

**INOVASI METODE FLOTASI: PERAN REAGEN XANTHATE SEBAGAI KOLEKTOR SELEKTIF UNTUK REDUKSI KADAR BESI PADA PASIR SILIKA**

2025

<sup>1)</sup>Jessy Syarastika, S.T., <sup>2)</sup>Umar R. Pulukadang, S.T., MBA., <sup>3)</sup>Amar Daeng Pagesa, S.T.

<sup>1)</sup>Mining Specialist, PT Minevesting Konsultan Indonesia,

<sup>2)</sup>Mining Specialist, PT Minevesting Konsultan Indonesia,

<sup>3)</sup>Mining Specialist, PT Minevesting Konsultan Indonesia.

\*E-mail: [jejesyarastika@minevesting.co](mailto:jejesyarastika@minevesting.co)

**ABSTRAK**

Penelitian ini mengevaluasi efektivitas reagen xanthate sebagai kolektor selektif untuk menurunkan kadar besi ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) pada pasir silika melalui integrasi pra-benefisiasi Induced Roll Magnetic Separator (IRM) dan flotasi. Sampel berupa fraksi non-magnetik hasil IRM ukuran  $+180 \mu\text{m}$  ( $\text{SiO}_2$  99,86%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  184 ppm) diuji dalam Denver Flotation Cell 4,4 L pada pH alami, padatan 15–20%, impeller 800 rpm, udara 10 L/min, conditioning 15 menit, dan waktu flotasi 3 menit. Reagen yang digunakan adalah Sodium Ethyl Xanthate (SEX) sebagai kolektor dan Methyl Isobutyl Carbinol (MIBC) sebagai frother. Hasil menunjukkan bahwa IRM efektif menurunkan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dari 2106 ppm (head) menjadi 184 ppm, namun flotasi tahap pertama dengan SEX 100 g/t meningkatkan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  menjadi 370 ppm akibat ikut terflotasinya hornblende (amfibol kaya Fe, paramagnetik, sebagian hidrofobik). Pada tahap kedua (cleaner) dengan SEX 500 g/t, terbentuk adsorpsi Fe-xanthate yang lebih dominan pada permukaan hornblende sehingga pengotor ini berpindah ke fase buih/tailing;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  konsentrat turun menjadi 105 ppm, sementara  $\text{SiO}_2$  tetap  $>99,7\%$  dengan recovery massa  $\sim 99,8\%$ . Temuan ini menegaskan bahwa pengendalian dosis xanthate menjadi kunci selektivitas terhadap mineral Fe-silikat yang lolos IRM. Kombinasi IRM-flotasi xanthate terbukti selektif, ekonomis, dan lebih ramah lingkungan dibanding pelindian asam, serta memenuhi spesifikasi kualitas untuk aplikasi industri bernilai tinggi dan kebijakan hilirisasi. Hasil ini sekaligus menyediakan dasar ilmiah bagi studi lanjutan terkait mekanisme dan optimasi penggunaan xanthate pada skala industri.

**Kata kunci:** pasir silika; flotasi; xanthate; hornblende;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; IRM.

**ABSTRACT**

*This study assesses the effectiveness of xanthate as a selective collector to reduce iron ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) in silica sand by integrating Induced Roll Magnetic Separator (IRM) pre-beneficiation with flotation. The feed was the non-magnetic IRM fraction at  $+180 \mu\text{m}$  ( $\text{SiO}_2$  99.86%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  184 ppm). Flotation tests were conducted in a 4.4-L Denver cell at natural pH, 15–20% solids, 800 rpm impeller speed, 10 L/min air flow, 15-min conditioning, and 3-min flotation time, using Sodium Ethyl Xanthate (SEX) as collector and Methyl Isobutyl Carbinol (MIBC) as frother. IRM effectively decreased  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  from 2106 ppm (head) to 184 ppm; however, the first flotation stage with 100 g/t SEX increased  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  to 370 ppm due to the unintended flotation of hornblende (Fe-rich amphibole, paramagnetic, partly hydrophobic). In the cleaner stage with 500 g/t SEX, stronger Fe-xanthate chemisorption on hornblende surfaces enhanced hydrophobicity and transferred this impurity to the froth/tailing, reducing  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  in the concentrate to 105 ppm while maintaining  $\text{SiO}_2 >99.7\%$  and mass recovery at  $\sim 99.8\%$ . These results demonstrate that xanthate dosage control governs selectivity toward Fe-silicate minerals that escape IRM. The combined IRM-xanthate flotation route is selective, cost-effective, and environmentally friendlier than acid leaching, meeting high-end industrial specifications and supporting downstreaming policies. The work also provides a scientific basis for further investigations on mechanism and process optimization toward industrial-scale application.*

**Keywords:** silica sand; flotation; xanthate; hornblende;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; IRM.

## A PENDAHULUAN

Pasir silika ( $\text{SiO}_2$ ) merupakan salah satu komoditas mineral non-logam yang paling melimpah dan memiliki peranan penting dalam berbagai sektor industri. Selain digunakan sebagai bahan baku utama pada pembuatan kaca dan keramik, pasir silika juga banyak diaplikasikan pada industri konstruksi, pengecoran logam, cat, abrasif, hingga teknologi tinggi seperti semikonduktor, serat optik, dan panel surya (Sobota & Bedeković, 2024; Othman et al., 2023). Kualitas pasir silika umumnya ditentukan oleh tingkat kemurnian  $\text{SiO}_2$  serta kandungan pengotor minor seperti oksida besi ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), dan titania ( $\text{TiO}_2$ ) (Osman, 2021). Di antara berbagai pengotor tersebut,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  menjadi parameter kritis karena keberadaannya dapat memengaruhi warna, transparansi, dan sifat fungsional produk akhir.

Proses benefisiasi pasir silika diperlukan untuk meningkatkan kualitasnya agar sesuai dengan spesifikasi industri. Metode kimiawi, seperti pelindian asam, efektif dalam menurunkan kadar  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , namun sering terkendala oleh biaya yang tinggi serta dampak lingkungan. Sebagai alternatif, metode fisika seperti attrisi, separasi magnetik, konsentrasi gravitasi, dan flotasi menjadi pilihan yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis (Rao & Verma, 2007; Çelik & Kaya, 2025). Dalam konteks regulasi, diterapkannya **Permendag No. 21 Tahun 2024** yang mengatur ketentuan ekspor komoditas mineral, termasuk pasir silika, menuntut agar produk yang diperdagangkan memenuhi standar kualitas tertentu, terutama terkait kadar pengotor. Hal ini mendorong perlunya inovasi teknologi benefisiasi yang lebih selektif, efisien, dan berkelanjutan.

Salah satu pendekatan yang mulai dikembangkan adalah penggunaan reagen xanthate dalam proses flotasi. Xanthate dikenal sebagai kolektor selektif yang efektif dalam berinteraksi dengan mineral pengandung besi tertentu, sehingga berpotensi meningkatkan kadar  $\text{SiO}_2$  sekaligus menurunkan kandungan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  secara signifikan (Yu et al., 2016). Penerapan reagen ini diharapkan dapat menjadi solusi untuk memperoleh konsentrat pasir silika dengan tingkat kemurnian tinggi yang sesuai dengan tuntutan industri modern.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis efektivitas penggunaan xanthate dalam proses benefisiasi pasir silika berdasarkan hasil uji laboratorium, khususnya dalam meningkatkan kadar  $\text{SiO}_2$  dan menurunkan kadar  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Pendekatan pemecahan masalah yang digunakan dalam penelitian ini mencakup karakterisasi awal sampel pasir silika, pengujian flotasi dengan variasi dosis xanthate, serta evaluasi kualitas konsentrat yang dihasilkan. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kelayakan teknologi flotasi berbasis xanthate sebagai metode inovatif, selektif, dan ekonomis dalam meningkatkan mutu pasir silika.

## B METODOLOGI PENELITIAN

### 1. Bahan Penelitian

Sampel penelitian berupa produk **non-magnetik hasil pemisahan Induced Roll Magnetic Separator (IRM)** dari pasir silika berukuran  $+180 \mu\text{m}$ . Berdasarkan hasil uji head assay, sampel ini memiliki kadar  **$\text{SiO}_2$  sebesar 99,86%**,  **$\text{Fe}_2\text{O}_3$  sebesar 184 ppm**, dan  **$\text{Al}_2\text{O}_3$  sebesar 0,04%**. Sampel dengan berat  $\pm 502 \text{ g}$  digunakan sebagai *feed* untuk uji flotasi.

### 2. Preparasi Sampel

- **Pengeringan:** Sampel dikeringkan pada suhu  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- **Homogenisasi dan pembagian:** Dilakukan dengan metode *rotary splitter* (8 bucket,  $\pm 12,5\%$  per bucket) untuk menghasilkan sub-sampel representatif seberat  $\pm 500 \text{ g}$ .

- **Karakterisasi awal:** Komposisi kimia dianalisis menggunakan **XRF (MET\_XRFFSI)**, sementara identifikasi mineral dilakukan dengan **mikroskopi optik (MLG\_MISI)**.

### 3. Rancangan Uji Flotasi

Uji flotasi dilakukan menggunakan **Denver Flotation Cell** berkapasitas 4,4 liter, dengan padatan pulp 15–20% (w/w), impeller 800 rpm, aliran udara 10 L/min, dan pH alami. Reagen yang digunakan adalah:

- **Kolektor:** Sodium Ethyl Xanthate (SEX).
- **Frother:** Methyl Isobutyl Carbinol (MIBC).

**Tabel 1.** Kondisi uji flotasi

Parameter	Tahap 1 ( <i>Rougher</i> )	Tahap 2 ( <i>Cleaner</i> )
Kolektor (SEX)	100 g/t	500 g/t
Frother (MIBC)	70 g/t	70 g/t
Waktu conditioning	15 menit	15 menit
Waktu rougher flotation	3 menit	3 menit
Padatan	15–20% w/w	15–20% w/w

Sumber: Data laboratorium (2025)

### 4. Prosedur Uji Laboratorium

- Sampel dimasukkan ke dalam sel flotasi dengan kadar padatan terkontrol.
- Kolektor SEX ditambahkan secara bertahap, diikuti oleh MIBC sebagai frother.
- Proses *conditioning* dilakukan selama 15 menit, kemudian flotasi berlangsung selama 3 menit.
- Konsentrat dikumpulkan, difiltrasi, dikeringkan pada 60 °C, dan dibagi untuk analisis kimia (XRF/ICP) serta mineralogi (mikroskopi optik).

### 5. Analisis Pasca Flotasi

Produk flotasi dievaluasi dengan parameter berikut:

- **Analisis kimia:** dilakukan dengan **XRF** untuk menentukan kadar SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>.
- **Analisis mineralogi:** dilakukan dengan mikroskopi optik untuk mengidentifikasi mineral pengotor (hornblende, plagioklas, pirit).
- **Evaluasi kinerja:** berdasarkan perubahan kadar Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, kadar SiO<sub>2</sub>, selektivitas flotasi, serta pencapaian target kualitas Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> <120 ppm.

**Tabel 2.** Ringkasan hasil flotasi

Tahap	Produk	Berat (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ppm)	Keterangan
Feed	Non-mag IRM	100	99,86	184	Hasil IRM
1	Konsentrat #1	99,8	99,68	370	Fe naik (hornblende ikut flotasi)
2	Konsentrat #2	99,8	99,74	105	Target <120 ppm tercapai

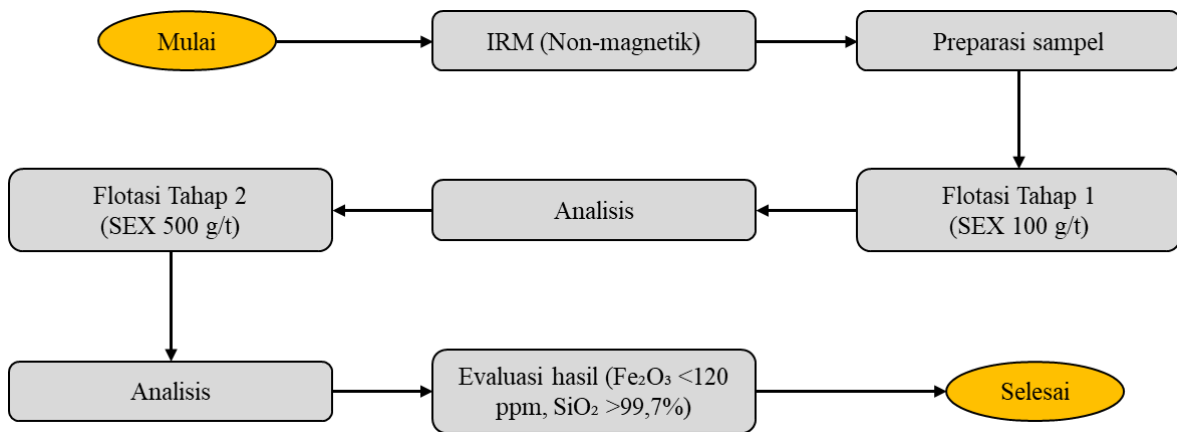
Sumber: Data laboratorium (2025)

## 6. Pendekatan Pemecahan Masalah

Pendekatan penelitian ini didasarkan pada integrasi **IRM dan flotasi berbasis xanthate**:

- **IRM** berfungsi menurunkan kandungan mineral besi magnetik (hematit, magnetit).
- **Flotasi xanthate** menargetkan mineral paramagnetik (hornblende, plagioklas ber-Fe) yang tidak terpisahkan oleh IRM.

Tahap pertama flotasi menunjukkan bahwa hornblende ikut terflotasi bersama kuarsa sehingga  $Fe_2O_3$  meningkat. Dengan meningkatkan dosis xanthate pada tahap kedua, hornblende berhasil terpisahkan sebagai tailing, menghasilkan konsentrat pasir silika dengan  $SiO_2$  **tinggi (>99,7%)** dan  $Fe_2O_3$  **rendah (105 ppm)** sesuai standar industri ekspor.



Gambar 1. Flowchart penelitian

## C HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Karakterisasi Awal Sampel

Berdasarkan hasil analisis kimia menggunakan **XRF (MET\_XRFFSI)**, sampel pasir silika awal memiliki kadar  $SiO_2$  sebesar **99,41%** dengan kandungan pengotor utama berupa  $Fe_2O_3$  sebesar **2106 ppm**. Nilai ini menunjukkan bahwa meskipun kadar  $SiO_2$  relatif tinggi, kandungan  $Fe_2O_3$  masih jauh di atas ambang batas yang dipersyaratkan untuk berbagai aplikasi industri bernilai tinggi, misalnya industri kaca optik yang mensyaratkan kadar  $Fe_2O_3 < 120$  ppm. Selain itu, analisis juga menunjukkan keberadaan  $Al_2O_3$  sebesar **0,08%** dan  $TiO_2$  sebesar **0,11%**, yang meskipun relatif kecil, tetap dapat memengaruhi sifat fungsional produk akhir jika tidak direduksi lebih lanjut.

Tabel 1. Komposisi kimia awal sampel pasir silika (head assay)

Tabel 3. Komposisi kimia awal sampel pasir silika (head assay)

Parameter	$SiO_2$ (%)	$Fe_2O_3$ (ppm)	$Al_2O_3$ (%)	$TiO_2$ (%)	Lainnya (%)
Head Assay	99,41	2106	0,08	0,11	<0,5

Sumber: Data laboratorium (2025)

Analisis mineralogi dengan mikroskopi optik (**MLG\_MISI**) memperlihatkan bahwa mineral utama penyusun sampel adalah **kuarsa**, sedangkan mineral pengotor yang teridentifikasi meliputi **hornblende**, **plagioklas**, serta jejak mineral oksida besi seperti magnetit dan hematit. Hornblende menjadi perhatian khusus karena merupakan mineral amfibol yang kaya Fe, bersifat paramagnetik, dan cenderung hidrofobik. Karakteristik ini menjadikannya sulit dipisahkan dengan metode fisika

konvensional seperti pemisahan magnetik, serta berpotensi ikut terflotasi bersama kuarsa akibat sifat permukaannya. Sementara itu, plagioklas dapat mengandung inklusi Fe dalam struktur kristalnya, sehingga turut berkontribusi terhadap kadar  $Fe_2O_3$ , meskipun dalam porsi yang lebih kecil dibanding hornblende.

Hasil karakterisasi ini memperlihatkan bahwa meskipun **SiO<sub>2</sub> mendominasi komposisi sampel (>99%)**, keberadaan **Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada level kritis (2106 ppm  $\approx$  0,21%)** tetap menjadi faktor pembatas utama dalam pemanfaatan pasir silika untuk aplikasi premium. Kandungan oksida minor seperti Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan TiO<sub>2</sub> relatif kecil, tetapi tidak bisa diabaikan sepenuhnya. Dengan demikian, tingginya Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang erat kaitannya dengan kehadiran hornblende menjadi tantangan utama dalam upaya benefisiasi. Kondisi ini menegaskan perlunya strategi pemurnian bertahap, yakni **pra-pemisahan magnetik (IRM) untuk mengurangi mineral Fe magnetik**, yang kemudian dilanjutkan dengan **flotasi berbasis xanthate** guna menargetkan pengotor paramagnetik seperti hornblende agar kualitas pasir silika memenuhi standar industri bernilai tinggi.

## 2. Hasil Pra-Benefisiasi dengan Induced Roll Magnetic Separator (IRM)

Proses pra-benefisiasi dengan **Induced Roll Magnetic Separator (IRM)** dilakukan untuk memisahkan mineral besi magnetik seperti hematit dan magnetit dari kuarsa. Hasil analisis kimia menunjukkan adanya peningkatan kualitas yang signifikan dibandingkan kondisi awal. Kadar **SiO<sub>2</sub> meningkat dari 99,41% menjadi 99,86%**, sedangkan kandungan pengotor utama berupa **Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> turun drastis dari 2106 ppm menjadi 184 ppm**. Unsur minor lainnya juga mengalami penurunan, di antaranya **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> berkurang dari 0,08% menjadi 0,04%** dan **TiO<sub>2</sub> menurun dari 0,11% menjadi <0,01%**.

Tabel 4. Komposisi kimia pasir silika sebelum dan sesudah IRM

Parameter	Head Assay (Awal)	Produk IRM (Non-Magnetik)	Perubahan
SiO <sub>2</sub> (%)	99,41	99,86	+0,45%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ppm)	2106	184	-91,3%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,08	0,04	-50,0%
TiO <sub>2</sub> (%)	0,11	<0,01	-90,9%

Sumber: Data laboratorium (2025)

Tabel 4 memperlihatkan dengan jelas efektivitas IRM dalam menurunkan kadar Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan meningkatkan SiO<sub>2</sub>. Grafik membandingkan kondisi sebelum dan sesudah proses, di mana terlihat tren penurunan signifikan pada Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (dari 2106 ppm menjadi 184 ppm) serta peningkatan kemurnian SiO<sub>2</sub> menjadi hampir 100%. Unsur minor seperti Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan TiO<sub>2</sub> juga berkurang cukup tajam, menandakan bahwa proses IRM tidak hanya efektif pada mineral besi magnetik, tetapi juga membantu mengurangi oksida pengotor lain.

Secara umum, hasil ini membuktikan bahwa IRM merupakan tahapan pra-benefisiasi yang sangat efektif untuk meningkatkan kualitas pasir silika. Namun demikian, **kandungan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang masih berada pada level 184 ppm** tetap belum memenuhi spesifikasi industri premium yang umumnya mensyaratkan <120 ppm. Hal ini mengindikasikan bahwa pengotor paramagnetik seperti hornblende masih tersisa dalam fraksi non-magnetik, karena sifat magnetiknya yang lemah tidak memungkinkan pemisahan sempurna melalui IRM.

Dengan demikian, IRM dapat dikatakan sebagai langkah awal yang penting dan efektif dalam mengurangi kandungan besi, tetapi tidak cukup untuk menghasilkan konsentrat pasir silika dengan kualitas tinggi yang dipersyaratkan. Oleh karena itu, diperlukan **tahapan lanjutan berupa flotasi dengan reagen xanthate** yang ditujukan secara spesifik untuk menargetkan pengotor paramagnetik, sehingga konsentrat akhir dapat mencapai standar industri kaca optik, serat optik, dan panel surya.

### 3. Hasil Flotasi Tahap Pertama

Flotasi tahap pertama dilakukan menggunakan kolektor **Sodium Ethyl Xanthate (SEX) 100 g/t** dan frother **Methyl Isobutyl Carbinol (MIBC) 70 g/t** pada kondisi pH alami dengan pulp density 15–20% dan waktu flotasi tiga menit. Analisis hasil menunjukkan bahwa kadar **SiO<sub>2</sub> dalam konsentrat masih sangat tinggi yaitu 99,68%**, tetapi kandungan **Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> justru meningkat menjadi 370 ppm dibandingkan feed IRM sebesar 184 ppm**, sedangkan recovery massa konsentrat relatif stabil pada 99,8%.

Tabel 5. Hasil flotasi tahap pertama

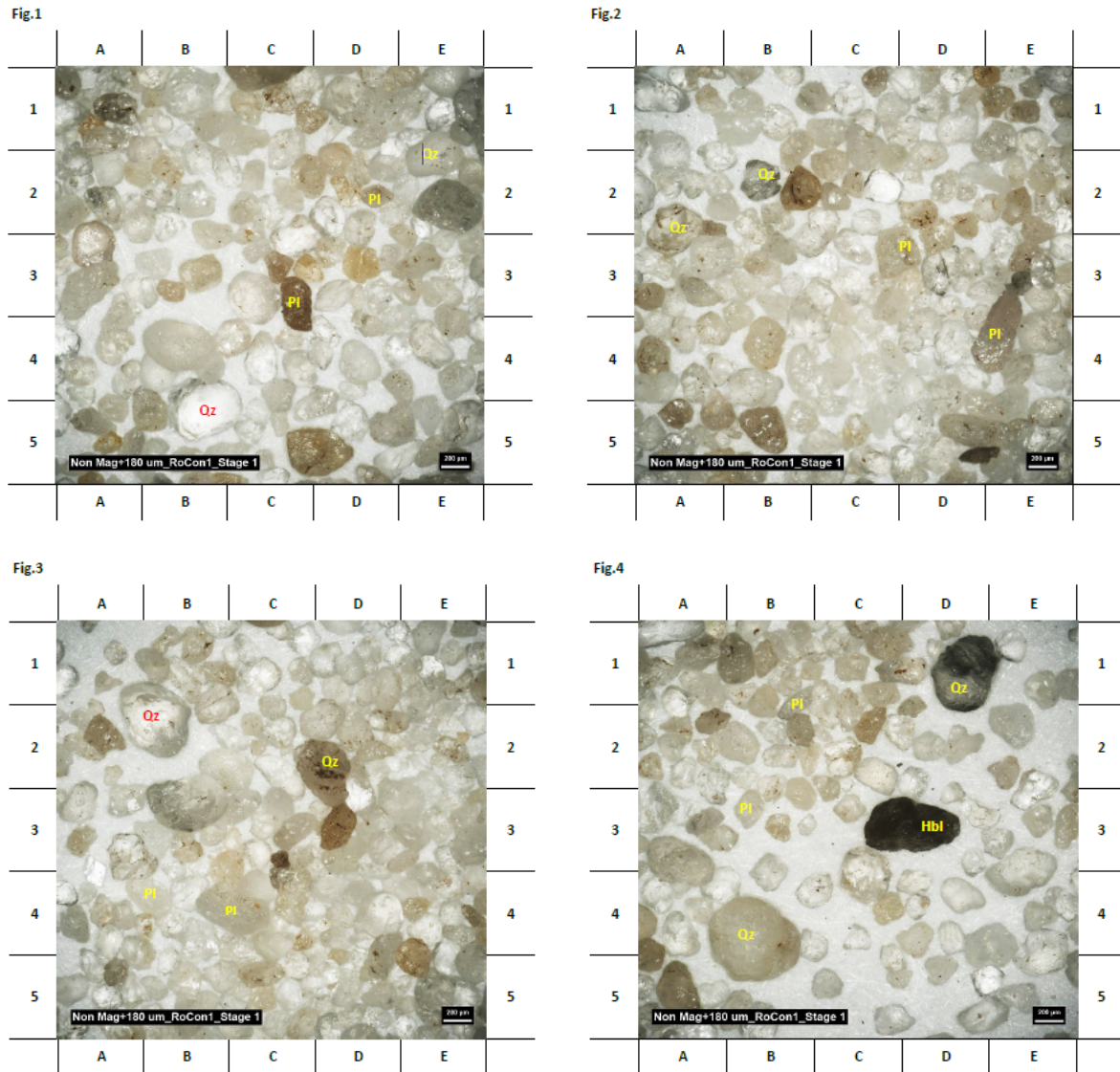
Parameter	Feed (IRM Non-mag)	Konsentrat Flotasi #1	Perubahan
SiO <sub>2</sub> (%)	99,86	99,68	-0,18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ppm)	184	370	+101%
Berat produk (%)	100	99,8	~tetap

Sumber: Data laboratorium (2025)

Peningkatan kadar Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ini berkaitan erat dengan keberadaan **hornblende**, mineral amfibol kaya Fe yang teridentifikasi jelas pada hasil analisis mineralogi mikroskopis (Gambar 2). Hornblende ditandai dengan warna hitam keabu-abuan dengan kilap vitreous, translusen hingga opak, serta habit kristal prismatic anhedral yang sering berasosiasi erat dengan butiran kuarsa. Sifat paramagnetik dan kecenderungan permukaan yang hidrofobik menyebabkan hornblende tidak sepenuhnya tereliminasi pada tahap IRM, dan pada saat flotasi rougher dengan dosis kolektor rendah, butiran hornblende ikut terangkat bersama kuarsa ke fase buih. Hal ini menjelaskan mengapa Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada konsentrat justru meningkat signifikan meskipun kadar SiO<sub>2</sub> tetap tinggi.

Kehadiran plagioklas yang juga teridentifikasi dalam analisis mineralogi turut memperumit sistem karena dapat mengandung inklusi Fe, meskipun kontribusinya relatif lebih kecil dibanding hornblende. Dengan demikian, hasil tahap pertama ini memperlihatkan bahwa selektivitas flotasi pada dosis SEX 100 g/t belum optimal. Jumlah molekul kolektor yang terbatas belum mampu berinteraksi secara dominan dengan permukaan hornblende, sehingga terjadi kompetisi adsorpsi dengan kuarsa.

Temuan ini menegaskan bahwa flotasi tahap pertama berperan sebagai **uji diagnostik** yang memberikan gambaran perilaku mineral pengotor terhadap kolektor. Walaupun belum menghasilkan konsentrat sesuai spesifikasi, data ini menjadi dasar penting untuk melakukan optimasi pada tahap berikutnya, yaitu dengan peningkatan dosis xanthate, agar pemisahan hornblende lebih efektif dan kandungan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dapat diturunkan hingga memenuhi standar industri.



**Gambar 2.** Hasil analisis mineralogi mikroskopis

*Keterangan Gambar :*

- *Fig. 1.* Foto mikroskopi butiran pasir silika non-magnetik (+180 µm) menunjukkan dominasi kuarsa (Qz) berbentuk sub-angular hingga rounded. Plagioklas (Pl) tampak menyebar dengan bentuk tabular.
- *Fig. 2.* Kuarsa (Qz) masih menjadi mineral dominan dengan kejernihan tinggi, sementara plagioklas (Pl) berasosiasi dalam jumlah lebih sedikit. Hal ini menunjukkan sistem masih relatif bersih, namun terdapat potensi inklusi Fe pada plagioklas.
- *Fig. 3.* Terlihat percampuran kuarsa (Qz) dan plagioklas (Pl), dengan beberapa butir menunjukkan warna kecoklatan akibat jejak oksida besi. Kondisi ini mendukung hasil head assay bahwa  $Fe_2O_3$  masih signifikan dalam sampel awal.
- *Fig. 4.* Identifikasi butiran hornblende (Hbl) berwarna gelap-hitam dengan kilap vitreous, berasosiasi erat dengan kuarsa (Qz) dan plagioklas (Pl). Kehadiran hornblende inilah yang menjadi penyumbang utama  $Fe_2O_3$ , sulit dipisahkan pada tahap IRM, dan cenderung ikut terflotasi bersama kuarsa pada dosis kolektor rendah.

#### 4. Hasil Flotasi Tahap Kedua

Flotasi tahap kedua dilaksanakan dengan peningkatan dosis kolektor menjadi **Sodium Ethyl Xanthate (SEX) 500 g/t**, sementara frother tetap menggunakan **Methyl Isobutyl Carbinol (MIBC) 70 g/t** pada kondisi pH alami. Tujuannya adalah memperbaiki selektivitas pemisahan setelah hasil flotasi pertama menunjukkan peningkatan kadar  $Fe_2O_3$ .

Tabel 6. Hasil flotasi tahap kedua

Parameter	Konsentrat Flotasi #1	Konsentrat Flotasi #2	Perubahan
SiO <sub>2</sub> (%)	99,68	99,74	+0,06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ppm)	370	105	-71,6%
Berat produk (%)	99,8	99,8	~tetap

Sumber: Data laboratorium (2025)

Hasil analisis memperlihatkan bahwa peningkatan dosis kolektor secara signifikan menurunkan kadar Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dari 370 ppm menjadi **105 ppm**, sekaligus mengembalikan kadar SiO<sub>2</sub> ke level **99,74%**. Nilai ini sudah berada di bawah batas maksimum 120 ppm, sehingga konsentrat memenuhi spesifikasi industri bernilai tinggi. Recovery massa konsentrat tetap tinggi, sekitar 99,8%, yang menandakan efisiensi pemulihan kuarsa tetap terjaga.

Secara teknis, perbaikan selektivitas pada tahap ini terjadi karena jumlah molekul xanthate yang lebih besar mampu membentuk lapisan adsorpsi stabil pada permukaan hornblende yang kaya ion Fe. Dengan meningkatnya hidrofobisitas, hornblende lebih mudah terbawa ke fase buih dan dipisahkan sebagai tailing. Mekanisme ini menjelaskan penurunan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hingga 71,6% dari konsentrat flotasi pertama.

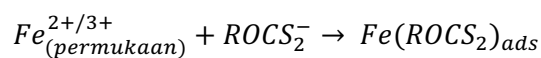
Peningkatan mutu SiO<sub>2</sub> tanpa kehilangan signifikan pada recovery massa menunjukkan bahwa metode ini efektif bukan hanya dalam menurunkan kadar pengotor, tetapi juga dalam mempertahankan kualitas kuarsa. Hal ini sekaligus mengatasi keterbatasan IRM yang hanya mampu mengeliminasi mineral besi magnetik, serta memperbaiki “anomali” flotasi tahap pertama yang justru meningkatkan kandungan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> akibat hornblende ikut terflotasi bersama kuarsa.

Dengan hasil ini, integrasi IRM dan flotasi berbasis xanthate dua tahap terbukti mampu menghasilkan konsentrat pasir silika dengan kualitas premium, yakni **SiO<sub>2</sub> >99,7% dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> <120 ppm**. Produk ini sudah relevan untuk berbagai aplikasi industri bernilai tinggi seperti kaca optik, fotovoltaik, hingga semikonduktor, sekaligus mendukung kebutuhan pasar global yang menuntut standar kemurnian ketat.

## 5. Peran Xanthate terhadap Hornblende

Hasil analisis mineralogi menunjukkan bahwa salah satu pengotor utama dalam sampel pasir silika adalah **hornblende**, mineral amfibol dengan struktur kristal kompleks yang kaya ion Fe<sup>2+</sup> dan Fe<sup>3+</sup>. Kehadiran ion-ion ini menjadikan hornblende sebagai kontributor dominan terhadap tingginya kadar Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Sifatnya yang **paramagnetik** menyebabkan hornblende tidak sepenuhnya dipisahkan melalui IRM, sementara permukaan yang cenderung **hidrofobik** membuatnya mudah ikut terflotasi bersama kuarsa. Kondisi inilah yang menjelaskan mengapa setelah IRM kandungan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> masih tersisa sebesar 184 ppm, dan pada flotasi tahap pertama justru meningkat menjadi 370 ppm akibat pengayaan hornblende dalam konsentrat.

Peran xanthate kemudian menjadi sangat penting. **Sodium Ethyl Xanthate (SEX)** adalah kolektor berbasis sulfur dengan gugus aktif -OCS<sub>2</sub><sup>-</sup> yang memiliki afinitas tinggi terhadap ion logam transisi. Pada permukaan hornblende, molekul xanthate berikatan melalui mekanisme *chemisorption* dan membentuk kompleks Fe-xanthate. Reaksi sederhana yang menggambarkan ikatan ini adalah:



Ikatan tersebut membuat permukaan hornblende semakin hidrofobik, sehingga partikel hornblende lebih mudah menempel pada gelembung udara dan terbawa ke fase buih. Dengan cara ini, hornblende

dapat dipisahkan ke dalam tailing, sementara kuarsa tetap dominan dalam konsentrat, yang berakibat pada penurunan kadar  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  secara signifikan.

Efektivitas interaksi ini sangat dipengaruhi oleh dosis xanthate yang digunakan. Pada flotasi tahap pertama dengan dosis 100 g/t, jumlah molekul kolektor belum cukup untuk menutupi permukaan hornblende sepenuhnya. Akibatnya, terjadi kompetisi adsorpsi antara hornblende dan kuarsa sehingga sebagian hornblende tetap masuk konsentrat dan menyebabkan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  naik menjadi 370 ppm. Sebaliknya, pada flotasi tahap kedua dengan dosis 500 g/t, jumlah kolektor yang cukup mampu memberikan interaksi dominan pada hornblende. Hal ini meningkatkan selektivitas flotasi, sehingga hornblende lebih efektif terbuang ke tailing, sementara kuarsa tetap stabil di konsentrat. Dampaknya,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  turun menjadi 105 ppm dengan kadar  $\text{SiO}_2$  yang tetap tinggi pada 99,74%.

**Tabel 7.** Perubahan kadar  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  akibat interaksi xanthate dengan hornblende

Tahap Flotasi	Dosis SEX (g/t)	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (ppm)	Keterangan
Feed IRM	–	184	Hornblende masih tersisa pasca IRM
Tahap 1	100	370	Hornblende ikut terflotasi dengan kuarsa
Tahap 2	500	105	Hornblende terpisahkan ke tailing

Sumber: Data laboratorium (2025)

Dengan demikian, peran xanthate dalam penelitian ini bukan hanya sebagai kolektor umum, tetapi juga sebagai kolektor selektif terhadap mineral Fe-silikat seperti hornblende. **Integrasi IRM dan flotasi xanthate** terbukti saling melengkapi: IRM efektif menurunkan mineral Fe magnetik, sementara xanthate menargetkan mineral paramagnetik yang tidak dapat diatasi dengan metode fisika murni. Temuan ini menegaskan bahwa peningkatan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  pada flotasi tahap pertama bukanlah kegagalan metode, melainkan indikasi perlunya optimasi dosis reagen agar selektivitas pemisahan tercapai dan standar kualitas industri terpenuhi.

## 6. Implikasi Teknis dan Regulasi

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi antara **Induced Roll Magnetic Separator (IRM)** dan flotasi berbasis xanthate mampu menghasilkan konsentrat pasir silika dengan kualitas tinggi, yaitu  **$\text{SiO}_2 >99,7\%$  dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3 <120$  ppm**. Pencapaian ini menegaskan efektivitas kombinasi metode fisika dan kimia dalam memperbaiki mutu pasir silika hingga memenuhi standar internasional. Dari sisi teknis, terdapat empat implikasi penting. Pertama, **selektivitas penghilangan pengotor** tercapai dengan baik: IRM efektif dalam menurunkan kandungan mineral besi magnetik seperti hematit dan magnetit, sedangkan flotasi berbasis xanthate secara khusus menargetkan pengotor paramagnetik seperti hornblende yang sulit diatasi dengan IRM (Bulatovic, 2007). Kedua, efisiensi pemulihan kuarsa sangat tinggi, ditunjukkan oleh recovery massa yang stabil di kisaran 99,8%, sehingga hampir seluruh kuarsa dapat dipertahankan dalam konsentrat. Ketiga, **optimasi dosis reagen** terbukti menjadi faktor kunci. Pada dosis rendah (100 g/t) selektivitas flotasi tidak tercapai, sehingga  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  meningkat, namun pada dosis lebih tinggi (500 g/t) kualitas konsentrat meningkat drastis hingga memenuhi spesifikasi premium. Keempat, kondisi operasi yang relatif sederhana—pH alami, impeller 800 rpm, dan penggunaan reagen standar—menunjukkan bahwa teknologi ini berpotensi diterapkan dalam skala industri tanpa memerlukan investasi besar (Amaratunga, 2012).

Dari sisi kualitas produk, hasil ini memiliki implikasi langsung terhadap pemenuhan standar industri. Banyak sektor pengguna pasir silika seperti kaca optik, panel surya, serat optik, dan semikonduktor menuntut kadar  **$\text{Fe}_2\text{O}_3 <120$  ppm** untuk menjamin kejernihan dan transparansi produk akhir (Zhao et al., 2018). Dengan tercapainya konsentrat berkualitas tinggi yang hanya mengandung 105 ppm  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , pasir silika hasil penelitian ini sudah termasuk kategori premium dan memiliki nilai tambah yang tinggi di pasar global.

Implikasi ekonomis dari metode ini juga tidak kalah penting. Dibandingkan dengan proses pelindian asam, flotasi berbasis xanthate jauh lebih efisien dari segi biaya dan lebih ramah lingkungan karena tidak menghasilkan limbah cair asam yang berpotensi mencemari lingkungan (Bulatovic, 2007). Penggunaan reagen juga relatif terbatas pada kolektor dan frother standar, sehingga biaya operasional lebih rendah. Dengan meningkatnya kualitas, nilai jual pasir silika pun naik signifikan, menjadikannya konsentrat siap ekspor dengan harga kompetitif di pasar internasional.

Dari perspektif regulasi, penelitian ini sangat relevan dengan **Peraturan Menteri Perdagangan (Permendag) No. 21 Tahun 2024** yang memperketat ketentuan ekspor komoditas mineral, termasuk pasir silika. Regulasi ini menekankan bahwa ekspor hanya diizinkan apabila produk sudah memenuhi standar kualitas tertentu dan telah melalui proses pengolahan di dalam negeri untuk meningkatkan nilai tambah. Dengan capaian mutu konsentrat yang dihasilkan, metode IRM–flotasi xanthate tidak hanya memastikan kepatuhan terhadap kebijakan nasional, tetapi juga memperkuat posisi daya saing pasir silika Indonesia di pasar global.

Lebih jauh lagi, metode ini juga memiliki keunggulan dari sisi keberlanjutan. Dibandingkan pelindian asam, flotasi berbasis xanthate lebih ramah lingkungan karena tidak menimbulkan limbah berbahaya, lebih hemat energi karena dapat dijalankan pada kondisi pH alami, dan lebih efisien secara ekonomi karena tidak memerlukan reagen dalam jumlah besar (Amaratunga, 2012). Keunggulan ini mendukung upaya pembangunan industri mineral yang berkelanjutan sekaligus memenuhi tuntutan pasar global yang semakin sensitif terhadap isu lingkungan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memberikan dasar ilmiah dan teknis yang kuat untuk pengembangan teknologi pengolahan pasir silika nasional. Penerapan metode IRM–flotasi xanthate mendukung implementasi **Permendag No. 21/2024**, meningkatkan nilai tambah di dalam negeri, dan memperkuat daya saing ekspor pasir silika Indonesia untuk memenuhi permintaan industri bernilai tinggi seperti kaca optik, panel surya, dan semikonduktor.

#### D KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan reagen **xanthate** dalam proses flotasi efektif meningkatkan kualitas pasir silika. Peningkatan dosis kolektor dari 100 g/t menjadi 500 g/t berhasil menurunkan kadar **Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dari 370 ppm menjadi 105 ppm** sekaligus mempertahankan kadar **SiO<sub>2</sub> pada >99,7%** dengan tingkat recovery yang tinggi. Hasil ini menegaskan bahwa flotasi berbasis xanthate merupakan metode **selektif, ekonomis, dan ramah lingkungan** untuk menghasilkan konsentrat pasir silika sesuai standar industri bernilai tinggi. Selain itu, penelitian ini memberikan dasar bagi kajian lanjutan mengenai mekanisme dan optimasi penggunaan xanthate, agar potensinya dalam skala industri dapat ditingkatkan.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada **PERHAPI** atas penyelenggaraan **TPT PERHAPI 2025** dan kesempatan yang diberikan dalam proses seleksi. Penulis berharap paper ini dapat dipresentasikan dan didiskusikan dalam forum ilmiah tersebut serta memberikan kontribusi positif bagi pengembangan ilmu dan praktik pertambangan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Amaratunga, M.M. (2012): Physical beneficiation methods for silica sand, *Minerals Engineering*, 25(6), 523 – 531.
- Bulatovic, S. (2007): *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice, Volume 1*, Elsevier, Amsterdam, 497 – 505.

- Çelik, M.S., dan Kaya, E. (2025): Methods used in the beneficiation of silica sand and comparison of flotation and magnetic separation in terms of iron removal, *ResearchGate*, data diperoleh melalui situs internet: [https://www.researchgate.net/publication/286328751\\_Methods\\_used\\_in\\_the\\_beneficiation\\_of\\_silica\\_sand\\_and\\_comparison\\_of\\_flotation\\_and\\_magnetic\\_separation\\_in\\_terms\\_of\\_iron\\_removal](https://www.researchgate.net/publication/286328751_Methods_used_in_the_beneficiation_of_silica_sand_and_comparison_of_flotation_and_magnetic_separation_in_terms_of_iron_removal). Diakses pada tanggal 15 Agustus 2025.
- Othman, N., Mustaffar, M.I., Ismail, S.A., dan Ibrahim, M.H. (2023): Upgrading silica rock quality by using attrition scrubbing and magnetic separation techniques, *Materials Today: Proceedings*, 1 – 6.
- Osman, R.A. (2021): Preliminary study on upgrading silica sand from the Elwadi Elgedid, Western Desert, Egypt for compatibility with various industrial applications, *Journal of Particle Science and Technology*, 7(2), 107 – 117.
- Rajib, M., Zaman, M.M., Kabir, M.Z., Deeba, F., dan Rana, S.M. (2009): Physical upgradation and characterization of river silica of Bangladesh to be used as glass sand, *Proceedings of Int. Conf. GeoDev*, Dhaka – Bangladesh, 192 – 198.
- Rao, S.R., dan Verma, A.A., eds. (2007): *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice – Flotation of Industrial Minerals*, Elsevier, Amsterdam, 458 – 465.
- Sobota, I., dan Bedeković, G. (2024): The Effect of Operating Variables on the Performance of Column Flotation of Silica Sand, *Minerals*, 14, 341.
- Wuletaw, A., dan 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, e43426. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e43426>
- Yu, J., Ge, Y., dan Cai, X. (2016): The Desulfurization of Magnetite Ore by Flotation with a Mixture of Xanthate and Dixanthogen, *Minerals*, 6, 70.
- Zhao, Y., Li, J., dan Han, K. (2018): Selective flotation of iron-bearing minerals from silica using xanthate reagents, *International Journal of Mineral Processing*, 174, 45 – 53.