

FLOTASI KASITERIT DARI BIJIH TIMAH PRIMER TIPE SKARN ASAL PULAU BELITUNG

Cassiterite Flotation of Skarn Type Primary Tin Ore from Belitung Island

RUSTAM KAMODA* dan EDY SANWANI**

Program Studi Teknik Metalurgi-Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesha 10 Bandung 40132,

Korespondensi email: kamodarustam@gmail.com

* Kontributor Utama, ** Kontributor Anggota

ABSTRAK

Indonesia sebagai salah satu produsen timah dunia, selain memiliki cadangan timah dari endapan sekunder juga memiliki cadangan timah dari endapan primer tipe *skarn* yang terletak di Pulau Belitung. Keterdapatannya serta karakteristik mineral kasiterit pada bijih timah primer tipe *skarn* dapat dikonfirmasi melalui karakterisasi sampel dan berpotensi untuk dipisahkan dari mineral-mineral pengotornya dengan metode flotasi. Ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi pemisahan mineral berharga dari pengotor melalui metode flotasi yaitu asosiasi mineral, skema penggunaan jenis kolektor, kondisi pH, penggunaan depresan dan lain-lain. Hasil karakterisasi sampel menunjukkan bahwa bijih timah primer tipe *skarn* asal Pulau Belitung mengandung Sn dengan kadar rendah yaitu 0,1615% dalam bentuk mineral kasiterit. Percobaan flotasi yang dilakukan terdiri dari dua skema. Skema pertama yaitu flotasi menggunakan kolektor SHA, SO dan SHA+SO dengan variasi pH 6, 7, 8, dan 9 dan skema kedua yaitu flotasi dengan penggunaan dan tanpa penggunaan depresan pada pH 8 untuk masing-masing jenis kolektor. Perolehan, kadar produk, *percent mass pull*, nisbah pengayaan, efisiensi pemisahan, dan indeks selektivitas merupakan parameter-parameter yang digunakan untuk menilai performa flotasi. Hasil percobaan menunjukkan bahwa flotasi kasiterit pada variasi pH cenderung menunjukkan performa yang lebih baik pada pH 8. Flotasi dengan variasi jenis kolektor menunjukkan bahwa *recovery* Sn kolektor SHA < SO < SHA+SO. Jika ditinjau dari segi kadar pada konsentrat, maka kadar Sn SO < SHA+SO < SHA. Percobaan flotasi menggunakan ketiga jenis kolektor pada kondisi penggunaan dan tanpa penggunaan depresan menunjukkan bahwa performa flotasi lebih baik pada kondisi tanpa penggunaan depresan.

Kata kunci: bijih timah, *skarn*, kasiterit, flotasi, perolehan.

ABSTRACT

Indonesia as one of the world's tin producers, not only has tin reserve from secondary deposit, but also has tin reserve from *skarn*-type primary deposit located on Belitung Island. The presence and characteristics of cassiterite in *skarn*-type of primary tin ore can be confirmed through sample characterization and have the potential to be separated from impurity minerals by flotation method. There are several factors that can affect the separation of valuable mineral from impurities through the flotation method, namely minerals association, the use of collector type scheme, pH condition of flotation and the use of depressant. The result of sample characterization showed that the primary tin ore of the *skarn* type from Belitung Island contained Sn in a low concentration of 0.1615% in the form of cassiterite. The flotation experiments carried out in two schemes. The first scheme was flotation on samples using SHA, SO and SHA + SO as collectors in the different pH values (pH 6, 7, 8, and 9) and flotation with the absence and presence of depressant at pH 8 for each type of collector. Recovery, grade, percent mass pull, enrichment ratio, separation efficiency, and selectivity index were the parameters used to assess flotation performance. Generally, the experimental results showed that cassiterite flotation in different pH values tend to show a better performance at pH 8. The flotation results of the three type of collectors showed that the recovery of Sn from SHA collector < SO < SHA+SO. In term of grade in the concentrate, the Sn grade of SO < SHA+SO

< SHA collector. Flotation experiments from the three type of collectors in the absence and presence of depressant showed that flotation performance was better in the absence of depressant.

Keywords: tin ore, skarn, cassiterite, flotation, recovery.

PENDAHULUAN

Timah memiliki banyak sifat penting seperti kelenturan, keuletan, konduktivitas listrik, plastisitas, titik leleh rendah dan ketahanan terhadap korosi (Angadi dkk., 2015; Tian, Gao, dkk., 2018; Jin dkk., 2021). Sifat-sifat tersebut yang menjadikan timah sebagai salah satu logam yang banyak digunakan dalam manufaktur solder, timah lempengan, paduan logam, produk kimia (Jin dkk., 2021), sensor gas, deteksi elektrokimia ion logam berat dan pipa saluran air (Tian, Liu, dkk., 2018). Untuk memenuhi kebutuhan ini, maka kegiatan penambangan serta eksplorasi timah terus dilakukan. Sumber utama ekstraksi logam timah berasal dari mineral kasiterit (Angadi dkk., 2015; Zhao, Liu dan Feng, 2020). Secara umum, timah diproduksi dari hasil penambangan bijih timah endapan primer dan endapan sekunder (*placer/alluvial*). Produksi timah dunia dari endapan *placer* dalam bentuk kasiterit berasal dari Brasil, Thailand, Indonesia dan Malaysia, sedangkan produksi timah dari endapan primer berasal dari Cina, Bolivia, Peru, Australia, Afrika Selatan, Inggris, Jerman dan Kanada (Angadi dkk., 2015).

Berdasarkan data *United States Geological Survey*, Indonesia yang memproduksi timah dari endapan sekunder, merupakan produsen timah terbesar kedua dunia setelah Cina (USGS, 2021). Produksi timah secara terus-menerus tentunya akan menyebabkan jumlah cadangannya semakin berkurang sehingga diperlukan sumber cadangan lain seperti dari endapan primer. Salah satu tipe endapan primer yang dapat menjadi sumber cadangan timah primer yang dimiliki Indonesia adalah tipe *skarn* yang terletak di Pulau Belitung. Saat ini, proses pemisahan mineral timah pada bijih primer (endapan pada batuan induk yang keras) umumnya dilakukan melalui kombinasi antara proses gravitasi dan flotasi. Mineralogi endapan *skarn* umumnya kompleks dengan kandungan mineral-mineral utama yang kaya kalsium-silikat. Adapun karakteristik mineral kasiterit pada endapan primer umumnya berukuran halus, terdiseminasi, dan *brittle*, sehingga ketika dilakukan penggerusan akan menghasilkan mineral kasiterit yang berukuran lebih halus

(Feng dkk., 2018). Selain itu, kehadiran mineral pengotor dengan waktu tinggal yang relatif lebih singkat jika dibandingkan dengan mineral kasiterit pada tahap penggerusan dapat menghasilkan *slime* dalam jumlah signifikan (Chen dkk., 2021). Fakta-fakta tentang karakteristik bijih timah endapan primer tersebut akan mempersulit proses pemisahan mineral timah dari mineral pengotornya.

Flotasi merupakan salah satu metode konsentrasi yang umum digunakan untuk memperoleh serta meningkatkan kadar mineral berharga dari bijih dengan kadar rendah dan memiliki ukuran butir yang halus. Flotasi mineral timah yang notabene adalah kasiterit menggunakan kolektor *sodium oleate* (SO) telah banyak dilakukan sebagaimana tercatat dalam beberapa referensi antara lain oleh Xu dan Qin (2012); Ren dkk. (2014); Angadi dkk. (2015); Peng dkk. (2017); Feng, Wen, Zhao dan H. Chen (2018); Feng, Wen, Zhao dan Y. Chen (2018); Wang dkk. (2021a, 2021c, 2021b). Beberapa referensi juga membahas penggunaan kolektor lain yaitu *salicylhydroxamic acid* (SHA) dalam flotasi mineral timah (Qin dkk., 2011, 2012; Ren dkk., 2014; Tian, Gao, dkk., 2018; Zhao, Liu dan Feng, 2020; Cao dkk., 2021; Chen dkk., 2021). Kemampuan kolektor *sodium oleate* yang tinggi dalam mengapungkan mineral kasiterit telah terbukti dari percobaan-percobaan yang dilaporkan dalam berbagai referensi tersebut di atas, namun kurang selektif terhadap kehadiran mineral pengotor khususnya mineral oksida. Berbeda halnya dengan kolektor *sodium oleate*, kolektor *salicylhydroxamic* memiliki tingkat perolehan yang rendah, namun cenderung lebih selektif terhadap kehadiran mineral pengotor. Selektivitas dari kolektor dapat ditingkatkan dengan penggunaan depresan pada proses flotasi. Pemilihan depresan tergantung pada jenis dan jumlah mineral pengotor yang terkandung dalam bijih yang akan diproses. Depresan yang telah umum digunakan dalam flotasi berbagai jenis bijih terutama mengandung mineral silika dan besi oksida adalah *sodium silicate* (SS) dan *starch* (ST) (Abaka-Wood dkk., 2019). Kombinasi dari dua depresan tersebut juga dapat digunakan dengan

tujuan untuk memberikan efek *depression* terhadap kehadiran beberapa jenis mineral pengotor pada bijih yang kompleks.

Meskipun belum ada penelitian yang spesifik menjelaskan tentang flotasi kasiterit dari bijih timah primer tipe *skarn*, namun berdasarkan uraian di atas, maka upaya pemisahan kasiterit dengan metode flotasi memungkinkan untuk diterapkan. Pada penelitian ini, flotasi kasiterit dari bijih timah primer tipe *skarn* yang berasal dari Pulau Belitung dilakukan menggunakan kolektor *salicylhydroxamic acid* (SHA), *sodium oleate* (SO), dan campuran keduanya (SHA+SO; rasio 1:1) serta campuran *sodium silicate* dan *starch* sebagai depresan.

METODE

Percobaan Flotasi

Sampel yang digunakan dalam percobaan flotasi merupakan bijih timah primer tipe *skarn* yang berasal dari Pulau Belitung. Umpan flotasi merupakan produk P₁₀₀ 140# dari proses *grinding* menggunakan *jar mill*. Percobaan flotasi dilakukan di Laboratorium Pengolahan Bahan Galian Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung. Jenis percobaan flotasi yang dilakukan adalah *selective flotation* pada tahap *rougher*

menggunakan mesin flotasi Denver dengan kapasitas 1,5 liter.

Alat

Secara umum, kegiatan yang dilakukan dalam percobaan ini yaitu preparasi sampel dan percobaan flotasi. Alat-alat yang digunakan dalam percobaan ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam percobaan ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Nama dan fungsi bahan-bahan yang digunakan dalam percobaan flotasi

Nama	Fungsi
Preparasi sampel:	
1. Bijih timah tipe <i>skarn</i> produk <i>jaw crusher</i>	Umpan pada proses penggerusan dan proses preparasi lanjutannya.
Flotasi:	
1. <i>Salicylhydroxamic acid</i> dan <i>sodium oleate</i>	Kolektor
2. <i>Soluble starch</i> dan <i>sodium silicate</i>	Depresan
3. <i>Methyl Isobutyl Carbinol</i> (MIBC)	<i>Frother</i>
4. HCl dan NaOH	Pengatur pH
5. Akuades	Bahan pengencer untuk pembuatan <i>slurry</i> .
6. <i>pH buffer</i>	Bahan untuk kalibrasi pH meter

Tabel 1. Nama dan fungsi alat-alat yang digunakan dalam percobaan flotasi bijih timah primer tipe *skarn*

Nama	Fungsi
Preparasi sampel:	
1. <i>Ball mill</i>	Penggerus sampel
2. <i>Sieve shaker</i>	Mesin pengayak sampel
3. Saringan 140#	Penyaring sampel untuk mendapatkan produk -140#
4. Plastik	Wadah untuk proses pemercontaan sampel
5. Mistar <i>stainlees steel</i>	Pemisah/pembagi sampel pada proses <i>quartering</i>
6. Kuas	Membersihkan partikel-partikel yang melekat pada saringan
7. Timbangan biasa	Penimbang sampel
8. Oven	Pengering produk hasil flotasi
9. Kontainer plastik	Wadah penyimpanan sampel
Flotasi:	
1. Mesin flotasi	Untuk proses flotasi
2. pH meter	Pengukur pH <i>pulp</i>
3. Gelas kimia	Pengukur volume aquades
4. Pipet tetes	Penyedot larutan kimia dari wadahnya (HCl, NaOH, dan <i>frother</i>)
5. Botol penyemprot	Pembersih produk flotasi dari impeller dan sel flotasi
6. Spatula	Untuk menyendok bahan kimia (padatan) dari wadahnya (kolektor, depresan)
7. Loyang <i>stainlees</i>	Wadah penampung produk hasil flotasi
8. Timbangan analitik	Penakar reagen kimia

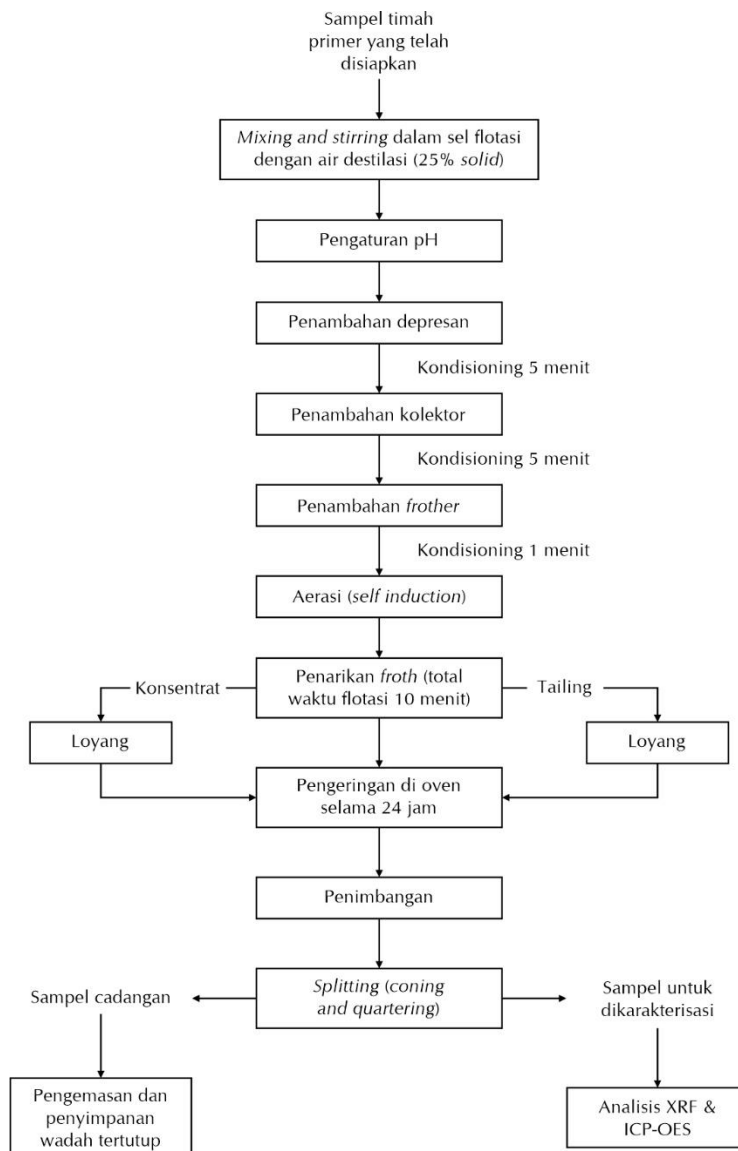
Prosedur percobaan

Sampel yang telah disiapkan dari kegiatan preparasi digunakan sebagai umpan untuk percobaan flotasi. Sampel yang digunakan sebagai umpan adalah P₁₀₀ 140#. Berikut adalah langkah-langkah yang dilakukan dalam percobaan flotasi:

1. Umpan dimasukkan ke sel flotasi dengan *percent solid* 25%;
2. pH campuran diatur dengan menambahkan NaOH dan/atau HCl hingga mencapai nilai pH yang diinginkan;
3. Depresan, kolektor dan *frother* ditambahkan ke dalam *pulp* secara berurutan dengan masing-masing *conditioning time* yang telah ditentukan;

4. Penginjeksian udara dan dilanjutkan dengan penarikan konsentrat hasil flotasi secara teratur pada selang waktu tertentu;
5. Konsentrat dan *tailing* hasil flotasi dikeringkan dalam oven selama ±24 jam pada suhu 100°C kemudian didinginkan dan ditimbang;
6. Sampel konsentrat dan *tailing* dianalisis menggunakan XRF dan ICP-OES untuk menentukan kadar unsur-unsurnya.

Gambar 1 merupakan diagram alir prosedur percobaan flotasi yang dilakukan pada penelitian ini.



Gambar 1. Diagram alir prosedur percobaan flotasi

Adapun skema percobaan flotasi yang dilakukan secara umum adalah flotasi dengan variasi jenis kolektor pada masing-masing nilai pH 6, 7, 8 dan 9 dengan penggunaan depresan SS+ST dan *frother* MIBC dan flotasi pada kondisi pH yang menunjukkan performa terbaik berdasarkan percobaan sebelumnya (skema I, II, dan III pada Tabel 3) tanpa penggunaan depresan untuk masing-masing jenis kolektor. Rincian skema percobaan flotasi dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Skema percobaan flotasi kasiterit dengan umpan -140#, dosis kolektor 1.500 g/t, dosis *frother* 250 g/t pada *conditioning time* 5 menit dan waktu flotasi 10 menit

Kode Sampel	Dosis Depresan (g/t)	
I	IA	3.000
	IB	3.000
	IC	3.000
	ID	3.000
II	IIA	3.000
	IIB	3.000
	IIC	3.000
	IID	3.000
III	IIIA	3.000
	IIIB	3.000
	IIIC	3.000
	IIID	3.000
IC	0	
IIC	0	
IIIC	0	

Keterangan:

I (A,B,C,D) : Kolektor SHA pada variasi pH (6,7,8,9)

II (A,B,C,D) : Kolektor SO pada variasi pH (6,7,8,9)

III (A,B,C,D) : Kolektor SHA + SO pada variasi pH (6,7,8,9)

IC : Kolektor SHA pada pH 8 tanpa penggunaan depresan

IIC : Kolektor SO pada pH 8 tanpa penggunaan depresan

IIIC : Kolektor SHA + SO pada pH 8 tanpa penggunaan depresan

Karakterisasi Sampel

Informasi mengenai komposisi kimia dari sampel timah primer tipe *skarn* yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh melalui proses karakterisasi sampel menggunakan analisis XRD, XRF dan ICP-OES. Analisis XRD dilakukan untuk mengetahui jenis dan jumlah mineral yang terkandung di dalam sampel; analisis XRF untuk mengetahui komposisi unsur-unsur mayor sampel dan

analisa ICP-OES untuk mengetahui komposisi unsur timah (Sn). Analisis ICP-OES dikhususkan terhadap Sn sebagai unsur target yang konsentrasinya kecil dalam sampel sekaligus untuk mengonfirmasi hasil analisis XRF. Sampel-sampel yang telah disiapkan dan membutuhkan proses karakterisasi kemudian dilakukan proses pemercontohan (*homogenisasi, coning and quartering*) untuk mendapatkan sampel yang representatif dan selanjutnya dianalisis menggunakan XRD, XRF dan ICP-OES.

Parameter Performa Flotasi

Baik buruknya suatu proses flotasi dinyatakan dengan istilah performa flotasi. Performa flotasi dapat dinilai dengan menggunakan parameter-parameter yang telah umum digunakan untuk menilai suatu proses konsentrasi. Parameter-parameter tersebut adalah perolehan dan kadar. Berdasarkan perolehan dan kadar kemudian dikembangkan untuk memperoleh parameter-parameter lainnya seperti nisbah pengayaan (*enrichment ratio* (ER)), efisiensi pemisahan (*separation efficiency* (SE)), dan indeks selektivitas (*selectivity index* (SI)).

1. Perolehan dan kadar

Istilah perolehan pada bijih merupakan persen total logam yang dapat diperoleh pada konsentrat suatu proses, sedangkan kadar (*grade/assay*) merupakan kandungan dari komoditas-komoditas yang dapat dipasarkan dari beberapa alir proses seperti pada umpan dan konsentrat (Wills dan Finch, 2016). Perolehan (R) umumnya dituliskan sebagai berikut:

$$R = \frac{C \cdot c}{F \cdot f} \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

dengan:

R : Perolehan (%),

C : Massa konsentrat (g),

c : Kadar logam/mineral konsentrat (%),

F : Massa umpan (g)

f : Kadar logam/mineral umpan (%).

2. Percent mass pull

Percent mass pull merupakan material (massa) yang terapung sebagai *froth* ke dalam konsentrat. Jumlah massa harus sekecil mungkin untuk menghasilkan flotasi yang selektif. Prinsip flotasi selektif adalah untuk mengapungkan dan mengumpulkan

mineral berharga sebanyak mungkin ke dalam massa konsentrat yang sesedikit mungkin. Secara matematis, *percent mass pull* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\% \text{ Massa} = \frac{C}{F} \dots\dots\dots(2)$$

3. Nisbah pengayaan (ER)

Salah satu parameter yang juga digunakan untuk mengukur efisiensi proses metalurgi adalah nisbah pengayaan (*enrichment ratio*). ER merupakan perbandingan antara kadar dari konsentrat terhadap kadar dari umpan (Wills dan Finch, 2016). Nisbah pengayaan secara matematis dituliskan sebagai berikut:

$$ER = \frac{C}{f} \dots\dots\dots(3)$$

dengan:

ER : Nisbah pengayaan

4. Efisiensi pemisahan (SE)

Perolehan dan kadar dapat dikombinasikan untuk membentuk indeks lain seperti SE. SE telah didefinisikan oleh Hancock sebagai perbedaan antara perolehan mineral berharga dan perolehan mineral pengotor pada konsentrat (Irannajad, Nuri dan Allahkarami, 2018).

$$SE = \frac{C}{F} \left(\frac{c}{f} - \frac{(m - c)}{(m - f)} \right) \dots\dots\dots(4)$$

dengan:

SE : Efisiensi pemisahan

m : Kadar maksimum mineral (%)

5. Indeks selektivitas (SI)

Gaudin merekomendasikan indeks selektivitas sebagai parameter untuk menilai efisiensi proses pemisahan dua produk (Nuri dkk., 2017). Indeks selektivitas adalah rata-rata geometris dari *depression* dan perolehan relatif dari dua komponen (mineral, logam, atau kelompok mineral atau logam) (Irannajad, Nuri dan Allahkarami, 2018). Indeks selektivitas dapat dituliskan sebagai berikut (Tian, Gao, dkk., 2018):

$$SI = \sqrt{\frac{Ra \times Jb}{(100 - Ra) \times (100 - Jb)}} \dots\dots\dots(5)$$

dengan:

Ra : Perolehan mineral berharga dalam konsentrat (%).

Jb : Perolehan mineral pengotor dalam *tailing* (%).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Sampel

Karakterisasi sampel yang dijadikan sebagai umpan flotasi menggunakan XRD, XRF, dan ICP-OES memberikan informasi mengenai komposisi mineral dan *head grade* sampel timah primer tipe *skarn*.

1. Komposisi mineral

Komposisi (jenis dan kuantitas) mineral-mineral yang terkandung dalam sampel diperlukan sebagai informasi dasar untuk menentukan skema penggunaan reagen dalam proses flotasi yang akan dilakukan. Identifikasi dan kuantifikasi puncak-puncak difraktogram hasil analisis XRD dilakukan untuk mengetahui jenis dan persentase fasa-fasa mineral yang terkandung dalam sampel. Komposisi mineral-mineral hasil pengolahan difraktogram sampel bijih timah primer tipe *skarn* dapat dilihat pada Tabel 4.

Mineral-mineral seperti kuarsa, fluorit, vesuvianit, wolastonit, muskovit, feldspar, dan epidot merupakan mineral pengotor utama dengan persentase total sebesar 78,8% dari kandungan sampel. Selain itu, mineral-mineral seperti kalsit, andradit, ferosilit, aktinolit, spinel, siderit, hematit, hersinit, magnesioferit, pirope, magnetit, dan franklinit yang juga merupakan mineral pengotor tambahan dengan persentase total sebesar 21,2%. Adapun mineral berharga pada sampel yang menjadi target konsentrasi pada penelitian ini yaitu kasiterit (SnO₂) dengan persentase 0,1%.

Ditinjau dari pengelompokan mineral berdasarkan komposisi kimianya, mayoritas mineral penyusun sampel merupakan kelompok mineral silikat (kuarsa, vesuvianit, wolastonit, muskovit, feldspar, epidot, andradit, ferosilit, aktinolit, dan pirope). Kelompok mineral lainnya yaitu kelompok halida (fluorit); kelompok

karbonat (kalsit dan siderit) serta kelompok oksida (spinel, hematit, hersinit, magnesioferit, magnetit, franklinit, dan kasiterit). Kompleksitas mineralogi endapan tipe *skarn* memperbesar kemungkinan adanya fasa-fasa mineral dalam sampel yang belum teridentifikasi, terutama fasa mineral dengan persentase kandungan yang kecil.

2. *Head grade* sampel

Komposisi unsur mayor dalam sampel timah primer tipe *skarn* ditentukan melalui analisis XRF, sedangkan kandungan unsur minor seperti Sn dikonfirmasi melalui analisis ICP-OES. *Head grade* dari bijih timah tipe *skarn* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 5. Hasil analisis XRF menunjukkan bahwa Ca, Fe, Si, dan Al merupakan unsur-unsur mayor dengan komposisi tinggi pada sampel timah primer. Unsur-unsur lain seperti K, Mn, Zn, Sn, S, Rb, As, Cu, Sr, Zr dan V juga terdeteksi dalam sampel dengan konsentrasi yang kecil. Berdasarkan hasil analisis ICP-OES, Sn sebagai unsur berharga yang akan dijadikan target proses konsentrasi dalam fasa SnO₂ memiliki *head grade* sebesar 0,1615%. Kadar Sn hasil analisis ICP-OES lebih kecil jika

dibandingkan dengan hasil XRF yaitu sebesar 0,182% (kadar Sn dari 0,26% SnO₂). Hal ini disebabkan oleh perbedaan tingkat keakuratan dari kedua metode analisis tersebut. Konsentrasi Sn yang kecil serta kompleksitas kandungan mineral yang tinggi pada sampel dapat menurunkan tingkat keakuratan hasil analisis XRF. Kadar Sn yang dijadikan data untuk perhitungan perolehan Sn pada penelitian ini adalah hasil analisis ICP-OES. Hal ini dilakukan karena hasil analisis ICP-OES terhadap unsur dengan kadar kecil memiliki tingkat akurasi yang lebih baik daripada XRF. Kadar unsur pengotor utama hasil analisis XRF seperti Ca, Si, Fe dan Al, dijadikan sebagai data untuk penentuan perolehan unsur-unsur pengotor utama dari hasil flotasi.

Kadar Sn pada sampel timah primer yang digunakan dalam penelitian ini lebih rendah dari kadar rata-rata bijih timah primer yang telah berhasil dilakukan proses konsentrasi dengan kadar rata-rata 0,4 – 1,5% (Angadi *dkk.*, 2015). Kondisi ini menjadi salah satu tantangan dalam proses flotasi yang dilakukan untuk memperoleh dan meningkatkan kadar Sn yang sangat rendah pada umpan.

Tabel 4. Komposisi mineral bijih timah tipe *skarn* hasil analisis XRD

Nama	Rumus Kimia	Jumlah (%)
Kuarsa	SiO ₂	23,3
Fluorit	CaF ₂	21,2
Vesuvianit	Ca ₁₀ (Mg,Fe) ₂ Al ₄ (SiO ₄) ₅ (Si ₂ O ₇) ₂ (OH,F) ₄	13,8
Wolastonit	CaSiO ₃	7,1
Muskovit	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂	5,3
Feldspar	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	4,2
Epidot	Ca ₂ (Al ₂ ,Fe)(Si ₂ O ₇)(SiO ₄)O(OH)	3,9
Kalsit	CaCO ₃	2,6
Andradit	Ca ₃ Fe ₂ Si ₃ O ₁₂	2,5
Ferosilit	FeSiO ₃	2,5
Aktinolit	Ca ₂ (Mg _{4,5-2,5} Fe _{0,5-2,5})Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	2,3
Spinel	Al ₂ MgO ₄	2,2
Siderit	FeCO ₃	2,2
Hematit	Fe ₂ O ₃	1,6
Hersinit	Fe ²⁺ Al ₂ O ₄	1,2
Magnesioferit	Fe ₂ MgO ₄	1,1
Piropo	Mg ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	1,1
Magnetit	Fe ₃ O ₄	1,0
Franklinit	ZnFe ₂ O ₄	0,8
Kasiterit	SnO ₂	0,1

Tabel 5. Komposisi kimia sampel hasil analisis XRF (oksida) dan ICP-OES (unsur)

Rumus Kimia	Komposisi Kimia (%)
Fe ₂ O ₃	29,98
CaO	29,60
SiO ₂	26,02
Al ₂ O ₃	10,19
K ₂ O	2,29
MnO	0,61
ZnO	0,39
SnO ₂	0,26
SO ₃	0,11
Rb ₂ O	0,10
As ₂ O ₃	0,06
CuO	0,04
SrO	0,01
ZrO ₂	0,01
V ₂ O ₅	0,01
Sn*	0,16

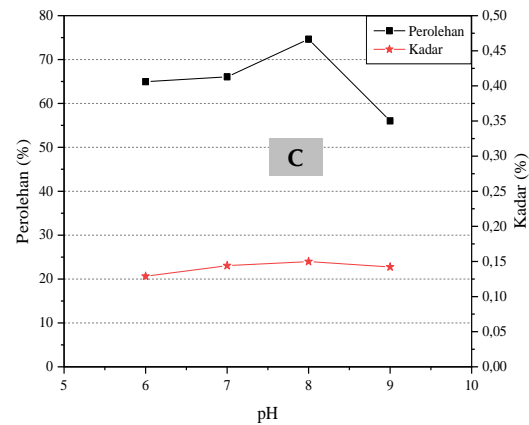
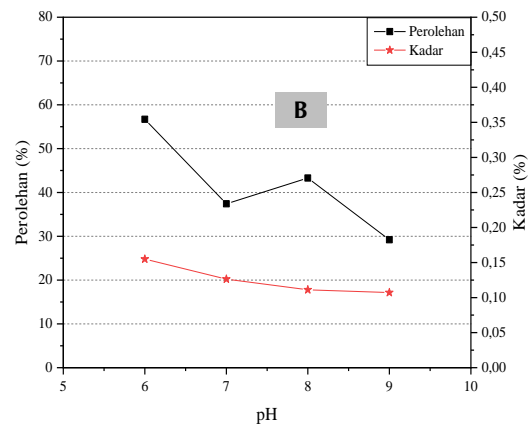
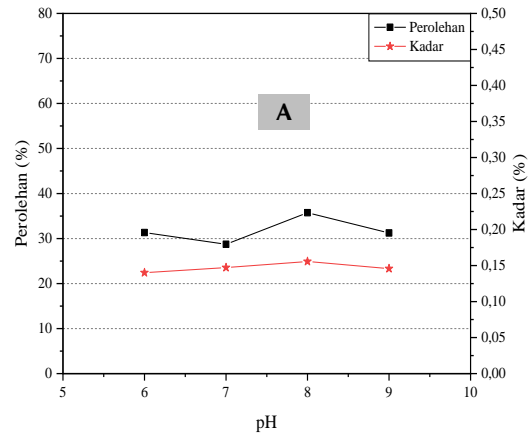
Keterangan :
* : Hasil ICP-OES

Percobaan Flotasi dengan Penggunaan Depresan pada Variasi pH

Jenis flotasi yang diterapkan dalam upaya pemisahan kasiterit dari bijih timah primer tipe *skarn* adalah *selective flotation*. Parameter-parameter yang digunakan untuk menilai performa flotasi pada penelitian ini yaitu perolehan dan kadar Sn serta unsur-unsur pengotor utama (Ca, Si, Fe dan Al), *percent mass pull*, nisbah pengayaan (ER), efisiensi pemisahan (SE) dan indeks selektivitas (SI).

A. Perolehan dan kadar Sn

Gambar 2 menunjukkan perolehan dan kadar Sn hasil flotasi sampel timah primer tipe *skarn* menggunakan kolektor SHA, SO, dan SHA+SO pada variasi pH 6, 7, 8, dan 9. Secara umum, hasil percobaan menunjukkan bahwa flotasi kasiterit menggunakan kolektor SHA, SO dan SHA+SO pada variasi pH dengan penggunaan depresan cenderung menunjukkan performa yang baik pada pH 8. Berdasarkan Gambar 2 (A), jika ditinjau dari masing-masing kondisi pH, perolehan tertinggi tercapai pada pH 8 dengan nilai perolehan sebesar 35%. Flotasi cenderung memperlihatkan nilai perolehan Sn yang lebih rendah pada pH basa (pH 9) dan pH normal ke asam (pH 7 ke pH 6).



Gambar 2. (A) Pengaruh pH terhadap perolehan dan kadar Sn menggunakan kolektor SHA, (B) pengaruh pH terhadap perolehan dan kadar Sn menggunakan kolektor SO, dan (C) pengaruh pH terhadap perolehan dan kadar Sn menggunakan kolektor SHA + SO

Berdasarkan penelitian percobaan flotasi sebelumnya, penggunaan kolektor SHA tanpa aktivator menghasilkan nilai *recovery* maksimum SHA yang kecil yaitu sekitar 36,51% pada flotasi mineral murni campuran kasiterit dan kalsit dengan pH 7

– 8 (Tian, Gao, *dkk.*, 2018), dan sekitar 38% pada flotasi kasiterit murni di pH 2 – 12 (Cao *dkk.*, 2021). Rendahnya perolehan kasiterit menggunakan kolektor SHA pada penelitian ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti; sebagian besar mineral kasiterit berukuran halus sehingga partikel tidak cukup kuat menembus lapis tipis air pada permukaan gelembung dan kandungan *slime* pada umpan yang tinggi. Selain itu, kandungan ion Ca^{2+} yang larut pada *pulp* akan berikatan kompleks dengan SHA sehingga akan turut mengonsumsi SHA. Ion Ca^{2+} dapat teradsorpsi pada permukaan kasiterit sehingga akan menutupi sisi aktif dari kasiterit untuk berinteraksi dengan SHA (Chen, Feng dan Tong, 2019). Kondisi ini akan memberi efek negatif terhadap flotasi kasiterit menggunakan kolektor SHA.

Perolehan yang rendah mengindikasikan lebih banyak timah yang terbuang bersama *tailing*. Kandungan *slime* yang tinggi mengakibatkan peningkatan kadar timah yang tidak signifikan karena sejumlah besar kandungan *slime* tersebut akan terapungkan bersama konsentrat melalui peristiwa *entrainment*. *Entrainment* adalah peristiwa terperangkapnya partikel-partikel yang berukuran halus pada celah-celah gelembung-gelembung udara sehingga akan terbawa bersama naiknya gelembung udara ke permukaan *pulp*. Selain itu, kemampuan pengapungan kolektor terhadap kasiterit yang rendah dan jumlah mineral-mineral pengotor dengan respon flotasi yang mirip dengan kasiterit masih banyak terapungkan bersama kasiterit pada konsentrat.

Dari Gambar 2 (A) terlihat bahwa *recovery* Sn naik pada pH asam (pH 6), namun diperlukan percobaan lanjutan untuk dapat menjustifikasi hasil tersebut. Salah satu faktor yang dapat mempengaruhi kondisi tersebut adalah komposisi kimia *pulp* yang kompleks akibat kompleksitas mineralogi dari umpan dan penggunaan pH regulator yaitu HCl dalam jumlah yang signifikan akibat sulitnya pengaturan pH pada kondisi asam.

Gambar 2 (B) menampilkan perolehan dan kadar Sn pada flotasi timah primer tipe

skarn menggunakan kolektor SO. Seperti halnya dengan penggunaan kolektor SHA, perolehan Sn pada pH asam (pH 6) cenderung naik jika dibandingkan dengan perolehan Sn pada kondisi pH netral sampai dengan pH basa (pH 7 – 9). Terlihat juga bahwa kadar Sn pada pH 6 lebih tinggi jika dibandingkan dengan kadar Sn pada pH lainnya. Fenomena ini cenderung tidak sesuai dengan perolehan kasiterit pada umumnya. Kasiterit cenderung memiliki flotabilitas yang rendah pada kondisi asam jika dibandingkan dengan kondisi pH yang mendekati netral (pH 6,5- 8) (Xu dan Qin, 2012; Chen *dkk.*, 2018; Feng, Wen, Zhao dan H. Chen, 2018; Feng, Wen, Zhao dan Y. Chen, 2018). Salah satu faktor yang mungkin menjadi penyebab dari fenomena ini yaitu penggunaan regulator pH yaitu HCl dalam jumlah yang tinggi sehingga dapat menciptakan kondisi elektro-kimia *pulp* yang dapat meningkatkan *recovery* kasiterit. Namun demikian, diperlukan kajian lanjutan untuk dapat mengkonfirmasi asumsi tersebut.

Secara umum, nilai perolehan kasiterit dari kolektor SO tergolong rendah meskipun kolektor SO dikenal sebagai kolektor dengan kemampuan pengapungan yang tinggi (Chen *dkk.*, 2018) pada mineral silikat dan oksida. Fenomena rendahnya *recovery* Sn pada penggunaan kolektor SO membutuhkan penelitian lanjutan untuk mengkonfirmasi faktor penyebabnya. Dosis kolektor, kehadiran *slime* dan komposisi mineral-mineral yang mengandung Ca, Al, Fe dan Mg dapat memberikan efek yang buruk terhadap *recovery* dan peningkatan kadar pada proses flotasi. Terkait dengan dosis kolektor SO yang digunakan, dosis kolektor yang lebih tinggi akan mengakibatkan adsorpsi multilayer pada permukaan mineral sehingga dapat memberikan efek yang buruk terhadap upaya flotasi yang dilakukan (Patra *dkk.*, 2019). Telah diketahui bahwa kalsit memiliki respon flotasi yang mirip dengan kasiterit, sehingga fenomena ini juga dapat terjadi pada mineral kasiterit (Tian, Gao, *dkk.*, 2018).

Gambar 2 (C) menampilkan perolehan dan kadar Sn pada proses flotasi menggunakan kolektor campuran SHA dan SO (SHA + SO)

dengan perbandingan 1:1. Nilai perolehan Sn dengan menggunakan kolektor SHA+SO lebih tinggi jika dibandingkan dengan perolehan Sn menggunakan kolektor SHA atau SO saja. Efek sinergi penggunaan kolektor SHA+SO dapat menjadi alasan lebih tingginya perolehan kasiterit dibandingkan dengan penggunaan kolektor SHA dan SO secara terpisah pada dosis yang sama (Angadi *dkk.*, 2015). Meskipun secara umum hasil flotasi dengan kolektor SHA+SO belum menunjukkan peningkatan kadar yang signifikan, namun tingkat perolehan kasiterit cenderung tinggi. Hal ini memberi peluang yang baik sekaligus tantangan untuk penelitian berikutnya terkait skema penggunaan *modifier*, terutama depresan, untuk dapat meningkatkan kadar Sn pada konsentrat. *Trend* perolehan kasiterit cenderung rendah pada kondisi pH yang lebih asam dan lebih basa namun cenderung tinggi pada pH 7 dan 8. Dari hasil flotasi juga menunjukkan bahwa *trend* kadar Sn mengikuti *trend* perolehan kasiterit. Hal ini menunjukkan bahwa perolehan kasiterit juga mengikuti persentase berat konsentrat atau *froth* produk flotasi. Perolehan dan kadar Sn tertinggi didapat pada kondisi pH 8 dengan persen perolehan dan kadar sebesar 74% dan 0,15%.

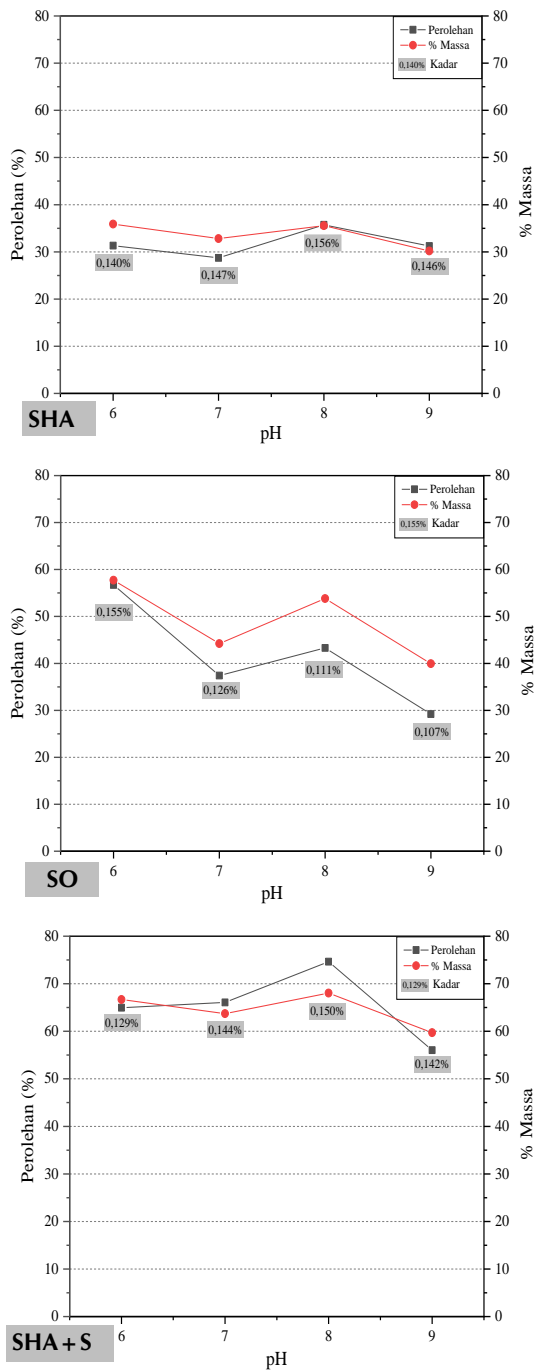
Dari hasil flotasi menggunakan ketiga jenis kolektor seperti yang telah diuraikan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa perolehan Sn dengan menggunakan kolektor $SHA < SO < SHA+SO$. Sedangkan jika ditinjau dari segi kadar Sn pada konsentrat maka $SO < SHA+SO < SHA$.

Kendala yang dihadapi dalam percobaan flotasi sampel timah primer tipe *skarn* adalah pengaturan pH pada kondisi asam (pH 6). Efek pelarutan Ca dari mineral-mineral yang mengandung Ca terutama kalsit pada pH asam akan mengakibatkan pengaturan pH (pH <7) menjadi sulit (Tian, Gao, *dkk.*, 2018). Kondisi pH *pulp* cenderung tidak

stabil ketika menggunakan HCl untuk mendapatkan pH 6. pH *pulp* cenderung naik mendekati pH netral meskipun telah dilakukan penambahan HCl dalam jumlah yang cukup banyak (± 10 ml). Kondisi ini mengakibatkan konsumsi regulator pH yaitu HCl yang cukup tinggi untuk mendapatkan kondisi pH yang diinginkan (pH 6). Fenomena ini tentunya akan memberikan dampak terhadap kondisi *pulp* dari segi *persen solid* maupun mekanisme kimiawi yang terjadi, sehingga diperlukan kajian yang lebih lanjut.

B. *Percent mass pull*

Percent mass pull umumnya akan berbanding lurus dengan perolehan pada proses flotasi dengan umpan yang terdiri dari beberapa jenis mineral. Flotasi selektif akan terjadi pada kondisi *percent mass pull* kecil dengan nilai perolehan yang tinggi. Pada percobaan flotasi bijih timah primer tipe *skarn*, perbandingan antara perolehan dan *percent mass pull* dari ketiga jenis kolektor pada variasi pH ditampilkan pada Gambar 3. Secara umum, hasil plot nilai perolehan dan *percent mass pull* mempunyai *trend* garis yang mirip. Hal ini mengindikasikan adanya korelasi yang kuat antar perolehan Sn dan *percent mass pull*. Kenaikan dan/atau penurunan nilai *percent mass pull* (terutama untuk kolektor SHA dan SO) juga akan diikuti oleh kenaikan dan/atau penurunan nilai perolehan Sn. Sedangkan pada penggunaan kolektor SHA+SO, kenaikan *percent mass pull* pada pH 6 tampak tidak diikuti oleh kenaikan nilai perolehan Sn. Hal ini mengindikasikan bahwa flotasi bijih timah primer tipe *skarn* pada pH 6 menggunakan kolektor SHA+SO lebih cenderung mengapungkan mineral-mineral pengotor. Secara umum *percent mass pull* dari masing-masing jenis kolektor tinggi pada kondisi pH 8. *Percent mass pull* yang tinggi dengan peningkatan kadar Sn yang rendah pada konsentrat dari masing-masing kolektor mengindikasikan bahwa jumlah mineral-mineral pengotor yang ikut terapungkan bersama kasiterit masih tinggi.



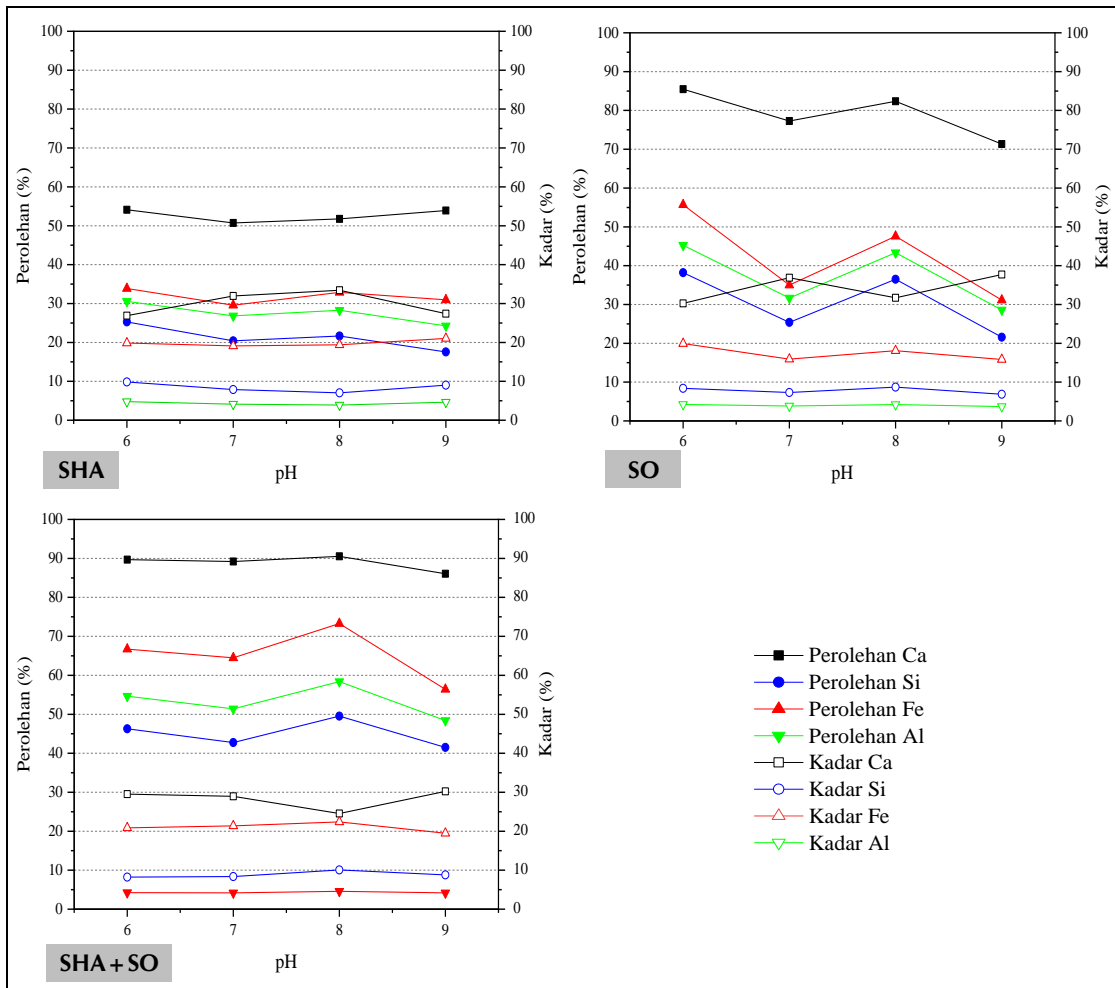
Gambar 3. Perolehan dan *percent mass pull* kolektor SHA, SO dan SHA + SO pada variasi pH

C. Perolehan dan kadar unsur pengotor
Kehadiran mineral-mineral pengotor yang memiliki respon mirip dengan kasiterit

terhadap penggunaan jenis kolektor mengakibatkan performa flotasi yang buruk. Hasil perolehan unsur-unsur mayor pengotor seperti yang ditampilkan pada Gambar 4 menampilkan *trend* garis yang mirip dengan *trend* garis perolehan dari Sn. Hal ini mengkonfirmasi adanya kemiripan respon dari mineral-mineral pengotor utama dengan respon mineral kasiterit terhadap penggunaan jenis kolektor pada setiap kondisi pH yang diuji.

Dari Gambar 4 juga terlihat bahwa perolehan unsur-unsur pengotor pada masing-masing jenis kolektor menunjukkan hasil yang serupa dengan nilai perolehan dari urutan tertinggi ke rendah yaitu Ca, Fe, Al dan Si. Perolehan Ca yang tinggi terutama diperoleh dari penggunaan kolektor SO dan SHA + SO. Hal ini mengindikasikan bahwa kolektor-kolektor tersebut tidak selektif terhadap mineral dengan kandungan unsur utama Ca seperti fluorit, vesuvianit, wolastonit, epidot, kalsit, andradit dan aktinolit. Kandungan Ca pada *pulp* akan berikatan dengan *oleate* membentuk spesies kalsium *oleate* ($\text{Ca}(\text{RCOO})_2$). Spesies ini akan menempel pada permukaan mineral fluorit dan mengakibatkan permukaan fluorit bersifat lebih hidrofobik (Qian *dkk.*, 2022). Adapun Si dengan perolehan terendah pada semua jenis kolektor mengindikasikan bahwa mineral-mineral dengan kandungan unsur Si seperti kuarsa cenderung memiliki flotabilitas yang rendah terhadap penggunaan ketiga jenis kolektor.

Perolehan unsur-unsur pengotor menggunakan kolektor SHA lebih rendah jika dibandingkan dengan penggunaan kolektor SO dan SHA+SO. Hal ini mungkin disebabkan oleh kemampuan kolektor SHA untuk mengapungkan partikel lebih rendah jika dibandingkan dengan kedua jenis kolektor lainnya. Secara komposisi kimia, kolektor SHA mempunyai jumlah rantai karbon yang lebih pendek yaitu sebanyak tujuh rantai karbon, sedangkan kolektor SO mempunyai 18 rantai karbon (Tian, Gao, *dkk.*, 2018; Wang *dkk.*, 2021a).



Gambar 4. Perolehan dan kadar Ca, Si, Fe dan Al dari ketiga jenis kolektor pada variasi pH 6, 7, 8 dan 9

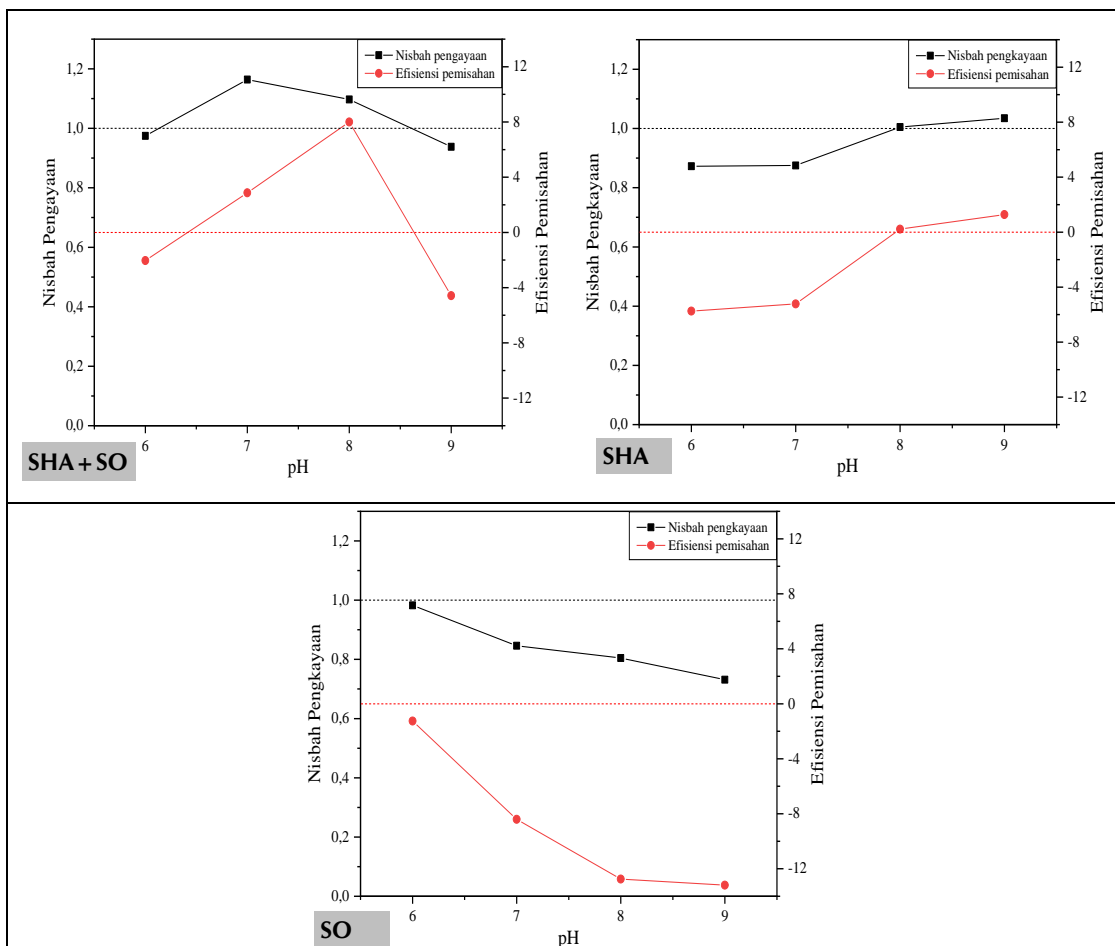
Kolektor dengan rantai karbon yang lebih panjang memiliki kemampuan pengapungan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan kolektor dengan rantai karbon yang lebih pendek (Wills dan Finch, 2016). Pada penggunaan kolektor SHA+SO, terlihat bahwa perolehan mineral-mineral pengotor dengan kandungan utama Si, Fe dan Al naik pada pH 6. Hal inilah yang menyebabkan nilai *percent mass pull* naik pada pH 6 tanpa diikuti kenaikan perolehan Sn. Secara umum, kadar dari keempat unsur mayor pada konsentrat masing-masing kolektor memperlihatkan *trend* yang cukup mirip terutama untuk kolektor SO dan SHA+SO. Persentasi kadar unsur-unsur pengotor pada konsentrat masing-masing kolektor dari urutan tertinggi ke rendah yaitu Ca, Fe, Si dan Al.

D. Nisbah pengayaan, efisiensi pemisahan dan indeks selektivitas proses flotasi
 Gambar 5 menampilkan nilai nisbah pengayaan (ER) Sn sebagai fungsi pH dari kolektor SHA, SO, dan SHA+SO. Secara umum, nilai nisbah pengayaan Sn tercatat rendah pada masing-masing pH yang diuji. Pada penggunaan kolektor SHA, pengayaan kadar Sn hanya terjadi pada kondisi pH 8 dan 9 dengan nilai nisbah pengayaan yang berada hanya sedikit di atas nilai 1 (satu) yang berarti tidak terjadi peningkatan kadar Sn yang signifikan, sedangkan pada kondisi pH 6 dan 7, nilai nisbah pengayaan tercatat kurang dari 1 yang menunjukkan tidak terjadi peningkatan kadar Sn pada konsentrat sehingga kadar Sn pada produk konsentrat lebih kecil daripada kadar Sn pada umpannya.

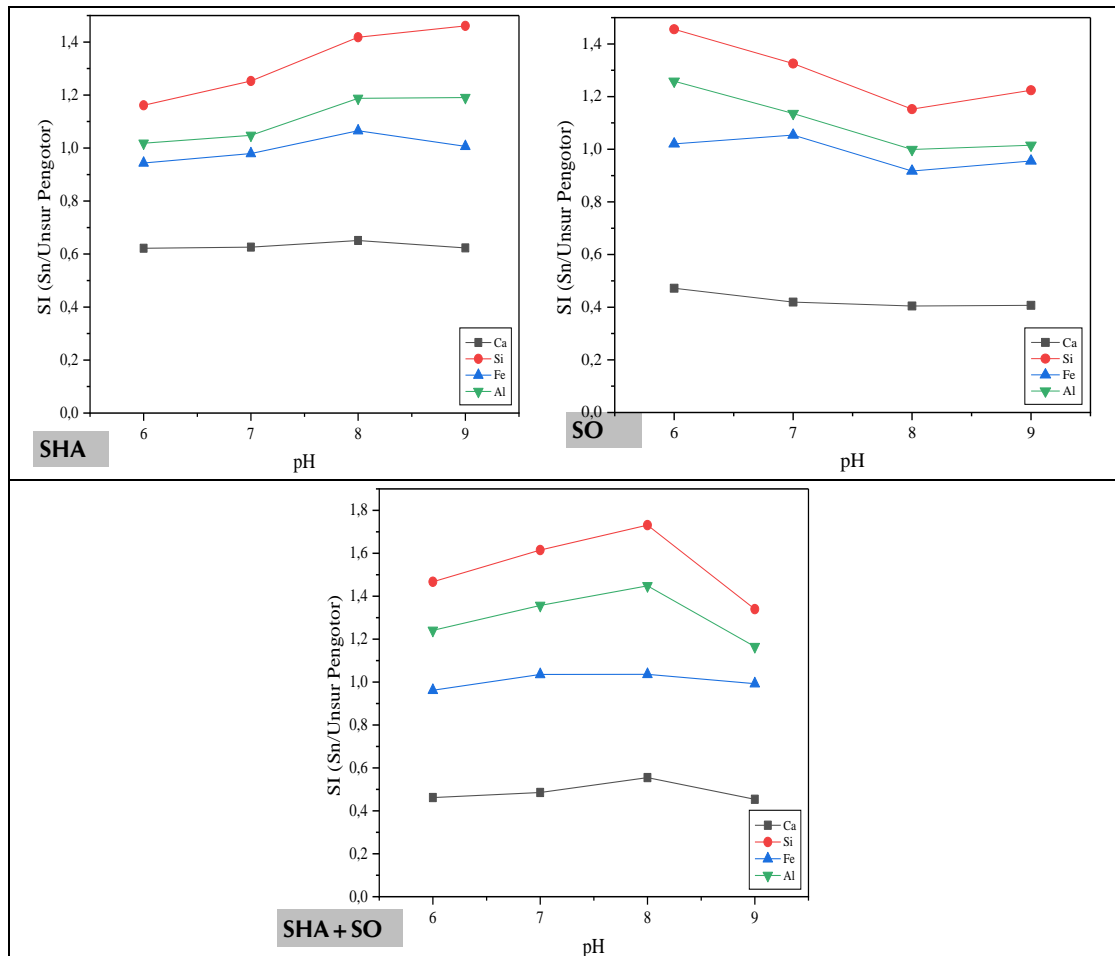
Untuk penggunaan kolektor SO, kadar Sn tidak mengalami peningkatan pada keseluruhan kondisi pH yang diuji. Nilai nisbah pengayaan Sn semakin rendah seiring meningkatnya pH. Hal ini menunjukkan bahwa kadar Sn pada produk konsentrat semakin kecil seiring kenaikan pH jika dibandingkan dengan kadar Sn di umpan. Adapun kolektor SHA+SO berhasil meningkatkan kadar Sn pada pH 7 dan 8, sedangkan hal sebaliknya terjadi pada pH 6 dan 9 yang menunjukkan bahwa Sn tidak mengalami pengayaan.

Gambar 6 menampilkan indeks selektivitas dari Sn terhadap unsur pengotor (Ca, Si, Fe Al) sebagai fungsi pH dari kolektor SHA, SO, dan SHA+SO. Dari Gambar 8, terlihat bahwa nilai selektivitas dari Sn terhadap unsur-unsur pengotor utama untuk semua

variasi pH dari tertinggi ke terendah secara berturut-turut adalah Si, Al, Fe dan Ca pada semua kolektor. Urutan nilai indeks selektivitas yang sama pada kondisi pH yang diujikan menunjukkan adanya respon yang mirip dari mineral-mineral pengotor utama terhadap penggunaan tiga jenis kolektor. Nilai indeks selektivitas yang rendah pada variasi pH yang diujikan untuk tiga jenis kolektor merupakan hal yang wajar mengingat rendahnya kadar Sn pada konsentrat sedangkan kadar unsur-unsur pengotor tinggi. Rendahnya nilai selektivitas dari ketiga jenis kolektor juga mengkonfirmasi bahwa kolektor-kolektor tersebut tidak selektif terhadap mineral-mineral pengotor pada bijih timah tipe *skarn* terutama pada mineral-mineral dengan kandungan utama Ca.



Gambar 5. Nisbah pengayaan Sn sebagai fungsi dari pH pada kolektor SHA, SO, dan SHA+SO. Garis putus-putus menandakan tidak terjadi pengayaan ($c = f$)



Gambar 6. Indeks selektivitas dari Sn terhadap unsur pengotor (Ca, Si, Fe, dan Al) sebagai fungsi pH dari kolektor SHA, SO, dan SHA + SO

Percobaan Flotasi Tanpa Penggunaan Depresan Pada pH 8

Hasil flotasi Sn pada variasi pH dengan penggunaan depresan pada masing-masing jenis kolektor belum memberikan performa flotasi yang baik. Salah satu faktor yang mungkin menjadi penyebabnya adalah kehadiran depresan yang dapat menekan kasiterit sehingga tenggelam bersama produk *tailing*. Oleh karena itu, untuk menilai bagaimana pengaruh penggunaan dan tanpa penggunaan depresan terhadap performa flotasi Sn, maka percobaan flotasi tanpa penggunaan depresan dilakukan terhadap sampel timah primer tipe *skarn* pada kondisi pH 8. Flotasi pada kondisi ini didasarkan pada hasil percobaan sebelumnya (variasi pH dengan penggunaan depresan SS + ST) yang cenderung memberikan performa yang lebih baik jika dibandingkan dengan hasil pada variasi pH lainnya (pH 6, 7, dan 9).

A. Perolehan dan kadar Sn

Gambar 7 menampilkan perolehan dan kadar Sn dengan penggunaan dan tanpa penggunaan depresan SS+ST pada pH 8. Dari Gambar 7 dapat diamati bahwa terjadi peningkatan perolehan Sn pada flotasi tanpa penggunaan depresan. Pada penggunaan kolektor SHA, terjadi peningkatan perolehan dari 36% menjadi 48%, kolektor SO dari 43% menjadi 60% dan kolektor SHA+SO dari 75% menjadi 79%. Meskipun terjadi peningkatan perolehan, namun kadar Sn mengalami penurunan untuk masing-masing jenis kolektor. Kadar Sn pada penggunaan kolektor SHA turun dari 0,156% menjadi 0,153%, kolektor SO dari 0,111% menjadi 0,101, dan kolektor SHA+SO dari 0,150% menjadi 0,144%.

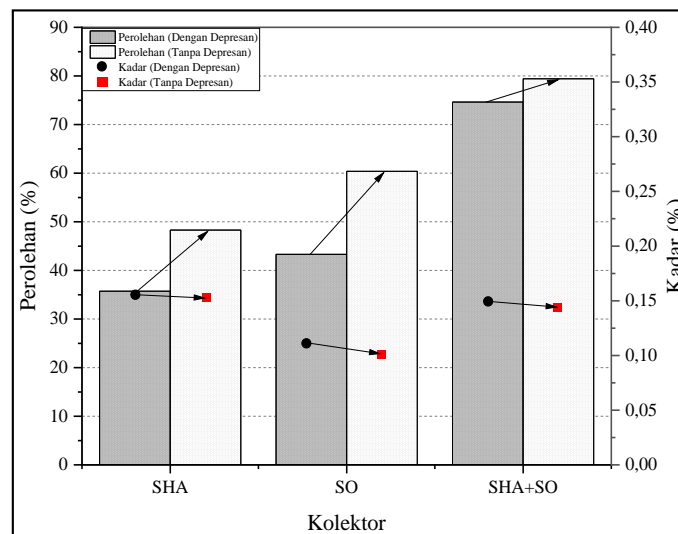
Meskipun terjadi penurunan kadar Sn pada produk konsentrat, namun penurunannya

tidak signifikan. Adanya penurunan kadar Sn menunjukkan bahwa perolehan mineral-mineral pengotor bersama kasiterit juga mengalami peningkatan. Disisi lain, adanya peningkatan perolehan Sn pada flotasi tanpa penggunaan depresan menunjukkan bahwa kehadiran depresan terbukti ikut menekan kasiterit sehingga perolehan Sn pada flotasi dengan penggunaan depresan lebih rendah. Oleh karena itu, perlu dilakukan percobaan lanjutan untuk menentukan berapa dosis depresan yang digunakan untuk mendapatkan kondisi flotasi yang optimum.

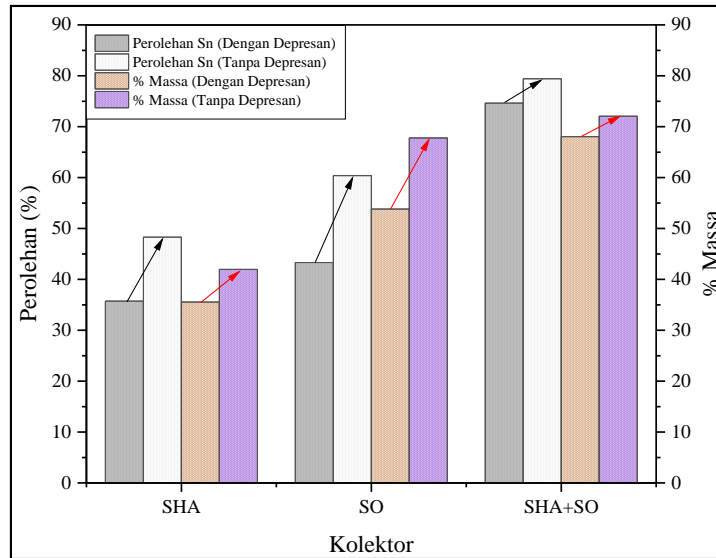
B. *Percent mass pull*

Gambar 8 menampilkan *percent mass pull* dan perolehan Sn dari flotasi bijih timah primer tipe *skarn* menggunakan kolektor SHA, SO, dan SHA+SO tanpa penggunaan depresan pada pH 8. Secara umum, hasil tersebut menunjukkan bahwa *percent mass pull* maupun perolehan Sn lebih tinggi pada flotasi tanpa penggunaan depresan dibandingkan dengan flotasi dengan penggunaan depresan. Hasil ini merupakan hal yang wajar karena kehadiran depresan selain bertujuan untuk menekan mineral-mineral pengotor, juga umumnya memberikan efek *depression* terhadap mineral berharga. *Percent mass pull* maupun perolehan Sn kolektor SHA lebih rendah dibandingkan dengan kolektor SO dan SHA+SO yang disebabkan oleh tingkat

pengapungan kolektor SHA yang lebih rendah. Namun demikian, peningkatan *percent mass pull* kolektor SHA tergolong tinggi yaitu sebesar 6,4%. Adapun kolektor SO dengan peningkatan nilai *percent mass pull* tertinggi dibandingkan kolektor SHA dan SHA+SO yaitu sebesar 13,9%, sedangkan untuk kolektor SHA+SO dengan peningkatan nilai *percent mass pul* terendah sebesar 4%. Peningkatan *percent mass pull* dari ketiga jenis kolektor diprediksi sebagian besar dipengaruhi oleh perolehan mineral-mineral pengotor yang tinggi pada konsentrat. Hal ini didasarkan pada kecilnya kadar Sn pada umpan sehingga meskipun terjadi peningkatan perolehan terhadap Sn, hal ini tidak akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai *percent mass pull*. Peningkatan nilai *percent mass pull* secara signifikan terutama untuk kolektor SO selain karena tanpa kehadiran depresan, faktor lain yang mungkin menjadi penyebab perolehan mineral fluorit melalui mekanisme adsorpsi fisika dari *metal soap* dengan mineral fluorit. Kandungan Ca yang berikatan dengan *oleate* akan meningkatkan hidrofobisitas dari fluorit sehingga menghasilkan perolehan fluorit yang tinggi. Perolehan mineral-mineral pengotor yang tinggi pada flotasi tanpa penggunaan depresan berimplikasi pada rendahnya kadar Sn dari masing-masing jenis kolektor.



Gambar 7. Perolehan dan kadar Sn kolektor SHA, SO dan SHA + SO dengan penggunaan dan tanpa penggunaan depresan pada pH 8



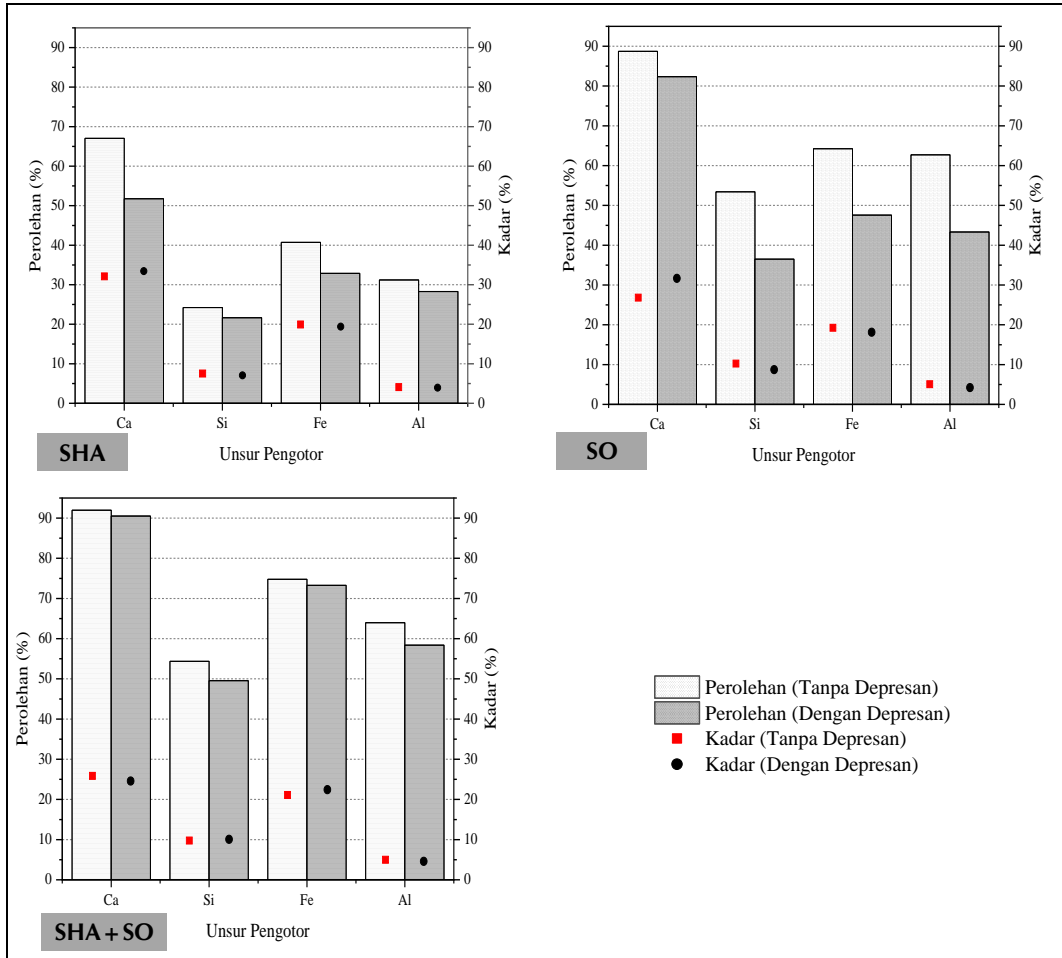
Gambar 8. Perolehan dan *percent mass pull* kolektor SHA, SO dan SHA+SO dengan penggunaan dan tanpa penggunaan depresan pada pH 8

C. Perolehan unsur pengotor dengan penggunaan dan tanpa penggunaan depresan

Gambar 9 merupakan perolehan dan kadar unsur pengotor Ca, Si, Fe dan Al pada flotasi sampel bijih timah primer tipe *skarn* dengan penggunaan dan tanpa penggunaan depresan pada kondisi pH 8. Hasil tersebut menunjukkan bahwa terdapat peningkatan perolehan untuk semua unsur pengotor utama yaitu Ca, Si, Fe, dan Al dari ketiga jenis kolektor pada flotasi tanpa penggunaan depresan. Kadar dari masing-masing unsur pengotor secara umum tidak mengalami penurunan yang signifikan meskipun terjadi peningkatan perolehan pada flotasi tanpa menggunakan depresan. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah mineral-mineral pengotor yang terapungkan bersama kasiterit. Kondisi inilah yang mengakibatkan rendahnya kadar Sn pada konsentrat.

Kolektor SHA cenderung lebih banyak mengapungkan mineral-mineral dengan kandungan utama Ca dan Fe, sedangkan kolektor SO dapat mengapungkan keseluruhan mineral-mineral pengotor

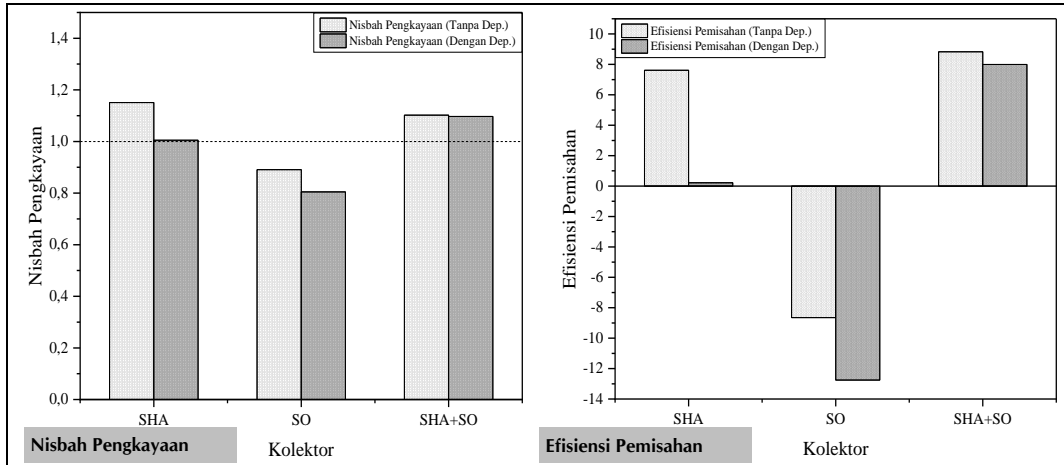
utama secara signifikan pada kondisi flotasi tanpa penggunaan depresan. Peningkatan perolehan mineral-mineral pengotor pada kolektor SHA+SO lebih rendah dibandingkan dengan kolektor SHA dan SO. Kolektor SHA+SO dapat mengapungkan sebagian besar mineral-mineral pengotor baik pada penggunaan maupun tanpa penggunaan depresan, sehingga sekalipun memberikan perolehan yang tinggi terhadap mineral kasiterit (Gambar 7), namun mengakibatkan kadar dari Sn menjadi rendah. Hasil flotasi SHA+SO dengan penggunaan dan tanpa penggunaan depresan terhadap perolehan mineral-mineral pengotor utama menunjukkan perbedaan yang tidak signifikan sehingga dapat disimpulkan bahwa penggunaan depresan dengan dosis SS+ST 3.000 g/t tidak memberikan efek *depression* yang signifikan terhadap mineral-mineral pengotor. Selain itu, proses *grinding* yang dilakukan dapat menghasilkan *slime* akibat kehadiran mineral pengotor yang bersifat *brittle* pada umpan dapat mengurangi efektifitas kerja dari depresan sehingga mengakibatkan konsumsi depresan dalam dosis yang tinggi.



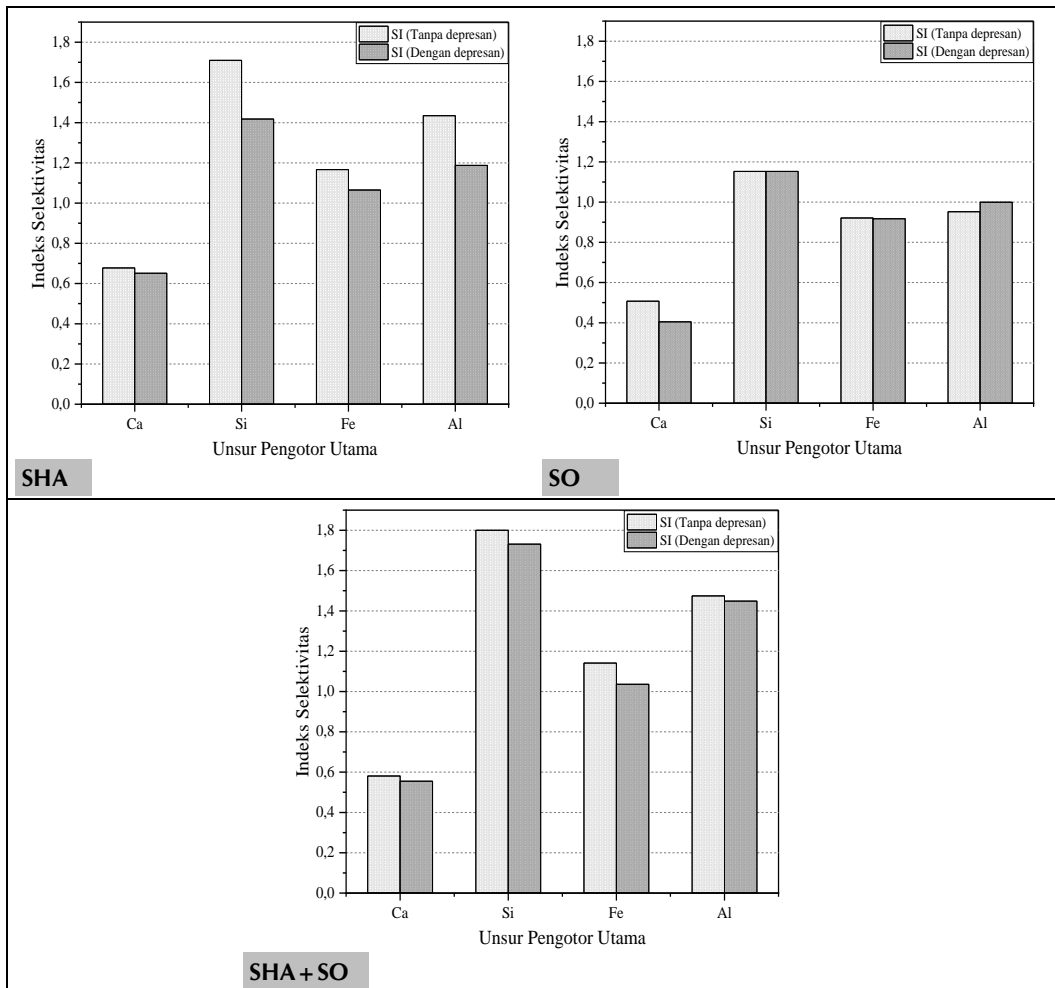
Gambar 9. Perolehan dan kadar Ca, Si, Fe dan Al dari kolektor SHA, SO dan SHA + SO dengan penggunaan dan tanpa penggunaan depresan pada pH 8

D. Nisbah pengayaan, efisiensi pemisahan dan indeks selektivitas proses flotasi
 Nilai nisbah pengayaan dan efisiensi pemisahan Sn untuk semua jenis kolektor seperti terlihat pada Gambar 10 menunjukkan bahwa performa flotasi tanpa penggunaan depresan lebih baik dibandingkan dengan flotasi dengan penggunaan depresan. Jika ditinjau dari penggunaan jenis kolektor, maka kolektor SHA + SO memberikan performa yang lebih baik dibandingkan dengan kolektor SHA dan SO. Nilai nisbah pengayaan $SHA > SHA + SO > SO$, sedangkan nilai indeks selektivitas $SHA + SO > SHA > SO$ baik pada flotasi tanpa penggunaan depresan maupun dengan penggunaan depresan. Kadar Sn konsentrat yang lebih rendah

daripada kadar umpan kolektor SO mengakibatkan nilai ER lebih kecil dari 1 ($ER < 1$) dan nilai *separation efficiency* menjadi minus ($SE < 0$). Gambar 11 merupakan indeks selektivitas dari Sn terhadap Ca, Si, Fe, dan Al dari kolektor SHA, SO, dan SHA+SO dengan penggunaan dan tanpa penggunaan depresan pada pH 8. Hasil tersebut menunjukkan bahwa flotasi kasiterit tanpa penggunaan depresan lebih selektif jika dibandingkan dengan penggunaan depresan. Hal ini disebabkan oleh perolehan Sn yang lebih tinggi pada flotasi tanpa penggunaan depresan sehingga memberikan hasil perhitungan SI yang lebih tinggi.



Gambar 10. Nisbah pengayaan Sn dari kolektor SHA, SO dan SHA + SO dengan penggunaan dan tanpa penggunaan depresan pada pH 8



Gambar 11. Indeks selektivitas dari Sn terhadap unsur pengotor (Ca, Si, Fe Al) dari kolektor SHA, SO, dan SHA + SO dengan penggunaan dan tanpa penggunaan depresan pada pH 8

Nilai SI untuk kelompok mineral dengan kandungan unsur utama Si terutama untuk kolektor SHA dan kolektor SHA+SO lebih tinggi dibandingkan dengan nilai SI untuk kelompok mineral-mineral pengotor lainnya (Ca, Fe dan Al) baik pada penggunaan depresan maupun tanpa penggunaan depresan. Hal ini mengindikasikan bahwa ketiga jenis kolektor tersebut cenderung lebih selektif terhadap mineral-mineral dengan kandungan utama Si (dalam hal ini adalah mineral kuarsa dengan kandungan yang tinggi pada bijih yang digunakan). Hal sebaliknya terjadi pada kelompok mineral dengan kandungan utama Ca yang memberikan nilai SI rendah yang mengindikasikan bahwa ketiga jenis kolektor cenderung kurang selektif terhadap kelompok mineral tersebut karena memiliki respon flotasi yang mirip dengan kasiterit.

Secara umum, hasil perbandingan nilai indeks selektivitas pada penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Tian, Gao, *dkk.* (2018) pada kondisi dengan penggunaan dan tanpa penggunaan depresan. Meskipun jenis umpan, skala flotasi, dan skema penggunaan reagen yang berbeda, namun perbandingan lebih ditekankan pada efek kehadiran depresan yang ikut menekan kasiterit. Namun demikian, dibutuhkan kajian lebih lanjut untuk menilai efek penggunaan depresan dengan variasi jenis dan dosis depresan dalam upaya flotasi kasiterit dari bijih timah primer tipe *skarn*.

KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil karakterisasi sampel menunjukkan bahwa bijih timah primer tipe *skarn* asal Pulau Belitung mengandung kasiterit dengan kadar Sn 0,1615%. Upaya pemisahan kasiterit melalui metode flotasi pada skema penggunaan 3 jenis kolektor SHA, SO, dan SHA+SO dengan variasi pH 6, 7, 8, dan 9 memberikan hasil perolehan tertinggi adalah dengan penggunaan kolektor SHA+SO > SO > SHA. Sedangkan jika ditinjau dari segi kadar Sn pada konsentrat, maka kadar Sn pada konsentrat dari proses flotasi menggunakan SHA > SHA+SO > SO. Flotasi kasiterit

cenderung memberikan performa yang lebih baik pada pH 8.

Upaya flotasi pada skema penggunaan dan tanpa penggunaan depresan pada pH 8 menunjukkan bahwa performa flotasi tanpa penggunaan depresan lebih baik dibandingkan dengan flotasi dengan penggunaan depresan. Diperlukan penelitian lanjut dengan skema penggunaan jenis dan dosis depresan, perlakuan *desliming* serta flotasi secara bertahap (*scavenger* dan *cleaner*) untuk menilai peluang pemisahan kasiterit dari bijih timah primer tipe *skarn* melalui metode flotasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) yang telah memberikan bantuan biaya untuk penelitian ini dan kepada Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)/ BRIN Lampung yang telah memfasilitasi proses karakterisasi sampel yang digunakan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abaka-Wood, G.B., Zanin, M., Addai-Mensah, J. dan Skinner, W. (2019) "Recovery of rare earth elements minerals from iron oxide-silicate rich tailings – Part 2: Froth flotation separation," *Minerals Engineering*, 142, hal. 105888. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105888>.
- Angadi, S.I., Sreenivas, T., Jeon, H.-S., Baek, S.-H. dan Mishra, B.K. (2015) "A review of cassiterite beneficiation fundamentals and plant practices," *Minerals Engineering*, 70, hal. 178–200. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.009>.
- Cao, Y., Tong, X., Xie, X., Song, Q., Zhang, W., Du, Y. dan Zhang, S. (2021) "Effects of grinding media on the flotation performance of cassiterite," *Minerals Engineering*, 168, hal. 106919. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106919>.
- Chen, Y., Feng, D. dan Tong, X. (2019) "Adsorption behavior of calcium ions and its effect on cassiterite flotation," *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, 55(1), hal. 258–267.
- Chen, Y., Li, H., Feng, D., Tong, X., Hu, S., Yang, F. dan Wang, G. (2021) "A recipe of surfactant

- for the flotation of fine cassiterite particles," *Minerals Engineering*, 160, hal. 106658. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106658>.
- Chen, Y., Tong, X., Feng, D. dan Xie, X. (2018) "Effect of Al (III) ions on the separation of cassiterite and clinocllore through reverse flotation," *Minerals*, 8(8), hal. 347. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/min8080347>.
- Feng, Q., Wen, S., Zhao, W. dan Chen, H. (2018) "Interaction mechanism of magnesium ions with cassiterite and quartz surfaces and its response to flotation separation," *Separation and Purification Technology*, 206, hal. 239–246. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.06.005>.
- Feng, Q., Wen, S., Zhao, W. dan Chen, Y. (2018) "Effect of calcium ions on adsorption of sodium oleate onto cassiterite and quartz surfaces and implications for their flotation separation," *Separation and Purification Technology*, 200, hal. 300–306. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.02.048>.
- Irannajad, M., Nuri, O.S. dan Allahkarami, E. (2018) "A new approach in separation process evaluation. Efficiency ratio and upgrading curves," *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, 54(3), hal. 847–857.
- Jin, S., Zhang, P., Ou, L., Zhang, Y. dan Chen, J. (2021) "Flotation of cassiterite using alkyl hydroxamates with different carbon chain lengths: A theoretical and experimental study," *Minerals Engineering*, 170, hal. 107025. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107025>.
- Nuri, O.S., Allahkarami, E., Irannajad, M. dan Abdollahzadeh, A. (2017) "Estimation of selectivity index and separation efficiency of copper flotation process using ANN model," *Geosystem Engineering*, 20(1), hal. 41–50. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1080/12269328.2016.1220334>.
- Patra, A., Taner, H.A., Bordes, R., Holmberg, K. dan Larsson, A.-C. (2019) "Selective flotation of calcium minerals using double-headed collectors," *Journal of Dispersion Science and Technology*, 40(8), hal. 1205–1216. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1080/01932691.2018.1503547>.
- Peng, H., Luo, W., Wu, D., Bie, X., Shao, H., Jiao, W. dan Liu, Y. (2017) "Study on the effect of Fe³⁺ on zircon flotation separation from cassiterite using sodium oleate as collector," *Minerals*, 7(7), hal. 108. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/min7070108>.
- Qian, Y., Qiu, X., Shen, T., Huai, Y., Chen, B. dan Wang, Z. (2022) "Effect of calcium ion on the flotation of fluorite and calcite using sodium oleate as collector and tannic acid as depressant," *Minerals*, 12(8), hal. 996. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/min12080996>.
- Qin, W., Ren, L., Xu, Y., Wang, P. dan Ma, X. (2012) "Adsorption mechanism of mixed salicylhydroxamic acid and tributyl phosphate collectors in fine cassiterite electro-flotation system," *Journal of Central South University*, 19(6), hal. 1711–1717. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1007/s11771-012-1197-9>.
- Qin, W., Xu, Y., Liu, H., Ren, L. dan Yang, C. (2011) "Flotation and surface behavior of cassiterite with salicylhydroxamic acid," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(18), hal. 10778–10783. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1021/ie200800d>.
- Ren, L., Zhang, Y., Qin, W., Bao, S. dan Wang, J. (2014) "Collision and attachment behavior between fine cassiterite particles and H₂ bubbles," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(2), hal. 520–527. Tersedia pada: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63091-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63091-0).
- Tian, M., Gao, Z., Ji, B., Fan, R., Liu, R., Chen, P., Sun, W. dan Hu, Y. (2018) "Selective flotation of cassiterite from calcite with salicylhydroxamic acid collector and carboxymethyl cellulose depressant," *Minerals*, 8(8), hal. 316. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/min8080316>.
- Tian, M., Liu, R., Gao, Z., Chen, P., Han, H., Wang, L., Zhang, C., Sun, W. dan Hu, Y. (2018) "Activation mechanism of Fe (III) ions in cassiterite flotation with benzohydroxamic acid collector," *Minerals Engineering*, 119, hal. 31–37. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.01.011>.
- USGS (2021) *Mineral commodity summaries 2021*. Virginia. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3133/mcs2021>.
- Wang, X., Liu, J., Zhu, Y. dan Li, Y. (2021a) "Adsorption and depression mechanism of an eco-friendly depressant PBTCa on fluorite surface for the efficient separation of cassiterite from fluorite," *Minerals Engineering*, 171, hal. 107124. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107124>.

- Wang, X., Liu, J., Zhu, Y. dan Li, Y. (2021b) "Selective adsorption of Na₂ATP as an eco-friendly depressant on the calcite surface for effective flotation separation of cassiterite from calcite," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 625, hal. 126899. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126899>.
- Wang, X., Liu, J., Zhu, Y. dan Li, Y. (2021c) "The application and mechanism of high-efficiency depressant Na₂ATP on the selective separation of cassiterite from fluorite by direct flotation," *Minerals Engineering*, 169, hal. 106963. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106963>.
- Wills, B.A. dan Finch, J.A. (2016) *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Elsevier. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/C2010-0-65478-2>.
- Xu, Y. dan Qin, W. (2012) "Surface analysis of cassiterite with sodium oleate in aqueous solution," *Separation Science and Technology*, 47(3), hal. 502–506. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1080/01496395.2011.617352>.
- Zhao, W., Liu, D. dan Feng, Q. (2020) "Enhancement of salicylhydroxamic acid adsorption by Pb(II) modified hemimorphite surfaces and its effect on floatability," *Minerals Engineering*, 152, hal. 106373. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106373>.

