

PELEBURAN PLASMA HIDROGEN UNTUK PENGHILANGAN FOSFOR DALAM MONASIT

FAIZAH 'AINUR RIDLO*, ZULFIADI ZULHAN, TAUFIQ HIDAYAT

Departemen Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No. 10, Bandung 40132, Indonesia

Abstrak. Monasit merupakan mineral fosfat pembawa unsur tanah jarang (*rare earth elements/REEs*) yang banyak ditemukan pada tailing endapan plaser kasiterit, khususnya hasil penambangan timah. Berdasarkan laporan PT Timah Tbk tahun 2023, sebanyak 1.424 ton monasit telah berhasil dikumpulkan. Namun, struktur kristal monasit yang inert dan tahan panas tinggi membutuhkan proses dekomposisi menjadi bentuk oksida agar REE dapat diekstraksi. Metode konvensional seperti perlakuan asam atau basa membutuhkan reagen kimia pekat, suhu tinggi, dan waktu reaksi panjang, serta menghasilkan limbah berbahaya. Sebagai alternatif, teknologi *hydrogen plasma smelting reduction* (HPSR) menawarkan pendekatan yang lebih ramah lingkungan dengan kemampuan menghilangkan fosfor secara selektif dari struktur monasit. Dalam penelitian ini, percobaan defosforisasi dilakukan dengan variasi durasi reduksi 1, 4, 7, dan 15 menit. Sampel konsentrat monasit 0,5 gram dibentuk menjadi briket, direduksi dalam reaktor HPSR pada laju alir gas 5 L/menit dengan rasio H_2/Ar sebesar 4:1. Karakterisasi dilakukan menggunakan XRD dan XRF sebelum reduksi, serta SEM-EDS setelahnya. Hasil menunjukkan efisiensi penghilangan fosfor meningkat seiring waktu: 70,6 % (1 menit), 92,7 % (4 menit), 95,7 % (7 menit), dan 99,1 % (15 menit).

Kata kunci: Monasit, defosforisasi, *hydrogen plasma smelting reduction*, durasi reduksi

Abstract. Monazite is a phosphate mineral containing rare earth elements (REEs) and is commonly found in cassiterite placer deposits, especially in tin mining tailings. According to PT Timah Tbk's 2023 report, Indonesia successfully collected 1,424 tons of monazite, indicating its potential as a strategic REE source. However, monazite has a stable and thermally resistant phosphate crystal structure, requiring decomposition into REE oxides for further extraction. Conventional methods, such as acid or alkaline treatment, demand high reagent concentrations and elevated suhues over several hours, generating significant chemical and radioactive waste. As an alternative, hydrogen plasma smelting reduction (HPSR) offers a more efficient and environmentally friendly method by selectively removing phosphorus from the monazite structure. In this study, dephosphorization was performed using HPSR with varying reduction durations of 1, 4, 7, and 15 minutes. A 0.5 g monazite concentrate sample was briquetted and reduced in a plasma reactor with a total gas flow rate of 5 L/min and an H_2/Ar ratio of 4:1. Characterization was conducted using XRD and XRF before reduction, and SEM-EDS after reduction. Phosphorus removal increased with time: 70.6 % at 1 minute, 92.7 % at 4 minutes, 95.7 % at 7 minutes, and 99.1 % at 15 minutes.

Keywords: Monazite, dephosphorization, hydrogen plasma smelting reduction, reduction duration

* Email: faizahainurr@gmail.com

1. Pendahuluan

Indonesia sebagai salah satu produsen utama timah global yang menyumbang sekitar 16,67 % dari total produksi timah dunia [1], memiliki potensi sebagai sumber komoditas unsur tanah jarang dari mineral yang berasosiasi dalam endapan plaser kasiterit, seperti monasit, xenotim, ilmenit, rutil, dan zirkon. *Tailing* yang dihasilkan selama proses penambangan timah mengandung sejumlah besar monasit yang merupakan salah satu mineral pembawa unsur tanah jarang [2]. Berdasarkan laporan PT Timah Tbk pada tahun 2023, jumlah total monasit yang berhasil terkumpul mencapai 1.424 ton dengan rincian 767 ton merupakan monasit *high grade* dan 657 ton merupakan monasit *low grade* [3]. Monasit merupakan mineral fosfat yang memiliki stabilitas termal yang tinggi dan tahan terhadap pelapukan karena sifat kristal fosfatnya yang sangat inert sehingga monasit memerlukan proses pelindian kimia agresif untuk mengekstraksi unsur tanah jarang [4].

Pengolahan monasit diawali dengan *pretreatment* atau dekomposisi untuk memodifikasi struktur REE-PO₄ menjadi bentuk yang lebih mudah untuk mengekstraksi REE [5]. Dekomposisi tersebut terbagi menjadi dua cara, yaitu dengan perlakuan asam dan perlakuan basa [6]. Beberapa penelitian telah menggunakan asam mineral, termasuk H₂SO₄, HCl, dan HNO₃ pada suhu tinggi selama beberapa jam untuk memecah struktur fosfat dalam monasit menggunakan teknik pelindian [7]. Namun, dalam proses alkali, monasit didekomposisi pada suhu tinggi menggunakan metode fusi, dimana NaOH and Na₂CO₃ berfungsi sebagai agen dekomposisi [8]. Teknik-teknik ini dapat menyebabkan pembentukan fosfida, yaitu senyawa yang mengandung anion P³⁻ dan dapat stabil dalam lingkungan asam maupun basa. Hal ini dapat mencemari produk akhir dan mengganggu fungsinya [4]. Selain itu, reduksi karbotermik yang menggunakan reduktor seperti karbon aktif, arang, dan kokas dapat digunakan untuk menghilangkan fosfor dan mendekomposisi monasit. Proses reduksi ini dibantu oleh sifat reduktif karbon dan suhu tinggi. Pembentukan karbida unsur tanah jarang (REE), yang dapat mengendap menjadi larutan dengan oksigen dan nitrogen untuk menghasilkan *oxycarbides* dan *oxycarbonitrides*, merupakan masalah utama dalam reduksi suhu tinggi dengan karbotermal [4], [5]. Walaupun proses tersebut efektif, masih terdapat kekurangan yakni proses tersebut menghasilkan limbah kimia dan radioaktif dalam jumlah yang besar, serta memerlukan waktu proses yang lama dan tidak ramah lingkungan [9].

Teknologi baru telah diusulkan untuk meningkatkan efisiensi ekstraksi dengan mengubah struktur monasit sedemikian rupa sehingga membuatnya lebih mudah bereaksi dengan bahan kimia. Salah satu metode tersebut adalah pemecahan melalui plasma hidrogen suhu tinggi pada kisi kristal monasit menggunakan *hydrogen plasma smelting reduction* (HPSR) untuk menghilangkan fosfor. Kemp dan Cilliers meneliti pengolahan monasit dengan plasma termal bertekanan tinggi, diikuti dengan perendaman dalam air selama setengah jam. Dengan efisiensi ekstraksi maksimum 38,56 %, monasit yang diolah menghasilkan 20 kali lebih banyak unsur tanah jarang (REE) dibandingkan sampel yang tidak diolah [9], [10]. Bissett dkk. juga meneliti dekomposisi monasit dengan plasma termal bertekanan tinggi dalam kondisi berbeda (H₂/Ar, He/Ar, O₂/Ar), yang diikuti dengan ekstraksi HCl 32 % [11]. Sampel yang diolah dengan plasma H₂/Ar memiliki efisiensi ekstraksi REE tertinggi yakni 44 %. Namun, studi ini belum menyelidiki defosforisasi monasit lebih lanjut untuk kemungkinan penggunaannya dalam pemecahan monasit.

Berdasarkan latar belakang tersebut, pada penelitian ini dilakukan percobaan skala laboratorium yang berfokus pada proses defosforisasi konsentrat monasit menggunakan proses HPSR sebagai metode alternatif yang lebih efisien dan ramah lingkungan untuk mempelajari pengaruh durasi reduksi terhadap karakteristik produk reduksi konsentrat monasit. Penelitian ini dilakukan dalam kondisi reduktif dengan durasi yang jauh lebih cepat dalam hitungan menit, yakni 1, 4, 7, dan 15 menit.

2. Eksperimen

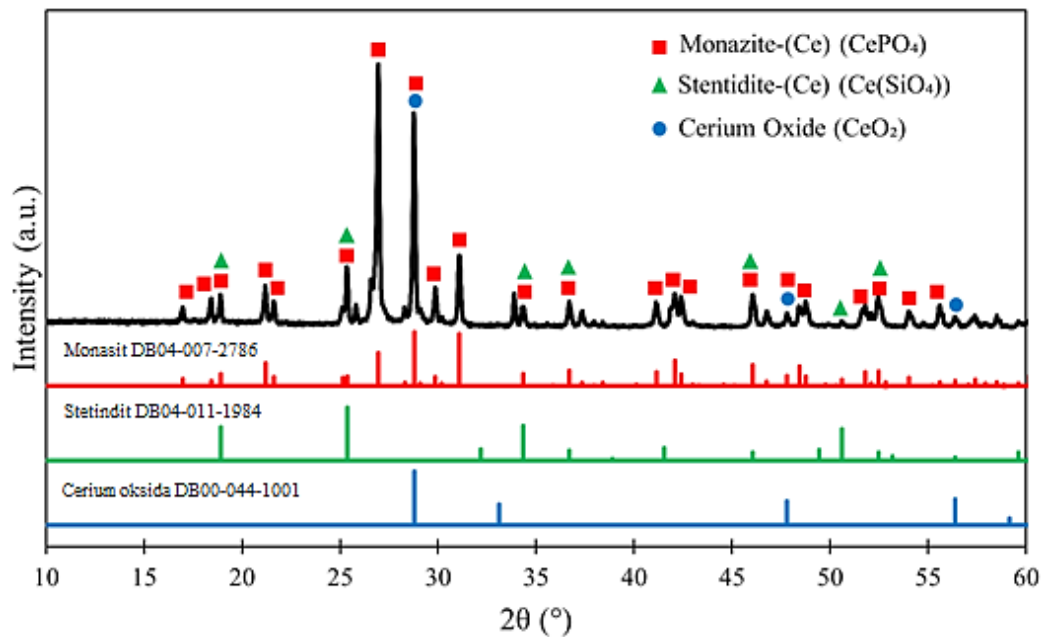
Penelitian ini menggunakan konsentrat monasit dengan ukuran lolos 45 mesh yang berasal dari PT Timah Tbk, Indonesia. Konsentrat monasit dikarakterisasi menggunakan *X-ray diffraction* (XRD) dan *X-ray fluorescence* (XRF) untuk melihat fasa dan komposisi senyawa yang terdapat pada konsentrat monasit. Pada penelitian ini, pemotong plasma Rilon Cut 40 dimodifikasi dan dipasang pada ruang baja tahan karat dengan jendela pengamatan untuk menciptakan reaktor plasma. Plasma beroperasi pada 35 A dan sekitar 40 V digunakan dalam uji defosforisasi. Elektroda generator plasma dipasang dengan *nozzle* pendingin air. Setelah menghilangkan oksigen sisa dari ruang dengan gas argon pada laju 1 L/menit, gas hidrogen diperkenalkan pada laju 4 L/menit sebelum pembakaran plasma. Sistem ditutup dengan menyalakan campuran gas keluar, yang membakar aliran keluar dan mengurangi kemungkinan ledakan.

Untuk menjaga kondisi termal yang stabil, briket monasit direduksi dalam wadah tembaga yang didinginkan dengan air, yang terletak di dasar reaktor. Skema perangkat yang digunakan serupa dengan yang dijelaskan dalam naskah-naskah sebelumnya [12], [13]. Eksperimen dilakukan dengan variasi durasi reduksi selama 1, 4, 7, dan 15 menit. Setelah proses reduksi, aliran hidrogen dihentikan, dan gas sisa diarahkan ke *torch* untuk membakar sisa hidrogen. Setelah api pembakaran padam sepenuhnya, reaktor dibuka, dan sampel yang telah direduksi dapat dikeluarkan. Produk yang dihasilkan menggunakan HPSR kemudian ditimbang untuk menghitung kehilangan berat dari sampel setelah direduksi. Lalu, sampel dikarakterisasi menggunakan *scanning electron microscope-energy dispersive spectroscopy* (SEM-EDS). Analisis melalui SEM-EDS dilakukan agar karakteristik hasil reduksi konsentrat monasit menggunakan HPSR tersebut dapat diketahui mikrostruktur dan komposisi kimianya

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakterisasi Awal Sampel Konsentrat Monasit

Komposisi mineralogi dan kimia dari konsentrat monasit masing-masing dianalisis menggunakan XRD dan XRF. Hasilnya disajikan dalam Gambar 2 dan Tabel 1. Berdasarkan analisis XRD, konsentrat tersebut sebagian besar terdiri dari monasit yang kaya cerium (Ce), dengan jumlah kecil fasa mineral lain, termasuk Stentindite-(Ce) dan CeO_2 . Berdasarkan hasil XRF, CeO_2 (27,24 %), La_2O_3 (12,75 %), dan Nd_2O_3 (10,08 %) merupakan oksida tanah jarang utama yang ditemukan dalam konsentrat monasit, dengan konsentrasi total oksida tanah jarang sebesar 57,73 % berat. Sementara itu, kontaminan lain yang ditemukan dalam konsentrat monasit yakni SiO_2 (1,79 %) dan SnO_2 (7,85 %). Sampel juga mengandung tingkat thorium yang signifikan (4,41 % sebagai ThO_2).



Gambar 1. Hasil karakterisasi XRD sampel konsentrat monasit

Tabel 1. Hasil karakterisasi XRF sampel konsentrat monasit (% berat)

Senyawa	% berat
CeO ₂	27,24
La ₂ O ₃	12,75
Nd ₂ O ₃	10,08
P ₂ O ₅ (P)	24,94 (10,89)
Pr ₆ O ₁₁	2,96
Sm ₂ O ₃	1,76
Gd ₂ O ₃	0,93
Tb ₄ O ₇	0,06
Dy ₂ O ₃	0,37
Ho ₂ O ₃	0,02
Er ₂ O ₃	0,10
Yb ₂ O ₃	0,04
Y ₂ O ₃	1,43
ThO ₂	4,41
SnO ₂	7,85
SiO ₂	1,79
U ₃ O ₈	0,19
SO ₃	1,08
Fe ₂ O ₃	0,91
ZrO ₂	0,57
TiO ₂	0,31
Bi ₂ O ₃	0,23

3.2. Pengaruh durasi reduksi terhadap defosforisasi konsentrat monasit

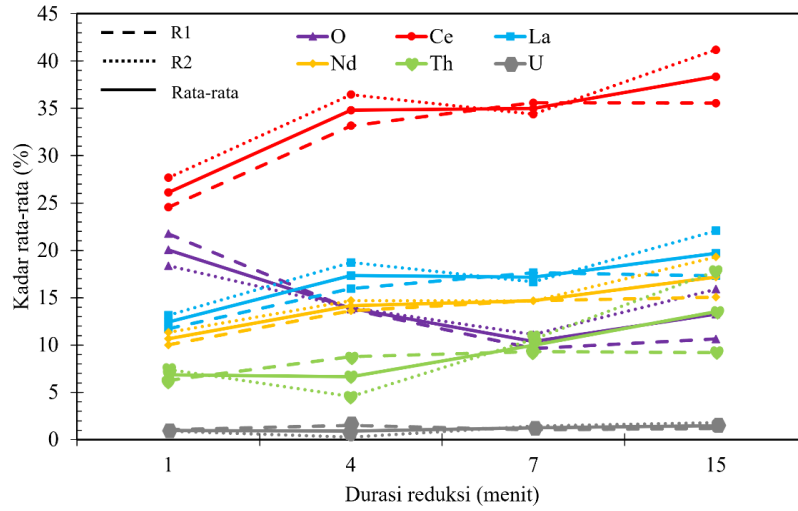
Pengaruh durasi reduksi terhadap kandungan unsur fosfor (P) yang terkandung dalam monasit setelah perlakuan plasma hidrogen ditunjukkan pada Tabel 2. Pengaruh durasi reduksi terhadap

kandungan P adalah bahwa semakin lama durasi reduksi, semakin rendah kandungan P dalam konsentrat monasit untuk membentuk oksida tanah jarang (REO). Selama proses reduksi, penghilangan berat sampel terjadi disebabkan oleh adanya kandungan fosfor yang keluar dalam bentuk gas PO, gas PO₂, dan gas P. Ketika proses reduksi berlangsung yang terjadi pada suhu teoretis sekitar 5.000 K hingga 25.000 K [14], sejumlah besar asap putih muncul melalui sela-sela reaktor serta pada saat reaktor dibuka. Selain itu, terlihat juga adanya endapan di bagian atas reaktor plasma tepatnya pada daerah kaca pengamatan. Jumlah endapan sangat kecil dikarenakan sampel yang digunakan hanya sebesar 0,5 gram sehingga analisis yang akurat untuk endapan tidak dapat dilakukan. Endapan tersebut kemungkinan besar merupakan senyawa yang mengandung fosfor yang terbentuk karena adanya proses defosforisasi konsentrat monasit pada suhu tinggi, dilihat dari warna endapan tersebut [15], [16].

Tabel 2. Persentase kadar unsur P sebelum dan setelah percobaan (% berat)

Durasi (menit)	Sebelum	Sesudah
1	10,89	6,87
4	10,89	1,97
7	10,89	1,45
15	10,89	0,40

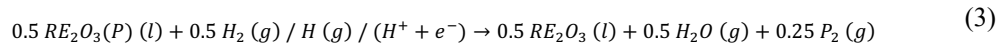
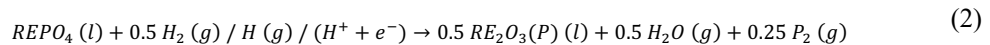
Berdasarkan data dari analisis XRF, kandungan P pada konsentrat monasit awal sekitar 10,89 %. Pada durasi reduksi 1 menit, kadar fosfor (P) relatif masih cukup tinggi sekitar 6,87 %, menunjukkan bahwa sebagian besar fosfat tanah jarang belum terdekomposisi secara maksimal. Seiring bertambahnya durasi reduksi hingga 15 menit, kadar fosfor menurun secara signifikan sekitar 0,4 %, menandakan bahwa proses defosforisasi berlangsung efektif dengan durasi yang lebih lama, dimana fosfat yang terikat dalam monasit mulai terurai dan dilepaskan. Selain itu, pada Gambar 2 menunjukkan adanya unsur lain yang terkandung dalam produk sebagai elemen mayor meliputi O (oksigen), Ce (cerium), La (*lanthanum*), Nd (*neodymium*), dan Th (*thorium*). Pada saat yang bersamaan dengan penurunan kadar fosfor, unsur O cenderung menurun akibat pelepasan fosfat dan reduksi oksida tanah jarang, sedangkan kadar unsur seperti Ce, La, Nd, dan Th cenderung meningkat atau stabil. Hal ini menunjukkan bahwa durasi reduksi yang lebih panjang membantu memecah senyawa fosfat dan membentuk fasa oksida tanah jarang yang lebih murni, sehingga kadar fosfor berkurang sementara unsur tanah jarang lainnya menjadi lebih terkonsentrasi. Perubahan proporsi unsur-unsur ini mengindikasikan bahwa proses reduksi memengaruhi distribusi dan konsentrasi elemen dalam produk, yang berpotensi berdampak pada sifat fisik dan kimia dari produk yang dihasilkan.



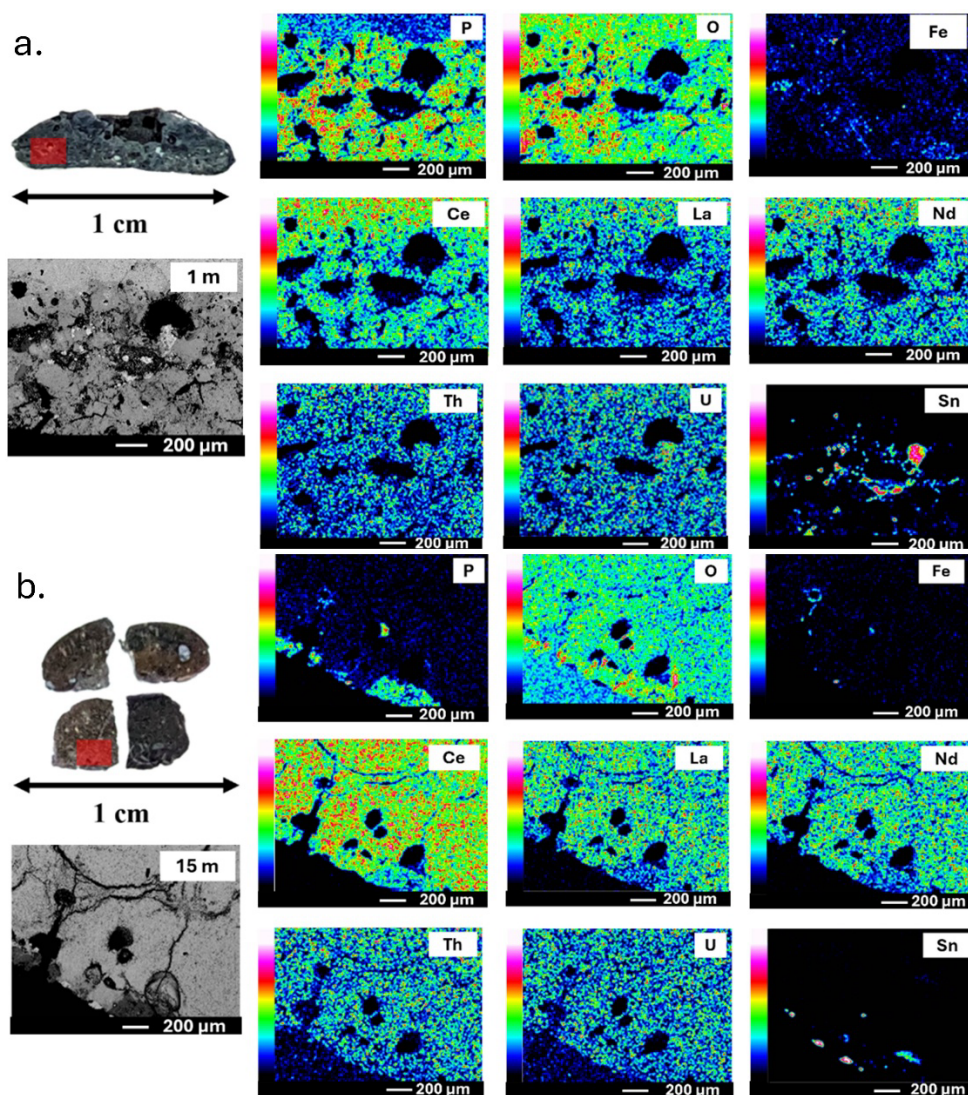
Gambar 2. Hasil analisis SEM-EDS kadar unsur selain P (%) pada produk hasil percobaan

Hasil analisis mikrostruktur dan peta persebaran unsur produk hasil percobaan dengan durasi reduksi 1 menit dan 15 menit ditunjukkan masing-masing oleh Gambar 3a dan 3b. Pada peta persebaran unsur, terlihat bahwa P masih terkonsentrasi di area tengah hingga bawah dari sampel. Hal ini menandakan bahwa dalam durasi reduksi 1 menit, defosforisasi belum berlangsung secara sempurna karena masih terdapat fosfor cukup tinggi pada sampel. Meskipun kandungan oksigen di area tersebut tergolong tinggi, fosfor juga masih terlihat dalam konsentrasi yang signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa di daerah bawah sampel, unsur tanah jarang seperti Ce, La, dan Nd masih berada dalam bentuk fosfat, yaitu REE-PO₄, dan belum sepenuhnya terkonversi menjadi oksida tanah jarang. Saat durasi perlakuan diperpanjang hingga 15 menit, proses defosforisasi hampir mencapai ke seluruh bagian briket, dimana plasma hidrogen mulai menembus lebih dalam ke bagian dalam briket.

Pada durasi 15 menit, struktur yang sebelumnya berpori mulai kembali merapat akibat kandungan P yang telah keluar serta oksida tanah jarang yang menyatu menjadi satu fasa setelah melalui fasa lelehan. Reaksi kimia yang terjadi saat proses reduksi berlangsung dengan HPSR ditunjukkan pada persamaan (1) hingga (3).



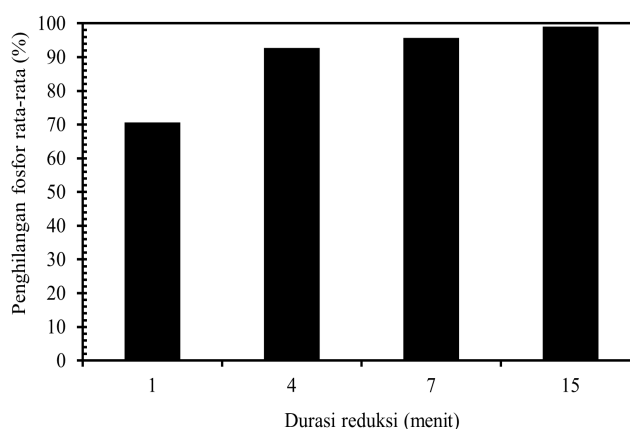
Fosfat tanah jarang yang masih dominan secara bertahap mengalami konversi menjadi oksida tanah jarang. Namun, proses ini berjalan lebih lambat dibandingkan di zona luar, kemungkinan karena keterbatasan penetrasi plasma dan kondisi lingkungan reduksi yang kurang optimal di bagian dalam. Meskipun demikian, kerapatan dari briket sampel yang meningkat terlihat dari mikrostruktur pada hasil SEM yang ditunjukkan Gambar 4, serta pengurangan fosfor yang terjadi pada durasi ini menunjukkan bahwa mekanisme defosforisasi semakin efektif seiring waktu.



Gambar 3. Distribusi unsur dalam produk percobaan durasi reduksi : a.) 1 menit dan b.) 15 menit

3.3. Estimasi persentase penghilangan fosfor

Sebelum melakukan percobaan, komposisi kimia konsentrat monasit dianalisis dan ditemukan mengandung sekitar 10,89 % fosfor dalam bentuk P_2O_5 serta sekitar 57,64 % oksida tanah jarang, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Estimasi penghilangan fosfor didapatkan untuk setiap durasi reduksi percobaan yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Estimasi persentase penghilangan fosfor

Secara keseluruhan peningkatan durasi reduksi berbanding lurus dengan peningkatan estimasi persentase penghilangan fosfor. Pada durasi reduksi 1 menit, penghilangan fosfor mencapai 70,6 %. Ketika durasi tersebut ditingkatkan menjadi 4 menit, terjadi kenaikan signifikan menjadi 92,7 %. Selanjutnya, pada durasi 7 menit, persentase penghilangan fosfor meningkat lebih lanjut menjadi 95,7 %. Peningkatan ini berlanjut hingga durasi 15 menit, di mana diperoleh nilai penghilangan fosfor optimum sebesar 99,1 %.

4. Kesimpulan

Durasi reduksi menggunakan HPSR berperan krusial dalam menentukan kualitas hasil reduksi konsentrat monasit. Semakin lama durasi, semakin efektif proses defosforisasi. Pada durasi 15 menit, plasma hidrogen mampu menembus hingga bagian dalam sampel, menyebabkan perubahan struktur mikro, peningkatan kepadatan, dan penurunan kadar fosfor, terutama di lapisan luar briket. Penghilangan fosfor berlangsung secara bertahap dari luar ke dalam. Efisiensi defosforisasi meningkat signifikan seiring waktu, yaitu 70,6% (1 menit), 92,7% (4 menit), 95,7% (7 menit), hingga 99,1% (15 menit), menunjukkan bahwa durasi yang lebih lama mempercepat pemecahan fosfat dan pelepasan fosfor, menghasilkan oksida tanah jarang bebas fosfor. Meski efisiensi meningkat, optimalisasi proses masih diperlukan untuk mencapai defosforisasi sempurna. HPSR juga memberikan keunggulan lingkungan dibandingkan metode konvensional karena menghasilkan limbah kimia lebih sedikit, sehingga menjadikannya teknologi yang efisien dan ramah lingkungan untuk ekstraksi logam tanah jarang.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis ucapkan terimakasih kepada PT Timah Tbk yang telah menyediakan sampel konsentrat monasit untuk penelitian ini. PT Gunbuster Nickel Industry yang telah menghibahkan alat SEM-EDS JCM-7000 NeoScope™, JEOL, Tokyo, Japan untuk proses karakterisasi pada penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] U. Geological Survey, "mcs2025.pdf - Mineral Commodity Summaries 2025," 2025.

- [2] K. Szamalek, G. Konopka, K. Zglinicki, and B. Marciniak-Maliszewska, "New potential source of rare earth elements," *Gospodarka Surowcami Mineralnymi / Mineral Resources Management*, vol. 29, no. 4, pp. 59–76, 2013.
- [3] PT Timah Tbk, "2023 Annual Report Laporan Tahunan Ensuring Strategy to Raising Performance Memastikan Strategi untuk Mengoptimalkan Kinerja," 2023.
- [4] S. Udayakumar, S. A. R. S. Abdul Hamid, N. Baharun, and M. I. Pownceby, "High-temperature carbothermal dephosphorization of Malaysian monazite," *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, vol. 57, no. 6, pp. 140–155, 2021.
- [5] D. C. Nababan, M. I. Pownceby, W. J. Bruckard, and M. A. Rhamdhani, "Dephosphorization Behavior of Monazite Concentrates Through Carbothermal Treatment at High Temperatures: Thermodynamic Assessment and Experimental Study," *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2024.
- [6] L. M. Suli, W. H. W. Ibrahim, B. A. Aziz, M. R. Deraman, and N. A. Ismail, "A Review of Rare Earth Mineral Processing Technology," *Chemical Engineering Research Bulletin*, vol. 19, p. 20, Sep. 2017.
- [7] L. Berry, V. Agarwal, J. Galvin, and M. S. Safarzadeh, "Decomposition of monazite concentrate in sulphuric acid," *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 57, no. 4, pp. 422–433, Oct. 2018.
- [8] A. Kumari, R. Panda, M. K. Jha, J. Y. Lee, J. R. Kumar, and V. Kumar, "Thermal treatment for the separation of phosphate and recovery of rare earth metals (REMs) from Korean monazite," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 21, pp. 696–703, Jan. 2015.
- [9] D. Kemp and A. C. Cilliers, "High-temperature thermal plasma treatment of monazite followed by aqueous digestion," *J South Afr Inst Min Metall*, vol. 116, no. 10, pp. 901–906, 2016.
- [10] D. Kemp, "The feasibility of extraction of thorium and rare earths from monazite through a thermal plasma and a chemical treatment process," 2017.
- [11] H. Bissett, M. M. Makhofane, R. Van Der Merwe, and S. J. Lotter, "Plasma dissociation of monazite," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, 2019.
- [12] I. Islam *et al.*, "Hydrogen plasma smelting reduction for fast production of green ferronickel," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 94, pp. 300–309, 2024.
- [13] D. Tandersen *et al.*, "Rapid and Sustainable Ferrochrome Production from Chromite Ore by Hydrogen Plasma Smelting Reduction," *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2025.
- [14] K. C. Sabat and A. B. Murphy, "Hydrogen Plasma Processing of Iron Ore," *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, vol. 48, no. 3, pp. 1561–1594, 2017.
- [15] P. Xing, F. Li, J. Guo, and G. Tu, "High temperature dephosphorus behavior of Baotou mixed rare earth concentrate with carbon," *Journal of Rare Earths*, vol. 28, no. SUPPL. 1, pp. 194–197, 2010.
- [16] P. F. Xing, Y. X. Zhuang, G. F. Tu, and J. Guo, "High temperature dephosphorization behavior of monazite concentrate with charred coal," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 20, no. 12, pp. 2392–2396, Dec. 2010.