

# Proses Pembuatan Besi Menggunakan Injeksi Gas Hidrogen ke Dalam *Blast Furnace*: Sebuah Alternatif untuk Mengurangi Emisi CO<sub>2</sub>

Fakhreza Abdul, Sungging Pintowantoro, Mas Irfan Purbawanto Hidayat

Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

*e-mail*: fakhreza.abdul@mat-eng.its.ac.id

**Abstrak**—Semakin ketatnya aturan lingkungan hidup khususnya emisi karbon membuat industri besi dan baja yang sudah stabil dan mapan selama puluhan tahun menghadapi tantangan baru di masa depan. Adanya *Paris Agreement* tahun 2015, dengan target nol emisi CO<sub>2</sub> pada tahun 2050 membuat banyak industri besi dan baja di dunia mulai mengembangkan berbagai alternatif teknologi untuk mereduksi emisi gas CO<sub>2</sub> nya. Saat ini, industri besi dan baja telah melakukan berbagai upaya untuk menurunkan emisi gas CO<sub>2</sub>, salah satu alternatif untuk mereduksi gas CO<sub>2</sub> tanpa mengubah jalur produksi dan teknologi pembuatan besi dan baja yang sudah ada, yaitu dengan menggunakan injeksi gas hidrogen ke dalam *blast furnace*. Tentunya, penggunaan injeksi gas hidrogen dalam jumlah yang besar akan mempengaruhi proses dan fenomena yang ada di dalam *blast furnace*. Terdapat beberapa reaksi reduksi oksida besi yang menjadi semakin banyak terjadi dan mengakibatkan perubahan yang cukup signifikan dalam proses di dalam *blast furnace*. Sehingga, *blast furnace* dengan injeksi gas hidrogen membutuhkan banyak penelitian dan studi yang lebih rinci.

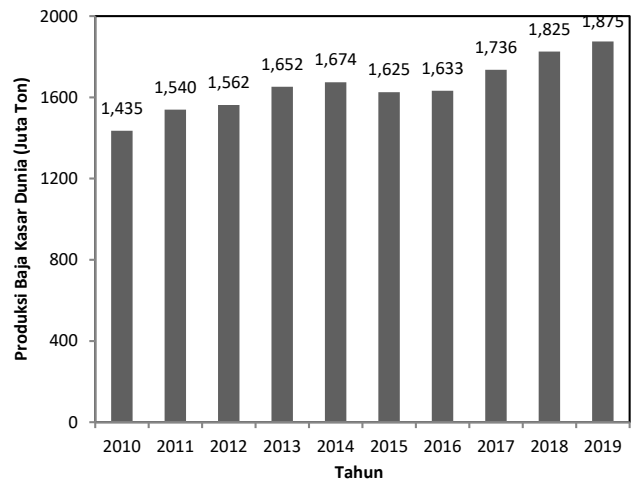
**Kata Kunci**— Mitigasi Emisi CO<sub>2</sub>, *Blast Furnace*, Besi dan Baja, Injeksi Gas Hidrogen

## I. PENDAHULUAN

Baja merupakan material yang penting dalam pembangunan infrastruktur suatu negara. Dengan kata lain, kemajuan suatu bangsa memiliki korelasi atau hubungan dengan tingkat konsumsi dan produksi baja bangsa tersebut. Meskipun dengan kemajuan teknologi material seperti material polimer, keramik, komposit dan logam bukan besi (*non ferrous*), peran baja khususnya untuk aplikasi struktur masih belum bisa digantikan oleh material lain secara penuh. Oleh karena itu, tingkat produksi baja kasar (*crude steel*) dunia semakin meningkat dari waktu ke waktu. Gambar 1 menunjukkan tingkat produksi baja kasar yang ada di dunia. Di tahun 2019 ini, produksi baja kasar dunia ialah sekitar 1.875 juta ton [1].

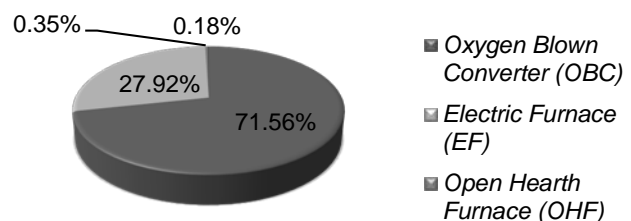
Dilihat dari proses pembuatannya, baja diperoleh dari proses pengolahan bijih besi yang ada di tambang maupun dari proses daur ulang baja. Proses pembuatan besi dari bijih besi merupakan proses utama dalam produksi baja. Pada prosesnya, bijih besi yang berasal dari tambang akan dihancurkan, kemudian diklasifikasikan ukurannya, ditingkatkan kandungan besinya, dilakukan proses perlakuan awal kemudian proses peleburan (*smelting*) dan dimurnikan.

Terdapat beberapa pilihan teknologi dalam proses pembuatan baja dari bijih besi, antara lain teknologi *Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace* (BF-BOF), *Direct Reduction Iron-Electric Arc Furnace* (DRI-EAF), dan *Open Hearth Furnace* (OHF).



Gambar 1. Produksi baja kasar dunia dari tahun 2010-2019 [1]

Dari semua teknologi tersebut, teknologi BF-BOF masih merupakan teknologi yang paling banyak digunakan untuk mengolah bijih besi menjadi besi kasar karena memiliki kapasitas produksi yang tinggi dan relatif lebih murah biaya investasinya. Gambar 2 menunjukkan perbandingan produksi baja kasar berdasarkan jenis teknologinya.

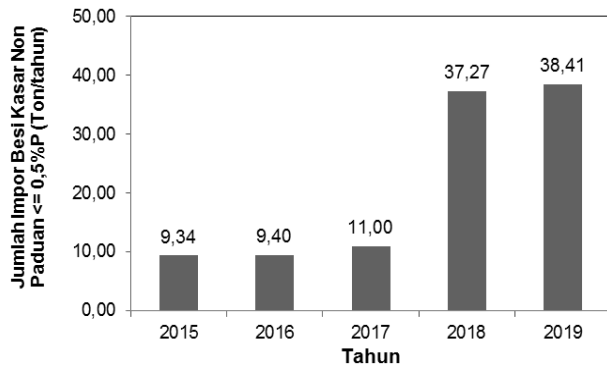


Gambar 2. Perbandingan produksi besi kasar berdasarkan jenis teknologinya tahun 2019 [1]

Berdasarkan data dari Gambar 2, tampak bahwa pembuatan baja kasar melalui proses konverter oksigen dan pembuatan besi melalui proses *blast furnace* merupakan

proses yang dominan, yaitu sekitar 71,6% dari total produksi baja kasar dunia. Hal tersebut dikarenakan teknologi *blast furnace* dan koverter oksigen memiliki tingkat produktivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan teknologi pembuatan besi dan baja lainnya.

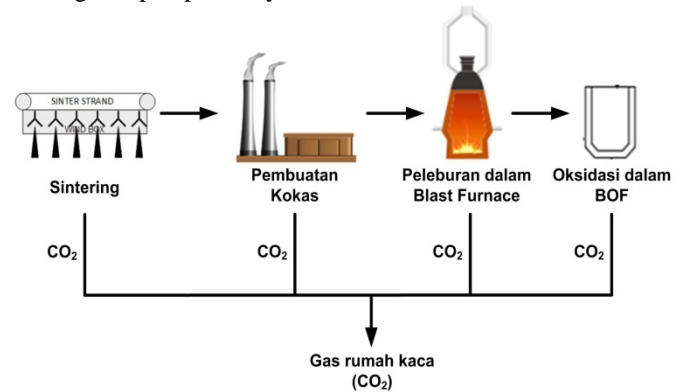
Untuk Indonesia sendiri, jumlah impor besi kasar non paduan dengan kandungan fosfor kurang dari sama dengan 0,5% mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Gambar 3 menunjukkan data impor besi kasar tersebut di Indonesia. Berdasarkan Gambar 3, tampak bahwa kebutuhan besi kasar di Indonesia masih tinggi bahkan mengalami peningkatan. Pada tahun 2015, terdapat beberapa rencana pembangunan industri pengolahan besi dan baja di Indonesia. Saat itu tercatat terdapat rencana investasi sebesar 5.680 juta USD dengan kapasitas produksi sebesar 9,25 juta ton per tahun [2].



Gambar 3. Jumlah impor Indonesia untuk komoditas besi kasar non paduan dengan kandungan fosfor kurang dari sama dengan 0,5% dalam lima tahun terakhir [3-6]

Meskipun memiliki tingkat produktifitas yang tinggi, pembuatan baja kasar melalui teknologi *blast furnace* dan *basic oxygen furnace* memiliki kelemahan dari segi dampak lingkungan. Proses pembuatan besi melalui proses tersebut banyak menghasilkan gas CO<sub>2</sub> yang mana merupakan gas rumah kaca. Dengan semakin ketatnya peraturan mengenai lingkungan hidup, dan sudah disepakatinya *Paris Agreement* pada tahun 2015, maka produksi baja kasar harus memiliki emisi karbon nol pada tahun 2050 [7]. Oleh karena itu industri besi dan baja dunia saat ini menghadapi tekanan untuk mengurangi emisi karbon yang dihasilkan. Sebagai contoh, sebanyak 1,85 ton CO<sub>2</sub> akan dihasilkan untuk tiap ton baja yang diproduksi. Dengan angka tersebut, pada tahun 2018, industri besi dan baja berkontribusi sekitar 8% dari total emisi gas CO<sub>2</sub> di seluruh dunia [8]. Karena mayoritas industri baja kasar menggunakan teknologi *blast furnace* dan *basic oxygen furnace*, maka reduksi emisi karbon pada teknologi BF-BOF merupakan hal yang penting dan dapat berkontribusi banyak dalam mengurangi emisi karbon. Tentu saja, jika semua *blast furnace* diubah menjadi teknologi baru yang lebih ramah lingkungan, maka hal tersebut kemungkinan besar akan mendapatkan banyak penolakan dari industri karena selain biaya investasi yang begitu mahal, juga waktu yang dibutuhkan untuk membangun dari awal sangat panjang. Selain itu, masih belum ada teknologi lain yang mampu mengimbangi kapasitas produksi dari *blast furnace*. Gambar

4 menunjukkan skema proses pembuatan baja melalui proses BF-BOF beserta kemungkinan emisi gas CO<sub>2</sub> pada masing-masing tahapan prosesnya.



Gambar 4. Kemungkinan terbentuknya CO<sub>2</sub> yang akan menjadi gas rumah kaca pada masing-masing tahapan proses pembuatan besi dan baja

Sedangkan Tabel 1 menunjukkan perbandingan emisi gas CO<sub>2</sub> yang dihasilkan untuk masing-masing jenis teknologi.

Tabel 1. Perbandingan jumlah emisi CO<sub>2</sub> untuk beberapa jenis teknologi pembuatan besi dan baja [9]

No	Jenis Teknologi	Perkiraan Emisi CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> ek/ton produk)	Sumber
1	<i>Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace</i> (BF-BOF)	1.850	[10]
2	Reduksi Langsung- <i>Electric Arc Furnace</i> (DR-EAF)	970	[10]
3	Proses berbasis hidrogen	196	[11]

Untuk mengurangi jumlah emisi gas CO<sub>2</sub>, saat ini sudah terdapat beberapa improvisasi proses dalam *blast furnace* antara lain: 1) Meningkatkan kandungan Fe di dalam bahan umpan sehingga mengurangi jumlah reduktan yang digunakan, 2) Menggunakan injeksi bahan bakar melalui *tuyere*, seperti injeksi serbuk batu bara, plastik, gas alam, biomassa, 3) Menggunakan gas keluaran dari tungku pembuatan kokas sebagai energi tambahan [8]. Kemudian, terdapat alternatif-alternatif perbaikan proses dalam *blast furnace*, misalkan: 1) Pengembangan teknologi untuk mengontrol reaksi reduksi bijih besi menggunakan hidrogen (sehingga produk reaksi reduksi akan menghasilkan H<sub>2</sub>O, tidak lagi menghasilkan CO<sub>2</sub>), 2) Teknologi *reformer* untuk gas keluaran dari tungku pembuatan kokas sehingga dapat meningkatkan kandungan hidrogen di dalam gas, dan 3) Teknologi untuk membuat kokas yang memiliki kekuatan yang tinggi dan reaktifitas yang tinggi [12]. Selain itu, efisiensi proses *blast furnace* juga bisa dilakukan dengan memodifikasi sistem pengumpanan untuk membuat distribusi bahan baku yang baik dan aliran gas di dalam *blast furnace* yang baik [13]. Meskipun demikian, semua perbaikan tadi masih membutuhkan kokas sebagai bahan bakar dan reduktan sehingga masih sulit untuk menciptakan emisi gas CO<sub>2</sub> sama dengan nol. Dalam usahanya untuk mereduksi CO<sub>2</sub>, terdapat beberapa proyek di beberapa

negara untuk mereduksi CO<sub>2</sub> di industri besi dan bajanya. Di Asia sendiri, salah satu proyek yang memiliki peta jalan yang baik dan ambisius dalam mitigasi CO<sub>2</sub> di industri besi dan baja ialah *COURSE 50* yang diterapkan oleh Jepang. Tujuan utama dari *COURSE 50* ini ialah untuk mengembangkan suatu teknologi untuk mengurangi emisi CO<sub>2</sub> sebesar sekitar 30% pada tahun 2030 [14]. Di Korea Selatan, terdapat tiga tahapan rencana pembuatan besi berbasis hidrogen, yaitu tahap 1 dimulainya uji coba pada tungku uji coba pada tahun 2025, tahap 2 yaitu produksi dua buah *blast furnace* untuk mengurangi emisi CO<sub>2</sub> sebesar 1,6% di tahun 2030, dan tahap 3 yaitu pembuatan besi menggunakan hidrogen untuk ke-dua belas *blast furnace* untuk mengurangi 8,7% emisi CO<sub>2</sub> di tahun 2040 [15]. Selain itu, di Eropa, terdapat suatu proyek untuk memitigasi emisi CO<sub>2</sub>, yaitu “*Ultra-Low CO<sub>2</sub> Steelmaking Top Gas Recycling Blast Furnace Process (ULCOS TGRBF)*” yang dimiliki oleh LKAB, Swedia [12]. Selain ULCOS TGRBF, terdapat usaha-usaha lain untuk menurunkan emisi gas CO<sub>2</sub> di Eropa seperti dikombinasikan dengan *Carbon Capture and Storage (CCS)*, penggunaan *Hot Briquette Iron (HBI)*, penggunaan reduktan berbasis biomassa, penggunaan kokas yang sudah diaktivasi atau penggunaan aglomerat komposit karbon [16].

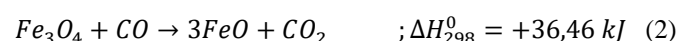
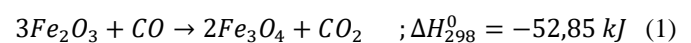
## II. TEKNOLOGI INJEKSI HIDROGEN KE DALAM *BLAST FURNACE*

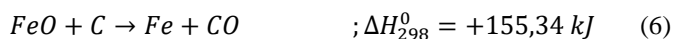
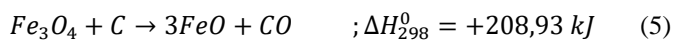
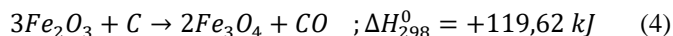
Salah satu teknologi yang saat ini dinilai paling memungkinkan untuk mencapai target nol emisi CO<sub>2</sub> di industri besi dan baja di tahun 2050 mendatang ialah penggunaan gas hidrogen sebagai reduktan pada *blast furnace*. Meskipun saat ini banyak alternatif teknologi reduksi langsung maupun *smelting reduction* yang lebih ramah lingkungan dan memiliki emisi gas CO<sub>2</sub> yang lebih rendah dibandingkan *blast furnace*, akan tetapi akan sulit untuk sepenuhnya mengkonversi teknologi *blast furnace* menjadi kedua teknologi tadi. Hal tersebut dikarenakan kapasitas produksi *blast furnace* yang masih belum bisa diimbangi oleh kedua alternatif teknologi tersebut serta kebutuhan investasi yang jumlahnya begitu besar dalam mengubah teknologi pembuatan besi dan baja. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, bahwa sekitar 70% produksi besi dan baja di dunia saat ini ialah berbasis teknologi BF-BOF. Sehingga, jika semua BF-BOF tadi diubah menjadi reduksi langsung atau *smelting reduction* maka akan membutuhkan investasi yang sangat besar, waktu yang lama, dan terganggunya rantai pasok besi dan baja dunia yang mana mengakibatkan kenaikan harga komoditas besi dan baja di dunia. Sehingga, modifikasi proses *blast furnace* menggunakan injeksi gas hidrogen merupakan hal yang realistis untuk dilakukan. Gas hidrogen yang digunakan tentu saja merupakan produk hidrogen dari proses yang ramah lingkungan, yaitu proses elektrolisis air bukan lagi mengandalkan gas hidrogen yang berasal dari proses *Steam Methane Reforming (SMR)* yang kurang ramah lingkungan karena memiliki produk proses berupa gas hidrogen dan gas karbon dioksida. Pada akhir tahun 2019, sebuah terobosan baru yang progresif dilakukan oleh Thyssenkrupp.

Thyssenkrupp memulai untuk menginjeksikan gas hidrogen ke salah satu *blast furnace*-nya, yaitu *blast furnace* nomor 9. Target dari proyek ini adalah dapat menginjeksikan sebanyak 25.000 Nm<sup>3</sup>/jam hidrogen ke dalam *blast furnace* dan dapat memproduksi besi kasar cair sebanyak 4.600 ton per hari. Rencana jangka panjang dari proyek ini ialah untuk menurunkan sekitar 30% emisi CO<sub>2</sub> per ton besi kasar yang dihasilkan di tahun 2030 dan mengurangi sepenuhnya emisi pada tahun 2050. Saat ini, Thyssenkrupp telah berhasil menurunkan 20% emisi CO<sub>2</sub> di *blast furnace*-nya. Proses injeksi hidrogen dilakukan di salah satu dari 28 *tuyere blast furnace* no. 9. Selanjutnya, proses injeksi ini akan dilakukan secara bertahap kepada ke-28 *tuyere blast furnace* no. 9 [17]. Dengan dimulainya uji coba injeksi gas hidrogen ini, maka target nol emisi CO<sub>2</sub> di tahun 2050 mendatang agaknya semakin menemui titik terang. Di sisi lain, teknologi ini akan menimbulkan pro dan kontra karena akan mempengaruhi rantai pasok bahan baku, utamanya batu bara. Selain itu, gas hidrogen akan menjadi primadona sebagai sumber energi baru untuk proses pembuatan besi. Tentunya, kebutuhan hidrogen yang masif untuk pembuatan besi akan mempengaruhi biaya operasi *blast furnace*. Sehingga, untuk meminimalkan biaya produksi tersebut dibutuhkan suatu integrasi antara reaktor pembuatan besi dan baja serta reaktor elektrolisis untuk memproduksi gas hidrogen dari produk H<sub>2</sub>O yang dihasilkan selama proses peleburan besi. Sebagai gambaran, saat ini harga gas hidrogen yang berasal dari produk elektrolisis memiliki harga dua kali lipat lebih tinggi dibandingkan gas hidrogen yang berasal dari proses *Steam Methane Reforming (SMR)*. Saat ini, harga gas hidrogen produk SMR ialah sekitar 3,8 Euro per kg H<sub>2</sub> [8].

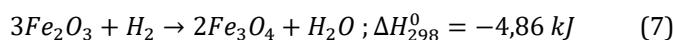
## III. PRINSIP DASAR REDUKSI HIDROGEN DALAM PROSES PEMBUATAN BESI

*Blast Furnace* merupakan suatu reaktor vertikal dengan aliran material secara berlawanan. Dalam hal ini, material umpan dimasukkan melalui bagian atas kemudian mengalir ke bagian bawah *blast furnace*. Sedangkan gas reduktan dan panas mengalir dari bagian bawah *blast furnace* melalui *tuyeres* ke bagian atas *blast furnace*. Dengan adanya kontak antara gas reduktan dan reduktan padat dengan besi oksida di dalam bijih besi maupun sinter dan dengan adanya energi yang dihasilkan oleh pembakaran karbon di dalam kokas maka terjadilah reaksi reduksi secara karbotermik dan terjadilah transfer panas, massa, dan momentum. Reaksi – reaksi reduksi tersebut merupakan reaksi pengurangan bilangan oksidasi dari oksida besi hingga diperoleh logam besi. Hal tersebut terjadi karena adanya pengikatan oksigen di dalam oksida besi oleh reduktan, baik gas karbon monooksida maupun karbon padat. Reaksi reduksi tersebut ditunjukkan oleh pers. (1) - (6) di bawah [18-21].





Dengan menggunakan hidrogen, maka peran C maupun CO sebagai reduktan akan digantikan oleh gas hidrogen. Sehingga, produk hasil reaksi reduksi tidak lagi berupa gas CO<sub>2</sub> melainkan uap air atau H<sub>2</sub>O seperti yang ditunjukkan oleh pers. (7) hingga (9) [20].



Dari segi termodinamika, terdapat perbedaan entalpi standar dan energi Gibbs untuk masing-masing tahapan reduksi  $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$ . Pada kasus reduksi menggunakan gas hidrogen sebagai reduktan, reaksi reduksi hematit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) menjadi magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) memiliki nilai entalpi yang lebih endotermik dibandingkan dengan reaksi reduksi menggunakan gas CO sebagai reduktan. Pada kasus transformasi Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> menjadi wustit (FeO), entalpi reaksi reduksi yang menggunakan gas hidrogen juga lebih endotermik dibandingkan dengan reaksi reduksi Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> menjadi FeO jika menggunakan gas CO sebagai reduktan. Terakhir, yang paling signifikan, pada kasus reaksi reduksi akhir dari FeO menjadi Fe, nilai entalpi reaksi untuk reduksi menggunakan hidrogen memiliki entalpi reaksi yang endotermik sedangkan pada reaksi reduksi menggunakan gas CO sebagai reduktan memiliki nilai entalpi yang eksotermik. Padahal, di *blast furnace*, reaksi ini merupakan reaksi yang sangat penting dan mempengaruhi adanya zona isothermal di dalam *blast furnace*. Sehingga, dengan semua perbedaan termodinamik tersebut, dapat diperkirakan bahwa profil temperatur dan lokasi reaksi-reaksi di dalam *blast furnace* akan berubah seiring dengan semakin banyaknya gas hidrogen yang diinjeksikan ke dalam *blast furnace*. Secara termodinamika, hidrogen lebih unggul dibandingkan CO dalam hal reduksi FeO menjadi Fe. H<sub>2</sub>O yang merupakan produk hasil reduksi oksida besi dengan gas hidrogen lebih mudah bereaksi dengan karbon dibandingkan dengan gas CO<sub>2</sub> yang merupakan produk hasil reaksi reduksi CO dengan oksida besi. Gas H<sub>2</sub>, terutama jika bersama dengan CO dapat melindungi kokas untuk tidak mengalami kerusakan lebih jauh di rentang temperatur 900-1000 °C. Selain itu, penggunaan hidrogen juga dapat meningkatkan permeabilitas *packed bed* pada temperatur hingga 100 °C. Adanya gas hidrogen juga akan mempengaruhi perilaku penyusutan (*shrinkage*) dari bahan baku yang dimasukkan. Adanya gas hidrogen ini akan membuat bahan baku yang dimasukkan ke dalam *blast furnace* menjadi lebih tahan terhadap penyusutan. Sebagai contoh pada temperatur antara 900 - 1000°C, penyusutan bahan baku karena transfer massa dan panas ialah 16% untuk kasus reaksi reduksi menggunakan gas hidrogen 100%. Sedangkan untuk kasus reduksi menggunakan gas 100% CO

memiliki nilai penyusutan yang jauh lebih tinggi, yaitu 31% [22]. Tabel 2 menunjukkan perbedaan nilai penyusutan bahan baku untuk berbagai skenario gas reduktan.

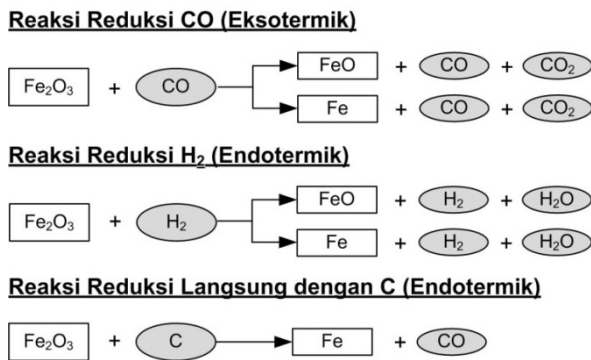
Tabel 2. Perbedaan nilai penyusutan material untuk kasus 100% CO, 100% H<sub>2</sub>, dan campuran antara gas CO dan H<sub>2</sub>

No	Skema	Tahap 1	Tahap 2	Tahap 3
1	Model <i>sandwich</i> dengan 100% H <sub>2</sub>	16%	8%	44%
2	Model tanpa kokas dengan 100% H <sub>2</sub>	12%	3%	6%
3	Model <i>sandwich</i> dengan 100% CO	31%	6,7%	18%
4	Model tanpa kokas dengan 100% CO	13%	2,5%	20%
5	Model <i>sandwich</i> dengan campuran antara CO dan H <sub>2</sub>	16%	8%	25%
6	Model tanpa kokas dengan campuran antara CO dan H <sub>2</sub>	13%	1,5%	4,3%

\*Diolah dari [22]

Selain itu, temperatur yang dibutuhkan agar produk besi dapat mulai menetes atau mencair juga mengalami perubahan seiring dengan bervariasinya jenis reduktan (H<sub>2</sub>, CO, atau campuran antara H<sub>2</sub> dan CO). Semakin banyak H<sub>2</sub> yang diinjeksikan, maka temperatur yang dibutuhkan oleh Fe untuk dapat menetes atau mengalir ke daerah di bagian bawahnya semakin meningkat. Hal tersebut dikarenakan pada kasus reduksi menggunakan hidrogen tidak ada karbon yang mengalami karburisasi dan terdifusi ke dalam Fe sehingga mempengaruhi titik leleh dari Fe itu sendiri. Sebaliknya, semakin banyak CO yang digunakan sebagai reduktan, maka semakin banyak pula karbon yang mungkin terdifusi ke dalam logam cair sehingga dapat menurunkan temperatur leleh dari logam cair tersebut. Temperatur rata-rata yang dibutuhkan untuk logam mulai untuk mengalir ialah 1505 °C untuk kasus reduksi menggunakan 100% gas hidrogen. Temperatur rata-rata yang dibutuhkan logam untuk mulai mengalir ialah 1420°C untuk kasus reduksi menggunakan 100% gas CO. Sedangkan untuk kasus campuran gas H<sub>2</sub> dan CO sebagai reduktan memiliki temperatur logam mulai mengalir pada 1475 °C [22].

Dari segi kinetika reaksinya, proses reduksi berbasis hidrogen akan memiliki kecepatan reaksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan reaksi reduksi berbasis karbon monooksida [9]. Kecepatan reaksi ini kemungkinan juga dipengaruhi oleh ukuran molekul gas H<sub>2</sub> yang lebih kecil dibandingkan dengan ukuran molekul gas CO. Sehingga, lokasi tercapainya derajat reduksi 100% juga akan semakin tinggi atau jauh dari *tuyere blast furnace* untuk kasus reduksi menggunakan gas hidrogen. Dengan meningkatnya laju reaksi reduksi oksida besi, maka kapasitas atau laju produksi besi kasar cair juga semakin meningkat. Gambar 5 menunjukkan klasifikasi reaksi reduksi oksida besi yang mungkin ada dalam operasi *blast furnace*.



Gambar 5. Klasifikasi reaksi reduksi oksida besi di dalam *blast furnace* (Diolah dari [23])

Terdapat banyak perbedaan saat suatu oksida besi direduksi oleh gas CO, H<sub>2</sub> maupun campuran antara CO dan H<sub>2</sub>. Beberapa perbedaan tersebut antara lain dari segi kinetiknya, termodinamika, perpindahan panas yang terjadi, dan aliran gas yang terbentuk. Dari segi kinetika reaksi, reaksi reduksi oksida besi menggunakan gas hidrogen sebagai reduktor akan memiliki kecepatan reaksi yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan reaksi reduksi oksida besi menggunakan gas CO sebagai reduktan. Kecepatan reaksi menggunakan gas H<sub>2</sub> ialah sekitar 10 kali lebih cepat dibandingkan kecepatan reaksi menggunakan gas CO. Dengan kecepatan reaksi reduksi yang lebih tinggi, maka reaksi reduksi oksida besi menggunakan hidrogen sebagai reduktan akan lebih cepat mencapai derajat reduksi 100 persen [9].

Secara termodinamika, saat terdapat gas hasil reaksi reduksi seperti CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O, misalkan gas CO<sub>2</sub> saat reaksi reduksi oksida besi menggunakan gas CO sebagai reduktan dan gas H<sub>2</sub>O saat menggunakan gas H<sub>2</sub> sebagai reduktan maka kedua gas hasil reaksi reduksi tersebut akan mempengaruhi kinetika dan termodinamika reaksi reduksi oksida besi. Gas CO akan lebih stabil di temperatur yang lebih rendah. Oleh karena itu, kecenderungan reduksi dari fasa wustit (FeO) menjadi besi (Fe) akan semakin turun seiring dengan meningkatnya temperatur gas. Sebaliknya, kecenderungan reduksi FeO menjadi Fe semakin meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur gas untuk kasus reaksi reduksi menggunakan gas hidrogen sebagai reduktan [9].

#### IV. TANTANGAN INJEKSI GAS HIDROGEN KE DALAM BLAST FURNACE

Substitusi C dan CO dengan H<sub>2</sub> akan terbatas. Hal tersebut dikarenakan *blast furnace* tetap membutuhkan kokas sebagai bahan bakar untuk pengoperasian *blast furnace*. Dengan menerapkan hal tersebut ke dalam *blast furnace* maka emisi gas CO<sub>2</sub> akan dapat diturunkan sebesar 20% [9], [24]. Meskipun demikian, saat ini, proses injeksi hidrogen ke dalam *blast furnace* dengan jumlah yang besar masih dalam tahap penelitian dan pengembangan. Terdapat beberapa hal yang perlu menjadi perhatian lebih dalam melakukan proses injeksi gas hidrogen ke dalam *blast furnace*, terutama saat masih menggunakan sejumlah kokas untuk bahan bakar dan

reduktan. Pertama, selain reaksi sesuai pers. (1) – (9) sebelumnya, terdapat beberapa kemungkinan reaksi seperti yang ditunjukkan oleh pers. (10) – (12) [25].



Reaksi pada pers. (10) dan (11) memiliki kecenderungan untuk menurunkan efisiensi penggunaan gas karbon monooksida dalam mereduksi oksida besi. Di sisi lain, reaksi pada pers. (12) yang merupakan reaksi *water gas shift* dapat berjalan baik ke arah kanan maupun ke arah kiri bergantung pada komposisi gas dan temperatur di dalam *blast furnace*. Reaksi ini akan mempengaruhi efisiensi penggunaan gas CO dan H<sub>2</sub> dalam mereduksi oksida besi di dalam *blast furnace*. Seperti yang kita ketahui, saat *blast furnace* beroperasi, maka akan membentuk profil temperatur, tekanan, dan komposisi gas yang bervariasi seiring dengan ketinggian *blast furnace* tersebut. Profil tersebut akan mempengaruhi reaksi-reaksi apa saja yang terjadi pada masing-masing titik ketinggian di dalam *blast furnace*. Pers. (12) akan cenderung berjalan ke arah kanan saat berada di daerah dengan temperatur sekitar 1000°C hingga daerah kohesif. Sedangkan di daerah dengan temperatur yang lebih rendah (pada daerah *stack* atau di atasnya), pers. (12) akan cenderung berjalan ke arah kiri, yaitu menghasilkan CO<sub>2</sub> dan gas H<sub>2</sub>. Oleh karena itu, hal ini akan mempengaruhi komposisi gas buang *blast furnace*. Hal tersebut dikarenakan semakin banyak gas H<sub>2</sub> yang diinjeksikan ke dalam *blast furnace* maka akan membuat CO<sub>2</sub> yang terbentuk melalui pers. (12) juga akan semakin banyak. Apalagi, jika *blast furnace* masih beroperasi menggunakan sejumlah kokas sebagai bahan bakar dan reduktan. Sehingga, dapat dikatakan bahwa reaksi *water gas shift* ini akan mempengaruhi komposisi gas buang *blast furnace* jika dilakukan injeksi gas hidrogen [25].

Kedua, injeksi gas hidrogen akan banyak mempengaruhi profil temperatur di bagian *stack* dan bagian atasnya. Hal tersebut dikarenakan adanya reaksi pada pers. (12) yang bersifat endotermik sehingga mengkonsumsi energi. Semakin banyak gas hidrogen yang diinjeksikan maka semakin banyak pula kemungkinan reaksi pada pers. (12) terjadi dan semakin curam gradien temperatur di daerah atas zona kohesif. Penurunan temperatur di bagian atas *blast furnace* tersebut juga mengakibatkan turunnya temperatur gas buang seiring dengan semakin banyaknya gas hidrogen yang diinjeksikan. Ketiga, semakin banyak gas hidrogen diinjeksikan ke dalam *blast furnace* maka semakin tinggi laju produksi besi kasar cair yang dihasilkan. Dengan menggunakan injeksi H<sub>2</sub> sebesar 40%, maka akan dapat meningkatkan laju produksi sebesar sekitar 30%. Keempat, dengan semakin banyaknya gas H<sub>2</sub> yang dihasilkan maka kemungkinan derajat reduksi mencapai 100% menjadi bergeser di daerah yang lebih tinggi (lebih jauh dari *tuyere*) dibandingkan dengan operasi *blast furnace* normal tanpa penambahan gas H<sub>2</sub> [25]. Hal tersebut disebabkan karena reaksi reduksi oksida besi menggunakan gas H<sub>2</sub> memiliki kinetika reaksi yang lebih cepat dibandingkan

dengan reaksi reduksi oksida besi menggunakan gas CO. Kelima, dengan semakin banyaknya gas H<sub>2</sub> yang diinjeksikan ke dalam *blast furnace*, maka akan menurunkan kehilangan tekanan di dalam *blast furnace* [25]. Sehingga dapat menurunkan kebutuhan tekanan blower utama *blast furnace*. Dengan semakin menurunnya kebutuhan tekanan udara yang dialirkan oleh *blower* ke dalam *blast furnace*, maka kebutuhan energi listrik juga dapat menurun sehingga biaya operasional *blast furnace* menjadi berkurang.

Selain dari aspek proses di dalam *blast furnace*, penerapan teknologi injeksi hidrogen ke dalam *blast furnace* membutuhkan suplai gas hidrogen yang kontinu dan dalam jumlah besar. Sehingga, akan menjadi percuma jika gas hidrogen tersebut disuplai oleh reaktor yang masih menggunakan karbon dan listrik yang masih berasal dari pembakaran bahan bakar fosil, seperti batu bara. Untuk dapat mencapai target nol emisi CO<sub>2</sub> di tahun 2050, maka dibutuhkan reaktor elektrolisis untuk mensuplai kebutuhan hidrogen *blast furnace*. Selain itu, listrik untuk proses elektrolisis juga diperoleh dari energi baru terbarukan yang ramah lingkungan dan tidak menghasilkan emisi gas CO<sub>2</sub>. Oleh karena itu, infrastruktur pendukung utamanya reaktor penghasil gas hidrogen yang ramah lingkungan juga menjadi pertimbangan dalam mencapai target nol emisi CO<sub>2</sub> di tahun 2020. Jika hal ini dilakukan dengan peta jalan yang jelas dan pengawasan yang baik, maka pada tahun 2050 bukan tidak mungkin akan diperoleh baja hijau atau *green steel* yang pada saat ini terasa sulit untuk tercapai.

## V. KESIMPULAN

Mitigasi emisi CO<sub>2</sub> dalam industri pembuatan besi berbasis *blast furnace* dapat dilakukan salah satunya dengan injeksi gas hidrogen ke dalam *blast furnace*. Proses injeksi hidrogen ke dalam *blast furnace* ini diprediksi memiliki beberapa keunggulan, antara lain: 1) Mampu menurunkan kebutuhan kokas, 2) Mampu menurunkan emisi CO<sub>2</sub> pada gas buang *blast furnace*, 3) Mampu meningkatkan produktivitas *blast furnace*, 4) Mampu menurunkan kehilangan tekanan di dalam *blast furnace*. Akan tetapi, proses injeksi gas hidrogen ke dalam *blast furnace* juga membutuhkan riset dan penelitian lebih lanjut karena memiliki dampak signifikan pada proses *blast furnace* terutama karena adanya kemungkinan terjadinya reaksi endotermik dalam reaksi *water gas shift*. Reaksi tersebut akan mampu mengubah profil temperatur pada bagian atas *blast furnace* dan menurunkan temperatur gas buang dari *blast furnace*. Meskipun demikian, injeksi gas hidrogen ke dalam *blast furnace* merupakan teknologi yang patut dicoba untuk mencapai nol emisi CO<sub>2</sub> di tahun 2050 dan memproduksi baja hijau atau *green steel*.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Sungging Pintowantoro, Ph.D yang telah memberikan saran dan masukan dalam pembuatan artikel ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] "Statistical reports | worldsteel." [Online]. Available: <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook.html>. [Accessed: 07-Jan-2021].
- [2] I. Suherman, "Analisis teknoekonomi pengembangan pabrik peleburan bijih besi dalam rangka memperkuat industri besi baja di Indonesia," *J. Teknol. Miner. dan Batubara*, vol. 12, no. 1, pp. 23–44, Dec. 2015.
- [3] "Badan Pusat Statistik." [Online]. Available: <https://www.bps.go.id/publication/2017/06/06/99bf33015acbc456a0c183fb/statistik-perdagangan-luar-negeri-indonesia-impor-2016-jilid-ii.html>. [Accessed: 07-Jan-2021].
- [4] "Badan Pusat Statistik." [Online]. Available: <https://www.bps.go.id/publication/2018/05/11/c91c31864f81570cdd57c27/statistik-perdagangan-luar-negeri-indonesia-impor-2017-jilid-ii.html>. [Accessed: 07-Jan-2021].
- [5] "Badan Pusat Statistik." [Online]. Available: <https://www.bps.go.id/publication/2019/05/08/7846107ee99382c7c8b4c121/statistik-perdagangan-luar-negeri-indonesia-impor-2018-jilid-ii.html>. [Accessed: 07-Jan-2021].
- [6] "Badan Pusat Statistik." [Online]. Available: <https://www.bps.go.id/publication/2020/05/08/1b84f053e3c8e5277518129a/statistik-perdagangan-luar-negeri-impor-2019-jilid-ii.html>. [Accessed: 07-Jan-2021].
- [7] R. Berger, "The future of steelmaking – How the European steel industry can achieve carbon neutrality," 2020. [Online]. Available: [www.rolandberger.com](http://www.rolandberger.com). [Accessed: 07-Jan-2021].
- [8] McKinsey & Co, "Decarbonization challenge for steel," 2020. [Online]. Available: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel#>. [Accessed: 07-Jan-2021].
- [9] F. Patisson and O. Mirgaux, "Hydrogen Ironmaking: How It Works," *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 7, p. 922, Jul. 2020.
- [10] J.-P. Birat, "Society, Materials, and the Environment: The Case of Steel," *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 3, p. 331, Mar. 2020.
- [11] D. Wagner, "Étude expérimentale et modélisation de la réduction du minerai de fer par l'hydrogène," <http://www.theses.fr>, Jan. 2008.
- [12] K. Nishioka, Y. Ujisawa, S. Tonomura, N. Ishiwata, and P. Sikstrom, "Sustainable Aspects of CO<sub>2</sub> Ultimate Reduction in the Steelmaking Process (COURSE50 Project), Part 1: Hydrogen Reduction in the Blast Furnace," *J. Sustain. Metall.*, vol. 2, no. 3, pp. 200–208, Sep. 2016.
- [13] E. A. Mousa, "Modern blast furnace ironmaking technology: Potentials to meet the demand of high hot metal production and lower energy consumption," *Metall. Mater. Eng.*, vol. 25, no. 2, pp. 69–104, Jul. 2019.
- [14] S. Tonomura, "Outline of course 50," in *Energy Procedia*, 2013, vol. 37, pp. 7160–7167.
- [15] J. Tang, M. sheng Chu, F. Li, C. Feng, Z. gen Liu, and Y. sheng Zhou, "Development and progress on hydrogen metallurgy," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 27, no. 6. University of Science and Technology Beijing, pp. 713–723, 01-Jun-2020.
- [16] M. Okvist, L.S. Lagerwall, P. Sundelin B, Orre, J, Bramming, M, Lundgren, "Low CO<sub>2</sub> ironmaking in the blast furnace," *Stahl und Eisen*, vol. 137, no. 9, pp. 29–37, 2017.
- [17] "Press release." [Online]. Available: <https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/world-first-in-duisburg-as-nrw-economics-minister-pinkwart-launches-tests-at-thyssenkrupp-into-blast-furnace-use-of-hydrogen-17280.html>. [Accessed: 07-Jan-2021].
- [18] F. Abdul and H. Wasik, "Analisa Penggunaan Beberapa Jenis Arang Lokal Sebagai Reduktor dalam Proses Pembuatan Besi Spon (Sponge Iron) dari Bahan Baku Pasir Besi Menggunakan Metode Reduksi Langsung," *J. IPTEK*, vol. 22, no. 2, pp. 43–50, Feb. 2019.
- [19] F. Abdul, S. Pintowantoro, and A. B. Hidayatullah, "Analysis of cylindrical briquette dimension on total iron content and the degree of metallization in direct reduction process of iron ore and iron sand mixture," in *Materials Science Forum*, 2019, vol. 964 MSF, pp. 19–25.
- [20] M. K. T. Babich A., Senk D., Gudenua H.W., *Ironmaking*. Aachen: Institut fur Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen, 2008.
- [21] Seshadri Seetharaman, *Treatise on Process Metallurgy, Volume 3: Industrial Processes*, 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 2013.

- [22] K. Ma, J. Xu, J. Deng, M. Kou, and L. Wen, "Hydrogen impact on the shrinkage behaviors of wustite packed beds above 900 °C," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 36, pp. 19555–19562, Jul. 2019.
- [23] M. Sato, K. Takahashi, T. Nouchi, and T. Ariyama, "Predictcion of next-generation ironmaking process based on oxygen blast furnace suitable for CO2 mitigation and energy flexibility," *ISIJ Int.*, vol. 55, no. 10, pp. 2105–2114, Oct. 2015.
- [24] C. Yilmaz, J. Wendelstorf, and T. Turek, "Modeling and simulation of hydrogen injection into a blast furnace to reduce carbon dioxide emissions," *J. Clean. Prod.*, vol. 154, pp. 488–501, Jun. 2017.
- [25] H. Nogami, Y. Kashiwaya, and D. Yamada, "Simulation of Blast Furnace Operation with Intensive Hydrogen Injection," *ISIJ Int.*, vol. 52, no. 8, pp. 1523–1527, 2012.