

Optimasi flotasi bijih nikel laterit menggunakan depresan pati singkong karet (*Manihot glaziovii*) dengan variasi konsentrasi pati dan pH terhadap recovery nikel

Optimization of Lateritic Nickel Ore Flotation Using Rubber Cassava (*Manihot glaziovii*) Starch Depressant with Variations in Starch Concentration and pH on Nickel Recovery

Cornelia Kesia Rantang, Mirna Almi Lestari, Putri Yoretno Y, Putri Caludia Rony, Ruberto Imanuel Tikupadang, Rosalia Sira Sarungallo*

Universitas Kristen Indonesia Paulus
Jalan Perintis Kemerdekaan Km. 13 Daya Makassar

Email: rosalia_sira@ukipaulus.ac.id

Disubmit: 15 Oktober 2025, direvisi: 30 Oktober 2025, diterima: 31 Oktober 2025

Doi : 10.30862/cassowary.cs.v8.4.503

ABSTRACT: *This research aims to characterize the chemical composition of laterite nickel ore and analyze the effect of variations in the mass of cassava rubber starch depressant (*Manihot glaziovii*) and the pH of the flotation solution on nickel recovery and the content of gangue minerals (Fe_2O_3 and SiO_2) in the flotation process. The laterite nickel ore used was obtained from Southeast Sulawesi. The research was conducted experimentally in the laboratory with pH variations of 5, 7, and 9 and starch depressant masses of 0, 0.1, 0.3, and 0.5 g. The collector used was sodium oleate, and pine oil was used as a frother. The results showed that the laterite nickel ore used as raw material has typical characteristics of laterite ore with a low Ni content and high gangue content. Variations in the mass of cassava rubber starch depressant and pH affected nickel recovery and the selectivity of separation toward gangue minerals. Under acidic conditions (pH 5), increasing the starch mass up to 0.3 g decreased nickel recovery from 58.26% to 36.75%. At neutral pH (pH 7), a recovery of 69.62% was obtained, while at basic pH (pH 9) and a starch mass of 0.5 g, the highest nickel recovery of 76.61% was achieved. However, the use of cassava rubber starch has not yet shown optimal selectivity in reducing Fe_2O_3 and SiO_2 contents. Research using cassava rubber starch has potential as a natural, economical, and environmentally friendly depressant to improve nickel recovery in the flotation process of laterite nickel ore, although further optimization is still needed to improve selectivity toward gangue minerals.*

Keywords: *lateritic nickel, flotation, cassava starch depressant, concentrate, tailing*

PENDAHULUAN

Nikel merupakan salah satu logam yang banyak digunakan dalam industri baja tahan karat (*stainless steel*), komponen baterai kendaraan listrik, serta aplikasi teknologi lainnya seperti turbin gas, serta katalis industri

kimia (Supriyatna *et al.*, 2019; Dilshara *et al.*, 2024). Logam nikel memiliki sifat ketahanan korosi dan oksidasi, kekuatan mekanik tinggi, serta konduktivitas listrik dan termal yang baik (Fan *et al.*, 2024).

Nikel dapat ditemukan dalam dua jenis bijih (ore), yaitu bijih nikel sulfida dan bijih nikel laterit. Menurut data dari United States Geological Survey (USGS, 2023), sekitar 60-70% cadangan nikel dunia tersimpan dalam bentuk bijih laterit (oksida), sedangkan 30-40% sisanya bijih sulfida.

Bijih nikel sulfida terbentuk melalui proses magmatik pada batuan beku ultramafik dan biasanya mengandung mineral pentlandit ((Fe,Ni)₉S₈), millerit (NiS), atau polydymit (Ni₃S₄). Sementara bijih nikel laterit terbentuk dari pelapukan batuan ultrabasa seperti peridotit dan serpentinit di daerah tropis dan subtropis. Proses pelapukan tersebut menyebabkan pelindian magnesium dan silika serta pengayaan relatif nikel dan besi pada lapisan tanah yang terbentuk. Berdasarkan zonasinya, bijih nikel laterit umumnya terdiri atas tiga lapisan: Zona limonit (lapisan atas) terdiri dari besi oksida (goetit, hematit) dengan kadar Fe > 40% dan Ni (0,6-1,7%). Zona nontronit (lapisan antara) mengandung lempung smektit dan kuarsa, dengan kadar Ni ~1,2%, Fe ~18%, dan Mg ~3,5%. Zona saprolit (lapisan bawah) terdiri dari mineral silikat nikel seperti garnierit ((Ni,Mg)₆Si₄O₁₀(OH)₈) dengan Ni 1,5-3%, Fe 9-25%, dan Mg 10-30% (Janwong, 2012; Farrokhpay and Filippov, 2016).

Kadar nikel pada bijih sulfida lebih tinggi dibandingkan bijih laterit. Bijih nikel sulfida dapat mengandung kadar nikel 60% lebih tinggi dibandingkan nikel laterit, namun bijih laterit memiliki sebaran lebih luas dan menjadi sumber produksi nikel saat ini. Nikel laterit terbagi menjadi tiga lapisan, yaitu saprolitik, limonitik, dan garnieritik, yang masing-masing mengandung nikel, besi, dan silika yang berbeda. Lapisan saprolitik banyak mengandung magnesium dan nikel, limonitik mengandung besi oksida (Fe₂O₃) yang tinggi, sedangkan garnieritik merupakan mineral silikat nikel hasil alterasi batuan ultrabasa.

Indonesia merupakan salah satu negara dengan cadangan bijih nikel laterit terbesar di dunia. Berdasarkan data Kementerian ESDM, total cadangan bijih nikel laterit Indonesia mencapai sekitar 6,3 miliar ton dengan produksi tahunan sebesar 126 juta ton pada

tahun 2023. Sebaran produksi terdapat di Sulawesi Tenggara (51 juta ton), Maluku Utara (39 juta ton), Sulawesi Tengah (22 juta ton), dan Papua Barat (10 juta ton) (USGS, 2023; Michel, 2024). Sejalan dengan kebijakan hilirisasi dan pelarangan ekspor bijih mentah, pengolahan bijih nikel dalam negeri dikembangkan untuk meningkatkan nilai tambah dan keberlanjutan industri pertambangan nasional (Basuhi *et al.*, 2024; Su *et al.*, 2025).

Bijih nikel laterit memiliki karakteristik kadar nikel rendah (umumnya <2%) dan kandungan mineral pengotor (*gangue*) yang tinggi, seperti silika (SiO₂) dan besi oksida (Fe₂O₃) (Butt and Cluzel, 2013; Wani *et al.*, 2024). Kandungan *gangue* yang tinggi menyebabkan proses pemisahan nikel tidak efisien karena sifat permukaan dan densitas mineral pengotor mirip dengan mineral pembawa nikel. Selain itu, mineral *gangue* seperti serpentin [Mg₃Si₂O₅(OH)₄] dan goetit [FeO(OH)] dapat membentuk lapisan lendir (*slime coating*) pada permukaan partikel mineral nikel, sehingga menghambat proses adhesi antara mineral nikel dan gelembung udara selama flotasi (Quast, Connor, *et al.*, 2015; Wani, 2023). Oleh karena itu, diperlukan pengoptimalan kondisi flotasi untuk meningkatkan selektivitas proses dan menurunkan kadar mineral *gangue* dalam produk konsentrat.

Flotasi merupakan salah satu metode pemisahan mineral yang digunakan untuk meningkatkan kadar logam nikel melalui perbedaan sifat permukaan mineral terhadap gelembung udara. Keberhasilan proses flotasi sangat dipengaruhi oleh jenis pereagen flotasi (kolektor, *frother*, dan depresan) serta kondisi operasi seperti pH dan konsentrasi depresan. Depresan dimanfaatkan untuk menekan mineral pengotor agar tidak ikut teradsorpsi pada gelembung udara, sehingga meningkatkan kemurnian konsentrat (Zhu *et al.*, 2012; Bahfie *et al.*, 2021).

Selama ini, proses flotasi bijih nikel menggunakan depresan sintesis seperti natrium silikat dan karboksimetil selulosa (CMC). Walaupun efektif, penggunaan depresan sintesis berpotensi menimbulkan dampak

lingkungan dan biaya pengolahan yang tinggi (Neisiani *et al.*, 2023; Taner and Onen, 2024). Oleh karenanya, diperlukan alternatif depresan alami yang bersifat terbarukan, ramah lingkungan, ekonomis, serta selektif (Xing *et al.*, 2017; Oulakhir *et al.*, 2023).

Salah satu bahan alami yang berpotensi sebagai depresan adalah pati singkong karet (*Manihot glaziovii*), sumber polisakarida yang mudah diperoleh namun masih jarang dimanfaatkan dalam pemisahan mineral. Gugus hidroksil (-OH) pada pati dapat berinteraksi dengan permukaan mineral oksida melalui ikatan hidrogen dan koordinasi dengan ion logam, sehingga dapat menurunkan afinitas mineral *gangue* terhadap gelembung udara dan meningkatkan selektivitas flotasi (Marins *et al.*, 2020; Rath and Sahoo, 2020).

Hingga saat ini, kajian mengenai penggunaan pati singkong karet sebagai depresan dalam proses flotasi bijih nikel laterit belum pernah dilaporkan. Sebagian besar studi sebelumnya menggunakan pati jagung untuk pemisahan mineral (Li *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024).

Berdasarkan latar belakang tersebut, riset ini bertujuan untuk (1) mengkarakterisasi komposisi kimia bijih nikel laterit, (2) menganalisis pengaruh variasi konsentrasi depresan pati singkong karet dan pH terhadap *recovery* nikel dan kadar mineral *gangue* (Fe_2O_3 dan SiO_2). Hasil penelitian diharapkan berkontribusi dalam pengembangan teknologi flotasi berbasis bahan alami yang ekonomis dan ramah lingkungan.

MATERI DAN METODE

Bahan dan Alat

Bahan utama yang digunakan meliputi bijih nikel laterit asal Sulawesi Tenggara 200 mesh, pati dari singkong karet (*Manihot glaziovii*), sodium oleat, minyak pinus, larutan NaOH 1 M dan HCl 0,1 M, dan air suling.

Alat yang digunakan antara lain timbangan analitik, sel flotasi berkapasitas 1 L dilengkapi aerator, oven, *magnetic stirrer*, saringan 200 mesh, dan instrumen X-ray Fluorescence (XRF) Epsilon 4.

Prosedur Penelitian

Riset dilaksanakan dengan mengacu pada Neisiani *et al.*, 2023 dan Quast, *et al.*, 2015 dengan beberapa modifikasi.

Penelitian ini dilaksanakan melalui tiga tahap, yaitu persiapan bahan baku, proses flotasi, serta analisis. Pada tahap persiapan, bijih nikel laterit dikeringkan, dihaluskan, dan diayak hingga berukuran ≤ 200 mesh. Larutan depresan dari pati singkong karet disiapkan, bersama dengan reagen sodium oleat dan minyak pinus. Proses flotasi dilakukan dengan mencampurkan 100 g bijih nikel laterit ke dalam sel flotasi berkapasitas 1 L yang berisi 250 mL air suling, kemudian ditambahkan sodium oleat, minyak pinus, serta variasi konsentrasi larutan pati singkong karet (0; 0,4; 1,2; dan 2,0 g/L). Kondisi pH divariasikan pada 5,0; 7,0; dan 9,0 menggunakan larutan HCl atau NaOH, lalu dipertahankan dengan pengadukan sebelum dilakukan aerasi selama empat menit. Konsentrat yang terbentuk dikumpulkan secara berkala, sedangkan tailing diambil dari dasar sel flotasi setelah proses selesai. Kedua fraksi kemudian dikeringkan pada suhu $105 \pm 2^\circ\text{C}$ hingga massa konstan, dilakukan penimbangan untuk tahap selanjutnya dilakukan analisis komposisi kimia konsentrat dan tailing.

Analisis

Analisis komposisi kimia dilakukan menggunakan instrumen *X-ray Fluorescence* (XRF, Epsilon 4). *Recovery* nikel dihitung berdasarkan perbandingan massa dan kadar nikel antara konsentrat dan umpan, menggunakan persamaan:

$$\text{Recovery nikel (\%)} = \left(\frac{m_c \times C_c}{m_0 \times C_0} \right) \times 100$$

Di mana m_0 dan m_c masing-masing merupakan massa konsentrat dan umpan (g), sedangkan C_0 dan C_c adalah kadar nikel dalam konsentrat dan umpan (%) (Li *et al.*, 2023).

Analisis dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi pH dan massa depresan pati singkong karet terhadap hasil flotasi bijih nikel laterit. Data yang diperoleh berupa hasil analisis XRF (Ni, Fe_2O_3 , SiO_2 , MgO, Cr_2O_3 , Al_2O_3) serta Yield konsentrat, yang disajikan dalam bentuk tabel dan grafik.

Metode analisis yang digunakan adalah deskriptif kuantitatif, dengan membandingkan

perubahan kadar unsur, Yield, dan *recovery* Nikel antarperlakuan untuk menentukan peningkatan kualitas konsentrat dan efektivitas depresan dalam menekan mineral pengotor

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi komposisi kimia ore (bijih) nikel

Analisis komposisi kimia bijih nikel disajikan pada Gambar 1 menunjukkan bahwa unsur-unsur utama penyusunnya terdiri atas nikel (Ni) sebesar 1,520 %, besi oksida (Fe_2O_3) sebesar 29,114 %, silika (SiO_2) 31,395 %, magnesium oksida (MgO) 12,791 %, kromiumoksida (Cr_2O_3) 1,254 %, dan alumina (Al_2O_3) 5,949 %.

Kadar nikel yang rendah sekitar 1-2 % menunjukkan bahwa bijih nikel yang digunakan tergolong laterit, yaitu jenis bijih nikel yang umumnya mengandung besi (Fe) dan silika (Si) tinggi serta nikel yang rendah (Butt and Cluzel, 2013; Janwong, 2012).

Karakteristik komposisi kimia tersebut menunjukkan bahwa bijih nikel laterit yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kadar nikel rendah dan kandungan pengotor (*gangue*) yang tinggi, seperti Fe_2O_3 dan SiO_2 . Komposisi tersebut mengindikasikan perlunya tahap *prattreatment* seperti flotasi untuk meningkatkan kadar nikel dan menurunkan kandungan pengotor sebelum bijih tersebut diolah lebih lanjut.

Kandungan Fe_2O_3 yang tinggi (29,114 %) menunjukkan adanya fasa limonit pada bijih, yang berpotensi berperan sebagai fase pengotor dalam proses flotasi apabila tidak dioptimasi melalui penerapan jenis dan konsentrasi atau massa depresan yang tepat.

Selain itu, kandungan silika (SiO_2) sebesar 31,395%, yang sebagian besar berasal dari mineral kuarsa sebagai silika bebas, serta sebagian dari struktur silikat pada mineral serpentin, dapat memengaruhi selektivitas flotasi. Kuarsa bersifat inert dan dapat berperan sebagai *gangue*, sedangkan serpentin berpotensi membentuk lapisan *slime coating* yang menghambat partikel bijih nikel berikatan dengan gelembung udara.

Hasil penelitian Farrokhpay *et al.*, (2018) dan Fan *et al.*, (2024) melaporkan bahwa mineral silikat dan *gangue* dapat menurunkan kinerja proses flotasi akibat keterbatasan interaksi antarpermukaan mineral. Keterbatasan tersebut disebabkan oleh perbedaan sifat permukaan antara mineral yang diinginkan (nikel sulfida atau oksida) dan mineral *gangue*, di mana permukaan silikat yang bersifat hidrofilik dapat menghambat pembentukan film udara pada partikel yang diinginkan, sehingga menurunkan kemampuan pengapungan (*floatability*) mineral yang diinginkan.

Kandungan MgO sebesar 12,791% menunjukkan tingginya fraksi mineral serpentin dalam bijih nikel, yang berpotensi menimbulkan masalah pada tahap pengolahan bijih nikel laterit. Mineral serpentin mudah menghasilkan partikel berukuran kecil yang dapat berinteraksi dengan pereagen flotasi (kolektor atau depresan) melalui mekanisme *slime coating*, yaitu pembentukan lapisan tipis mineral serpentin pada permukaan partikel yang diinginkan sehingga dapat menghambat proses adhesi antara partikel yang diinginkan dengan gelembung udara (Zeng *et al.*, (2023); Wani *et al.*, (2024), yang menyebabkan penurunan selektivitas flotasi. Selain itu, kandungan Cr_2O_3 sebesar 1,254 % mengindikasikan terdapat mineral kromit sebagai mineral ikutan, sedangkan Al_2O_3 sebesar 5,949 % berasal dari mineral aluminosilikat seperti kaolinit (Yu *et al.*, 2017).

Analisis komposisi kimia ore nikel, konsentrat, terhadap Yield

Tabel 1 menampilkan analisis komposisi kimia menggunakan *X-ray Fluorescence* (XRF) dilakukan untuk mengevaluasi distribusi unsur-unsur: Ni, Fe_2O_3 , SiO_2 , MgO, Cr_2O_3 , dan Al_2O_3 , pada ore, konsentrat, dan Yields dari setiap perlakuan variasi pH dan massa depresan pati singkong karet. Hasil analisis XRF menunjukkan adanya perbedaan kadar Fe_2O_3 , SiO_2 , MgO, Cr_2O_3 , dan Al_2O_3 pada konsentrat.

Pada pH 5 tanpa penambahan depresan, kandungan Ni dalam konsentrat meningkat menjadi 1,533%, dengan Fe_2O_3 sebesar

28,70% dan SiO_2 21,43%. Penurunan fraksi silika menandakan bahwa pada kondisi asam, partikel silikat mengalami hidrofobisasi yang lebih rendah, sehingga mudah terbuang ke fraksi tailing. Penambahan depresan 0,5 g meningkatkan Fe_2O_3 hingga 32,07% dengan Ni 1,611%, menunjukkan bahwa sebagian besar mineral Fe ikut terflotasi bersama mineral nikel, yang terlihat juga pada Yield 59,1%. Hasil ini mengindikasikan bahwa pada pH rendah, pati singkong karet cenderung berperan sebagai depresan terhadap mineral silika tetapi kurang selektif terhadap mineral besi, yang dapat disebabkan oleh afinitas permukaan mineral Fe-oksida terhadap kolektor (Fletcher *et al.*, 2021).

Pada kondisi netral (pH 7), peningkatan kadar Ni tertinggi diperoleh tanpa penambahan depresan, yaitu 1,599% dengan Yield 66,18%, menunjukkan proses flotasi yang berlangsung stabil. Penambahan depresan 0,1-0,5 g menyebabkan penurunan Yield hingga 55,49%. Penurunan menunjukkan bahwa pada pH netral, molekul pati singkong karet cenderung membentuk lapisan parsial di permukaan partikel nikel. Adsorpsi pati berlangsung melalui ikatan hidrogen antara gugus hidroksil ($-\text{OH}$) pada pati dengan gugus $-\text{M}-\text{OH}$ ($\text{M} = \text{Fe}, \text{Ni}$) pada permukaan oksida logam, membentuk film tipis yang bersifat hidrofilik. Karena adsorpsi tidak homogen di seluruh permukaan mineral, sebagian area permukaan partikel nikel tetap aktif secara hidrofobik dan masih dapat terflotasi, sedangkan sebagian mengalami depresi. Dikenal sebagai depresi parsial partikel nikel, di mana efisiensi flotasi menurun akibat berkurangnya jumlah situs aktif yang dapat berinteraksi dengan gelembung udara.

Pada pH 9, diperoleh tren yang berbeda. Kandungan Ni tertinggi 1,632% tanpa depresan, dengan Yield mencapai 68,84%, sedangkan pada penambahan depresan 0,5 g, Yield meningkat hingga 73,10% meskipun kadar Ni menurun (1,593%). Hal ini mengindikasikan bahwa kondisi basa meningkatkan interaksi antara pati terdeprotonasi dengan permukaan mineral oksida logam, dan meningkatkan hidrofobitas mineral nikel relatif terhadap silika dan alumina. Selain itu, Fe_2O_3 relatif tinggi (29-32%), mengindikasikan bah-

wa sebagian mineral besi ikut terflotasi akibat muatan permukaan serupa pada pH tinggi (Fletcher *et al.*, 2021).

SiO_2 terlihat menurun pada konsentrat dibandingkan ore. Pada pH 9, 0,1 depresan, kadar SiO_2 pada ore sebesar 31,395% menurun menjadi 20,598% pada konsentrat. Hal ini menunjukkan bahwa proses flotasi menurunkan kandungan silika pada konsentrat, sehingga meningkatkan kadar Nikel terhadap fraksi pengotor, meskipun selektivitas pemisahan masih dipengaruhi oleh kondisi operasi yang digunakan. Sementara Farrokhpay and Filippov (2016) membahas mengenai pengendalian pH dan interaksi antarfasa dalam menekan silika melalui modifikasi kondisi permukaan mineral.

Kandungan MgO pada konsentrat relatif mendekati kadar pada ore, dengan sedikit menurun pada kondisi tertentu. Pada pH 7, 0,1 g depresan, kadar MgO turun dari 12,791% (ore) menjadi 13,867% (konsentrat).

Unsur oksida minor menunjukkan perilaku yang bervariasi selama flotasi. Kadar Al_2O_3 menurun pada konsentrat, sedangkan Cr_2O_3 relatif stabil terhadap perubahan pH dan massa depresan. Hal ini menunjukkan bahwa kedua unsur tersebut tidak terpengaruh oleh kondisi flotasi. Penurunan Al_2O_3 disebabkan oleh sifat mineral aluminous (seperti kaolinit atau gibsit) yang berukuran halus, hidrofilik, dan mudah terdispersi dalam pulp sehingga tidak mudah menempel pada gelembung udara. Sebaliknya, Cr_2O_3 umumnya terdapat dalam mineral spinel atau kromit yang bersifat inert dan tidak mudah bereaksi dengan depresan pati. (Moore *et al.*, 2015; Yin *et al.*, 2024).

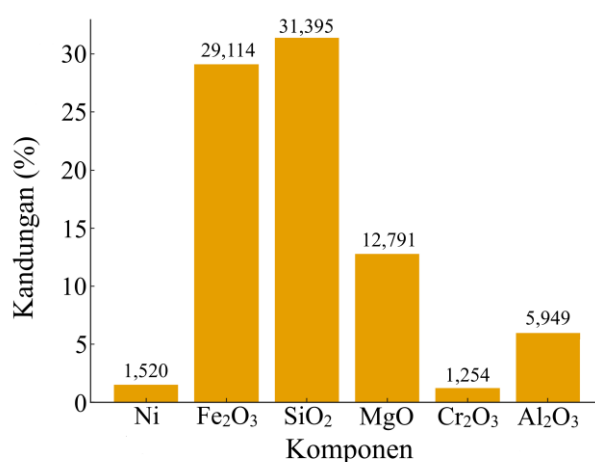
Pengaruh konsentrasi pati dan pH terhadap recovery nikel

Hasil pengujian flotasi nikel dengan variasi massa depresan pati pada pH 5, 7, dan 9 menunjukkan bahwa pH dan jumlah depresan berpengaruh terhadap selektivitas flotasi. Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukkan bahwa perubahan jumlah pati dari 0-0,5 g menghasilkan tren yang berbeda untuk setiap kondisi pH terhadap mineral yang diinginkan (Ni) dan mineral pengotor (Fe_2O_3 dan SiO_2).

Pada pH 5, *recovery* nikel menurun seiring dengan peningkatan massa pati dari 0 hingga 0,3 g, yaitu dari 58,26% menjadi 36,75%.

Penurunan yang terjadi menunjukkan bahwa pati bekerja sebagai depresan, menurunkan flotabilitas partikel nikel dengan mengubah permukaan mineral menjadi lebih hidrofilik. Dalam kondisi asam, sebagian besar permukaan mineral oksida seperti nikel, besi, dan silika bermuatan positif akibat protonasi gugus hidroksil pada permukaannya. Gugus hidroksil pati dan sebagian gugus karboksil dapat berinteraksi melalui ikatan hidrogen atau koordinasi dengan ion logam di permukaan, sehingga membentuk lapisan film yang menurunkan sifat hidrofobik partikel.

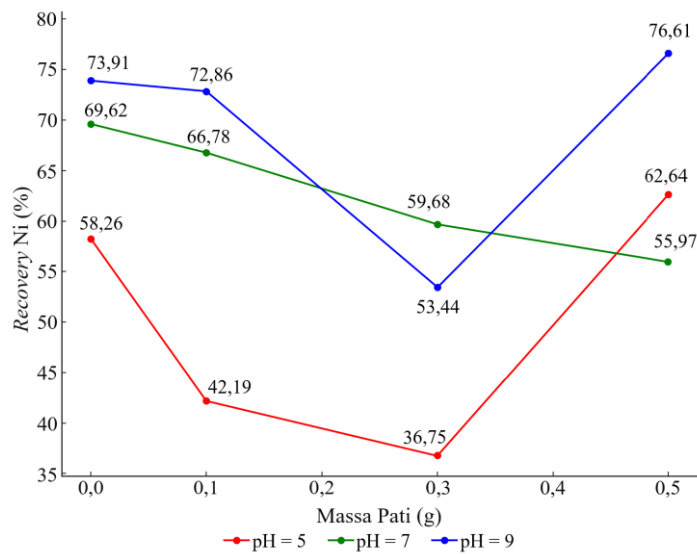
Namun, pada massa pati 0,5 g terjadi peningkatan *recovery* nikel menjadi 62,63%. Hal ini disebabkan oleh sebagian permukaan nikel menjadi kembali bersifat hidrofobik akibat kejenuhan adsorpsi pati, sehingga sebagian partikel nikel kembali terflotasi bersama gelembung udara, sementara partikel *gangue* tidak seluruhnya terdepresi sehingga sebagian ikut terflotasi bersama nikel (Farrokhpay and Filippov, 2016).



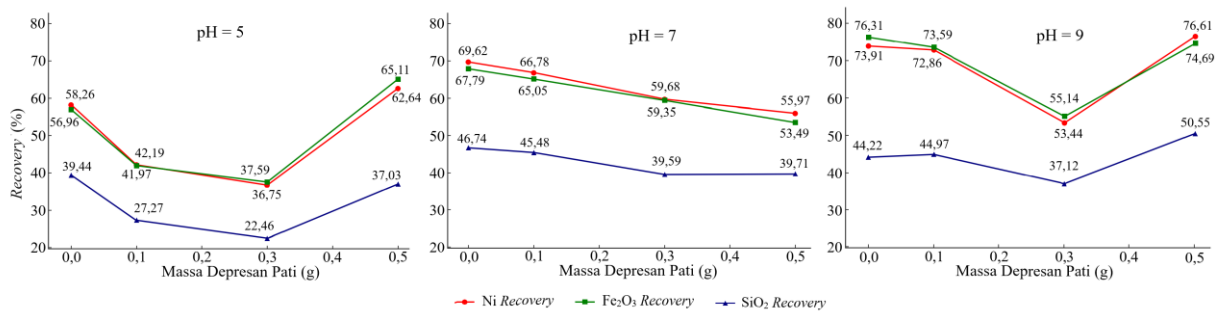
Gambar 1 Komposisi kimia ore nikel laterit

Tabel 1 Hasil analisis XRF ore dan konsentrat nikel laterit serta yield konsentrat pada variasi pH dan massa depresan pati singkong karet

Massa pH Depresan (g)	Sampel	Ni (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Yield Konsentrat (%)
-	Ore	1,520	29,114	31,395	12,791	1,254	5,949	-
5	0,0 Konsentrat	1,533	28,703	21,431	13,732	1,274	5,533	57,77
5	0,1 Konsentrat	1,578	30,060	21,065	13,336	1,230	5,695	40,64
5	0,3 Konsentrat	1,589	31,134	20,061	12,762	1,233	5,734	35,15
5	0,5 Konsentrat	1,611	32,070	19,669	12,537	1,188	5,852	59,1
7	0,0 Konsentrat	1,599	29,817	22,171	13,742	1,144	5,787	66,18
7	0,1 Konsentrat	1,582	29,515	22,252	13,867	1,229	5,722	64,16
7	0,3 Konsentrat	1,558	29,673	21,347	13,549	1,308	5,707	58,22
7	0,5 Konsentrat	1,533	28,062	22,465	14,372	1,323	5,598	55,49
9	0,0 Konsentrat	1,632	32,267	20,164	12,403	1,152	5,864	68,84
9	0,1 Konsentrat	1,616	31,259	20,598	12,719	1,128	5,771	68,53
9	0,3 Konsentrat	1,487	29,383	21,329	13,252	1,188	5,464	54,63
9	0,5 Konsentrat	1,593	29,743	21,708	13,555	1,177	5,668	73,10



Gambar 2 Pengaruh konsentrasi pati terhadap *recovery* nikel



Gambar 3 Pengaruh depresan dan pH terhadap *recovery* nikel dan pemisahan *gangue*

Pada pH 7, diperoleh *recovery* nikel tertinggi sebesar 69,62% tanpa penambahan depresan, kemudian menurun hingga 55,96% pada 0,5 g pati. Penurunan menunjukkan bahwa pada pH netral, interaksi terjadi melalui ikatan hidrogen, gaya tarik elektrostatis antara permukaan mineral dan molekul pati menjadi lemah karena perbedaan potensial permukaannya menurun, sehingga interaksi adsorpsi antara keduanya berkurang (Wei *et al.*, 2024). Selain itu, pada pH netral, pati menunjukkan selektivitas pada dosis moderat; peningkatan dosis melewati ambang dapat menurunkan hidrofobisitas partikel Ni, sehingga *recovery* Ni turun (Neisiani *et al.*, 2023).

Pada pH 9, *recovery* nikel meningkat, mencapai nilai tertinggi sebesar 76,61% pada massa depresan 0,5 g. Peningkatan *recovery*

nikel diikuti oleh peningkatan *recovery* Fe₂O₃ dan SiO₂, yang menunjukkan bahwa proses flotasi tidak selektif. Pada pH tinggi, permukaan mineral oksida dan molekul pati bermuatan negatif akibat deprotonasi gugus hidroksil. Hal ini menyebabkan timbulnya gaya tolak-menolak elektrostatis yang menghambat adsorpsi pati pada permukaan mineral, sehingga mineral Nikel dan mineral pengotor (Fe dan Si) tetap bersifat hidrofobik dan ikut terflotasi bersama gelembung udara.

Penelitian terhadap berbagai pati, menunjukkan bahwa sebagai depresan, pati singkong bisa menekan mineral *gangue* (feldspar dan kuarsa), namun tidak selektif dan berpotensi menurunkan efisiensi flotasi mineral yang diinginkan, terutama dalam kondisi tertentu (Zeng *et al.*, 2025). Oleh karena itu, pada kondisi pH 9 dengan penambahan 0,5 g depresan pati singkong karet, *recovery* Ni tertinggi

mencapai 76,61%. Namun, peningkatan juga teramati pada *recovery* Fe₂O₃ (74,69%) dan SiO₂ (50,55%), yang mengindikasikan bahwa proses flotasi berlangsung efisien tetapi belum selektif. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi alkalis, pati singkong karet mengalami adsorpsi parsial pada permukaan mineral *gangue* dan mineral nikel secara bersamaan, sehingga depresi terhadap mineral pengotor belum optimal.

KESIMPULAN

Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa bijih nikel laterit yang digunakan memiliki kadar Ni sebesar 1,52%, dengan kandungan Fe₂O₃ sebesar 29,11% dan SiO₂ sebesar 31,39%, serta kandungan MgO, Al₂O₃, dan Cr₂O₃ masing-masing sebesar 12,79%, 5,95%, dan 1,25%. Komposisi tersebut menunjukkan bahwa sampel yang digunakan merupakan bijih nikel laterit, dengan karakteristik kadar nikel rendah dan kandungan mineral *gangue* (silikat dan oksida besi) yang tinggi.

Pati singkong karet meningkatkan *recovery* nikel hingga 76,61% pada kondisi basa (pH 9), meskipun selektivitas terhadap penurunan Fe₂O₃ dan SiO₂ masih perlu dioptimalkan.

Pati singkong karet memiliki potensi sebagai depresan alami yang ramah lingkungan dan ekonomis dalam proses flotasi bijih nikel laterit, namun masih memerlukan optimasi untuk meningkatkan selektivitas terhadap mineral pengotor seperti silika dan oksida besi. Kajian lebih lanjut mengenai modifikasi kimia pati melalui oksidasi, eterifikasi, atau rekonstruksi struktur molekul sehingga dapat meningkatkan afinitas dan stabilitas kimia dalam sistem flotasi. Pendekatan berbasis biomaterial lain, seperti penggunaan nanokristal selulosa, juga berpotensi diterapkan untuk memperbaiki proses pengolahan nikel laterit.

DAFTAR PUSTAKA

- Bahfie, F., Manaf, A., Astuti, W., Nurjaman, F., & Herlina, U. (2021). Tinjauan teknologi proses ekstraksi bijih nikel laterit. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*. 17(3): 135–152. <https://doi.org/10.30556/jtmb.vol17.no3.2021.1156>.
- Basuhi, R., Bhuwalka, K., Moore, E. A., Diersen, I., Malik, R. H., Young, E., Billy, R. G., Stoner, R., Ceder, G., Müller, D. B., Roth, R., & Olivetti, E. A. (2024). Clean energy demand must secure sustainable nickel supply. *Joule*. 8(11): 2960–2973. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.10.008>.
- Butt, C. R. M., & Cluzel, D. (2013). Nickel laterite ore deposits: Weathered serpentinites. *Elements*. 9(2): 123–128. <https://doi.org/10.2113/gselements.9.2.123>.
- Dilshara, P., Abeysinghe, B., Premasiri, R., Dushyantha, N., Ratnayake, N., Senarath, S., Sandaruwan Ratnayake, A., & Batapola, N. (2024). The role of nickel (Ni) as a critical metal in clean energy transition: applications, global distribution and occurrences, production-demand and phytomining. *Journal of Asian Earth Sciences*. 259: 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2023.105912>.
- Fan, Q., Yuan, S., Wen, J., & He, J. (2024). Review on comprehensive utilization of nickel laterite ore. *Minerals Engineering*. 218: 1–21. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.109044>.
- Farrokhpay, S., & Filippov, L. (2016). Challenges in processing nickel laterite ores by flotation. *International Journal of Mineral Processing*. 151: 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.04.007>.
- Farrokhpay, S., Fornasiero, D., & Filippov, L. (2018). Upgrading nickel in laterite ores by flotation. *Minerals Engineering*. 121: 100–106. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.02.021>.
- Fletcher, B., Chimonyo, W., & Peng, Y. (2021). The Potential of Modified Starches as Mineral Flotation Depressants. *Mining, Metallurgy and Exploration*. 38(2): 739–750. <https://doi.org/10.1007/s42461-021-021-021-0>.

- 00379-x.
- Janwong, A. (2012). The Agglomeration Of Nickel Laterite Ore. The University of Utah. Available at: <http://content.lib.utah.edu/utis/getfile/collec tion/etd3/id/2055/filename/2052.pdf>.
- Li, B., Liu, D., Shi, Q., Zhang, G., & Zheng, H. (2023). Application of hydroxyethylidene diphosphonic acid as a depressant for efficient pyrite separation from serpentine: a performance and mechanistic study. *Minerals Engineering*. 204: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108381>.
- Li, K., Zhang, H., Peng, T., Liu, C., & Yang, S. (2022). Influences of starch depressant with the various molecular structure on the interactions between hematite particles and flotation bubbles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 652(June): 129814. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129814>.
- Marins, T. F., Rodrigues, O. M. S., Reis, É. L., & Beltrão, J. G. (2020). Utilising starches from sugarcane and cassava residues as hematite depressants. *Minerals Engineering*. 145: 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106090>.
- Michel, T. (2024). The Prospects Of Indonesia's Nickel Boom Amidst A Systemic Challenge From Coal. *Ifri Papers*. Available at: https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/ifri_michel_indonesia_nickel_boom_2024.pdf.
- Moore, L. R., Macy, P., Casagrande, R., & Sessoms, J. (2015). Magnesium oxide suppression during nickel flotation. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 32(3): 170–175. <https://doi.org/10.1007/BF03402285>.
- Neisiani, A. A., Saneie, R., Mohammadzadeh, A., Wonyen, D. G. and Chehreh Chelgani, S. (2023). Polysaccharides-based pyrite depressants for green flotation separation: An overview. *International Journal of Mining Science and Technology*. 33(10): 1229–1241. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2023.09.002>.
- Oulakhir, A., Lyamlouli, K., Danouche, M., Ouazzani, J., & Benhida, R. (2023). A critical review on natural surfactants and their potential for sustainable mineral flotation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 22(1): 105–131. <https://doi.org/10.1007/s11157-022-09639-8>.
- Quast, K., Connor, J. N., Skinner, W., Robinson, D. J., & Addai-Mensah, J. (2015). Preconcentration strategies in the processing of nickel laterite ores Part 1: Literature review. *Minerals Engineering*. 79: 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.03.017>.
- Quast, K., Otsuki, A., Fornasiero, D., Robinson, D. J., & Addai-Mensah, J. (2015). Preconcentration strategies in the processing of nickel laterite ores part 3: Flotation testing. *Minerals Engineering*. 79: 279–286. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.03.018>.
- Rath, S. S., & Sahoo, H. (2020). A Review on the Application of Starch as Depressant in Iron Ore Flotation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 43(1): 122–135. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1843028>.
- Su, C., Geng, Y., van Ewijk, S., Borrión, A., & Zhang, C. (2025). Uncovering the evolution of the global Nickel cycle and trade networks. *Resources, Conservation and Recycling*. 215: 108164. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108164>.
- Supriyatna, Y. I., Sihotang, I. H., & Sudibyo. (2019). Preliminary study of smelting of Indonesian Nickel Laterite Ore using an Electric Arc Furnace. *Materials Today: Proceedings*. 13: 127–131. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.03.201>.
- Taner, H. A., & Onen, V. (2024). Environmentally friendly alternative depressants in chalcopyrite flotation. *Separation Science and Technology*.

- 59(2): 257–267.
<https://doi.org/10.1080/01496395.2024.2315617>.
- USGS. (2023). Cement Statistics and Information. *U.S. Geological Survey*. 53(9): 1689–1699. Available at: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/cement-statistics-and-information%0Ahttps://www.usgs.gov/centers/nmic/cement-statistics-and-information>.
- Wang, Q., Zhang, H., Xu, Y., Bao, S., Liu, C., & Yang, S. (2023). The molecular structure effects of starches and starch phosphates in the reverse flotation of quartz from hematite. *Carbohydrate Polymers*. 303(October 2022): 120484. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120484>.
- Wani, O. B. (2023). Enhanced Beneficiation Of Ultramafic Nickel Ores Using Novel Reagents. University of Toronto.
- Wani, O. B., Khan, S., Shoaib, M., da Costa Gonçalves, C., Chen, Z., Zeng, H., & Bobicki, E. R. (2024). Processing of low-grade ultramafic nickel ores: A critical review. *Minerals Engineering*. 218: 108976. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108976>.
- Wei, B., Li, J., Cao, Z., Ma, S., & Zhang, Y. (2024). The inhibition mechanism of esterified starch on flotation separation of fluorite and calcite. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 60(4): 1–12. <https://doi.org/10.37190/ppmp/190698>.
- Xing, Y., Gui, X., Karakas, F., & Cao, Y. (2017). Role of collectors and depressants in mineral flotation: A theoretical analysis based on extended DLVO theory. *Minerals*. 7(11): 1–14. <https://doi.org/10.3390/min7110223>.
- Yang, S., Xu, Y., Kang, H., Li, K., & Li, C. (2023). Investigation into starch adsorption on hematite and quartz in flotation: Role of starch molecular structure. *Applied Surface Science*. 623: 157064. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.157064>.
- Yin, F., Zhang, C., Yu, Y., Lv, C., Gao, Z., Lu, B., Su, X., Luo, C., Peng, X., McFadzean, B., & Cao, J. (2024). Review on the Challenges of Magnesium Removal in Nickel Sulfide Ore Flotation and Advances in Serpentinite Depressor. *Minerals*. 14(10): 1–20. <https://doi.org/10.3390/min14100965>.
- Yu, Y., Ma, L., Cao, M., & Liu, Q. (2017). Slime coatings in froth flotation: A review. *Minerals Engineering*. 114: 26–36. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.09.002>.
- Zeng, G., Chen, W., Liu, S., & Liu, G. (2023). New insights into the aggregation and disaggregation between serpentine and pyrite in the xanthate flotation system. *Journal of Colloid and Interface Science*. 633: 243–253. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.11.123>.
- Zeng, H., Sun, W., Luo, Y., & Wang, L. (2025). Effect of different natural starches on strengthening flotation separation of quartz and feldspar under alkaline conditions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 726: 137930. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.137930>.
- Zhang, C., Tan, Y., Yin, F., Zhao, J., Gao, Z., Sun, W., McFadzean, B., & Cao, J. (2024). Utilization of phosphorylated starch as a selective depressant for serpentine in the flotation of nickel sulfide ore. *Minerals Engineering*. 217: 108906. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108906>.
- Zhu, D. Q., Cui, Y., Vining, K., Hapugoda, S., Douglas, J., Pan, J., & Zheng, G. L. (2012). Upgrading low nickel content laterite ores using selective reduction followed by magnetic separation. *International Journal of Mineral Processing*. 106–109: 1–7. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.m>

inpro.2012.01.003.