel 1 dan 2" untuk setiap parameter. Koordinat yang tercantum pada naskah juga perlu diaudit: pit Sampel 1 E 571249/N 9678211 dan pit Sampel 2 E 571157/N 9578211, sedangkan koordinat stockpile ditulis tidak lengkap/berbeda antarbagian. Karena jumlah sampel sangat terbatas dan strategi compositing belum jelas, sampel tidak diklaim mewakili seluruh variasi endapan atau produksi.



Gambar 1. Lokasi sampling pada pit

Instrumen dan Prosedur

Analisis kimia dilaporkan dilakukan dengan metode Inductively Coupled Plasma (ICP) di laboratorium PT Sucofindo. Naskah awal belum menyebut apakah instrumen yang digunakan adalah ICP-OES atau ICP-MS, sehingga nomenklatur "ICP" dipertahankan sampai dokumen laboratorium diverifikasi. ASTM E1479 dapat dicantumkan hanya bila memang menjadi acuan laboratorium dan harus disertai prosedur analitik yang benar-benar diterapkan. Rangkaian pengolahan lapangan meliputi penambangan, hauling, dumping ke hopper, pencucian dengan water jet, screening awal, trommel screen, kontrol ukuran, fine screening, penampungan, dan hauling ke stockpile. Informasi ini diperlukan agar prosedur dapat direplikasi dan

performa unit operasi dapat dibandingkan secara ilmiah. Untuk analisis kuarsa berkadar impurity rendah, pelaporan preparasi, replikasi, blank, standar, dan batas deteksi sangat penting karena kualitas data dapat dipengaruhi oleh matriks serta metode introduksi/analisis; studi ICP pada kuarsa dan LA-ICP-MS menunjukkan praktik pelaporan analitik yang jauh lebih rinci (Dong et al., 2020; Wang et al., 2025).

Analisis Data

Analisis data dilakukan secara deskriptif. Untuk sampel pit, kadar rata-rata dihitung dari dua hasil individual. Untuk stockpile, nilai yang tersedia diperlakukan sebagai “nilai yang dilaporkan untuk Sampel 1 dan 2” dan tidak dianggap rerata sebelum status penggabungannya dikonfirmasi. Perbandingan disajikan sebagai selisih absolut dalam poin persentase dan, jika membantu interpretasi, perubahan relatif terhadap rerata pit. Fe_2O_3 berubah dari 0,016% menjadi 0,018% (+0,002 poin persentase; +12,5% relatif), TiO_2 dari 0,0385% menjadi 0,140% (+0,1015 poin persentase; sekitar +263,6% relatif), dan SiO_2 dari 99,62% menjadi 99,45% (-0,17 poin persentase; sekitar -0,17% relatif). Tidak dilakukan uji signifikansi karena desain tidak berpasangan, jumlah observasi kecil, tidak tersedia replikasi analitik, dan ketidakpastian laboratorium belum dilaporkan. Konversi berulang %-ppm-gram yang terdapat pada naskah awal dihapus karena tidak menambah informasi independen tentang performa proses; massa “mineral” hasil perkalian kadar dengan massa contoh 5 kg bukan hasil mass balance proses. Evaluasi terhadap spesifikasi buyer hanya dilakukan setelah sumber resmi batas mutu diverifikasi. Data produk lama pada Tabel 4 dipertahankan sebagai informasi historis, tetapi tidak digunakan sebagai pembanding inferensial sebelum provenance, tanggal sampling, metode preparasi, dan metode analitiknya dilengkapi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kualitas Pasir Silika pada Front Penambangan (Pit)

Hasil uji pit disajikan secara individual untuk dua titik sampling. Fe_2O_3 pada Sampel 1 dan 2 masing-masing 0,017% dan 0,015%, dengan rerata 0,016%. TiO_2 masing-masing 0,042% dan 0,035%, dengan rerata 0,0385%. SiO_2 masing-masing 99,64% dan 99,60%, dengan rerata 99,62%. Nilai ini digunakan sebagai baseline deskriptif untuk perbandingan dengan nilai yang dilaporkan pada stockpile. Perhitungan konversi %-ppm-gram yang berulang pada naskah awal dihapus karena tidak merepresentasikan recovery atau mass balance proses. Ringkasan seluruh parameter ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia Fe_2O_3 , TiO_2 , dan SiO_2 pada sampel pit

Parameter	Sampel 1 (%)	Sampel 2 (%)	Rata-rata (%)	Variasi antar titik (Δ maks-min, poin %)	Metode
Fe_2O_3	0,017	0,015	0,016	0,002	ICP
TiO_2	0,042	0,035	0,0385	0,007	ICP
SiO_2	99,64	99,60	99,62	0,04	ICP

Proses Pencucian dan Pengolahan

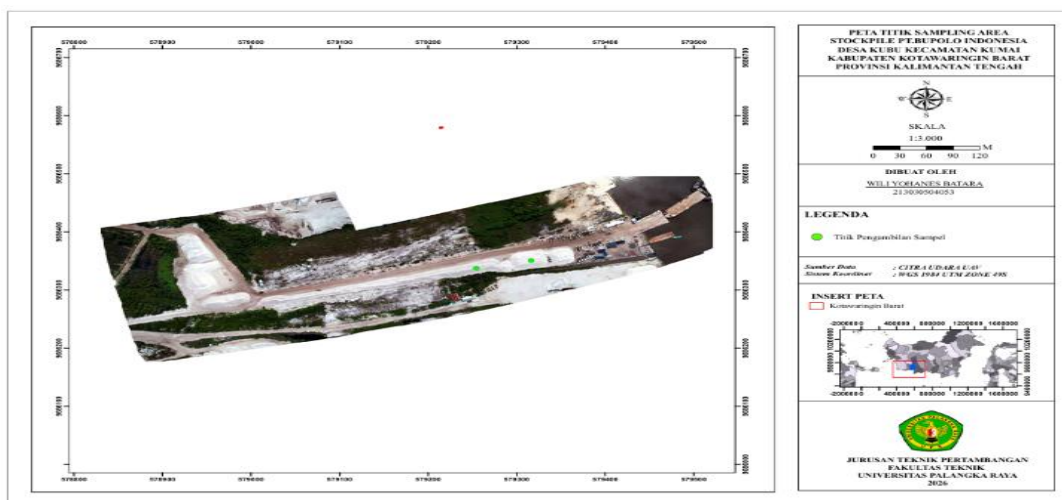
Alur proses yang diamati terdiri atas penambangan, hauling menuju washing plant, dumping ke hopper, pencucian dengan water jet, screening untuk memisahkan material berukuran tidak sesuai, pengolahan dengan trommel screen, kontrol ukuran, fine screening, penampungan produk, dan hauling ke stockpile. Uraian ini menjelaskan fungsi operasional unit, bukan membuktikan efisiensi penghilangan Fe/Ti. Efisiensi setiap tahap belum dapat dihitung karena data massa dan kadar stream feed, product, dan reject tidak tersedia. Parameter operasi yang harus dilengkapi untuk reproduksibilitas dicantumkan pada bagian Metode.



Gambar 2. Proses pencucian dan pengolahan PT Bupolo Indonesia

Kualitas Pasir Silika pada Stockpile

Pada stockpile, naskah sumber hanya melaporkan satu nilai per parameter dengan label "Sampel 1 dan 2". Nilai yang dilaporkan adalah 0,018% Fe_2O_3 , 0,140% TiO_2 , dan 99,45% SiO_2 . Status angka tersebut sebagai composite sample, rerata dua analisis, atau satu hasil laboratorium harus dikonfirmasi sebelum submit. Oleh karena itu, tabel berikut mempertahankan label sumber dan tidak menambahkan variasi atau ukuran ketidakpastian yang tidak tersedia.



Gambar 3. Lokasi sampling pada stockpile

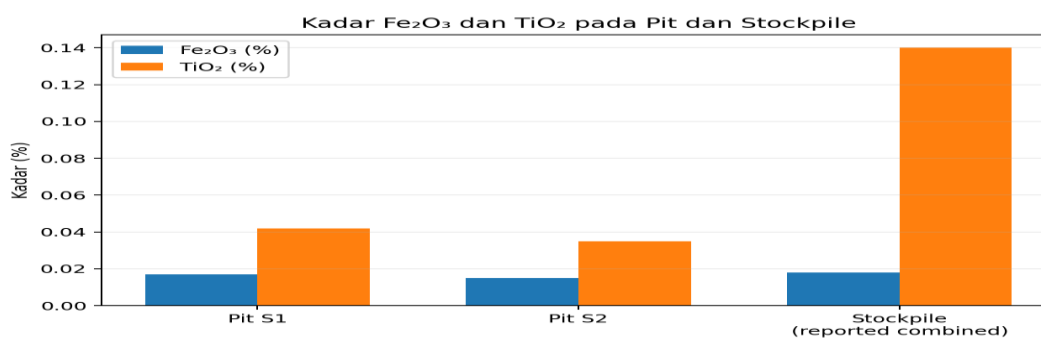
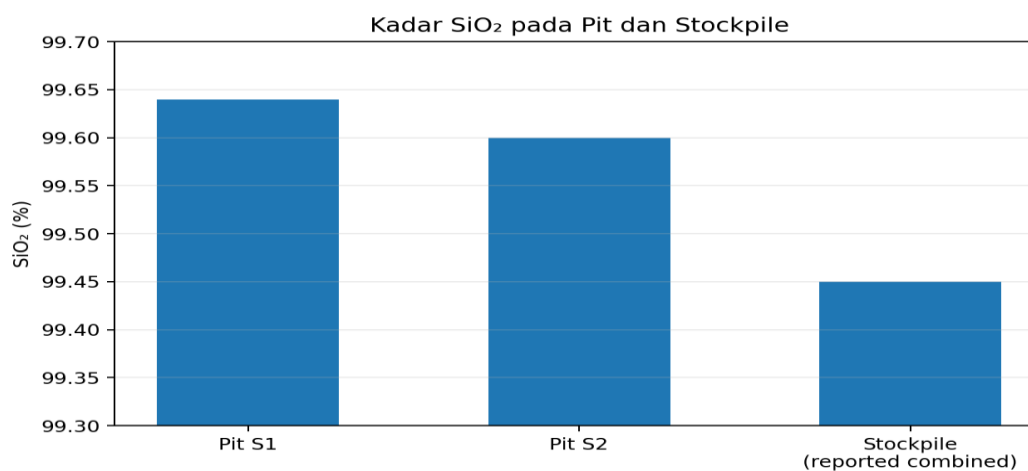
Tabel 2. Komposisi kimia Fe_2O_3 , TiO_2 , dan SiO_2 pada sampel stockpile

Parameter	Sampel stockpile	Hasil (%)	Metode	Indikator mutu	Keterangan data
Fe_2O_3	Sampel 1 dan 2*	0,018	ICP	Pengotor Fe	Nilai gabungan yang dilaporkan
TiO_2	Sampel 1 dan 2*	0,140	ICP	Pengotor Ti	Nilai gabungan yang dilaporkan
SiO_2	Sampel 1 dan 2*	99,45	ICP	Kemurnian silika	Nilai gabungan yang dilaporkan

Perbandingan Pit dan Stockpile

Tabel 3. Nilai kadar mineral pada pasir silika PT Bupolo Indonesia

Parameter	Pit S1 (%)	Pit S2 (%)	Rerata Pit (%)	Stockpile* (%)	Standar Buyer**	Metode
Fe_2O_3	0,017	0,015	0,016	0,018	<0,09%	ICP
TiO_2	0,042	0,035	0,0385	0,140	<0,08%	ICP
SiO_2	99,64	99,60	99,62	99,45	>98,2%	ICP

**Gambar 4.** Kadar Fe_2O_3 dan TiO_2 pada pit dan stockpile**Gambar 5.** Kadar SiO_2 pada pit dan stockpile

Secara deskriptif, Fe_2O_3 berubah dari rerata 0,016% menjadi 0,018% (+0,002 poin persentase), TiO_2 dari 0,0385% menjadi 0,140% (+0,1015 poin persentase), dan SiO_2 dari 99,62% menjadi 99,45% (-0,17 poin persentase). Arah perubahan ini tidak mendukung klaim bahwa kualitas kimia meningkat setelah proses. Karena data tidak berpasangan dan ketidakpastian analitik tidak tersedia, grafik digunakan untuk memperlihatkan pola, bukan untuk membuktikan efek atau signifikansi statistik

Perubahan Komposisi Kimia dan Maknanya

Data yang tersedia menunjukkan perbedaan komposisi kimia antara material pit dan stockpile, bukan peningkatan kualitas kimia yang konsisten. Rata-rata pit adalah 0,016% Fe_2O_3 , 0,0385% TiO_2 , dan 99,62% SiO_2 . Pada stockpile, nilai yang dilaporkan menjadi 0,018% Fe_2O_3 , 0,140% TiO_2 , dan 99,45% SiO_2 . Dengan demikian, Fe_2O_3 meningkat sedikit, TiO_2 meningkat sekitar 3,6 kali dibanding rerata pit, sedangkan SiO_2 menurun 0,17 poin persentase. Pola ini bertentangan dengan klaim awal bahwa proses meningkatkan kualitas kimia secara umum. Karena lempung, lanau, bahan organik, kekeruhan, atau parameter fisik lain tidak diukur, penelitian juga tidak dapat menyimpulkan bahwa pengotor halus atau organik berkurang. Perbedaan TiO_2 merupakan perubahan terbesar dan memerlukan perhatian khusus, tetapi besarnya perubahan tidak boleh disebut “signifikan” dalam arti statistik tanpa replikasi dan ketidakpastian analitik. Selain itu, nilai stockpile yang ditampilkan sebagai “Sampel 1 dan 2” belum diketahui apakah merupakan composite sample, rerata, atau satu hasil laboratorium. Dengan kondisi data tersebut, interpretasi paling aman adalah bahwa mutu kimia produk stockpile pada sampling yang dilakukan belum menunjukkan tren perbaikan terhadap baseline pit.

Temuan tersebut perlu dibaca bersama kemungkinan variasi material dan cara mineral pengotor hadir di dalam pasir. Mineral Fe dan Ti dapat berada sebagai butiran bebas, noda permukaan, inklusi, atau bagian dari fase mineral berat sehingga responsnya terhadap pengolahan fisik sederhana berbeda-beda (Liu et al., 2023). Penelitian lain juga menunjukkan bahwa karakterisasi mineralogi merupakan langkah penting sebelum memilih rute pemurnian kuarsa (Xie et al., 2023). Pada penelitian ini, kenaikan persentase Fe_2O_3 dan TiO_2 dapat berkaitan dengan perbedaan batch feed, segregasi ukuran selama penimbunan, heterogenitas titik sampling, atau perubahan proporsi antarfraksi setelah sebagian material terbuang. “Pengayaan relatif” hanya dapat diperlakukan sebagai hipotesis mekanistik, karena penelitian tidak mengukur massa feed, product, dan reject serta tidak mengidentifikasi mineral pembawa Ti. Tanpa mass balance, kenaikan kadar tidak membuktikan bahwa massa absolut Ti bertambah atau bahwa proses secara langsung “memusatkan” mineral Ti. Oleh karena itu, pembahasan diarahkan pada alternatif penjelasan dan kebutuhan verifikasi, bukan pada satu mekanisme tunggal. Pengambilan sampel feed-product yang berpasangan dan analisis mineralogi diperlukan untuk membedakan efek proses dari variabilitas material.

Mekanisme Washing-Screening dan Batas Selektivitas

Rangkaian water jet dan screening di PT Bupolo Indonesia secara prinsip lebih sesuai untuk dispersi material yang mudah lepas dan klasifikasi ukuran daripada untuk pemisahan selektif semua mineral pembawa Fe-Ti. Wet screening dapat mengeluarkan fraksi yang lebih halus, sedangkan pencucian membantu melepaskan material yang tidak terikat kuat. Namun, attrition scrubbing menghasilkan kontak

antarbutil yang lebih intensif sehingga lebih efektif untuk melepaskan coating atau slime pada permukaan pasir; setelah itu, pemisahan gravitasi dapat digunakan untuk mengurangi mineral berat (Alali, 2023). Pada pasir silika lain, wet sieving dan attrition berhasil meningkatkan kemurnian ketika pengotor dapat diliberasi oleh mekanisme tersebut (Thio et al., 2021). Sebaliknya, apabila Fe atau Ti berada pada mineral berat dengan ukuran yang mirip kuarsa, atau sebagai inklusi/ikatan pada butir kuarsa, screening saja mempunyai selektivitas yang terbatas. Karena penelitian ini tidak mengukur distribusi ukuran butir sebelum dan sesudah plant, tidak tersedia bukti untuk mengaitkan perubahan komposisi dengan fraksi ukuran tertentu. Oleh sebab itu, fungsi water jet dan trommel dalam naskah direvisi menjadi fungsi operasional yang teramati—pencucian dan klasifikasi—bukan sebagai bukti bahwa mineral pengikut tertentu telah berkurang.

Evaluasi performa unit operasi memerlukan parameter yang saat ini belum dicatat dalam naskah, antara lain debit/tekanan water jet, ukuran bukaan aktual, laju umpan, rpm trommel, persen padatan, residence time, serta massa dan kadar pada stream feed, product, dan reject. Studi optimasi spiral concentrator menunjukkan bahwa parameter operasi dapat mengubah grade dan recovery, sehingga performa tidak cukup dinilai hanya dari dua kadar endpoint (Sinaiyah et al., 2024). Studi lain pada silica sand juga menggunakan mass balance untuk menghubungkan recovery produk dengan komposisi dan fraksi ukuran (Alali, 2023). Flotasi kolom pun menunjukkan bahwa parameter operasi seperti pH, kadar padatan, jenis/dosis kolektor, dan laju udara dapat mengubah grade serta mass recovery (Sobota & Bedeković, 2024). Implikasinya bagi PT Bupolo Indonesia adalah bahwa audit proses berikutnya perlu mengambil sampel pada setiap stream utama dan menimbang atau mengestimasi laju massa keringnya. Dengan data tersebut, kenaikan atau penurunan kadar dapat diterjemahkan menjadi distribusi massa unsur/mineral di sepanjang flowsheet. Pendekatan ini akan membedakan perubahan komposisi karena removal aktual dari perubahan relatif akibat penghilangan fraksi lain. Data seperti itu juga menjadi dasar yang lebih kuat untuk memutuskan apakah modifikasi washing-screening cukup atau perlu unit pemisahan tambahan.

Kenaikan TiO_2 dan Kebutuhan Pengolahan Selektif

Kenaikan TiO_2 dari 0,0385% pada rerata pit menjadi 0,140% pada stockpile tidak dapat dijelaskan hanya dengan mekanisme pencucian. Pada endapan pasir, Ti dapat terkait dengan mineral berat seperti ilmenit atau rutil, sedangkan mineral pembawa Fe juga dapat mempunyai sifat densitas dan kemagnetan yang berbeda dari kuarsa. Pemrosesan pasir kaya mineral berat sering mengombinasikan pemisahan gravitasi, magnetik, dan flotasi untuk mengatur distribusi mineral tersebut (Terzi et al., 2021). Pendekatan shaking table untuk menyingkirkan mineral berat juga telah digunakan pada silica sand dalam studi aplikasi lanjutan (Fawzy et al., 2024). Alali (2023) menunjukkan bahwa spiral dapat memisahkan fraksi mineral berat dari produk silika berdasarkan perbedaan perilaku hidrodinamik dan densitas. Liu et al. (2023) juga menekankan bahwa keberhasilan penghilangan Fe dari kuarsa bergantung pada mode keterdapatan pengotornya; hal serupa menguatkan kebutuhan untuk mengetahui fase pembawa Ti sebelum memilih teknologi. Dalam penelitian ini belum ada XRD, SEM-EDS, heavy-mineral analysis, atau pengamatan mineralogi lain yang membuktikan fase pembawa Fe-Ti. Karena itu, istilah ilmenit/rutil digunakan hanya

sebagai contoh fase yang secara umum mungkin terdapat pada pasir, bukan sebagai mineral yang telah teridentifikasi di lokasi penelitian.

Rekomendasi spiral concentrator dan magnetic separator diposisikan sebagai engineering trial, bukan sebagai solusi yang telah terbukti pada material PT Bupolo Indonesia. Magnetic separation efektif ketika mineral pengotor mempunyai respons magnetik yang cukup berbeda dari kuarsa; attrition atau flotasi dapat dibutuhkan bila pengotor berupa coating atau fase lemah magnetik (Abdullah, 2023; Ibrahim et al., 2021). Kombinasi proses fisik juga lazim digunakan untuk meningkatkan kualitas silika, tetapi kebutuhan dan urutannya harus ditentukan berdasarkan mineralogi serta ukuran liberasi (Bouabdallah et al., 2023; Yassin et al., 2024). Uji lanjutan sebaiknya dimulai dengan karakterisasi XRD dan, bila tersedia, SEM-EDS atau mineralogical mapping; kemudian dilakukan trial yang mengukur grade $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$, recovery SiO_2 , massa reject, konsumsi air/energi, dan stabilitas produk. Blending dapat dievaluasi sebagai strategi quality control, tetapi komposisinya harus dihitung dengan mass balance dan menggunakan material yang provenance-nya jelas. Dengan pendekatan tersebut, keputusan proses tidak hanya didasarkan pada satu angka kadar akhir, tetapi pada trade-off grade-recovery serta target buyer yang terverifikasi.

Sampling, Quality Control, dan Batas Generalisasi

Keterbatasan terbesar penelitian berada pada representativitas sampling dan keterlacakan feed-product. Dua titik pit dan dua titik stockpile belum cukup untuk menangkap variasi temporal dan spasial operasi apabila material berasal dari beberapa front atau batch. Stockpile juga rentan mengalami segregasi ukuran selama dumping, stacking, dan reclaiming, sehingga grab sample pada satu atau dua posisi dapat memberikan komposisi berbeda dari komposisi lot secara keseluruhan. Karena sampel pit tidak didokumentasikan mengikuti material yang sama sampai stockpile, perbedaan kadar tidak dapat diatribusikan secara khusus kepada plant. Desain yang lebih kuat adalah sampling berpasangan per batch atau per shift, dengan composite sample yang dibentuk dari beberapa increment sesuai SOP, homogenisasi dan splitting yang terdokumentasi, serta chain of custody sampai laboratorium. Hasil individual dan duplo analitik perlu disajikan untuk menilai variasi dan precision. Pada kondisi tersebut, analisis statistik berpasangan dapat dipertimbangkan jika jumlah batch mencukupi dan asumsi analisis terpenuhi. Untuk naskah saat ini, semua klaim dibatasi pada evaluasi deskriptif agar kesimpulan proporsional terhadap kekuatan bukti.

Meskipun terbatas, studi ini tetap memberi kontribusi praktis sebagai baseline diagnosis proses dan quality-control gap pada operasi nyata. Tiga pesan operasional dapat ditarik. Pertama, angka kimia harus konsisten dari abstrak sampai kesimpulan, terutama TiO_2 stockpile sebesar 0,140% pada data final yang tersedia. Kedua, spesifikasi buyer perlu menjadi controlled document yang versi, tanggal, dan sumbernya jelas agar evaluasi pass/fail dapat diaudit. Ketiga, data proses dan laboratorium harus dihubungkan melalui sampling plan yang memungkinkan mass balance. Literatur mutakhir tentang pemurnian kuarsa menekankan pentingnya menggabungkan karakterisasi impurity dengan pemilihan teknologi pemisahan yang sesuai (Xie et al., 2023). Karena itu, nilai ilmiah naskah ini bukan pada pembuktian bahwa washing “berpengaruh” terhadap kualitas, tetapi pada identifikasi mismatch

antara tujuan pemrosesan dan bukti analitik yang tersedia serta penyusunan desain verifikasi berikutnya. Generalisasi di luar PT Bupolo Indonesia harus dibatasi sampai tersedia data dari lebih banyak batch, variasi kondisi operasi, dan karakterisasi mineralogi.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan adanya perbedaan komposisi kimia antara material pit dan stockpile pada data yang tersedia. Rata-rata pit mengandung Fe_2O_3 0,016%, TiO_2 0,0385%, dan SiO_2 99,62%, sedangkan nilai stockpile yang dilaporkan adalah Fe_2O_3 0,018%, TiO_2 0,140%, dan SiO_2 99,45%. Pola tersebut tidak membuktikan peningkatan kualitas kimia setelah pencucian dan pengolahan karena Fe_2O_3 dan TiO_2 meningkat sementara SiO_2 menurun. Penelitian juga tidak dapat menetapkan hubungan sebab-akibat karena sampel pit dan stockpile belum terdokumentasi sebagai pasangan batch yang sama, hasil individual stockpile tidak tersedia, dan tidak ada replikasi analitik atau neraca massa. Kontribusi utama studi adalah menyediakan baseline evaluasi proses industri dan mengidentifikasi bahwa perubahan TiO_2 memerlukan penelusuran lebih lanjut melalui sampling yang lebih representatif, verifikasi metode laboratorium, dan karakterisasi mineralogi. Klaim mengenai penurunan pengotor halus/organik serta “peningkatan kualitas secara umum” dihapus karena parameter tersebut tidak diukur secara langsung.

REKOMENDASI

Penelitian berikutnya perlu menerapkan sampling feed-product berpasangan pada beberapa batch atau waktu produksi, menampilkan hasil individual setiap sampel, serta menyertakan duplo laboratorium dan ketidakpastian pengukuran. Parameter operasi water jet, screen/trommel, solids concentration, residence time, dan laju umpan perlu dicatat agar setiap unit operasi dapat dievaluasi. Karakterisasi mineralogi, misalnya XRD dan/atau SEM-EDS bila tersedia, disarankan untuk mengidentifikasi mineral pembawa Fe dan Ti sebelum menentukan teknologi pemisahan. Spiral concentrator, magnetic separator, atau kombinasi proses lain sebaiknya diuji pada skala laboratorium/pilot dengan perhitungan grade, recovery, dan mass balance. Blending dapat dievaluasi sebagai opsi quality control hanya setelah provenance material dan spesifikasi buyer diverifikasi. Sumber resmi batas Fe_2O_3 , TiO_2 , dan SiO_2 dari buyer harus dilampirkan atau dirujuk secara konsisten sebelum resubmisi. Pengelolaan reject dan limbah padat dari pemurnian juga perlu dipertimbangkan dalam evaluasi skala plant

ACKNOWLEDGMENT

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Bupolo Indonesia atas akses lokasi dan data penelitian serta kepada laboratorium PT Sucofindo atas layanan pengujian sampel

REFERENSI

- Abdullah, W. R. (2023). Improving silica sand specifications for making colorless glasses by using chemical and physical methods. *Solid State Phenomena*, 341, 77–85. <https://doi.org/10.4028/p-n971x4>
- Alali, J. (2023). Mineral processing of silica sand in Hanout Area/South of Jordan. *Open Journal of Geology*, 13(7), 667–696. <https://doi.org/10.4236/ojg.2023.137029>
- Bakri, S., Anas, M., Wakila, M. H., & Chalik, C. A. (2023). Geochemical characterization of silica sand in the Sidenreng Rappang area based on X-ray diffraction analysis and X-ray fluorescence analysis. *Journal of Geology and Exploration*, 2(1), 1–7. <https://doi.org/10.58227/jge.v2i1.36>
- Bouabdallah, S., Chaib, A., Bounouala, M., Dovbash, N., Benselhoub, A., & Bellucci, S. (2023). Recycling of siliceous by-products to reduce their impacts on the environment. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(3(70)), 31–36. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.277784>
- Dong, X., Xiong, Y., Wang, N., Song, Z., Qiu, X., & Zhu, L. (2020). Determination of trace elements in high-purity quartz samples by ICP-OES and ICP-MS: A normal-pressure digestion pretreatment method for eliminating unfavorable substrate Si. [Metadata jurnal/volume/halaman perlu diverifikasi dari sumber asli sebelum submit].
- Fawzy, M., Mohamed, S. G., & Hamdy, M. S. (2024). Egyptian silica sand-based materials for supercapacitor applications: Towards sustainability. *Delta Journal of Science*, 49(1), 112–130. <https://doi.org/10.21608/djs.2024.322554.1190>
- Ibrahim, S. S., Fathy, W., Elsayed, M. A., & Boulos, T. R. (2021). Iron bearing minerals flotation from silica sand using hydroxyl surfactants. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 9(4), 327–344. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2021.94023>
- Li, S., Liang, Z., Zhou, W., & Chen, J. (2024). Review of upscale quartz sand purification process: From raw material properties to efficient technologies. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 133(4), 171–190. <https://doi.org/10.1177/25726641241301583>
- Liu, C., Wang, W., Wang, H., Zhu, C., & Ren, B. (2023). A review on removal of iron impurities from quartz mineral. *Minerals*, 13(9), 1128. <https://doi.org/10.3390/min13091128>
- Long, H., Zhu, D., Pan, J., Li, S., Yang, C., & Guo, Z. (2024). Advanced processing techniques and impurity management for high-purity quartz in diverse industrial applications. *Minerals*, 14(6), 571. <https://doi.org/10.3390/min14060571>
- Meechoowas, E., Suriyoporn, S., Yoocharoenkit, C., & Pleakbaow, S. (2021). The comparison of different sand sources for glass industrial production. *Materials Today: Proceedings*, 47(12), 3445–3448. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.381>
- Mohanty, K., Alfonso, P., Oliva, J., Sampaio, C. H., & Anticoi, H. (2025). Perspectives for high-purity quartz from European resources. *Minerals*, 15(10), 1080. <https://doi.org/10.3390/min15101080>

- Othman, N., Mustaffar, M. I., Ismail, S. A., & Ibrahim, M. H. (2025). A study on the potential of local silica sand for the production of coloured glass. *Engineering Headway*, 15, 71–77. <https://doi.org/10.4028/p-iv4kzi>
- Popa, F., Marinca, T. F., Neamtu, B. V., Gabor, M., & Chicinas, I. (2022). Structural, chemical and magnetic characterization of quartz sand from Cluj Area, Romania for future beneficiation in the glass industry. *Materials*, 15(24), 9026. <https://doi.org/10.3390/ma15249026>
- Sinaiyah, P., Udayakumar, S., Hussin, H., & Ramakrishan, S. (2024). Design of experimental (DOE) analysis of silica sand processing using spiral concentrator. *Applied Mechanics and Materials*, 918, 65–73. <https://doi.org/10.4028/p-zgm9k4>
- Sobota, I., & Bedeković, G. (2024). The effect of operating variables on the performance of column flotation of silica sand. *Minerals*, 14(4), 341. <https://doi.org/10.3390/min14040341>
- Sulistiyono, E., Handayani, M., Prasetyo, A. B., Irawan, J., Febriana, E., Firdiyono, F., Yustanti, E., Sembiring, S. N., Nugroho, F., & Muslih, E. Y. (2021). Implementation of sulfuric acid leaching for aluminum and iron removal for improvement of low-grade silica from quartz sand of Sukabumi, Indonesia. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(6(111)), 32–40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.226267>
- Susianti, B., Warmadewanthi, I. D. A. A., & Tangahu, B. V. (2022). Characterization of post-mining soil and solid waste from silica sand purification. *Journal of Ecological Engineering*, 23(8), 276–288. <https://doi.org/10.12911/22998993/151145>
- Syahrani, A. M., Juniah, R., Syarifudin, Rahmi, H., & Zakir, S. (2024). Analisis peningkatan kadar pasir silika dengan menggunakan magnetic separator untuk memenuhi kebutuhan industri kaca pengaman. *Jurnal Sains dan Teknologi: Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Teknologi Industri*, 24(1), 12–20. <https://doi.org/10.36275/gh9wja94>
- Terzi, M., Kurşun, İ., Çınar, M., & Özdemir, O. (2021). Digital image processing (DIP) application on the evaluation of iron-rich heavy mineral concentrates produced from river sand using a sequential mineral processing approach. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 57(3), 21–35. <https://doi.org/10.37190/ppmp/134216>
- Thio, P. R., Koffi, K. B., Konan, K. D., & Yao, K. A. (2021). Production of high-purity silica sand from Ivorian sedimentary basin by attrition without acid leaching process for windows glass making. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 9(4), 345–361. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2021.94024>
- Wang, H., Wang, F., Zhao, Y., Xu, X., Wang, B., Fan, Y., Zhang, L., & Guo, F. (2025). Application of quartz LA-ICP-MS analysis in the evaluation of high-purity quartz deposits. *Minerals*, 15(4), 400. <https://doi.org/10.3390/min15040400>
- Wuletaw, A., & Mihret, B. (2024). Physicochemical and mineralogical characterization of silica sand from the Lemi region, Blue Nile Basin, central Ethiopia: Evaluating

- industrial applications and resource potential. *Heliyon*, 10(14), e34426. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34426>
- Xie, Y., Li, S., Pan, X., Li, Y., & Zhang, A. (2023). Recent advances in the marketing, impurity characterization and purification of quartz. *Minerals and Mineral Materials*, 2(4). <https://doi.org/10.20517/mmm.2023.17>
- Yassin, K. E., Mourad, S., Khalil, M. M. H., Abdel-Khalek, N., Elbendari, A. M., Selim, K. A., & Hassan, E. R. E. (2024). Upgrading and surface coating of Egyptian white sand with polymers and silanes. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 39(1), 101–114. <https://doi.org/10.17794/rgn.2024.1.9>
- Zhang, R., Tang, C., & Ni, W. L. (2023). Research status and challenges of high-purity quartz processing technology from a mineralogical perspective in China. *Minerals*, 13(12), 1505. <https://doi.org/10.3390/min13121505>