

Penerapan Kombinasi Shaking Table dan Magnetic Separator pada Pengolahan Bijih Timah Primer serta Analisis Kelayakan Investasinya di Bangka Belitung

Gandhy Argadinata*, Restu Juniah, Yuli Andriani

Universitas Sriwijaya, Indonesia

Email: argadinata@gmail.com*

Keywords:

primary tin ore;
cassiterite;
shaking table;
magnetic separator;
investment feasibility

Abstract

Tin is a strategic mineral commodity with important applications in electronic components, energy storage, and industrial manufacturing. The decline of alluvial tin reserves has encouraged the utilization of primary tin ore, which has complex mineral characteristics, low grade, and requires effective processing technology. This study aims to evaluate the performance of a combined shaking table and magnetic separator process in improving tin grade and recovery, as well as assessing the investment feasibility of primary tin ore processing in Bangka Belitung. This research applied a quantitative experimental method at laboratory scale combined with financial feasibility analysis. Primary tin ore samples from Tambang Paku, South Bangka, were processed through shaking table optimization followed by magnetic separation under various operating parameters. The results showed that the optimum shaking table condition increased Sn grade from 1.42% to 38.20% with a recovery of 75.17%. The magnetic separator further improved concentrate quality by producing 52.80% Sn with Fe_2O_3 reduction from 12.6% to 5.6% and achieving a total recovery of 68.9%. Economic analysis indicated that the project was feasible, with an NPV of Rp53.58 billion, IRR of 46.26%, payback period of 1.84 years, and profitability index of 2.04. The study concludes that the integration of shaking table and magnetic separator technology is technically effective and economically feasible for sustainable primary tin ore processing.

Kata Kunci:

bijih timah primer;
kasiterit;
shaking table;
magnetic separator;
kelayakan investasi

Abstrak

Timah merupakan komoditas mineral strategis yang memiliki peranan penting dalam industri elektronik, penyimpanan energi, dan manufaktur. Menurunnya cadangan timah aluvial mendorong pemanfaatan bijih timah primer yang memiliki karakteristik mineral kompleks, kadar rendah, serta membutuhkan teknologi pengolahan yang efektif. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja kombinasi shaking table dan magnetic separator dalam meningkatkan kadar serta recovery timah, sekaligus menganalisis kelayakan investasi pengolahan bijih timah primer di Bangka Belitung. Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif eksperimental skala laboratorium yang dikombinasikan dengan analisis kelayakan finansial. Sampel bijih timah primer dari Tambang Paku, Bangka Selatan, diolah melalui tahap optimasi shaking table dan dilanjutkan dengan proses pemisahan magnetik menggunakan variasi parameter operasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa

kondisi optimum shaking table meningkatkan kadar Sn dari 1,42% menjadi 38,20% dengan recovery 75,17%. Selanjutnya, proses magnetic separator menghasilkan konsentrat akhir dengan kadar Sn sebesar 52,80%, menurunkan kandungan Fe_2O_3 dari 12,6% menjadi 5,6%, serta menghasilkan recovery total sebesar 68,9%. Analisis ekonomi menunjukkan proyek layak dengan nilai NPV Rp53,58 miliar, IRR 46,26%, payback period 1,84 tahun, dan profitability index 2,04. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kombinasi shaking table dan magnetic separator efektif secara teknis dan ekonomis sebagai alternatif pengolahan bijih timah primer yang berkelanjutan.

PENDAHULUAN

Timah merupakan komoditas logam strategis yang berperan penting dalam industri solder elektronik, baterai, pelapis antikorosi, dan bahan kimia. Indonesia merupakan salah satu produsen timah terbesar di dunia dan menempati posisi kedua setelah Tiongkok, dengan sebagian besar produksi berasal dari Provinsi Kepulauan Bangka Belitung (Irzon, 2021; Kurniawan dkk., 2019). Sumber utama timah adalah mineral kasiterit (SnO_2), yang secara historis ditambang dari endapan aluvial karena relatif mudah diolah. Seiring menipisnya cadangan aluvial, perhatian beralih pada bijih timah primer yang masih terikat di dalam batuan keras, berkadar rendah, dan memerlukan tahapan pelepasan serta konsentrasi yang lebih intensif.

Karakter bijih timah primer yang umumnya berkadar rendah dan didominasi mineral gangue menuntut teknologi pemisahan yang efisien namun tetap ramah lingkungan. Kombinasi pemisahan gravitasi menggunakan shaking table dan pemisahan magnetik menggunakan magnetic separator merupakan alternatif yang menarik karena berbasis sifat fisik mineral, relatif sederhana, hemat energi, dan minim penggunaan bahan kimia (Wu dkk., 2020; Sari & Widodo, 2020). Shaking table memanfaatkan perbedaan berat jenis antara kasiterit (6,8–7,1) dan mineral pengotor ringan seperti kuarsa (2,6–2,7), sedangkan magnetic separator menurunkan kandungan mineral pengotor besi yang bersifat magnetik atau paramagnetik.

Sejumlah studi terdahulu telah membuktikan efektivitas kombinasi kedua teknologi tersebut. Ramdani dkk. (2019) melaporkan peningkatan efisiensi produksi hingga sekitar 70% pada pengolahan bijih timah di Bangka Belitung, sedangkan Rifa'i & Hidayat (2020) memperoleh peningkatan sekitar 50% disertai penurunan beban limbah. Putri dkk. (2024) menegaskan peran pemisahan magnetik dalam menaikkan kadar dan recovery pada pengolahan ulang monasit, dan (Anggraini et al., 2019) memanfaatkan kombinasi alat untuk konsentrasi mineral berharga dari terak timah. Namun, sebagian besar penelitian tersebut berhenti pada indikator teknis berupa kadar dan recovery, dan belum menaikkannya secara eksplisit dengan kelayakan investasi yang menjadi dasar pengambilan keputusan di tingkat perusahaan maupun investor.

Bijih timah primer memiliki tingkat kompleksitas yang lebih tinggi dibandingkan endapan sekunder karena mineral kasiterit (SnO_2) umumnya berasosiasi dengan mineral pengotor seperti kuarsa, mineral besi, dan mineral silikat lainnya. Kondisi tersebut menyebabkan proses pengolahan tidak dapat hanya mengandalkan metode konvensional, tetapi membutuhkan kombinasi teknologi pemisahan yang mampu meningkatkan kadar dan recovery secara optimal. Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan dalam pengolahan mineral

adalah pemanfaatan metode pemisahan berbasis sifat fisik mineral, seperti shaking table yang memanfaatkan perbedaan berat jenis dan magnetic separator yang memanfaatkan sifat kemagnetan mineral. Kombinasi kedua metode tersebut dinilai memiliki keunggulan karena tidak membutuhkan penggunaan bahan kimia dalam jumlah besar, relatif hemat energi, serta sesuai diterapkan pada pengolahan mineral dengan karakteristik kompleks. Dalam konteks pertambangan berkelanjutan, penerapan teknologi pemisahan yang efektif juga menjadi bagian penting dalam meningkatkan nilai tambah mineral sekaligus mengurangi kehilangan mineral berharga pada limbah hasil pengolahan.

Sejumlah penelitian terdahulu telah membahas efektivitas penggunaan shaking table dan magnetic separator dalam meningkatkan kualitas konsentrat timah. Ramdani et al. (2019) menunjukkan bahwa kombinasi kedua teknologi tersebut mampu meningkatkan efisiensi pengolahan bijih timah melalui peningkatan konsentrasi mineral berharga. Selanjutnya, Rifa'i dan Hidayat (2020) menemukan bahwa penerapan kombinasi pemisahan gravitasi dan magnetik pada bijih timah di Bangka Belitung mampu meningkatkan efisiensi produksi sekaligus menurunkan kandungan mineral pengotor. Penelitian lain oleh Putri et al. (2024) juga menunjukkan bahwa pemisahan magnetik berperan penting dalam meningkatkan kadar dan recovery mineral berharga pada proses pengolahan ulang mineral kompleks. Selain itu, Wu et al. (2020) menjelaskan bahwa perkembangan teknologi magnetic separator telah memberikan kontribusi besar terhadap peningkatan efektivitas pemrosesan mineral melalui mekanisme pemisahan yang lebih presisi. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa teknologi kombinasi pemisahan memiliki potensi besar untuk diterapkan dalam pengolahan bijih timah primer yang memiliki tingkat kesulitan lebih tinggi dibandingkan bijih aluvial.

Meskipun berbagai penelitian sebelumnya telah membuktikan keberhasilan aspek teknis penggunaan shaking table dan magnetic separator, sebagian besar kajian masih berfokus pada parameter metalurgi seperti peningkatan kadar konsentrat, recovery mineral, dan efisiensi proses pemisahan. Penelitian-penelitian tersebut umumnya belum menghubungkan secara langsung hasil optimasi teknis dengan aspek kelayakan investasi yang menjadi dasar penting dalam pengambilan keputusan industri. Padahal, keberhasilan suatu teknologi pengolahan mineral tidak hanya ditentukan oleh kemampuan menghasilkan konsentrat berkualitas tinggi, tetapi juga harus mempertimbangkan aspek ekonomi seperti kebutuhan modal awal (capital expenditure), biaya operasional (operational expenditure), tingkat pengembalian investasi, serta ketahanan proyek terhadap perubahan harga komoditas. Kesenjangan tersebut menunjukkan bahwa masih diperlukan penelitian yang mampu mengintegrasikan evaluasi teknis dan finansial secara bersamaan, khususnya pada konteks pengolahan bijih timah primer di wilayah Bangka Belitung.

Urgensi penelitian ini semakin meningkat sejalan dengan kebutuhan industri pertambangan untuk melakukan transformasi menuju pemanfaatan sumber daya mineral yang lebih efisien dan berkelanjutan. Penurunan cadangan timah aluvial menyebabkan perusahaan pertambangan harus mencari alternatif pengolahan terhadap sumber daya primer yang sebelumnya kurang ekonomis untuk dikembangkan. Tanpa adanya kajian yang komprehensif mengenai performa teknologi dan kelayakan ekonominya, investasi pada fasilitas pengolahan bijih primer memiliki risiko ketidakpastian yang tinggi. Oleh karena itu, analisis terhadap kombinasi shaking table dan magnetic separator pada bijih timah primer Tambang Paku, Bangka Selatan, menjadi penting untuk memberikan gambaran mengenai kemampuan

teknologi tersebut dalam meningkatkan kadar Sn, mempertahankan recovery, serta menghasilkan keputusan investasi yang berbasis data teknis dan ekonomi. Pendekatan ini diharapkan mampu mendukung strategi konservasi mineral melalui peningkatan pemanfaatan cadangan yang sebelumnya memiliki nilai ekonomi rendah.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan integratif yang menggabungkan optimasi proses pemisahan mineral dengan analisis kelayakan investasi pada pengolahan bijih timah primer. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang lebih menitikberatkan pada aspek peningkatan performa teknis, penelitian ini menghubungkan hasil pengujian laboratorium berupa kadar, recovery, dan neraca logam dengan indikator ekonomi seperti Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Payback Period (PBP), dan Profitability Index (PI). Integrasi tersebut memberikan perspektif yang lebih aplikatif karena mampu menjawab tidak hanya apakah teknologi tersebut efektif secara metalurgi, tetapi juga apakah teknologi tersebut layak diterapkan pada skala industri. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah berupa model evaluasi terpadu antara aspek rekayasa pengolahan mineral dan pengambilan keputusan investasi pertambangan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja kombinasi shaking table dan magnetic separator dalam meningkatkan kadar serta recovery Sn dari bijih timah primer Tambang Paku, Bangka Belitung, sekaligus menganalisis kelayakan investasi penerapan teknologi tersebut pada skala operasional. Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat teoritis dalam memperkaya kajian mengenai teknologi pemisahan mineral berbasis sifat fisik, khususnya pada pengolahan bijih timah primer yang kompleks. Selain itu, secara praktis penelitian ini dapat menjadi referensi bagi perusahaan pertambangan, investor, dan pemangku kepentingan dalam menentukan strategi pengembangan fasilitas pengolahan mineral yang lebih efisien, ekonomis, dan berkelanjutan. Hasil penelitian juga diharapkan dapat mendukung optimalisasi pemanfaatan sumber daya timah Indonesia melalui peningkatan nilai tambah mineral serta pengurangan kehilangan timah selama proses pengolahan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif terapan dengan pendekatan eksperimental laboratorium yang dipadukan dengan evaluasi kelayakan investasi. Rancangan penelitian disusun agar setiap keluaran teknis dapat langsung digunakan sebagai masukan perhitungan ekonomi, sehingga aliran data dari karakterisasi bijih hingga pemodelan finansial bersifat berkesinambungan dan dapat ditelusuri.

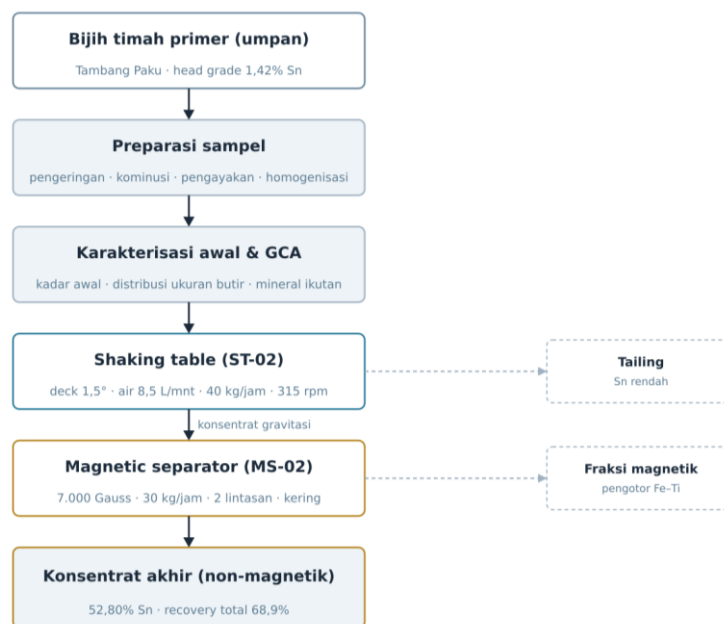
Lokasi, Sampel, dan Preparasi

Bijih timah primer berasal dari Tambang Paku, Kabupaten Bangka Selatan, Provinsi Kepulauan Bangka Belitung. Pengambilan contoh dilakukan secara purposive pada lima titik yang mewakili variasi domain oksida, transisi, dan fresh, masing-masing sekitar 20 kg, kemudian dihomogenkan menjadi komposit 100 kg. Preparasi sampel meliputi pengeringan, pengecilan ukuran (kominusi), pengayakan, dan homogenisasi untuk memperoleh fraksi kerja #20–#200 mesh (sekitar $-1,00 +0,074$ mm) yang siap diumpankan ke shaking table.

Karakterisasi awal dilakukan untuk menentukan kadar Sn awal (head grade), komposisi kimia, kadar air, serta distribusi Sn per fraksi ukuran melalui grain counting analysis (GCA). Data ini menjadi dasar penyusunan neraca massa dan neraca logam pada tahap berikutnya.

Pengujian Shaking Table dan Magnetic Separator

Uji shaking table dilakukan terhadap contoh feed dengan tiga variasi parameter operasi yang mencakup kemiringan deck, debit air pencuci, kecepatan stroke, dan laju umpan. Keberhasilan tiap kondisi dinilai dari keseimbangan antara peningkatan kadar dan perolehan recovery, bukan semata-mata dari kadar tertinggi. Konsentrat dari kondisi optimum shaking table selanjutnya digunakan sebagai umpan magnetic separator. Pada tahap ini divariasikan kuat medan magnet (5.000, 7.000, dan 9.000 Gauss), laju umpan, serta jumlah lintasan pada kondisi umpan kering. Produk magnetic separator dikelompokkan menjadi fraksi magnetik (pengotor) dan fraksi non-magnetik sebagai kandidat konsentrat akhir. Diagram alir keseluruhan proses ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian pengolahan bijih timah primer dengan kombinasi shaking table dan magnetic separator.

Analisis Data Teknis dan Kelayakan Investasi

Analisis teknis menggunakan neraca massa dan neraca logam. Recovery Sn dihitung dengan persamaan (1), dan enrichment ratio sebagai perbandingan kadar konsentrat terhadap kadar umpan.

$$\text{Recovery Sn (\%)} = (C \times c) / (F \times f) \times 100\% \quad (1)$$

Dengan C adalah massa konsentrat, c kadar Sn konsentrat, F massa umpan, dan f kadar Sn umpan. Analisis ekonomi disusun dengan menurunkan hasil teknis ke skala operasi pada kapasitas 30 ton umpan per hari dan 330 hari operasi per tahun. Komponen biaya modal (CAPEX) dan biaya operasi (OPEX) diestimasi berdasarkan acuan industri lokal. Indikator kelayakan yang digunakan adalah Net Present Value (NPV) dengan tingkat diskonto setara WACC sebesar 10,5% dan umur proyek 5 tahun, Internal Rate of Return (IRR), Payback Period (PBP), serta profitability index (PI). Proyek dinyatakan layak apabila NPV bernilai positif dan IRR melampaui WACC (Kasmir & Jakfar, 2010). Harga jual Sn diasumsikan USD 42.500/ton

dengan kurs Rp 16.700. Analisis sensitivitas dilakukan dengan menurunkan harga timah dan recovery total masing-masing hingga 20% untuk menguji ketahanan kelayakan proyek.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Awal Bijih

Komposit bijih timah primer Tambang Paku memiliki head grade 1,42% Sn dengan komposisi yang didominasi mineral silikat. Komposisi kimia utama feed disajikan pada Tabel 1. Dominasi SiO_2 menegaskan bahwa kuarsa merupakan gangue utama, sedangkan Fe_2O_3 hadir sebagai pengotor penting yang menjadi alasan rasional bagi penerapan tahap pemisahan magnetik setelah konsentrasi gravitasi.

Tabel 1. Komposisi kimia dan sifat fisik komposit umpan (feed).

Parameter	Nilai
Kadar Sn (head grade)	1,42%
SiO_2	54,8%
Fe_2O_3	12,6%
Al_2O_3	10,4%
Kadar air	5,3%
Bulk density	1,62 ton/m ³
Berat jenis kasiterit (SnO_2)	6,8–7,1
Berat jenis kuarsa (SiO_2)	2,6–2,7

Hasil analisis GCA memperlihatkan bahwa sebaran Sn tidak merata pada seluruh fraksi ukuran. Distribusi Sn terbesar berada pada fraksi $-70 +100$ mesh sebesar 30,6%, sedangkan kadar Sn tertinggi terdapat pada fraksi $-100 +150$ mesh sebesar 2,25%. Temuan ini memberikan dua implikasi penting: pertama, persentase butir kasiterit relatif rendah di tengah dominasi silikat sehingga strategi pemisahan harus mengandalkan perbedaan berat jenis; kedua, pengendalian fraksi medium–halus menjadi kunci untuk menjaga recovery sekaligus kebersihan konsentrat.

Kinerja Pemisahan Shaking Table

Uji shaking table pada tiga variasi parameter menunjukkan bahwa kondisi ST-02 memberikan keseimbangan terbaik antara kadar dan recovery, sehingga dipilih sebagai kondisi optimum. Kondisi tersebut dicapai pada kemiringan deck 1,5°, laju air pencuci 8,5 L/menit, laju umpan 40 kg/jam, dan kecepatan stroke 315 rpm. Pada kondisi ini kadar Sn meningkat dari 1,42% menjadi 38,20% dengan recovery 75,17% dan enrichment ratio sekitar 27 kali. Neraca massa kondisi optimum disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Neraca massa shaking table pada kondisi optimum (ST-02), basis komposit 20 kg.

Produk	Massa (kg)	Kadar Sn (%)	Sn (kg)	Distribusi Sn (%)
Umpan (feed)	20,000	1,42	0,2840	100,00
Konsentrat (ST-02)	0,559	38,20	0,2136	75,17

Produk	Massa (kg)	Kadar Sn (%)	Sn (kg)	Distribusi Sn (%)
Middling + tailing	19,441	0,36	0,0704	24,83

Dari 0,2840 kg Sn dalam umpan, sebanyak 0,2136 kg terkonsentrasi pada produk shaking table, setara recovery 75,17%. Hasil ini menegaskan prinsip early liberation, early recovery: pemisahan gravitasi mampu menaikkan kadar secara signifikan, namun konsentrat masih mengandung mineral pengotor besi sehingga kadar 38,20% belum memadai sebagai konsentrat jual dan perlu dibersihkan lebih lanjut.

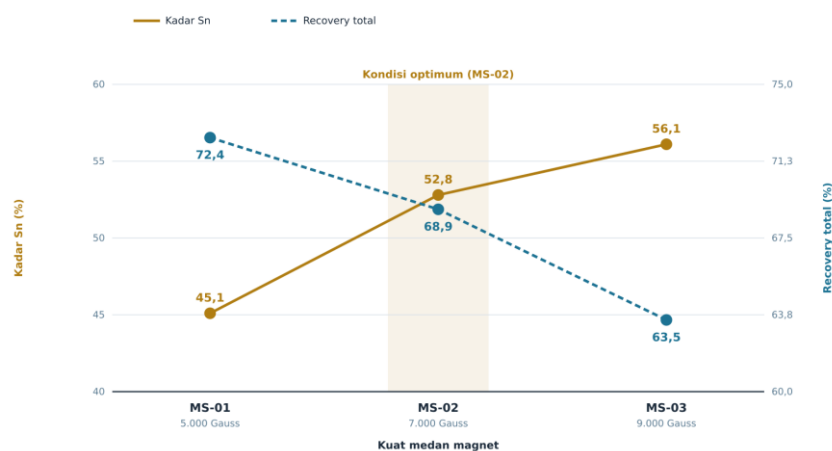
Kinerja Pemisahan Magnetic Separator

Konsentrat optimum shaking table kemudian diproses menggunakan magnetic separator untuk menurunkan kandungan mineral pengotor magnetik dan paramagnetik. Ringkasan hasil pada tiga variasi kuat medan magnet disajikan pada Tabel 3. Peningkatan kuat medan magnet konsisten menaikkan kadar Sn pada fraksi non-magnetik, namun disertai penurunan recovery total karena sebagian partikel komposit pembawa Sn ikut tertarik ke fraksi magnetik.

Tabel 3. Ringkasan hasil uji magnetic separator pada berbagai kuat medan magnet.

Kondisi	Kuat medan (Gauss)	Kadar Sn (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Recovery total (%)
MS-01	5.000	45,1	—	72,4
MS-02 (optimum)	7.000	52,80	5,6	68,9
MS-03	9.000	56,1	3,8	63,5

Kondisi MS-02 (7.000 Gauss, laju umpan 30 kg/jam, dua lintasan, umpan kering) dipilih sebagai kondisi optimum karena memberikan keseimbangan terbaik, yaitu kadar akhir 52,80% Sn dengan Fe₂O₃ turun menjadi 5,6% dan recovery total 68,9%. Sebaliknya, kondisi MS-03 menghasilkan kadar tertinggi (56,1%) tetapi recovery total justru turun menjadi 63,5%. Hubungan saling tukar (trade-off) antara kadar dan recovery ini diilustrasikan pada Gambar 2, dan menjadi dasar penegasan bahwa kondisi optimum bukanlah kondisi berkadar maksimum.



Gambar 2. Hubungan antara kuat medan magnet, kadar Sn, dan recovery total pada tahap magnetic separator.

Neraca massa pada kondisi MS-02 disajikan pada Tabel 4. Dari 0,559 kg konsentrat shaking table berkadar 38,20% Sn dihasilkan 0,371 kg produk non-magnetik berkadar 52,80% Sn yang mengandung 0,196 kg Sn. Tahap magnetic separator dengan demikian berperan sebagai tahap pembersihan konsentrat gravitasi, bukan untuk menarik kasiterit, melainkan untuk membuang mineral pengotor yang bukan timah.

Tabel 4. Neraca massa magnetic separator pada kondisi optimum (MS-02).

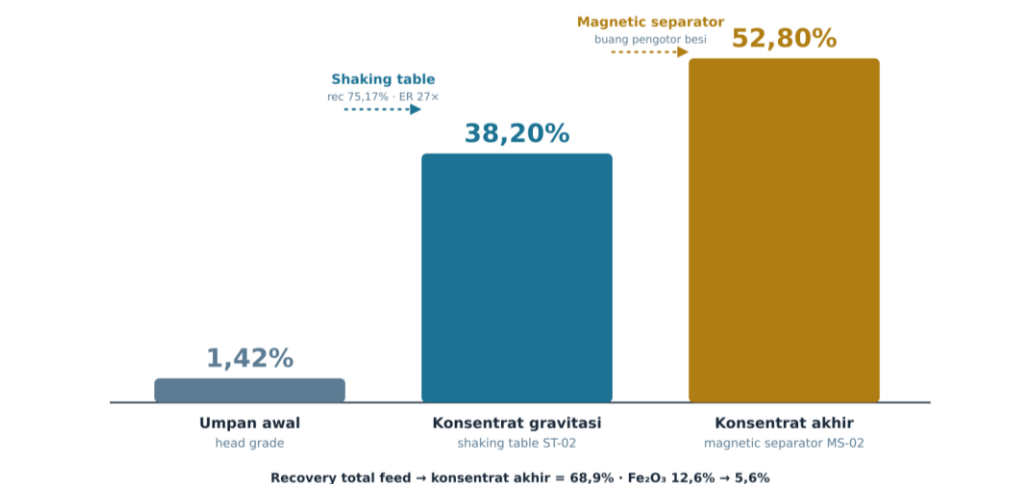
Produk	Massa (kg)	Kadar Sn (%)	Sn (kg)	Distribusi Sn (%)
Umpan (konsentrat ST-02)	0,559	38,20	0,2136	100,00
Non-magnetik (konsentrat akhir)	0,371	52,80	0,1959	91,72
Fraksi magnetik	0,188	9,40	0,0177	8,28

Peningkatan Kadar dan Recovery Total Terintegrasi

Integrasi neraca teknis dari umpan awal hingga konsentrat akhir disajikan pada Tabel 5 dan diilustrasikan pada Gambar 3. Secara bertahap kadar Sn meningkat dari 1,42% pada feed menjadi 38,20% pada konsentrat gravitasi, lalu menjadi 52,80% pada konsentrat akhir, sementara kandungan Fe_2O_3 menurun dari 12,6% menjadi 5,6%. Recovery total dari feed hingga konsentrat akhir tercatat 68,9%, yang menunjukkan bahwa sebagian besar Sn berhasil dipertahankan sepanjang rangkaian proses.

Tabel 5. Integrasi neraca teknis dari umpan awal hingga konsentrat akhir.

Tahap	Kadar Sn (%)	Recovery (%)	Keterangan
Umpan awal	1,42	100,0	head grade komposit
Konsentrat gravitasi (ST-02)	38,20	75,17	enrichment ratio 27×
Konsentrat akhir (MS-02)	52,80	68,9	recovery total feed→produk



Gambar 3. Peningkatan kadar Sn secara bertahap melalui kombinasi shaking table dan magnetic separator.

Analisis Kelayakan Investasi

Hasil teknis diturunkan ke skala operasi dengan kapasitas 30 ton umpan per hari dan 330 hari operasi per tahun, sehingga feed tahunan mencapai 9.900 ton. Pada head grade 1,42% Sn, umpan tahunan mengandung sekitar 140,58 ton Sn; dengan recovery total 68,9%, Sn tertagih diperkirakan 96,9 ton per tahun yang setara dengan sekitar 183,5 ton konsentrat akhir berkadar 52,80%. Asumsi produksi dan pendapatan tahunan dirangkum pada Tabel 6.

Tabel 6. Asumsi produksi dan pendapatan tahunan.

Parameter	Nilai
Kapasitas umpan	30 ton/hari (330 hari/tahun)
Feed tahunan	9.900 ton
Recovery total	68,9%
Sn tertagih	96,9 ton/tahun
Konsentrat akhir (52,80% Sn)	183,5 ton/tahun
Harga Sn	USD 42.500/ton (kurs Rp 16.700)
Pendapatan tahunan	Rp 68,76 miliar

Berdasarkan estimasi biaya, proyek memerlukan CAPEX sebesar Rp 51,75 miliar dan OPEX Rp 34,55 miliar per tahun. Komponen CAPEX terbesar berasal dari unit magnetic separator karena tahap ini memerlukan peralatan pemisahan magnetik beserta sistem pengeringan dan kondisioning umpan. Dengan pendapatan tahunan Rp 68,76 miliar, arus kas bersih tahunan diperkirakan Rp 28,14 miliar. Indikator kelayakan finansial proyek ditampilkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Ringkasan indikator kelayakan finansial proyek.

Indikator	Nilai
CAPEX	Rp 51,75 miliar
OPEX	Rp 34,55 miliar/tahun
Arus kas bersih	Rp 28,14 miliar/tahun
Tingkat diskonto (WACC)	10,5%
Umur proyek	5 tahun
Net Present Value (NPV)	Rp 53,58 miliar
Internal Rate of Return (IRR)	46,26%
Payback Period (PBP)	1,84 tahun
Profitability Index (PI)	2,04

Seluruh indikator menunjukkan bahwa proyek layak secara finansial. NPV bernilai positif Rp 53,58 miliar, IRR sebesar 46,26% jauh melampaui WACC 10,5%, payback period kurang dari dua tahun, dan profitability index 2,04 yang berarti nilai kini manfaat lebih dari dua kali lipat investasi. Keterkaitan langsung antara hasil teknis dan keekonomian ini

memperlihatkan bahwa kelayakan investasi sangat bergantung pada kesinambungan angka dari tahap karakterisasi hingga pemodelan finansial.

Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa proyek paling peka terhadap penurunan harga timah dan recovery total karena keduanya secara langsung menentukan pendapatan. Pengujian dilakukan dengan menurunkan kedua variabel tersebut hingga 20% dari skenario dasar (Tabel 8). Pada skenario tertekan ini, NPV tetap positif sebesar Rp 13,30 miliar dengan IRR 20,20% yang masih berada di atas WACC 10,5%. Dengan demikian, meskipun margin menipis, proyek masih layak dan memiliki ketahanan yang memadai terhadap fluktuasi pasar.

Tabel 8. Analisis sensitivitas terhadap penurunan harga timah dan recovery.

Skenario	NPV	IRR
Skenario dasar	Rp 53,58 miliar	46,26%
Harga & recovery turun 20%	Rp 13,30 miliar	20,20%

Posisi terhadap Studi Terdahulu dan Kebaruan

Kecenderungan hasil penelitian ini sejalan dengan prinsip umum yang dilaporkan dalam literatur pengolahan timah, yaitu bahwa konsentrasi gravitasi mampu menaikkan kadar SnO₂ secara nyata sementara pemisahan magnetik berperan menurunkan pengotor besi. Posisi penelitian terhadap studi terdahulu dirangkum secara kualitatif pada Tabel 9. Berbeda dengan Ramdani dkk. (2019) dan Rifa'i & Hidayat (2020) yang menekankan peningkatan efisiensi teknis, penelitian ini melengkapi rangkaian analisis hingga keputusan investasi.

Tabel 9. Posisi penelitian terhadap studi terdahulu (kualitatif).

Sumber	Fokus kajian	Kecenderungan hasil
Ramdani dkk. (2019)	Shaking table + magnetic separator, bijih timah	Efisiensi produksi naik ± 70%
Rifa'i & Hidayat (2020)	Shaking table + magnetic separator, Bangka Belitung	Efisiensi produksi naik ± 50%
Putri dkk. (2024)	Magnetic separator pada pengolahan ulang monasit	Kadar dan recovery naik, limbah berkurang
Penelitian ini	Kombinasi alat + kelayakan investasi, bijih timah primer	1,42% → 52,8% Sn; recovery 68,9%; proyek layak

Kebaruan penelitian terletak pada integrasi hasil optimasi teknis dengan evaluasi kelayakan investasi pada konteks bijih timah primer Bangka Belitung—aspek yang belum banyak dibahas pada studi terdahulu. Implikasi praktisnya, penerapan kombinasi shaking table dan magnetic separator di Tambang Paku dapat dipertimbangkan sebagai alternatif pengolahan awal bijih timah primer yang sekaligus mendukung prinsip konservasi mineral melalui penurunan kehilangan Sn ke tailing.

Penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu disampaikan secara terbuka. Pertama, jumlah dan variasi sampel masih terbatas sehingga belum tentu mewakili seluruh karakter cebakan. Kedua, sebagian parameter ekonomi bersifat asumtif, terutama harga timah,

kurs, dan komponen biaya, sehingga perlu pemutakhiran berkala. Ketiga, terdapat potensi perbedaan kinerja antara skala laboratorium dan operasi nyata, sehingga validasi melalui uji pilot plant sangat dianjurkan sebelum penerapan skala industri.

KESIMPULAN

Kombinasi shaking table dan magnetic separator terbukti mampu meningkatkan kadar Sn bijih timah primer Tambang Paku secara bertahap dari 1,42% pada umpan awal menjadi 38,20% pada konsentrat gravitasi (kondisi optimum ST-02: kemiringan deck 1,5°, air 8,5 L/menit, umpan 40 kg/jam, stroke 315 rpm; recovery 75,17%), dan selanjutnya menjadi 52,80% pada konsentrat akhir (kondisi optimum MS-02: 7.000 Gauss, 30 kg/jam, dua lintasan, kering), dengan recovery total 68,9% dan penurunan Fe_2O_3 dari 12,6% menjadi 5,6%. Hasil ini menegaskan bahwa kondisi optimum bukanlah kondisi berkadar tertinggi, melainkan kondisi yang menyeimbangkan kadar dan recovery.

Pada kapasitas rancangan 30 ton/hari, proyek layak secara finansial dengan NPV Rp 53,58 miliar, IRR 46,26% (di atas WACC 10,5%), payback period 1,84 tahun, dan profitability index 2,04. Analisis sensitivitas menunjukkan proyek tetap layak meskipun harga timah dan recovery turun 20% (NPV Rp 13,30 miliar; IRR 20,20%). Dengan demikian, kombinasi kedua teknologi tersebut direkomendasikan sebagai alternatif pengolahan bijih timah primer yang layak secara teknis dan ekonomis, dengan catatan perlunya validasi pilot plant, pengendalian fraksi ukuran $-70 +100$ dan $-100 +150$ mesh, pemanfaatan kembali middling, serta pemutakhiran asumsi ekonomi secara berkala.

REFERENSI

- Anggraini, M., Nawawi, F. W., & Widana, K. S. (2019). Penentuan Kondisi Optimum Proses Ekstraksi Uranium dan Torium dari Terak II Timah dengan Metode Pelindian Asam Sulfat dan Solvent Extraction Trioctylamine (TOA). *Eksplorium*, 40(1), 11–18.
- Barzegari, A., & Rezai, B. (2018). Mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. Elsevier.
- Buchmann, C., & Schreiber, A. (2018). Evaluation of magnetic separation efficiency on a cassiterite-bearing skarn ore by means of integrative SEM-based image and XRF–XRD analysis. *Minerals*, 8(9), 390.
- Irzon, R. (2021). Penambangan timah di Indonesia: Sejarah, masa kini, dan prospeksi. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 17(3), 179–189. <https://doi.org/10.30556/jtmb>
- Kasmir, & Jakfar. (2010). Studi kelayakan bisnis (Edisi revisi). Jakarta: Prenada Media Group.
- Kurniawan, A. B., Risdianto, E., & Wibowo, P. A. (2019). Tin mining in Indonesia: The sustainable mining challenge. *Resources Policy*, 60, 72–81.
- Petrus, H. T. B. M., Sutijan, Sujoto, V. S. H., Tangkas, I. W. C. W. H., Sumardi, S., & Astuti, W. (2022). Pengaruh tegangan operasi dan konsentrasi larutan elektrolit pada pemurnian timah. *Jurnal Rekayasa Proses*, 16(1).
- Pratiwi, D. D., Hidayat, T., & Sari, R. P. (2020). Tin mining waste management using magnetic separator and shaking table combination: A case study of Lampung Province, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- Putri, N., dkk. (2024). Analysis of tin grade and recovery in monazite retreatment with three disc magnetic separator. *Journal of Metallurgical Engineering and Processing*.
- Ramdani, M., Supriyadi, S., & Setiawan, A. (2019). Application of shaking table and magnetic separator for tin ore processing: A case study. *Minerals Engineering*, 134, 12–20.

- Rifa'i, M., & Hidayat, T. (2020). Pengolahan mineral timah menggunakan shaking table dan magnetic separator di Kepulauan Bangka Belitung. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*.
- Sari, R. M., & Widodo, A. (2020). The effect of shaking table on concentration of tin ore. *Journal of Physics: Conference Series*, 1526(1), 012078.
- Su, Z., Tu, Y., Chen, X., Zhang, Y., Han, B., Anderson, C., & Jiang, T. (2019). A value-added multistage utilization process for the gradient recovery of tin, iron and precious metals. *Journal of Cleaner Production*.
- Subagyo, A., & Wardana, I. N. G. (2020). Tin mineral processing towards sustainable development goals in Bangka-Belitung Islands Province, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- Sulastri, E., Anwar, K., Nur, O. I., & Amri, A. (2019). Tin mining activity in Bangka Island—Case study of the impact on environmental degradation. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*.
- Wang, Y., Zhang, L., & Li, J. (2019). Advances in the extraction and processing of tin from cassiterite. *Journal of Cleaner Production*, 210, 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.355>
- Wu, R., Zhang, J., Fan, X., Qin, S., & Sun, B. (2020). An overview of the advancements of magnetic separators for mineral processing. *Minerals Engineering*, 147, 106039.
- Zhang, Y., Li, X., Li, W., Zhang, C., & Wang, Z. (2021). Study on the improvement of flotation separation efficiency of cassiterite from complex sulfide ore by hydrocyclone classification. *Minerals Engineering*.