



## PRODUKSI BESI DAN TERAK TITANIUM KADAR TINGGI DARI KONSENTRAT PASIR BESI ATAU TITANOMAGNETIT: ULASAN LITERATUR

Safira Fitri<sup>a,\*</sup>, Zulfiadi Zulhan<sup>a</sup>, Imam Santoso<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Teknik Metalurgi – Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan

Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha No. 10 Bandung, Jawa Barat, Indonesia 40132

\*E-mail: safiraafitri@gmail.com

Masuk tanggal : 07-03-2021, revisi tanggal : 19-01-2022, diterima untuk diterbitkan tanggal 28-02-2022

### Abstrak

Pasir besi atau titanomagnetit ditemukan di wilayah pesisir pantai Indonesia yang tersebar dari Aceh hingga pantai utara Papua. Kandungan logam berharga seperti besi, titanium, dan vanadium belum dimanfaatkan dengan baik karena hingga saat ini belum ada pabrik pengolahan dan pemurnian (*smelter*) di dalam negeri yang mampu mengolah pasir besi hingga menjadi produk akhir dengan nilai tambah yang tinggi. Perusahaan di dalam negeri hanya mampu mengolah pasir besi hingga menjadi konsentrat. Ulasan literatur ini disusun dengan harapan dapat menjadi salah satu langkah awal perkembangan teknologi pengolahan dan pemurnian pasir besi di Indonesia. Hasil ulasan literatur menunjukkan bahwa pasir besi atau titanomagnetit telah diproses baik menggunakan teknologi *rotary kiln – electric furnace* maupun tanur tiup (*blast furnace*). Penelitian terus berkembang ke arah teknologi reduksi langsung karena kemungkinannya untuk menghasilkan terak titanium dengan kadar tinggi. Artikel ini juga membandingkan parameter yang berpengaruh dalam proses reduksi langsung konsentrat pasir besi atau titanomagnetit yang terdiri dari pengaruh reaktor, reduktor, temperatur proses, dan penambahan bahan imbu. Rekomendasi juga diberikan sebagai saran untuk perkembangan penelitian selanjutnya dalam reduksi konsentrat pasir besi atau titanomagnetit.

**Kata Kunci:** Pasir besi, titanomagnetit, reduksi langsung, pembuatan besi

### Abstract

*Iron sand or titanomagnetite are found in the coastal areas of Indonesia from Aceh to the northern coast of Papua. The precious metals such as iron, titanium and vanadium has not been utilized properly because there is no processing and refining plant (smelter) in Indonesia that is capable of processing iron sand into a final product with high added value. Domestic companies just turn iron sand into concentrate. This literature review is prepared with high expectation that it will be one of the first steps in the development of processing and refining technology for iron sand in Indonesia. Literature review shows that iron sand or titanomagnetite has been processed using either rotary kiln – electric furnace technology or blast furnace. Research continues towards direct reduction technology because of the possibility to produce high grade titanium slag. This article also presents a review on the parameters that influence direct reduction technology of iron sand or titanomagnetite which include the effect of reactor, reducing agent, process temperature, and additives. Recommendation is made to provide suggestion for further research development in processing iron sand or titanomagnetite concentrate.*

**Keywords:** *Iron sand, titanomagnetite, direct reduction, iron making*

### 1. PENDAHULUAN

Titanomagnetit (TTM), biasa disebut dengan pasir besi di Indonesia, merupakan salah satu jenis dari TFSO (*titanium ferrous solution ore*). Al dan Si oksida terdapat pada TTM sebagai pengotor dalam bentuk senyawa alumino-silikat

[1]. Pasir besi di dunia memiliki kandungan  $Fe_{total}$  pada rentang 38-60% berat bijih, sedangkan kandungan  $TiO_2$  sebesar 6-13% berat bijih.

Pasir besi ditemukan di wilayah pesisir pantai sebagai endapan aluvial yang berasal dari

DOI : [10.14203/metalurgi.v3i6i3.580](https://doi.org/10.14203/metalurgi.v3i6i3.580)

© 2021 Metalurgi. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

Metalurgi is Sinta 2 Journal (<https://sinta.ristekbrin.go.id/journals/detail?id=3708>) accredited by Ministry of Research & Technology, Republic Indonesia

batuan gunung berapi dan dihasilkan secara bertahap dari pendinginan cepat lahar vulkanik. Adanya pengaruh cuaca seperti panas dan hujan menyebabkan batuan tersebut mengalami pelapukan dan hancur menjadi butiran mineral pasir yang terbawa oleh aliran sungai hingga ke muara. Gelombang dan arus laut akan memisahkan mineral tersebut berdasarkan perbedaan berat jenisnya dimana mineral yang berat akan terendapkan di pantai, sedangkan mineral yang ringan akan terbawa arus ke laut. Endapan pasir besi ini umumnya terjadi pada pantai landai yang tersebar di beberapa provinsi di Indonesia yaitu Aceh, Bengkulu, Lampung, Jawa Barat, Jawa Tengah, D.I. Yogyakarta, Jawa Timur, Nusa Tenggara Barat, Nusa Tenggara Timur, Sulawesi Barat, Sulawesi Tengah, Sulawesi Utara, Sulawesi Selatan, Maluku Utara, dan pantai utara Papua [2].

Jumlah sumber daya pasir besi terukur di Indonesia untuk bijih dan logam masing-masing sebesar 439,1 juta ton dan 155,7 juta ton, sedangkan jumlah cadangan pasir besi terbukti untuk bijih dan logam masing-masing sebesar 221,2 juta ton dan 13,7 juta ton [3]. Perkiraan jumlah produksi *crude steel* di Indonesia pada tahun 2019 hanya mencapai 6,4 juta ton dan impor baja sebanyak 13,4 juta ton harus dilakukan untuk memenuhi kebutuhan di dalam negeri [4]. Bappenas (badan perencanaan pembangunan nasional) menyebutkan bahwa kebutuhan besi-baja Indonesia pada tahun 2020 sebesar 16,39 juta ton. Kebutuhan besi dan baja diperkirakan meningkat hingga 21,87 juta ton pada tahun 2025 [5]. Ketersediaan pasir besi di Indonesia seharusnya bisa menjadi alternatif bahan baku dalam industri besi dan baja selain menggunakan bijih besi primer untuk memenuhi kebutuhan besi dan baja nasional.

Permintaan pasir besi di dunia mulai meningkat seiring dengan penggunaannya sebagai sumber bahan baku bagi industri besi dan baja serta kemungkinan untuk menghasilkan mineral berharga lain seperti titania ( $\text{TiO}_2$ ) dan vanadium pentoxide ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ). Berkurangnya sumber mineral titanium kadar tinggi seperti rutil dan ilmenit menyebabkan produksi titanium mulai berkembang ke arah pemanfaatan bijih kadar rendah seperti pasir besi [6]. Logam titanium banyak dibutuhkan karena karakteristiknya yang memiliki kekuatan tinggi, densitas rendah, tahan korosi, dan *biocompatible*. Aplikasi dari logam titanium meliputi industri pesawat terbang, industri kimia, bidang medis, elektronik, dan bidang lainnya.

Perusahaan yang bergerak di bidang pertambangan pasir besi di Indonesia hanya

mampu mengolah pasir besi hingga menghasilkan konsentrat. Hal ini terjadi karena pemanfaatan bahan baku dari hasil pertambangan belum optimal di dalam negeri sehingga gagal memberikan *multiplier effect* bagi ekonomi domestik. Oleh karena itu, teknologi pembuatan besi dan baja dari pasir besi di Indonesia perlu dipelajari dan dikembangkan guna meningkatkan nilai tambah pasir besi.

Terdapat 2 teknologi proses yang telah diaplikasikan dalam pembuatan besi dan baja dari konsentrat titanomagnetit atau pasir besi [7]-[8]. Teknologi pertama adalah reduksi langsung menggunakan *rotary kiln* dan peleburan di *electric furnace*. Teknologi ini telah diaplikasikan secara komersial oleh New Zealand Steel dan Highveld Steel & Vanadium Corp Ltd di Afrika Selatan [9]-[10]. Teknologi kedua adalah reduksi menggunakan tanur tiup (*blast furnace*). Teknologi peleburan menggunakan tanur tiup diaplikasikan oleh Panzhihua Iron and Steel di China yang mengolah bijih titanomagnetit dengan kadar  $\text{TiO}_2$  sebesar 10,6%. Operasi tanur tiup berjalan sukses dengan beberapa penyesuaian. Peleburan menggunakan tanur tiup juga diaplikasikan oleh NTMK (nizhniy tagil iron and steel works), namun bijih titanomagnetit yang diolah memiliki kadar  $\text{TiO}_2$  yang rendah sekitar 2,5-3,4%.

Pasir besi Indonesia umumnya memiliki kadar besi total dan  $\text{TiO}_2$  masing-masing sebesar 55-58% berat dan 8-11% berat. Kadar besi, titanium dan mineral lainnya pada pasir besi bervariasi tergantung dari proses pembentukannya. Kadar  $\text{TiO}_2$  pada pasir besi yang ditemukan di Selandia Baru sebesar 8% berat, China sebesar 10,6% berat, dan Afrika Selatan sebesar 12,6% berat [11].

Perbedaan karakteristik pasir besi ini membutuhkan evaluasi untuk menentukan teknologi yang dapat diaplikasikan di Indonesia dengan mengacu pada teknologi proses yang sudah diaplikasikan secara komersial di dunia dan penelitian yang terkait. Selain itu, penelitian tentang proses ekstraksi pasir besi memang sudah banyak dilakukan, akan tetapi pemahaman dan integrasi hasil penelitian dengan teknologi yang dapat diaplikasikan di Indonesia masih sangat minim. Ulasan ini disusun dengan harapan dapat menjadi langkah awal perkembangan teknologi dalam proses pembuatan besi dan baja dari pasir besi di Indonesia serta kemungkinan utilisasi titanium yang terdapat di dalam pasir besi.

## 2. TEKNOLOGI PEMBUATAN BESI DARI KONSENTRAT PASIR BESI ATAU TITANOMAGNETIT

Keberadaan bijih titanomagnetit dapat berasosiasi dengan mineral berharga lainnya seperti vanadium yang ditemukan di Afrika Selatan, Rusia, China, dan Kanada. Selain itu, bijih titanomagnetit juga ditemukan sebagai deposit aluvial di Selandia Baru, Filipina, dan Indonesia [12]. Oleh karena itu, proses peleburan dan pemurniannya tidak hanya mengambil besi dan titanium, tetapi juga mempertimbangkan keberadaan vanadium yang bernilai tinggi.

### 2.1 Selandia Baru

Deposit pasir besi ditemukan di sepanjang pantai barat pulau utara, Selandia Baru dengan kadar  $Fe_{total}$  55-56%,  $TiO_2$  7-9%, dan  $V_2O_5$  0,4%. Salah satu perusahaan yang saat ini menghasilkan besi dan baja dari bijih titanomagnetit di Selandia Baru adalah New Zealand Steel. Proses konsentrasi dilakukan di tambang Waikato menggunakan pemisahan magnetik menghasilkan konsentrat titanomagnetit dengan kadar  $Fe_3O_4$  80%,  $TiO_2$  8%, dan  $V_2O_5$  0,6%. Konsentrat yang berupa *slurry* dengan kadar air 50% dibawa ke Glenbrook Mill melalui pipa bawah tanah sepanjang 18 km. Konsentrat tersebut kemudian dikeringkan kembali karena air hanya digunakan untuk memudahkan proses transportasi.

Konsentrat pasir besi dan batu bara, dengan sedikit batu kapur, dalam bentuk halus dicampur dan dibawa ke salah satu dari 4 unit *multi hearth furnace* untuk proses pengeringan dan pemanasan pada temperatur 650 °C. Pada proses ini batu bara akan terkonversi menjadi *char* sehingga proses selanjutnya di *rotary kiln* tidak memerlukan adanya pembakaran menggunakan *pulverized coal*. New Zealand Steel hanya mengandalkan gas panas dari *multi hearth furnace* untuk membakar batu bara pada umpan dan meneruskan pembakaran tersebut dengan mengatur aliran udara di dalam *kiln* pada temperatur 1100 °C [9]-[11]. Proses reduksi langsung di *rotary kiln* menghasilkan besi pre-reduksi dengan kadar logam Fe 80% dan temperatur 900-1000 °C.

Produk yang dihasilkan dari *rotary kiln* dilebur menggunakan *melting* untuk proses reduksi akhir. Reduksi menggunakan busur listrik pada temperatur di atas titik leleh sehingga menghasilkan besi dan terak dalam bentuk lelehan yang mengandung vanadium dan terpisah dari terak titanium. *Tapping* dilakukan pada temperatur 1500 °C. Lelehan besi yang dihasilkan memiliki kadar Fe 95,5%, Ti 0,16%, V

0,42%, C 3,4%, dan pengotor lainnya. Pada proses peleburan di *melting*, konsentrat awal ditambahkan ke dalam lelehan untuk menghindari reduksi dari  $SiO_2$  dan  $TiO_2$  di dalam terak.  $TiO_2$  di dalam terak memiliki kadar 33% dan FeO di dalam terak biasanya dijaga pada kadar sekitar 3% [9]. Untuk menghindari permasalahan selama proses, material masuk dan kondisi operasi dijaga konstan dengan meminimalkan perubahan pada komposisi konsentrat pasir besi dan batu bara.

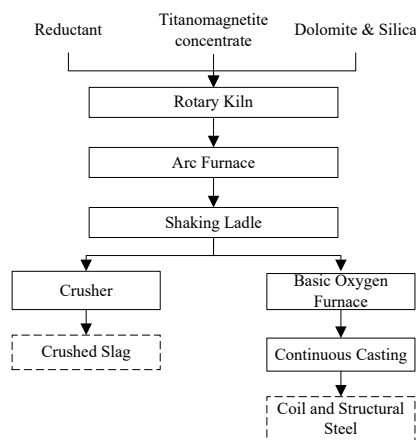
Lelehan besi dengan temperatur 1380-1420 °C dibawa ke VRU (*vanadium recovery unit*) untuk memisahkan vanadium yang akan masuk ke terak. Proses di VRU dilakukan dengan injeksi gas oksigen dan nitrogen selama 8-12 menit. Terak vanadium yang terbentuk pada permukaan akan diambil menggunakan *skimmer*. Keseluruhan proses di VRU berlangsung selama 26-45 menit dengan perolehan vanadium 40-50%. Komposisi terak vanadium adalah  $Fe_{total}$  34%,  $V_2O_5$  15,5%, dan  $TiO_2$  13,3% [9]. *Pig iron* selanjutnya masuk ke proses pembuatan baja menggunakan konverter dengan mengembuskan oksigen dan penambahan besi tua (*scrap*). Proses pemurnian lebih lanjut seperti proses *alloying* dilakukan di dalam *ladle* sebelum dibawa ke *continuous casting machine* untuk menghasilkan produk berupa *slab*. New Zealand Steel tidak memproduksi titanium oksida dari terak titanium karena teknologi yang ada belum dapat mengolahnya secara ekonomis [10].

### 2.2 Afrika Selatan

Produksi besi, baja, dan vanadium telah dilakukan sejak tahun 1963 menggunakan bijih *titaniferous magnetite* yang ditemukan di Bushveld, Afrika Selatan, oleh EHSV Corp (Evraz Highveld Steel and Vanadium). Proses produksi menggunakan teknologi *co-current rotary kiln* dan SAF (*submerged arc furnace*) atau RK-EF menghasilkan besi wantah dengan kadar vanadium mencapai 1,15%. Penggunaan *rotary kiln* berguna untuk mereduksi bijih sebanyak mungkin menggunakan reduktor berupa *pulverized coal*. Teknologi RK-EF dipilih daripada peleburan menggunakan tanur tiup konvensional karena tingginya kadar  $TiO_2$  di dalam bijih dapat menyebabkan terbentuknya TiC yang bersifat rekraktori. Komposisi bijih terdiri dari  $Fe_{total}$  54,8%,  $V_2O_5$  1,65%,  $TiO_2$  12,7% dan oksida lainnya.

Proses produksi di Evraz Highveld menggunakan 13 *rotary kiln* dengan panjang masing-masing 60 m dan 7 *arc furnace* [11]. Umpan berupa campuran bijih, dolomit, silika, dan batu bara dilakukan proses aglomerasi dan

pemisahan ukuran sebelum masuk ke *rotary kiln*. Proses di *rotary kiln* pada temperatur 1140 °C menghasilkan besi pre-reduksi dengan kadar logam besi 60% yang selanjutnya masuk ke *arc furnace*. Selanjutnya, proses peleburan menghasilkan besi wantah (*pig iron*) yang mengandung vanadium dan terpisah dari terak titanium. Dolomit dan silika ditambahkan agar bereaksi dengan titania ( $\text{TiO}_2$ ) dan memudahkan proses pemisahan lelehan besi dan terak titanium. Terak dengan kandungan  $\text{TiO}_2$  35,6% digerus dan dipisahkan komponen magnetiknya yang dapat dimasukkan kembali ke dalam proses. *Pig iron* dengan kadar vanadium 1,2% dibawa ke *shaking ladle furnace* (4 unit) [9]. Diagram alir proses EHSV ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir proses EHSV [11]

Proses yang terjadi pada *shaking ladle furnace* adalah proses pengadukan dengan mengembuskan oksigen pada tekanan yang rendah 0,15-0,25 MPa. Oksigen membuat sebagian Fe teroksidasi menjadi FeO. Namun, FeO akan tereduksi kembali oleh Si, Ti, Mn, V, dan Cr di dalam metal. Temperatur terak dijaga pada 1400 °C dengan penambahan besi tua sebagai *coolant* yang juga dapat meningkatkan aktivitas FeO di terak sehingga meningkatkan laju oksidasi vanadium dari lelehan besi. Selama proses pengembusan oksigen, karbon yang terlarut pada lelehan besi akan ikut teroksidasi menjadi karbon monoksida atau karbon dioksida.

Banyaknya karbon yang teroksidasi dapat menyebabkan lelehan besi berubah menjadi padat karena temperatur dijaga pada 1400 °C. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, antrasit ditambahkan pada proses di *shaking ladle furnace* untuk menggantikan kembali karbon yang hilang karena teroksidasi dan juga mereduksi kembali FeO di terak, namun penambahan antrasit yang berlebih dapat mereduksi vanadium kembali ke lelehan besi [9]. Oleh karena itu, laju hembusan oksigen,

penambahan besi tua dan antrasit perlu dijaga dengan ketat agar menghasilkan lelehan besi dan terak vanadium dengan perolehan vanadium mencapai 92% dan kadar 25%. Lelehan besi kemudian dibawa ke BOF (*basic oxygen furnace*), sedangkan terak dengan kandungan vanadium diproses untuk dijual sebagai *by product*. Kapasitas produksi pabrik EHSV adalah 2.600 ton per hari dengan produksi mencapai 900.000 ton per tahun. Proses peleburan menggunakan SAF mengalami beberapa masalah teknis yang berujung pada rendahnya efisiensi energi [11]. Oleh karena itu, pada tahun 2004, EHSV memutuskan untuk mengganti proses operasi di *electric furnace* menjadi OSB (*open slag bath*).

### 2.3 China

Deposit titanomagnetit terbesar di China ditemukan di daerah Panzhihua-Xichang. Besi dan titanium umumnya terdapat pada mineral magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), titanomagnetit ( $\text{Fe}_{2,25}\text{Ti}_{0,75}\text{O}_4$ ) dan ilmenite ( $\text{FeTiO}_3$ ), sedangkan vanadium ditemukan sebagai vanadium-iron spinel ( $\text{FeV}_2\text{O}_4$ ). Deposit ini diolah oleh Panzhihua Iron and Steel Group Corp. dan Chengde Iron and Steel Group Co. [10].

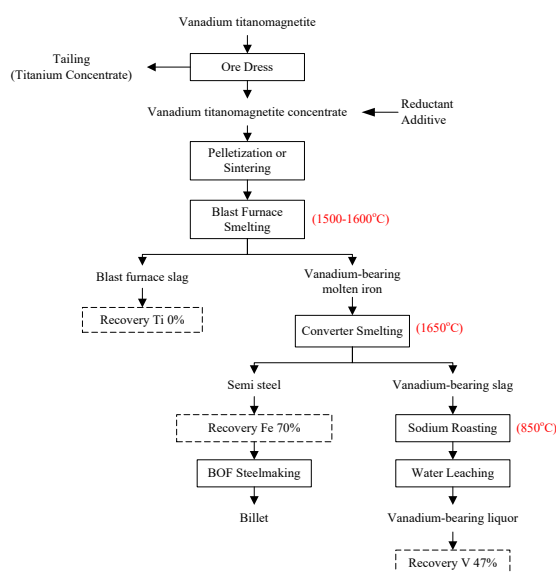
Sebelum masuk ke proses peleburan, deposit tersebut terlebih dahulu melalui serangkaian proses konsentrasi yang terdiri dari proses pemisahan berdasarkan berat atau gravitasi dan sifat kemagnetan untuk memisahkan konsentrat titanomagnetit dari *tailing* yang mengandung ilmenit dan mineral lainnya. Sebanyak 51% titanium di dalam bijih akan terbawa sebagai *tailing* dan sisanya sebagai konsentrat titanomagnetit.

Mineral yang mengandung titanium di dalam *tailing* dipisahkan menggunakan pemisahan magnetik (utilisasi 25-33%) menghasilkan konsentrat ilmenit. Konsentrat ilmenit tersebut memiliki struktur yang kompleks dan kandungan pengotor tinggi sehingga hanya dapat dilindi menggunakan asam sulfat untuk menghasilkan  $\text{TiO}_2$ . Pelindian menggunakan asam sulfat tidak dapat meregenerasi asam seperti pada proses pelindian HCl sehingga konsumsi asam tinggi. Proses pelindian hanya mampu menghasilkan perolehan titanium dari *tailing* kurang dari 20% karena rendahnya kapasitas produksi, tingginya biaya, dan sulitnya penanganan limbah asam sulfat [13].

Konsentrat titanomagnetit yang dihasilkan memiliki kadar  $\text{Fe}_{\text{total}}$  51,55%,  $\text{TiO}_2$  12,74%,  $\text{V}_2\text{O}_5$  0,579, dan oksida pengotor lainnya. Konsentrat tersebut dilakukan proses *sintering* dan pembentukan pelet sebelum masuk ke proses peleburan. Proses peleburan yang dilakukan

menggunakan tanur tiup memerlukan kokas sebagai reduktor. Peleburan di tanur tiup menghasilkan lelehan besi dengan kadar C 4,33%, Si 0,1%, Ti 1,17%, V 0,32%, P 0,066%, S 0,054% dan perolehan logam Fe 70%. Rendahnya perolehan besi salah satunya disebabkan oleh logam besi yang diselubungi oleh  $Ti(C_x, N_{1-x})$  atau *wetted iron* [14]. Semakin banyak  $TiO_2$  di dalam terak, maka jumlah titanium yang tereduksi menjadi TiC, TiN, dan  $Ti(C,N)$  juga semakin banyak. Salah satu cara yang telah dilakukan untuk mengatasi permasalahan dan meningkatkan perolehan Fe pada operasi tanur tiup adalah dengan mengoksidasi Ti di dalam besi wantah (*pig iron*) menjadi  $TiO_2$  dan masuk ke terak tanpa menurunkan temperatur tanur. Oksidasi Ti dilakukan dengan injeksi bijih besi primer dengan udara bertekanan langsung ke dalam lelehan besi wantah (*pig iron*) sehingga fluiditas besi wantah dan terak menjadi baik dan operasi berjalan dengan normal [15].

Vanadium akan terbawa ke dalam lelehan besi dan masuk ke proses pemurnian di BOF. Proses di BOF memisahkan vanadium dari lelehan besi (*semi-steel*) dan masuk ke fasa terak. *Semi-steel* akan masuk ke proses pembuatan baja dan terak vanadium dimurnikan menjadi  $V_2O_5$  dengan proses *sodium roasting* yang diikuti dengan pelindian air [7]. Proses ini menghasilkan perolehan vanadium sekitar 47%. Selain itu, proses peleburan juga menghasilkan terak dengan kadar  $TiO_2$  20-30%. Diagram alir proses yang dilakukan oleh Panzhihua Iron and Steel Group Corp. ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir proses peleburan tanur tiup untuk bijih titanomagnetit Panxi [7]

Penggunaan tanur tiup dalam peleburan titanomagnetit menghadapi beberapa masalah diantaranya adalah tingginya viskositas, porositas rendah, dan terjadinya *slag foaming*. Masalah tersebut dapat diatasi dengan mengumpukan sinter konsentrat titanomagnetit yang bersifat basa ke dalam tanur tiup menghasilkan terak dengan basisitas 1,15 [10]. Selain itu, pencampuran bijih hematit kualitas tinggi dari Australia pada umpan juga dilakukan untuk menurunkan temperatur leleh  $TiO_2$  sehingga terak tidak membeku [11]. Park dkk., [16] juga membuktikan bahwa pencampuran bijih titanomagnetit dan hematit dalam proses reduksi dapat mengurangi waktu yang dibutuhkan dalam proses reduksi.

Proses peleburan menggunakan tanur tiup hanya dapat mengambil besi dan vanadium, sedangkan titanium yang masuk ke terak sangat sulit untuk diproses. Terak titanium yang dihasilkan oleh Panzhihua Steel terus menumpuk dan bertambah 3 juta ton setiap tahunnya. Hal ini menyebabkan masalah lingkungan, membuang sumber daya titanium, dan menimbulkan kerugian secara ekonomi. Banyak penelitian yang dilakukan untuk memisahkan dan mengambil titanium dari terak seperti: karbonisasi pada temperatur tinggi menghasilkan titanium karbida, elektrolisis dalam lelehan garam menghasilkan paduan titanium, pelindian di dalam asam sulfat menghasilkan  $TiO_2$ , dan reduksi pada temperatur tinggi dengan pemisahan magnetik menghasilkan paduan titanium [17]. Walaupun penelitian tersebut berhasil mendapatkan produk dengan perolehan tinggi, namun aplikasi secara industri tidak ekonomis dan sangat sulit dilakukan karena rendahnya kadar  $TiO_2$  di dalam terak dan terbentuk pada fasa stabil yang disebabkan oleh reduksi pada temperatur tinggi 1500-1600 °C [18]. Selain itu, titanium yang tersebar di berbagai fasa mineral berukuran halus ( $<10\mu m$ ) juga menyebabkan sulitnya memisahkan titanium melalui proses pemisahan mekanik [8], [19].

### 3. PERKEMBANGAN PENELITIAN PROSES EKSTRAKSI BESI, VANADIUM DAN TERAK TITANIUM KADAR TINGGI DARI KONSENTRAT PASIR BESI ATAU TITANOMAGNETIT

Pada reduksi titanomagnetit atau pasir besi menggunakan *blast furnace*, permasalahan utama yang terjadi adalah rendahnya kadar  $TiO_2$  di dalam terak yang tersebar dalam ukuran halus ( $<10\mu m$ ) di berbagai fasa mineral stabil karena

reduksi pada temperatur tinggi 1500-1600 °C. Hingga saat ini, belum ditemukan teknologi dan proses yang sesuai dan ekonomis dalam skala industri untuk mengolah terak titanium tersebut. Penelitian yang dilakukan untuk meningkatkan utilisasi bijih titanomagnetit terus berkembang ke arah teknologi *direct reduction* atau reduksi langsung demi peningkatan utilisasi titanium yang terdapat di dalam bijih titanomagnetit. Proses reduksi langsung dilakukan pada temperatur yang lebih rendah dari peleburan di tanur tiup sehingga diharapkan terak titanium yang dihasilkan memiliki kadar tinggi dan lebih mudah untuk diproses.

### 3.1 Direct Reduction - Magnetic Separation

Proses reduksi langsung dan pemisahan magnetik berhasil memisahkan besi dari terak titanium menghasilkan produk dengan perolehan tinggi. Secara umum, proses dimulai dengan pencampuran konsentrat titanomagnetit, batu bara, dan bahan imbuh (jika ada). Selanjutnya, campuran tersebut dimasukkan ke dalam krusibel dan dilakukan reduksi pada temperatur tertentu. Produk hasil reduksi dihaluskan dan dilakukan pemisahan magnetik menghasilkan logam besi dan terak.

Beberapa proses reduksi langsung dengan pemisahan magnetik dilakukan dengan penambahan bahan imbuh. Chen dkk. (2011) menambahkan 1,5%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dalam proses reduksi, sedangkan L. Zhao dkk. (2014) menambahkan 2,5%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  [19]-[20]. Selanjutnya, Y. min Zhang dkk. (2017) mengusulkan proses reduksi langsung yang dinamakan dengan *sodium modification-direct reduction coupled (SRC) process* dengan menambahkan  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  hingga 35% berat dan mendapatkan perolehan besi, vanadium, dan titanium masing-masing sebesar 84,52%, 89,37%, dan 95,59% [7]. Penelitian kembali dilanjutkan pada tahun 2018 dengan penambahan 70% berat  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  [8]. Selama proses reduksi, terdapat 3 proses yang terjadi secara bersamaan yaitu proses reduksi langsung besi oksida oleh karbon, proses oksidasi vanadium oksida oleh garam natrium, dan proses pemisahan logam dan terak. Produk hasil reduksi yang didapatkan berupa *nugget* besi yang terpisah dari terak. Reduksi besi oksida, oksidasi vanadium, dan pemisahan logam-terak dapat terjadi dalam satu proses pada temperatur relatif rendah dari tanur tiup sehingga dapat menurunkan konsumsi energi dan biaya operasi. Proses ini juga menghasilkan perolehan besi, vanadium, dan titanium yang tinggi serta tidak menghasilkan limbah yang berbahaya bagi lingkungan. Namun, penambahan  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dalam

jumlah besar akan meningkatkan biaya operasi dan menyebabkan korosi pada peralatan produksi [9].

Penelitian dengan metode reduksi langsung dan pemisahan magnetik juga dilakukan menggunakan pasir besi yang berasal dari Indonesia. Gao dkk., [21] melakukan reduksi konsentrat pasir besi dengan penambahan bitumite sebagai reduktor dan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sebagai bahan imbuh dalam jumlah tertentu. Tianyang Hu dkk., [22] melakukan reduksi konsentrat pasir besi menggunakan BFD (*blast furnace dust*) sebagai reduktor. Penggunaan BFD dalam proses reduksi dilakukan karena kandungan *fixed carbon* sebesar 33,73% dan juga terdapat magnetit dan hematit yang mudah tereduksi sehingga diharapkan dapat meningkatkan utilisasi BFD yang selama ini hanya sebagai limbah padat. Yongqiang Zhao dkk., [23] juga melakukan reduksi konsentrat pasir besi dengan menambahkan  $\text{CaF}_2$  sebagai bahan imbuh dan membuktikan bahwa  $\text{CaF}_2$  dapat mempengaruhi pertumbuhan partikel logam besi.

Usaha untuk meningkatkan utilisasi titanium di dalam bijih titanomagnetit juga dilakukan dengan proses reduksi langsung bersamaan dengan proses karbonisasi atau nitridasi untuk menghasilkan logam besi dengan titanium dan vanadium terpisah ke dalam terak. Titanium pada terak terikat sebagai TiC, TiN, atau Ti(C,N) dengan vanadium larut di dalamnya dalam bentuk VC atau VN. TiC, TiN, atau Ti(C,N) dalam bentuk murni dapat digunakan sebagai material pada proses klorinasi temperatur rendah menghasilkan  $\text{TiCl}_4$  [24]. TiN juga memiliki temperatur leleh yang tinggi (2950 °C), kekerasan yang tinggi (skala Mohs 8-9), dan konduktivitas termal tinggi sehingga banyak digunakan sebagai material coating yang tahan aus, krusibel di industri kimia, lapisan penyangga pada mikroelektronika dan material implant [25]. TiC dan VC juga merupakan partikel penguat yang dapat ditambahkan pada pembuatan material tahan aus [26].

Secara termodinamika, logam besi, titanium karbida (TiC) dan vanadium karbida (VC) akan terbentuk melalui reaksi karbotermik antara konsentrat titanomagnetit dan karbon pada reduksi temperatur 1300 °C selama 3 jam dalam kondisi vakum 10 Pa. Hal ini dibuktikan dengan percobaan yang dilakukan di dalam *vacuum sintering furnace* pada campuran konsentrat titanomagnetit dan grafit. Hasil percobaan menunjukkan bahwa 96% besi oksida tereduksi menjadi logam besi, 75%  $\text{FeTiO}_3$  tereduksi menjadi TiC, dan 94%  $\text{V}_2\text{O}_5$  tereduksi menjadi



VC dan pengotor lainnya seperti  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  tidak tereduksi oleh karbon [26].

Pada penelitian yang dilakukan oleh Yu dkk., [25] hampir semua titanium di dalam bijih terkonversi menjadi TiN dengan vanadium dan karbon larut didalamnya. Namun, TiN yang dihasilkan masih mengandung banyak pengotor terutama  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  yang tidak larut dalam asam sehingga diperlukan proses pemurnian lebih lanjut. Oleh karena itu, penelitian dilanjutkan dengan menambahkan boraks pada proses reduksi untuk mengubah senyawa yang tahan terhadap asam ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) menjadi senyawa yang larut di dalam asam [27].

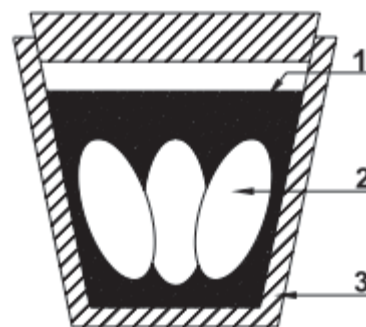
Qin dkk., [24] melakukan penelitian yang hampir sama untuk mempelajari mekanisme proses pembentukan TiC, TiN, atau Ti(C,N) dalam lingkungan gas argon dan nitrogen tanpa penambahan bahan imbu. Reduksi dengan aliran gas argon dilakukan untuk mencegah oksidasi TiC dan reduksi dengan aliran gas nitrogen dilakukan agar terbentuk fasa TiN. Setelah proses reduksi, sampel didinginkan dalam lingkungan argon dan dihaluskan untuk proses analisis. Transformasi fasa yang terjadi pada saat reduksi di dalam lingkungan gas argon (inert) adalah ilmenite ( $\text{FeTiO}_3$ )  $\rightarrow$  ferropseudobrookite ( $\text{FeTi}_2\text{O}_5$ )  $\rightarrow$  Fe, Ti, Mg Oxide  $\rightarrow$  Titanium karbida (TiC). Aliran gas nitrogen memfasilitasi terjadinya proses karbonisasi dan nitridasi. Pada kondisi lingkungan dengan karbon berlebih, TiN yang terbentuk akan bereaksi dengan karbon dan TiC menghasilkan Ti(C,N). Penelitian sebelumnya menghasilkan TiN karena hanya dilakukan pada temperatur 1300 °C tanpa mengalirkan gas nitrogen dan tidak terdapat karbon berlebih. Adanya aliran gas nitrogen dapat menurunkan temperatur kesetimbangan dengan pembentukan TiN dan bukan TiC. Transformasi fasa yang terjadi pada saat reduksi dalam lingkungan gas nitrogen adalah ilmenit ( $\text{FeTiO}_3$ )  $\rightarrow$  ferropseudobrookite ( $\text{FeTi}_2\text{O}_5$ )  $\rightarrow$  Fe, Ti, Mg Oxide  $\rightarrow$  titanium karbida (TiC)  $\rightarrow$  titanium nitrida (TiN)  $\rightarrow$  titanium carbonitride (Ti(C,N)). Mikrostruktur yang terbentuk saat reduksi pada lingkungan argon dan nitrogen hampir sama dimana butiran TiC atau TiN yang berukuran  $<10 \mu\text{m}$  terdispersi dalam logam Fe.

Yu dkk., [25], [27] menyebutkan bahwa logam Fe dan TiN dapat dipisahkan dengan pemisahan magnetik, sedangkan pemisahan antara logam Fe dan TiC belum dipelajari lebih lanjut. Penelitian tersebut tidak menyebutkan berapa ukuran butiran TiN dan TiC yang terbentuk untuk dilakukan pemisahan secara magnetik sehingga belum butiran TiC atau TiN

dapat dipisahkan secara magnetik pada penelitian yang dilakukan oleh Qin dkk. (2020).

### 3.2 *Embedding Direct Reduction - Magnetic Separation*

Reduksi yang dilakukan dengan mencampur konsentrat pasir besi, batu bara, dan aditif dalam proses reduksi hanya menghasilkan terak dengan kadar  $\text{TiO}_2$  rendah ( $\text{TiO}_2 < 40\%$ ). Hal ini dapat disebabkan karena kadar abu yang tinggi di dalam batu bara dan bahan imbu akan masuk ke terak dan menurunkan kadar  $\text{TiO}_2$ . Untuk mendapatkan kadar  $\text{TiO}_2$  yang tinggi di dalam terak, proses reduksi dilakukan dengan metode *embedding-direct reduction*. Konsentrat pasir besi, bahan imbu, dan *binder* dibuat menjadi pelet dan dimasukkan ke dalam reduktor batu bara sehingga seluruh permukaan pelet diselubungi oleh reduktor seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Oleh karena itu, proses reduksi terjadi dari bagian luar ke bagian dalam pelet dan reduksi karbotermik dikendalikan oleh reaksi gasifikasi atau reaksi boudouard [28].



1-Coal 2-Pellet 3-Crucible

Gambar 3. Susunan bahan dalam krusibel pada proses embedding direct reduction [29]

Reduksi dengan metode ini dilakukan oleh Geng dkk., [29] dengan menambahkan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sebagai bahan imbu dan batu bara bituminous sebagai reduktor. Reduksi dilakukan pada 3 pelet sekaligus di dalam krusibel yang berisi *pulverized coal*. Geng dkk., [30] melanjutkan penelitiannya untuk menentukan rasio C/Fe, temperatur serta waktu reduksi yang menghasilkan produk dengan kadar dan perolehan yang tinggi. Hasil penelitian didapatkan DRI (*direct reduced iron*) dengan perolehan hingga 90,28% (kadar Fe 90,85%) dan produk non magnetik dengan kadar  $\text{TiO}_2$  46,24%.

Yong qiang Zhao dkk., [28] juga melakukan reduksi pasir besi menggunakan metode ini dengan variasi 3 jenis reduktor yaitu batu bara bituminous, *biochar*, dan kokas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan batu bara

bituminous menghasilkan produk dengan perolehan dan kadar yang lebih tinggi dibandingkan reduktor lainnya. Pengaruh variasi reduktor juga dipelajari oleh Xiaohui Li dkk., [31] yang menggunakan reduktor lignite, bitumite, kokas dan antrasit. Urutan reduktor yang menghasilkan persen metalisasi tertinggi adalah lignite > bitumite > kokas > antrasit. Xiaohui Li dkk., [32]-[33] kembali melanjutkan penelitiannya dan membandingkan penggunaan  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaCl}_2$  sebagai bahan imbu. Hasil penelitian menunjukkan %metalisasi Fe tertinggi sebesar 90,99% didapatkan pada penambahan  $\text{CaCO}_3$  sebanyak 15%.

#### 4. TEKNOLOGI REDUKSI LANGSUNG (DIRECT REDUCTION) DALAM PROSES PEMBUATAN BESI DARI KONSENTRAT PASIR BESI ATAU TITANOMAGNETIT

##### 4.1 Pengaruh Jenis Reaktor

Reduksi bijih titanomagnetit atau pasir besi dengan teknologi reduksi langsung (*direct reduction*) dapat dilakukan menggunakan reaktor yang sama dengan bijih besi primer dengan beberapa penyesuaian. Pemilihan reaktor akan menentukan proses yang efektif dan dapat menghasilkan produk dengan perolehan dan kadar besi yang tinggi serta dapat mengambil logam berharga lainnya yaitu titanium dan vanadium.

Salah satu reaktor yang telah lama dipelajari dalam teknologi *direct reduction* adalah *rotary kiln*. Proses reduksi titanomagnetit di dalam *rotary kiln* dimulai dari reduksi  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Keberadaan FeO akan berikatan dengan  $\text{FeO}\cdot\text{TiO}_2$  menghasilkan  $2\text{FeO}\cdot\text{TiO}_2$  dan membentuk larutan padat dengan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . FeO yang bebas dari  $\text{TiO}_2$  diamati pada bagian akhir dari *rotary kiln* yang tereduksi menjadi logam Fe sehingga besi oksida yang tersisa dari proses reduksi di dalam *rotary kiln* adalah  $2\text{FeO}\cdot\text{TiO}_2$ .

Permasalahan dalam proses reduksi langsung menggunakan *rotary kiln* adalah terjadi pembentukan senyawa oksida kompleks dengan titik leleh rendah yang dapat menempel di sekeliling dinding kiln. Suhu yang tinggi juga menyebabkan aglomerasi partikel halus yang memiliki titik leleh rendah. Hal ini dapat dicegah dengan memilih material *feed* yang memiliki kandungan pengotor rendah, batu bara dengan kadar abu rendah, reaktivitas tinggi, titik leleh tinggi dan *swelling index* rendah [34].

Penggunaan *rotary kiln* dalam proses reduksi langsung konsentrat pasir besi atau

titanomagnetit yang dilanjutkan dengan peleburan di dalam *electric furnace* telah diaplikasikan secara komersial oleh New Zealand Steel dan Highveld Steel. Teknologi ini termasuk teknologi yang *proven* hingga saat ini.

Proses reduksi langsung menggunakan RHF (*rotary hearth furnace*) telah diteliti dalam skala *pilot plant* oleh Panzhuhua Iron and Steel Corporation untuk mengganti proses peleburan di tanur tiup. Proses ini menghasilkan terak titanium dengan kadar  $\text{TiO}_2$  mencapai 45% berat dengan unsur pengotor seperti kalsium, magnesium, dan silikon [18]. Penggunaan RHF dalam proses reduksi langsung juga telah dipelajari oleh Gu dkk., [35]-[36] dengan umpan berupa konsentrat ilmenit (titanium plaser) dari Indonesia. Konsentrat tersebut memiliki  $\text{Fe}_{\text{total}}$  22,4-24,5% dan  $\text{TiO}_2$  55,3-57%. Percobaan dilakukan dalam skala industri (*test bed*) dengan kapasitas 100.000 ton. Briket komposit konsentrat ilmenit dan *pulverized coal* sebanyak 13% berat dimasukkan ke dalam RHF dalam 2 atau 3 lapisan. Reduksi pada RHF dilakukan pada temperatur 1350 °C selama 30 menit. Produk yang dihasilkan berupa besi spons dengan persen metalisasi Fe 57%. Untuk meningkatkan persen metalisasi Fe, lingkungan reduksi perlu dijaga agar tetap homogen selama proses reduksi berlangsung.

Besi spons yang dihasilkan dari RHF kemudian masuk ke *electric furnace* menghasilkan lelehan besi wantah (*pig iron*) yang mengandung vanadium dan terpisah dari terak titanium. Pada proses di *electric furnace*, penambahan reduktor dilakukan melalui injeksi langsung *pulverized coal* ke dalam lelehan terak (*deep reduction*). Hal ini akan meningkatkan kadar  $\text{TiO}_2$  dan mereduksi FeO yang ada di dalam terak. Percobaan tersebut dilakukan hingga 10 *batch* sampel dan berhasil mendapatkan lelehan besi dengan kadar Fe >97% dan terak titanium dengan kadar  $\text{TiO}_2$  78-82,5%.

Pemilihan RHF pada proses reduksi langsung dilakukan karena umpan yang dimasukkan lebih fleksibel, tidak perlu dicampur dengan hematit kadar tinggi dan tidak menggunakan kokas seperti pada peleburan menggunakan tanur tiup [17]. Proses ini juga menghasilkan terak titanium dengan komposisi yang lebih sederhana dan kadar  $\text{TiO}_2$  mencapai 40-47% berat, lebih tinggi dari proses yang dilakukan oleh New Zealand Steel dan Highveld yang hanya menghasilkan terak titanium dengan kadar  $\text{TiO}_2$  30-35% [11]. Selain itu, temperatur reduksi RHF lebih tinggi dari *rotary kiln* sehingga waktu reduksi dapat menjadi lebih singkat yaitu 10-30 menit [9].



Permasalahan pada reduksi briket atau pelet komposit konsentrat titanomagnetit dan batu bara di dalam RHF adalah rendahnya produktivitas karena susunan pelet di dalam RHF maksimum hanya dapat terdiri dari 2 lapisan. Jika briket komposit di dalam RHF lebih dari 2 lapisan atau *multilayer bed*, maka reduksi secara menyeluruh tidak dapat tercapai. Hu dkk., [37] memberikan simulasi jika reduksi dilakukan pada susunan briket komposit yang terdiri dari 3 lapisan. Pada awal proses reduksi, lapisan paling atas akan mendapatkan suplai panas yang paling besar dan tereduksi paling awal. Lapisan tengah dan paling bawah hanya mendapatkan sedikit panas karena tertahan oleh lapisan briket komposit di atasnya. Selanjutnya, reduksi mulai terjadi pada briket komposit di lapisan tengah sehingga briket komposit di bagian atas dan tengah mengalami metalisasi yang hampir sempurna, sedangkan briket komposit di bagian bawah masih belum tereduksi sehingga persen metalisasinya rendah.

Untuk mendapatkan persen metalisasi yang tinggi di setiap lapisan, waktu tinggal briket komposit di dalam RHF perlu diperpanjang. Hal ini dapat meningkatkan persen metalisasi briket komposit di lapisan bawah, akan tetapi briket komposit di bagian atas akan mengalami oksidasi kembali oleh CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari reaksi reduksi. Oksidasi tersebut akan menurunkan persen metalisasi briket komposit di bagian atas. Oleh karena itu, jika ingin menggunakan beberapa lapisan briket komposit pada reduksi di dalam RHF, proses reduksi perlu diatur agar lapisan paling bawah dapat tereduksi dengan cepat dan lapisan paling atas memiliki laju reduksi yang lebih lambat sehingga reduksi dapat terjadi secara seragam. Hal ini dapat dilakukan dengan menambahkan Fe-Si ke dalam briket komposit di lapisan paling bawah. Fe-Si dapat mempercepat laju reduksi melalui reaksi silikon dan besi oksida yang merupakan reaksi eksotermik sehingga reduksi yang seragam di setiap lapisan briket komposit dapat tercapai [37].

#### 4.2 Pengaruh Jenis Reduktor

Penggunaan reduktor yang berbeda akan mempengaruhi proses reduksi besi dan proses nukleasi serta pertumbuhan partikel besi. Y. min Zhang dkk., [8] melakukan penelitian reduksi konsentrat titanomagnetit menggunakan 4 jenis batu bara yaitu bituminous, antrasit, lignit, dan grafit. Hasil reduksi menunjukkan *mugget* besi hanya terbentuk pada penggunaan batu bara bituminous dan antrasit. Kadar abu dari batu bara bituminous dan antrasit lebih tinggi dari lignit dan grafit. Abu pada reduktor dan pengotor pada bijih dapat bereaksi membentuk terak yang

memudahkan pemisahan logam dan terak selama reduksi berlangsung. Perolehan Fe lebih besar pada reduksi menggunakan antrasit karena tingginya kadar karbon sehingga reduksi besi lebih mudah terjadi.

Penelitian tentang pengaruh reduktor juga dipelajari oleh Xiaohui Li dkk., [31] yang membandingkan batu bara lignit, bituminous, antrasit, dan kokas dalam reduksi titanomagnetit. Perbandingan berdasarkan reaktivitas gasifikasi menunjukkan urutan batu bara yang memiliki reaktivitas paling tinggi dimulai dari lignit > bituminous > antrasit > kokas. Reaktivitas merupakan kemampuan batu bara untuk berinteraksi dengan CO<sub>2</sub> pada temperatur tertentu dimana lignit dan bituminous memiliki reaktivitas yang lebih tinggi dibandingkan batu bara lainnya. Selain itu, perbandingan berdasarkan persen metalisasi juga menunjukkan penggunaan lignit atau bituminous sebagai reduktor menghasilkan persen metalisasi yang lebih tinggi dari antrasit dan kokas. Penggunaan lignit sebagai reduktor menghasilkan persen metalisasi sebesar 95,11%, sedangkan pada penggunaan bitumite sebesar 94,43%. Penelitian selanjutnya dilanjutkan menggunakan batu bara bituminous untuk mempelajari pengaruh beberapa jenis senyawa kalsium sebagai bahan imbuhan [32]-[33].

Pada penelitian yang dilakukan oleh Yong qiang Zhao dkk., [28] dengan metode *embedding-direct reduction*, ditemukan bahwa penggunaan batu bara bituminous lebih baik dibandingkan dengan bio-char dan kokas. Hal ini juga disebabkan karena reaktivitas gasifikasi bituminous lebih baik daripada *bio-char* dan kokas sehingga reaksi gasifikasi berlangsung lebih cepat pada temperatur yang rendah. Hal ini dapat mencegah terbentuknya lelehan yang dapat menahan difusi gas dalam proses reduksi.

Tianyang Hu dkk., [22] menggunakan BFD (*blast furnace dust*) sebagai reduktor dalam proses reduksi konsentrat pasir besi. BFD memiliki kandungan *fixed carbon* sebesar 33,73%, *volatile matter* 8,88%, abu 57,4%, dan air 2,1%. Walaupun BFD memiliki kandungan *fixed carbon* lebih rendah dan abu yang lebih tinggi daripada batu bara, hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan BFD dengan rasio C/Fe 0,65 dapat mereduksi pasir besi menghasilkan DRI dengan kadar Fe 94,23% dan perolehan Fe 87,62%. Penelitian reduksi konsentrat pasir besi menggunakan BFD sebagai reduktor kembali dilanjutkan oleh X. Wang dkk., [38] yang membandingkan penggunaan BFD dan bitumit sebagai reduktor. Hasil penelitian menunjukkan dalam jumlah yang sama,

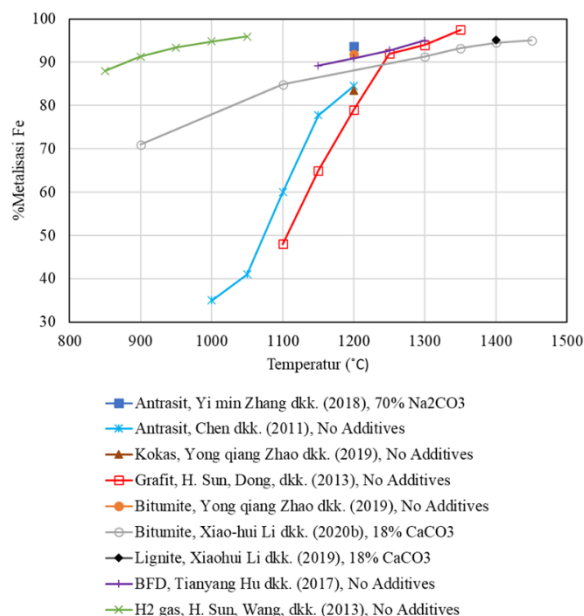
penggunaan BFD sebagai reduktor menghasilkan perolehan dan kadar Fe di dalam DRI lebih tinggi daripada bitumit. Hal ini disebabkan karena *fixed carbon* di dalam BFD tidak hanya dapat mereduksi pasir besi, tetapi juga berguna dalam proses pemisahan titanium dan besi. *Fixed carbon* di dalam BFD memiliki luas permukaan yang lebih besar karena bentuknya yang tidak beraturan. Hal ini dapat meningkatkan permukaan kontak antara karbon dan pasir besi (reaksi *solid-solid*) sehingga laju reduksi pasir besi semakin meningkat. Namun, jika BFD memiliki kadar abu yang sangat tinggi, terak titanium dapat terperangkap di antara lelehan logam besi karena besi oksida di dalam abu BFD lebih cepat tereduksi dan saling bergabung dengan partikel logam besi lainnya. Oleh karena itu, penggunaan BFD sebagai reduktor perlu mempertimbangkan kadar abu di dalamnya untuk mendapatkan perolehan dan kadar Fe tinggi yang terpisah dari terak titanium.

Reduksi langsung konsentrat titanomagnetit juga dapat dilakukan menggunakan reduktor gas karena penggunaan batu bara terbatas pada rendahnya laju reduksi dan tingginya konsumsi energi. Abu pada batu bara yang mengandung sulfur dan fosfor juga dapat menurunkan kualitas dari produk hasil reduksi. Selain itu, penggunaan batu bara mulai tidak diminati karena menghasilkan gas CO<sub>x</sub> yang berdampak pada pemanasan global dan perubahan iklim. Oleh karena itu, proses reduksi mulai berkembang pada penggunaan sumber energi yang bersih sehingga tidak meninggalkan jejak karbon. Salah satu penelitian yang mempelajari pengaruh gas hidrogen sebagai reduktor dilakukan oleh Sun dkk., [39]. Penelitian dilakukan dengan variasi gas H<sub>2</sub>-Ar dalam persen volume tertentu. Reaksi reduksi akan berjalan semakin cepat dengan meningkatnya persen volume gas hidrogen terhadap argon.

Reduksi berbasis gas memiliki kelebihan pada konsumsi energi yang lebih rendah dan laju reduksi yang lebih cepat dibandingkan dengan penggunaan reduktor karbon. Reduksi konsentrat titanomagnetit menggunakan gas hidrogen (H<sub>2</sub>) telah dipelajari dan dapat mengekstraksi Fe, Ti, V, dan Cr dengan tahapan proses yang terdiri dari pembuatan pelet, pengeringan, pemanasan (*preheated*), preoksidasi, reduksi, dan pelelehan untuk memisahkan logam dan terak. Walaupun reduksi konsentrat titanomagnetit berbasis gas berhasil memisahkan logam dan terak dengan perolehan tinggi, penggunaan hidrogen sebagai reduktor memerlukan biaya yang besar. Alternatif reduktor berbasis gas lainnya seperti gas alam juga terkendala pada biaya yang

membuat proses tersebut hanya ekonomis di negara dengan harga gas alam yang murah [17]. Perbandingan persen metalisasi dari proses reduksi konsentrat titanomagnetit atau pasir besi dengan variasi reduktor yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 4. Grafik tersebut menunjukkan persen metalisasi masing-masing penelitian sebagai fungsi temperatur.

Reduksi menggunakan reduktor gas hidrogen dapat menghasilkan persen metalisasi yang tinggi pada temperatur rendah, sedangkan pada penggunaan reduktor berbasis karbon membutuhkan temperatur yang lebih tinggi. Penggunaan antrasit sebagai reduktor tanpa penambahan bahan imbu pada penelitian Chen dkk., [19] menghasilkan persen metalisasi yang lebih rendah dibandingkan reduksi dengan penambahan Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> sebagai bahan imbu pada penelitian Zhang dkk., [8]. Hal ini menunjukkan penambahan bahan imbu dapat memudahkan pemisahan logam dan terak sehingga menghasilkan persen metalisasi yang tinggi. Penggunaan grafit sebagai reduktor pada penelitian Sun dkk., [40] menghasilkan persen metalisasi yang paling tinggi dibandingkan reduktor lainnya. Namun, grafit membutuhkan temperatur lebih dari 1300 °C untuk mendapatkan persen metalisasi tersebut.



Gambar 4. Perbandingan persen metalisasi sebagai fungsi temperatur pada reduksi dengan reduktor berbeda

Penggunaan batu bara bituminous dan lignit sebagai reduktor menunjukkan persen metalisasi yang hampir sama pada penelitian yang dilakukan Li dkk., [31]. Melihat ketersediaan batu bara bituminous di Indonesia, maka penggunaan batu bara bituminous sebagai reduktor dalam teknologi reduksi langsung dapat

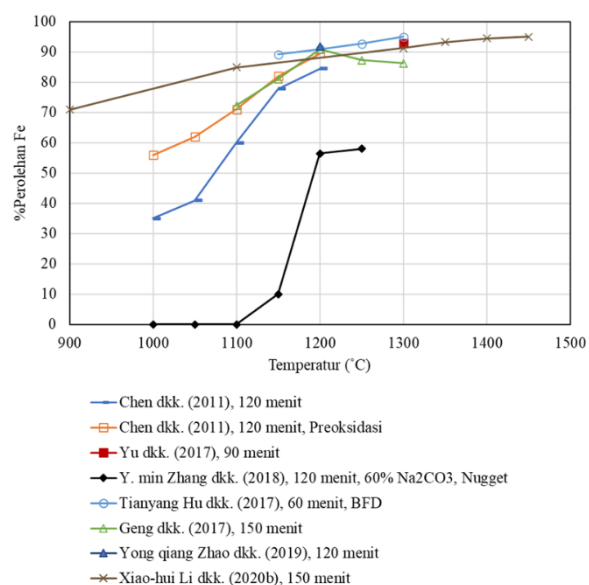
menjadi pertimbangan karena dapat menghasilkan persen metalisasi Fe yang tinggi pada temperatur yang relatif rendah.

### 4.3 Pengaruh Temperatur Reduksi

Penentuan temperatur reduksi penting untuk menghasilkan produk yang memiliki perolehan dan kadar tinggi. Perolehan Fe pada produk hasil reduksi menggunakan teknologi *direct reduction* sebagai fungsi dari temperatur dan waktu reduksi ditunjukkan pada Gambar 5. Grafik tersebut menunjukkan kecenderungan perolehan besi yang semakin meningkat dengan meningkatnya temperatur. Chen dkk.,[19] melakukan reduksi bijih titanomagnetit menggunakan *pulverized coal* dengan variasi preoksidasi dan tanpa preoksidasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa persen metalisasi konsentrat titanomagnetit meningkat dengan meningkatnya temperatur (>1100 °C). Hal ini disebabkan karena peningkatan reaktivitas *pulverized coal* pada temperatur tinggi sehingga meningkatkan laju reaksi gasifikasi dan meningkatkan rasio CO/CO<sub>2</sub>. Pada temperatur reduksi (<1100 °C), energi yang dibutuhkan untuk proses reduksi belum cukup untuk menghasilkan persen metalisasi yang tinggi. Selain itu, preoksidasi berpengaruh pada perolehan besi yang dihasilkan dimana reduksi pada bijih titanomagnetit yang telah dilakukan preoksidasi menghasilkan perolehan besi yang lebih tinggi dibandingkan tanpa preoksidasi.

Reduksi konsentrat titanomagnetit pada temperatur 1200°C dapat mendukung terjadinya proses pembentukan nugget besi pada penelitian yang dilakukan oleh Zhang dkk., [8]. Proses pembentukan *nugget* besi terdiri dari proses reduksi besi oksida, karbonisasi logam besi dan pemisahan logam besi dan terak.

Reaksi  $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO$  terjadi pada temperatur <1000 °C, sedangkan reaksi  $FeO \rightarrow Fe$  terjadi pada temperatur 1000-1100 °C, dan keseluruhan proses selesai pada temperatur 1200 °C. Pada temperatur reduksi >1200 °C, vanadium akan ikut tereduksi dan masuk ke dalam logam besi. Hal ini tidak diinginkan dalam percobaan tersebut karena akan menurunkan kadar Fe di dalam nugget besi. Pada temperatur reduksi 1250-1300 °C akan terbentuk lelehan terak yang dapat menghalangi difusi gas dalam proses reduksi [30]. Hal ini akan menyebabkan proses reduksi terjadi secara tidak merata sehingga titanium dapat terjebak di dalam lelehan besi yang akan menurunkan perolehan dan kadar produk [28], [41].



Gambar 5. Perbandingan perolehan besi pada reduksi titanomagnetit atau pasir besi sebagai fungsi temperatur dengan waktu reduksi yang berbeda

### 4.4 Pengaruh Penambahan Bahan Imbuh

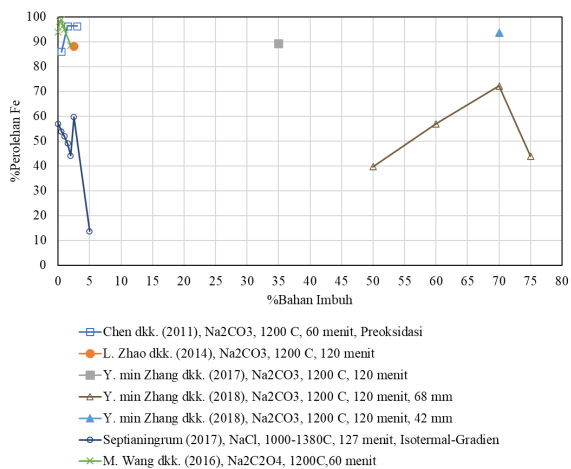
Bahan imbuh dapat ditambahkan dalam campuran umpan pada proses reduksi yang biasanya berupa senyawa alkali. Penambahan senyawa alkali pada reduksi besi oksida menyebabkan terjadinya distorsi kisi dan transformasi kisi menghasilkan besi berpori yang dapat mempercepat laju difusi gas. Selain itu, senyawa alkali dapat masuk ke dalam partikel batu bara dan bereaksi dengan karbon yang akan meningkatkan reaktivitas karbon dan laju gasifikasi karbon [19].

#### 4.4.1 Penambahan Senyawa Natrium

Penambahan senyawa natrium pada reduksi konsentrat titanomagnetit atau pasir besi dapat berupa Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaCl, Boraks, dan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Pengaruh penambahan Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> dan NaCl dalam komposisi yang berbeda terhadap perolehan besi ditunjukkan pada Gambar 6, sedangkan pengaruh penambahan boraks dan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ditunjukkan pada Gambar 7. Dari grafik terlihat bahwa reduksi dengan penambahan Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dan Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> menghasilkan perolehan Fe yang lebih tinggi dibandingkan dengan NaCl, sedangkan penambahan boraks menghasilkan perolehan Fe yang hampir sama dengan penambahan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Namun, sulfur yang terdapat pada Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dapat masuk produk akhir sehingga menurunkan kualitas produk.

Chen dkk., [19] telah membandingkan penggunaan Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dan boraks dalam reduksi konsentrat titanomagnetit dimana dalam jumlah yang lebih sedikit Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dapat menghasilkan persen metalisasi yang lebih tinggi daripada reduksi dengan penambahan boraks. Penggunaan

Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, boraks dan natrium oksalat (Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) sebagai bahan imbuhan juga telah dipelajari oleh M. Wang dkk., [42].



Gambar 6. Pengaruh penambahan Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dan NaCl terhadap perolehan Fe

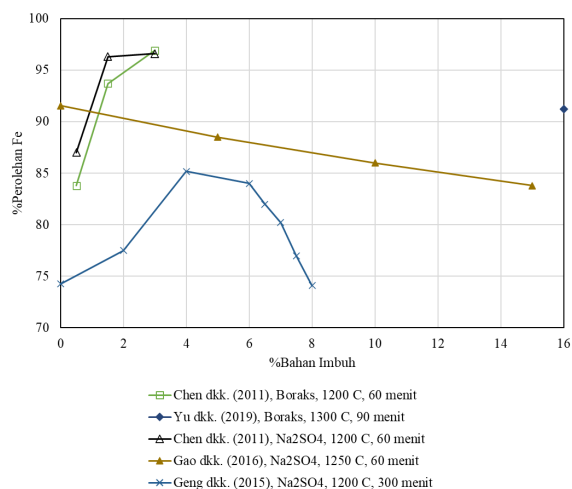
Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> menghasilkan persen metalisasi yang paling tinggi dibandingkan dengan Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dan boraks. Dalam proses reduksi, Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> terdekomposisi menjadi Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dan CO yang akan menyediakan tambahan gas karbon monoksida sebagai reduktor. Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> yang dihasilkan dari proses dekomposisi akan memiliki reaktivitas tinggi dan dapat berperan dalam pemisahan besi dan titanium.

Penambahan Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> juga dapat menghasilkan nugget besi yang terpisah dari terak dengan perolehan hingga 93,67% pada penelitian yang dilakukan oleh Y. min Zhang dkk.,[8]. Karena percobaan tersebut dilakukan pada temperatur 1200 °C, vanadium tidak ikut tereduksi bersamaan dengan besi sehingga kadar Fe di dalam nugget besi dapat mencapai 95,44% sehingga dapat digunakan untuk memproduksi *semi-steel*. Oleh karena itu, penggunaan Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> dan Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> sebagai bahan imbuhan lebih disarankan dibandingkan dengan senyawa natrium lainnya.

#### 4.4.2 Penambahan Senyawa Kalsium

Penambahan senyawa kalsium sebagai bahan imbuhan pada reduksi konsentrat pasir besi atau titanomagnetit dapat berupa CaF<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>, CaSO<sub>4</sub>, dan CaCl<sub>2</sub>. Pengaruh penambahan senyawa kalsium terhadap perolehan besi ditunjukkan pada Gambar 8. Dari gambar tersebut terlihat bahwa penambahan CaF<sub>2</sub> dan CaCO<sub>3</sub> menghasilkan perolehan Fe yang paling tinggi dibandingkan dengan senyawa kalsium lainnya. Xiao hui Li dkk., [31] membandingkan

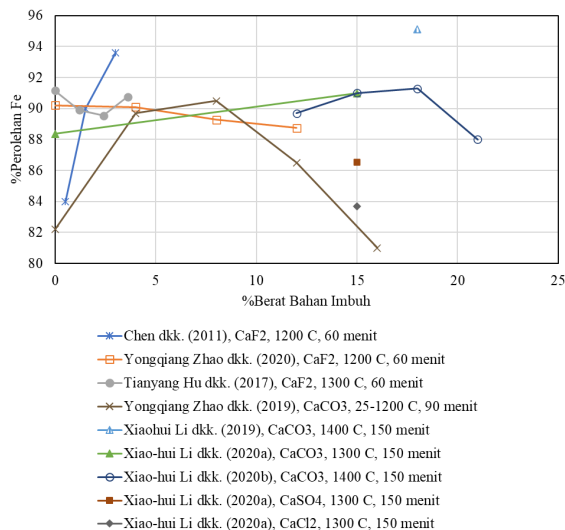
penambahan CaCO<sub>3</sub>, CaCl<sub>2</sub>, dan CaSO<sub>4</sub> dalam reduksi konsentrat titanomagnetit. Ketiga senyawa tersebut dapat bereaksi dengan ilmenit menghasilkan CaTiO<sub>3</sub>.



Gambar 7. Pengaruh penambahan boraks dan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> terhadap perolehan Fe

Penambahan CaCO<sub>3</sub> menghasilkan persen metalisasi Fe yang paling tinggi yaitu 90,99% dibandingkan dengan tanpa penambahan bahan imbuhan sebesar 88%. Walaupun penambahan CaCl<sub>2</sub> dan CaSO<sub>4</sub> dapat meningkatkan pertumbuhan logam besi, namun persen metalisasi yang dihasilkan lebih rendah daripada reduksi tanpa penambahan bahan imbuhan masing-masing sebesar 83,69% dan 86,55%. Rendahnya persen metalisasi Fe pada penambahan CaCl<sub>2</sub> dan CaSO<sub>4</sub> disebabkan oleh pembentukan Fe-Mg<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub> yang menghalangi reduksi besi dan pembentukan FeS.

Pada penambahan CaCO<sub>3</sub>, konsentrasi gas CO dan CO<sub>2</sub> meningkat dibandingkan dengan reduksi tanpa penambahan bahan imbuhan sehingga mendukung proses reduksi. Selain itu, CaCO<sub>3</sub> dapat terdekomposisi menjadi CaO dan CO<sub>2</sub>. CaO dapat mencegah pembentukan fayalit sedangkan CO<sub>2</sub> dapat meningkatkan laju gasifikasi karbon [1]. CaO juga dapat memutuskan ikatan tetrahedral oksida pengotor pada konsentrat titanomagnetit. Hal ini akan menurunkan viskositas dan berat jenis terak sehingga memudahkan proses pemisahan lelehan logam dan terak pada proses peleburan di *electric furnace* [43]. Oleh karena itu, penambahan CaCO<sub>3</sub> sebagai bahan imbuhan lebih disarankan dalam reduksi konsentrat titanomagnetit dibandingkan senyawa kalsium lainnya.



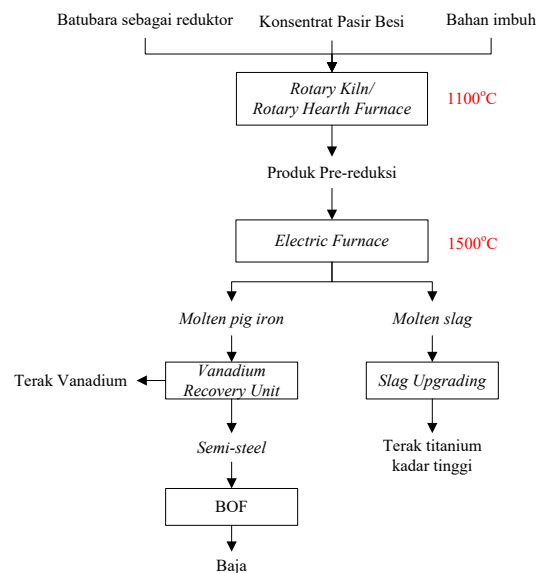
Gambar 8. Pengaruh penambahan senyawa kalsium terhadap perolehan Fe

### 5. KEMUNGKINAN ALUR PROSES PRODUKSI BESI, BAJA, DAN TERAK TITANIUM KADAR TINGGI DARI PASIR BESI DI INDONESIA

Pasir besi yang terdapat di Indonesia terdiri dari titanomagnetit ( $Fe_{2,75}Ti_{0,25}O_4$ ) dan sedikit kandungan ilmenite ( $FeTiO_3$ ) dengan oksida pengotor seperti  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ , dan  $MnO$ . Pasir besi tersebut memiliki kandungan  $Fe_{total}$  55-58% dan  $TiO_2$  sekitar 11% sehingga dapat digunakan sebagai alternatif bahan baku dalam pembuatan besi dan baja. Selain itu, kandungan  $TiO_2$  yang tinggi di dalam terak juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan pigmen  $TiO_2$ . Selain besi dan titanium, logam berharga lain yang juga biasanya terdapat di dalam konsentrat titanomagnetit adalah vanadium. Vanadium dapat ikut tereduksi bersama dengan besi pada reduksi temperatur tinggi ( $>1200\text{ }^{\circ}C$ ) dan dipisahkan dari lelehan besi dengan mengembuskan oksigen sehingga vanadium akan masuk ke terak dan terpisah dari lelehan besi.

Teknologi peleburan di dalam tanur tiup (*blast furnace*) seperti yang diaplikasikan di China berhasil memproduksi besi wantah yang dapat digunakan dalam proses pembuatan baja. Namun, titanium di dalam terak memiliki kadar yang rendah dengan struktur yang kompleks dan stabil. Terak titanium tersebut hanya menjadi limbah karena proses pemurnian lebih lanjut sulit dilakukan dan tidak ekonomis. Alur proses pembuatan besi, baja dan terak titanium kadar tinggi yang dapat diaplikasikan di Indonesia ditunjukkan pada Gambar 6.

Teknologi lain yang juga berkembang dalam proses pembuatan besi dan baja dari konsentrat titanomagnetit adalah teknologi reduksi langsung.



Gambar 9. Alur proses pembuatan besi, baja dan terak titanium kadar tinggi yang dapat diaplikasikan di Indonesia

Teknologi ini dapat diklasifikasikan berdasarkan reduktor yang digunakan yaitu gas dan batu bara.

Penggunaan gas sebagai reduktor di Indonesia terkendala karena mahalnya harga gas yang akan membuat proses menjadi tidak ekonomis. Teknologi yang mungkin diaplikasikan di Indonesia adalah reduksi langsung dengan reduktor batu bara menggunakan *rotary kiln* atau *rotary hearth furnace*.

Reduksi langsung dengan reduktor batu bara dapat dilakukan menggunakan *rotary kiln* seperti proses yang dioperasikan oleh New Zealand Steel atau menggunakan *rotary hearth furnace* seperti pilot plant yang diaplikasikan di Panzhihua Steel. Proses reduksi langsung menghasilkan produk reduksi yang dapat dilebur kembali di dalam *electric furnace* menghasilkan lelehan besi wantah (*pig iron*) yang terpisah dari terak titanium. Lelehan besi wantah (*pig iron*) dapat dibawa ke BOF untuk proses pemisahan vanadium dan proses pembuatan baja dengan mengembuskan oksigen. Terak titanium dapat dimurnikan lebih lanjut untuk menghilangkan oksida pengotor menghasilkan terak titanium kadar tinggi yang dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan pigmen  $TiO_2$ . Laju reduksi konsentrat titanomagnetit dapat ditingkatkan dengan pengaturan parameter operasi seperti perlakuan pre-oksidasi, penambahan bahan imbuh, serta pengaturan temperatur operasi.  $Na_2CO_3$  dan  $Ca_2CO_3$  dapat ditambahkan sebagai bahan imbuh dalam reduksi pasir besi untuk meningkatkan perolehan Fe di produk akhir.



## 6. KESIMPULAN

Laju reduksi konsentrat titanomagnetit atau pasir besi dapat ditingkatkan dengan mengatur parameter operasi seperti perlakuan pre-oksidasi, jenis reduktor, pengaturan temperatur proses, dan penambahan bahan imbu. Pengaruh dari masing-masing parameter operasi adalah batu bara bituminous sebagai reduktor dalam reduksi konsentrat pasir besi lebih disarankan karena ketersediaannya di Indonesia dan kemampuannya untuk menghasilkan persen metalisasi Fe yang tinggi. Semakin tinggi temperatur reduksi maka perolehan Fe yang dihasilkan pada produk akhir juga semakin besar. Penambahan senyawa alkali seperti  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  dan  $\text{Ca}_2\text{CO}_3$  dapat meningkatkan perolehan Fe dalam proses reduksi

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Taufiq Hidayat, S.T, M.Phil., Ph.D. yang telah memberikan masukan dalam penulisan ulasan literatur ini.

## REFERENCES

- [1] S. M. Jung, "Effects of  $\text{CaO}/\text{CaCO}_3$  on the carbothermic reduction of titanomagnetite ores," *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, vol. 46, no. 3, pp. 1162-1174, 2015. Doi: 10.1007/s11663-015-0341-y.
- [2] P. M. Hilman, "*Pasir besi di Indonesia geologi, eksplorasi dan pemanfaatannya*," Pusat Sumber Daya Geologi-Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, pp. 9-14, 2014.
- [3] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Badan Geologi, "*Executive summary pemutakhiran data dan neraca sumber daya mineral dan batubara*," pp. 7-16, 2019.
- [4] "2020 World Steel in Figures," Internet : <https://aceroplatea.es/docs/WorldSteelInFigures2020.pdf>, 2020 [Diakses 16 November 2020].
- [5] M. A. Irfan, "Penguatan industri besi-baja menuju ketahanan nasional," Internet : <https://investor.id/opinion/200003/penguatan-industri-besibaja-menuju-ketahanan-nasional>, November 2019 [Diakses 16 November 2020].
- [6] Y. Zhao, T. Sun, H. Zhao, C. Xu, and S. Wu, "Effect of  $\text{MgO}$  and  $\text{CaCO}_3$  as additives on the reduction roasting and magnetic separation of beach titanomagnetite concentrate," *ISIJ International*, vol. 59, no. 6, pp. 981-987, 2019. Doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-757.
- [7] Y. Zhang, L. Yi, L. Wang, D. Chen, W. Wang, Y. Liu, H. Zao, T. Qi "A novel process for the recovery of iron, titanium, and vanadium from vanadium-bearing titanomagnetite: sodium modification-direct reduction coupled process," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 24, no. 5, pp. 504-511, 2017. Doi: 10.1007/s12613-017-1431-4.
- [8] Y. Zhang, L. Wang, D. Chen, and W. Wang, "A method for recovery of iron, titanium, and vanadium from vanadium-bearing titanomagnetite," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 25, no. 2, pp. 131-144, 2018. Doi: 10.1007/s12613-018-1556-0.
- [9] J. Qin, G. G. Liu, Z. J. Li, and J. L. Qi, "A study on the comparison of the several typical processes for dealing with vanadium titanium magnetite resources," *Energy and Environmental Engineering - Proceedings of the International Conference on Energy and Environmental Engineering, ICEEE 2014*, pp. 145-148, 2015.
- [10] P. R. Taylor, S. A. Shuey, E. E. Vidal, and J. C. Gomez, "Extractive metallurgy of vanadium-containing titaniferous magnetite ores: A review," *Minerals and Metallurgical Processing*, vol. 23, no. 2, pp. 80-86, 2006. Doi: 10.1007/bf03403340.
- [11] W. S. Steinberg, W. Geysler, and J. Nell, "The history and development of the pyrometallurgical processes at Evraz highveld steel & vanadium," *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 111, pp. 6-9, 2011.
- [12] E. Hukkanen and H. Walden, "The production of vanadium and steel from titanomagnetites," *International Journal of Mineral Processing*, vol. 15, no. 1-2, pp. 89-102, 1985. Doi: 10.1016/0301-7516(85)90026-2.
- [13] H. P. Gou, G. H. Zhang, and K. C. Chou, "Phase evolution during the carbothermic reduction process of ilmenite concentrate," *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, vol. 46, no. 1, pp. 48-56, 2014. Doi: 10.1007/s11663-014-0175-z.
- [14] Y. Z. Wang, J. L. Zhang, Z. J. Liu, and C. B. Du, "Carbothermic reduction reactions



- at the metal-slag interface in Ti-bearing slag from a blast furnace,” *Jom*, vol. 69, no. 11, pp. 2397-2403, 2017. Doi: 10.1007/s11837-017-2508-2.
- [15] K. Kodama, A. Shigemi, and T. Ogata, “Use of iron sand in small blast furnaces,” *Tetsu-to-Hagané Overseas*, vol. 4, no. 3, pp. 280-287, 1964. Doi: 10.2355/isijintoverseas.4.3\_280.
- [16] E. Park, S. B. Lee, O. Ostrovski, D.-J. Min, and C.-H. Rhee, “Reduction of the mixture of titanomagnetite iron sand and hematite iron ore fines by carbon monoxide,” vol. 44, no. 1, pp. 214-216, 2004.
- [17] L. H. Zhou, J. Wang, S. Y. Gou, L. Y. Chen, and Z. R. Li, “Development of utilization of vanadic titanomagnetite,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 184-185, pp. 949-953, 2012. Doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.184-185.949.
- [18] J. H. Zhang, C. X. Li, and L. X. Zeng, “Study on process mineralogy and titanium separation of Ti-bearing EAF slag,” *Advanced Materials Research*, vol. 734-737, pp. 1097-1103, 2013. Doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.734-737.1097.
- [19] D. S. Chen, B. Song, L. N. Wang, T. Qi, Y. Wang, and W. J. Wang, “Solid state reduction of Panzhihua titanomagnetite concentrates with pulverized coal,” *Minerals Engineering*, vol. 24, no. 8, pp. 864-869, 2011. Doi: 10.1016/j.mineng.2011.03.018.
- [20] L. Zhao, L. Wang, T. Qi, D. Chen, H. Zhao, and Y. Liu, “A novel method to extract iron, titanium, vanadium, and chromium from high-chromium vanadium-bearing titanomagnetite concentrates,” *Hydrometallurgy*, vol. 149, pp. 106-109, 2014. Doi: 10.1016/j.hydromet.2014.07.014.
- [21] E. Gao, T. Sun, Z. Liu, C. Geng, and C. Xu, “Effect of sodium sulfate on direct reduction of beach titanomagnetite for separation of iron and titanium,” *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 23, no. 5, pp. 428-433, 2016. Doi: 10.1016/S1006-706X(16)30068-1.
- [22] T. Hu, T. Sun, J. Kou, C. Geng, X. Wang, and C. Chen, “Recovering titanium and iron by co-reduction roasting of seaside titanomagnetite and blast furnace dust,” *International Journal of Mineral Processing*, vol. 165, pp. 28-33, 2017. Doi: 10.1016/j.minpro.2017.06.003.
- [23] Y. Zhao, T. Sun, Z. Li, and Z. Wang, “Measurement and characterisation of metallic iron particles on coal-based reduction and magnetic separation of refractory titanomagnetite,” *Mining, Metallurgy and Exploration*, vol. 38, no. 1, pp. 141-150, 2020. Doi: 10.1007/s42461-020-00309-3.
- [24] J. Qin, Y. Wang, Z. You, L. Wen, and X. Lv, “Carbonization and nitridation of vanadium-bearing titanomagnetite during carbothermal reduction with coal,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 4272-4282, 2020. Doi: 10.1016/j.jmrt.2020.02.053.
- [25] W. Yu, X. Wen, J. Chen, J. Kuang, Q. Tang, Y. Tiang, J. Fu, W. Fuang, and T. Qiu, “Preparation of direct reduced iron and titanium nitride from panzhihua titanomagnetite concentrate through carbothermic reduction-magnetic separation,” *Minerals*, vol. 7, no. 11, pp. 1-10, 2017. Doi: 10.3390/min7110220.
- [26] G. Zhang, K. Feng, and H. Yue, “Theoretical analyses and experimental investigations of selective carbothermal reactions of vanadium-bearing titanomagnetite concentrates for preparation of iron-based wear-resistant material,” *Jom*, vol. 68, no. 9, pp. 2525-2532, 2016. Doi: 10.1007/s11837-016-2035-6.
- [27] W. Yu, X. Wen, J. Chen, Q. Tang, W. Dong, and J. Zhong, “Effect of sodium borate on the preparation of TiN from titanomagnetite concentrates by carbothermic reduction-magnetic separation and acid leaching process,” *Minerals*, vol. 9, no. 11, pp. 675, 2019. Doi: 10.3390/min9110675.
- [28] Y. Zhao, T. Sun, H. Zhao, C. Chen, and X. Wang, “Effect of reductant type on the embedding direct reduction of beach titanomagnetite concentrate,” *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 26, no. 2, pp. 152-159, 2019. Doi: 10.1007/s12613-019-1719-7.
- [29] C. Geng, T. Sun, H. Yang, Y. Ma, E. Gao, and C. Xu, “Effect of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> on the embedding direct reduction of beach titanomagnetite and the separation of titanium and iron by magnetic separation,” *ISIJ International*, vol. 55, no. 12, pp. 2543-2549, 2015. Doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-420.

- [30] C. Geng, T. Sun, Y. Ma, C. Xu, and H. Yang, "Effects of embedding direct reduction followed by magnetic separation on recovering titanium and iron of beach titanomagnetite concentrate," *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 24, no. 2, pp. 156-164, 2017. Doi: 10.1016/S1006-706X(17)30022-5.
- [31] X. Li, J. Kou, T. Sun, X. Guo, and Y. Tian, "Coal and coke based reduction of vanadium titanomagnetite concentrate by the addition of calcium carbonate," *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 00, no. 00, pp. 1-8, 2019. Doi: 10.1080/08827508.2019.1702039.
- [32] X. Li, J. Kou, T. Sun, S. Wu, and Y. Zhao, "Formation of calcium titanate in the carbothermic reduction of vanadium titanomagnetite concentrate by adding CaCO<sub>3</sub>," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 27, no. 6, pp. 745-753, 2020. Doi: 10.1007/s12613-019-1903-9.
- [33] X. Li, J. Kou, T. Sun, S. Wu, and Y. Zhao, "Effects of calcium compounds on the carbothermic reduction of vanadium titanomagnetite concentrate," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 27, no. 3, pp. 301-309, 2020. Doi: 10.1007/s12613-019-1864-z.
- [34] N. Saleh, S. Rochani, and H. E. Mamby, "Making of iron nugget from concentrated iron sand using mini-sized rotary kiln," *Indonesian Mining Journal*, vol. 20, no. 1, pp. 59-68, 2017.
- [35] J. Gu, D. Xia, K. Liu, and S. Wang, "Experimental study on utilization of low-grade complex ore through direct reduction-melting and separation," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 394, no. 4, 2018. Doi: 10.1088/1757-899X/394/4/042044.
- [36] J. Gu, L. Wang, D. hong Xia, F. Zhang, Z. dong Qi, and W. qing Ao, "Experimental study and industrial demonstration on utilization of Fe, Ti and V from vanadium-bearing titanomagnetite ore sands," *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 26, no. 12, pp. 1295-1303, 2019. Doi: 10.1007/s42243-019-00305-y.
- [37] T. Hu, X. Lv, and C. Bai, "Enhanced reduction of coal-containing titanomagnetite concentrates briquette with multiple layers in rotary hearth furnace," *Steel Research International*, vol. 87, no. 4, pp. 494-500, 2016. Doi: 10.1002/srin.201500119.
- [38] X. Wang, T. Hu, C. Chen, and T. Sun, "Effects of the fixed carbon and ash in blast furnace dust on its co-reduction with seaside titanomagnetite," *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, vol. 55, no. 5, pp. 1323-1337, 2019. Doi: 10.5277/ppmp19060.
- [39] H. Sun, J. Wang, Y. Han, X. She, and Q. Xue, "Reduction mechanism of titanomagnetite concentrate by hydrogen," *International Journal of Mineral Processing*, vol. 125, pp. 122-128, 2013, doi: 10.1016/j.minpro.2013.08.006.
- [40] H. Sun, X. Dong, X. She, Q. Xue, and J. Wang, "Solid state reduction of titanomagnetite concentrate by graphite," *ISIJ International*, vol. 53, no. 4, pp. 564-569, 2013. Doi: 10.2355/isijinternational.53.564.
- [41] E. Park and O. Ostrovski, "Reduction of titania-ferrous ore by carbon monoxide," *ISIJ International*, vol. 43, no. 9, pp. 1316-1325, 2003. Doi: 10.2355/isijinternational.44.999.
- [42] M. Wang, S. Zhou, X. Wang, and B. Chen, "Recovery of iron from chromium vanadium-bearing titanomagnetite concentrate by direct reduction," *Jom*, vol. 68, no. 10, pp. 2698-2703, 2016. Doi: 10.1007/s11837-016-2083-y.
- [43] J. Xin, N. Wang, M. Chen, and C. Chen, "Slag-metal separation and reduction behaviors of vanadiumbearing titanomagnetite metallized pellets," *ISIJ International*, vol. 60, no. 5, pp. 823-831, 2020. Doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-529.