

Perolehan TiO_2 Dari Iron Ore Mengandung Titanium Melalui Proses Reduksi Karbon Dan Pelarutan Asam

Elda Rayhana¹, Azwar Manaf²

¹Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Mesin, Institut Sains dan Teknologi Nasional, Kampus ISTN Jakarta, Jl. Moh. Kahfi II, Jakarta 12640, Indonesia

²Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, PS. Ilmu Material, Universitas Indonesia, Kampus UI, Jl. Salemba Raya No 4, Jakarta 10430, Indonesia

E-mail: eldarayhana@yahoo.com

Received 02-03-2012, Revised 19-03-2012, Accepted 26-03-2012, Published 30-04-2012

ABSTRACT

RECOVERY OF TiO_2 FROM TITANIUM CONTAINING IRON ORE BY CARBON REDUCTION AND LEACHING PROCESSES. Indonesia has a large source of iron ore which is quite tempting for the purposes of exploitation in form of raw materials as well as for the production of pig iron. However, not all sources of iron ore are proved useful since not only because the present of deposit is scattere dinamounts of less significant but also because it contains element of tin oxide compounds with iron like ilmenite or $FeTiO_3$. However, ilmenite can actually be used as a source of titanium metal which is much more valuable than Fe it self. In order to recover the Ti from their respective compound it is required the release of strong bonds between the atoms in the compound. This paper reports the recovery of Ti oxide of ilmenite containing iron ore which was obtained through a combination of carbon reduction and acid leaching processes. Carbon reduction of iron ore was carried out through mechanical milling between iron ore and carbon with a ratio of 1:1. This was successively followed by a sintering at a temperature of 1000 °C employing a heating rate of 10 ° C/min for 0-3 hours. The reduction process has resulted in the formation of 27.83wt% TiO_2 . In order to improve the recovery level of TiO_2 , further reduction process was conducted through an HCl leaching. This successive stage produced fine powders in the form of deposits. Based on our quantitative analysis, the recovery of TiO_2 increased to a level of 73.73%.

Keywords: iron ore; Ilmenite; Titanium Recovery; Carbon Reduction; Leaching

ABSTRAK

PEROLEHAN TiO_2 DARI IRON ORE MENGANDUNG TITANIUM MELALUI PROSES REDUKSI KARBON DAN PELARUTAN ASAM. Indonesia memiliki sumber bijih besi yang cukup menggoda untuk tujuan eksploitasi sebagai bahan baku untuk pembuatan pig iron. Namun tidak semua sumber bijih besi bermanfaat, disamping karena depositnya yang tersebar dalam jumlah kurang signifikan tetapi juga karena mengandung unsur Ti dalam bentuk senyawa oksida dan terikat dengan besi seperti ilmenite atau $FeTiO_3$. Namun demikian, ilmenite justru dapat dijadikan sebagai sumber logam titanium yang jauh lebih bernilai dari Fe itu sendiri. Untuk memperoleh Ti dari senyawa tersebut diperlukan pelepasan ikatan-ikatan kuat antar atom-atom dalam senyawa. Makalah ini melaporkan tingkat perolehan oksida Ti dari bijih besi melalui kombinasi proses reduksi karbon dan pelarutan asam. Tahapan reduksi karbon dilaksanakan melalui pengabungan secara

mekanik antara bijih besi dan karbon dengan ratio 1:1 dan pemanasan di dalam furnace pada temperatur 1000°C dan laju pemanasan 10 °C/menit selama 0 – 3 jam. Proses reduksi berjalan dengan baik dengan terbentuknya TiO₂ sebesar 27,83 wt %. Untuk meningkatkan hasil perolehan TiO₂ dilakukan tahapan lanjutan berupa pelarutan dengan HCl. Tahapan ini menghasilkan serbuk halus dalam wujud endapan. Berdasarkan analisa kuantitatif, tingkat perolehan TiO₂ bertambah menjadi 73,73 %.

PENDAHULUAN

Iron ores adalah suatu senyawa besi oksida dimana didalam banyak hal merupakan campuran antara FeO (wustite), Fe₃O₄ (magnetite) dan Fe₂O₃ (hematite) serta beberapa senyawa oksida lainnya seperti Al₂O₃, MgO, SiO₂ dll sebagai komponen minor^[1,2]. Oleh karenanya iron ore telah lama digunakan manusia sebagai bahan baku untuk memproduksi *pig iron*^[3] yaitu suatu senyawa besi-karbon yang kaya dengan besi (Fe) dapat mencapai kemurnian > 95 wt. % dan karenanya digunakan sebagai bahan baku baik untuk pembuatan baja (*steel*) maupun besi tuang (*cast iron*), besi tempa (*wrought iron*). Proses baku untuk pembuatan *pig iron* adalah penerapan prinsip reduksi besi oksida dengan karbon yang dapat dilakukan melalui dapur pemanas temperatur tinggi atau dikenal dengan *blast furnace*^[4-6]. Sebagai sumber baik sebagai penyedia karbon maupun energi panas biasanya digunakan batu bara berkualitas tertentu yang dikenal dengan kokas (*cokes*). Dengan demikian dalam proses reduksi besi oksida tersebut, disamping diperlukan energi panas yang cukup juga diperlukan sumber oksigen yang dapat diperoleh melalui suatu semburan udara (*air blast*) ke dalam dapur pemanas. Namun di Indonesia, utilisasi bijih besi untuk keperluan industri belum intensif atau menjadi sebagai bahan baku utama untuk industri baja. Hal ini bisa dikarenakan disamping rendahnya kandungan Fe dalam *iron ore* juga di beberapa lokasi, *iron ore* memiliki kandungan titanium tinggi dalam bentuk senyawa oksida Fe dan Ti. Senyawa oksida Fe dan Ti yang terkandung dalam bijih besi tidak selalu sebagai dua atau lebih senyawa terpisah. Umumnya senyawa Fe dapat berbentuk *magnetite*, *hematite*, *ilmenite*, *titanomagnetite* dan senyawa Ti disamping berbentuk *ilmenite*, *titanomagnetite* juga dalam bentuk *rutile*^[7,8,9]. Dengan perkataan lain, proses separasi mineral-mineral berbasis Fe dan Ti tidak saja memerlukan separasi secara fisik tetapi juga perlu pemisahan dengan cara pemutusan ikatan dalam kristalnya. Paper ini membicarakan singkat proses *leaching* dan proses reduksi yang digunakan dalam proses pemisahan Ti dari Fe. Beberapa hasil percobaan skala laboratorium juga dibicarakan pintas.

PROSEDUR EKSPERIMEN

Tahapan penelitian yang diterapkan dalam proses perolehan senyawa TiO₂ dari bijih besi yang digunakan sebagai objek penelitian adalah sebagai berikut. Sebagai langkah awal, bijih besi dari alam dikeringkan dengan pemanasan agar kandungan airnya lepas dan kemudian bongkahan-bongkahan bijih besi dihaluskan dengan menggunakan penghalusan mekanik. Terhadap serbuk halus hasil penghalusan mekanik dilakukan

pengujian XRF untuk mengetahui kandungan unsur yang terdapat didalam bijih besi dan pengujian XRD untuk mengetahui baik secara kualitatif maupun kuantitatif senyawa-senyawa oksida yang terkandung dalam bijih besi. Kedua pengujian ini juga diperlukan untuk mengetahui berapa persen senyawa yang mengandung Titanium dapat diperoleh setelah tahapan reduksi dan *leaching*.

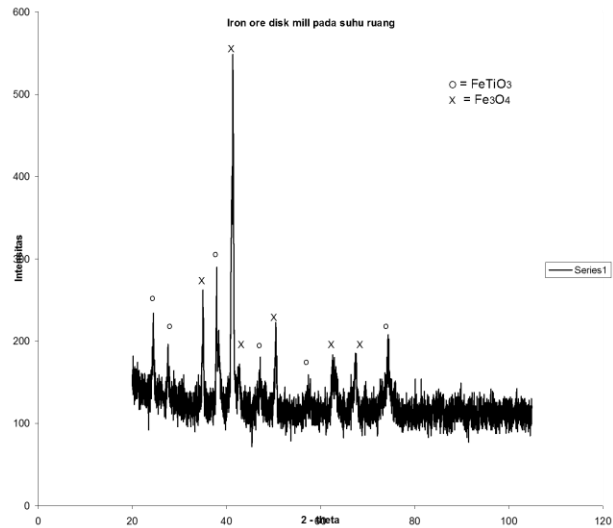
Penghalusan mekanik lanjutan diterapkan pada campuran antara serbuk bijih besi dan karbon dengan komposisi serbuk bijih besi : karbon 1 : 1 (masing –masing 100 g). Pencampuran dan sekaligus penghalusan kedua komponen tersebut berjalan selama 3 jam.

Serbuk halus campuran antara bijih besi dan karbon menjalani suatu proses reduksi dalam furnace dengan laju 10^0C permenit untuk waktu reduksi 0, 1 dan 3 jam dan dilanjutkan dengan proses reduksi melalui pelarutan menggunakan HCl (konsentrasi 25 %). Hasil reduksi kombinasi reduksi karbon dan pelarutan HCl ini dianalisa lebih lanjut dengan XRD (*X-Ray Diffractometer*) merk Philips PW 3710 yang dilengkapi perangkat computer dengan soft-ware APD (*Automatic Powder Diffraction*) sumber radiasinya adalah Co- $\text{K}\alpha$ dengan panjang gelombang ($\lambda = 1,78897 \text{ \AA}$), tegangan kerja pada 40 kV dan arus 30 mA, selang lebar jangkauan untuk setiap pencacahan berkas sinar-X sebesar $0,02^\circ$ dengan waktu pengukuran sebesar 1 detik/cacah dan dilakukan pada sudut difraksi (2θ) $20^\circ - 105^\circ$, dan perangkat penganalisa struktur GSAS (*General Structure Analysis Software*)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Reduksi Karbon

Gambar 1 adalah pola difraksi *iron ore* setelah penghalusan data untuk mempermudah identifikasi puncak-puncak difraksi. Terlihat terdapat 12 puncak difraksi yang dapat diidentifikasi . Penentuan senyawa yang ada pada sampel dilakukan dengan pencocokan antara nilai d_{hkl} dari hasil XRD dan *Powder Diffraction Data Base*. Hasil identifikasi pola difraksi yang diperoleh diringkas pada Tabel 1



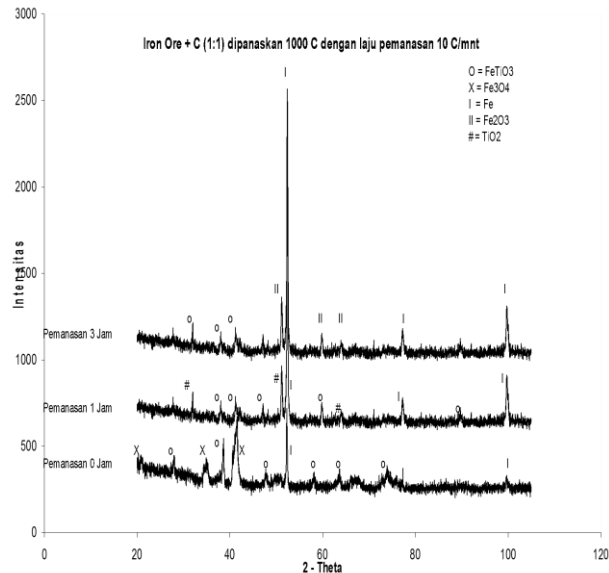
Gambar 1. Pola Difraksi *iron ore*

Tabel 1. Ringkasan hasil identifikasi pola difraksi *iron ore*

	Pengukuran	Teori / ICDD		Keterangan
No	d-value	d - value	Fasa	Pdf - no:
1	3,7593	3,7356	FeTiO₃	75-1203
2	2,9762	2,9867	Fe ₃ O ₄	82-1533
3	2,7520	2,7509	FeTiO₃	75-1203
4	2,5538	2,5442	FeTiO₃	75-1203
5	2,5349	2,5317	Fe ₃ O ₄	82-1533
6	2,4567	2,4240	Fe ₃ O ₄	82-1533
7	2,2354	2,2369	FeTiO₃	75-1203
8	2,0967	2,0992	Fe ₃ O ₄	82-1533
9	1,8592	1,8678	FeTiO₃	75-1203
10	1,7242	1,7140	Fe ₃ O ₄	82-1533
11	1,7242	1,7253	FeTiO₃	75-1203
12	1,6112	1,6160	Fe ₃ O ₄	82-1533

Hasil identifikasi memperlihatkan bahwa hanya ada 2 senyawa yang dominan, yaitu FeTiO₃ atau *ilmenite* dan Fe₃O₄ atau *magnetite*. Data pola difraksi *iron ore* hasil pengukuran konvergen dengan nilai Chi **2 sebesar 1,344 dianggap dapat diterima untuk menggunakan kurva teoritik yang terbangun. Berdasarkan kurva teoritik tersebut diturunkan nilai fraksi massa masing-masing fasa yaitu sebesar 59,71 % untuk fasa Fe₃O₄ dan 40,29 % untuk fasa FeTiO₃. Dengan komposisi seperti ini maka kandungan TiO₂ dalam iron ore adalah sebesar 21,21 %.

Tahapan reduksi dilakukan melalui pemanasan pada temperatur $1000\text{ }^\circ\text{C}$ terhadap campuran antara serbuk *iron ore* dan karbon dengan ratio massa 1:1 untuk kurun 0 jam, 1 dan 3 jam dengan laju pemanasan $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{menit}$. Temperatur pemanasan $1000\text{ }^\circ\text{C}$ berdasarkan reaksi *Boudouard* ^[10] diketahui akan menghasilkan pembentukan CO yang paling optimal. Gambar 2 membandingkan pola difraksi material residu pasca tahapan reduksi.



Gambar 2. Pola Difraksi pasca reduksi karbon pada temperatur $1000\text{ }^\circ\text{C}$

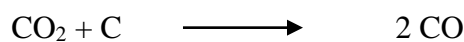
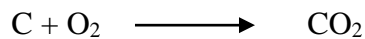
Sebagaimana terlihat pada Pada Gambar 2 terjadi perubahan pola difraksi terutama bila dibandingkan sebelum pemanasan (Gambar 1) yaitu hadirnya puncak difraksi yang cukup tajam pada sudut $2\theta = 52,38^\circ$ dan $99,71^\circ$. Puncak difraksi yang dimaksud ternyata bersesuaian sangat baik dengan puncak difraksi milik fasa α Fe yang hadir baik pada sampel dengan waktu penahanan 0 jam maupun 1 dan 3 jam. Jadi selama pemanasan menuju temperatur $1000\text{ }^\circ\text{C}$ proses reduksi karbon telah berlangsung. Proses reduksi karbon tersebut terus berlangsung pada selama penahanan temperatur $1000\text{ }^\circ\text{C}$ sampai dengan 3 jam ditandai dengan makin meningkatnya intensitas puncak difraksi fasa α -Fe.

Hasil identifikasi kesemua puncak-puncak difraksi pada sampel dengan waktu penahanan 0 jam menunjukkan hadirnya fasa Fe, Fe_3O_4 dan FeTiO_3 meskipun fasa yang tereduksi hanyalah berasal dari fasa Fe_3O_4 , sedangkan fasa FeTiO_3 belum mengalami perubahan. Beberapa puncak difraksi masih bersesuaian dengan puncak-puncak difraksi Fe_3O_4 yang mengindikasikan bahwa reduksi Fe_3O_4 menjadi Fe belum berjalan optimal. Analisa kuantitatif terhadap pola difraksi dari sampel ini menghasilkan komposisi material hasil reduksi sebagai berikut : α -Fe = 7,39 % ; Fe_3O_4 = 50,63 % ; dan FeTiO_3 = 41,98 %.

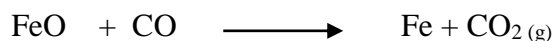
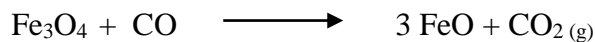
Pada sampel hasil reduksi dengan penahanan waktu 1 jam telah tidak terlihat lagi kehadiran fasa Fe₃O₄. Hal ini menunjukkan bahwa selama waktu penahanan 1 jam pada temperatur 1000 °C proses reduksi Fe₃O₄ menjadi Fe telah berjalan secara optimal. Ketersediaan karbon sebagai reduktor dipastikan cukup dalam material sehingga reduksi lanjutan terus dapat berjalan bersamaan baik itu berasal dari Fe₃O₄ maupun dari FeTiO₃ ditandai dengan telah terdekomposisinya FeTiO₃ secara parsial menjadi TiO₂. Dari hasil analisis kuantitatif terhadap sampel ini diketahui bahwa komposisi material hasil reduksi dalam fraksi massa adalah : α-Fe = 52,28 % ; FeTiO₃ = 19,88 % ; TiO₂ = 27,83 %. Jadi dalam hal ini telah terjadi peningkatan fraksi fasa α-Fe sebagai hasil proses reduksi karbon dari serendah 7.99 % pasca penahanan 0 jam menjadi setinggi 52,28 % pasca penahanan 1 jam. Bersamaan dengan hal tersebut, terjadi penurunan fraksi massa FeTiO₃ dari 41,98 % menjadi 19,88 % disertai peningkatan fraksi massa TiO₂ sebesar 27,83 %.

Melihat kembali fasa-fasa penyusun material sebelum dan sesudah proses reduksi diperkirakan reaksi yang berlangsung selama proses reduksi adalah sebagai berikut :

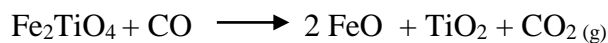
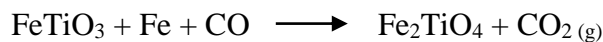
I. Tahapan prereduksi gas CO



II. Tahapan reduksi Fe₃O₄ menjadi Fe



III. Tahapan reduksi FeTiO₃ menjadi TiO₂

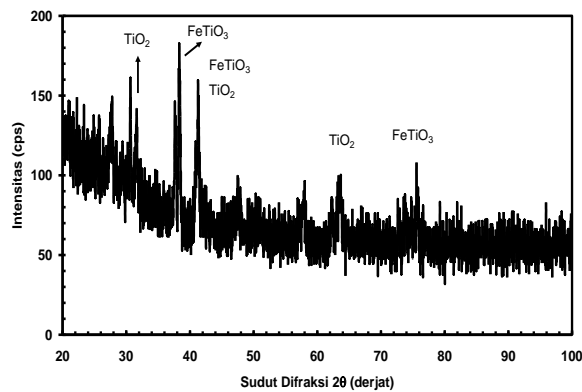


Reaksi pada tahapan ke III memungkinkan terjadi selama masih terdapat gas CO. Bila tidak demikian maka proses sebaliknya yang terjadi yaitu proses oksidasi. Hal ini kelihatannya terjadi pada sampel yang menjalani proses reduksi karbon dengan waktu tahan 3 jam. Berdasarkan data hasil identifikasi fasa dalam sampel terdiri dari FeTiO₃, Fe₂O₃, dan Fe. Apa yang dapat diduga dari hasil ini adalah, waktu penahanan 3 jam ternyata relatif lama sehingga diperkirakan semua C telah habis menjadi CO dan CO₂ sebelum proses dihentikan. Dengan demikian sampel yang telah bebas dari C dan masih menjalani proses pemanasan pada temperatur 1000 °C meneruskan reaksi reduksi dengan reaksi oksidasi. Dalam proses oksidasi ini diperkirakan pada temperatur

tersebut terjadi fasa FeO terlebih dahulu dan bereaksi dengan TiO₂ membentuk FeTiO₃. Namun demikian waktu 3 jam tadi tidak cukup mengoksidasi semua Fe yang merupakan fraksi terbesar dalam sampel. Sehingga diperoleh material hasil reduksi terdiri dari FeTiO₃, Fe₂O₃ dan Fe. Jelaslah, waktu penahanan pada temperatur 1000 °C tersebut perlu dikontrol sedemikian sehingga ketika C dalam material telah habis, maka proses reduksi segera dihentikan.

Reduksi Pelarutan HCl

Dari hasil- hasil yang telah diperoleh dengan berbagai macam proses di atas terlihat bahwa proses reduksi berjalan dengan baik terjadi pada *iron ore* + C dipanaskan 1000°C selama 1 jam. Oleh karena itu hasil proses ini yang digunakan untuk proses selanjutnya yaitu proses pengambilan TiO₂. Pada proses ini sampel dicampur dengan HCl dengan tujuan Fe diikat oleh Cl membentuk FeCl₂ [11]. Hasil endapan yang diperoleh menjalani pencucian agar bebas dari senyawa lain yang tidak diinginkan dan pengeringan dapat dengan mudah dilaksanakan melalui pemanasan. Gambar 3 memperlihatkan pola difraksi material endapan proses pelarutan.



Gambar 3. Pola difraksi material endapan pasca tahapan pelarutan HCl

Dari hasil identifikasi pola difraksi pada Gambar 3 di atas terlihat bahwa fasa Fe sudah tidak terdapat dalam endapan. Terdapat 2 fasa dominan yaitu FeTiO₃ dan fasa TiO₂ masing-masing dengan fraksi massa 32.05 % dan 67.95 %. (Hasil identifikasi seperti terlihat pada Tabel 2). Jadi, pasca tahapan pelarutan HCl terhadap hasil reduksi karbon selama 1 jam telah terjadi peningkatan lanjut fraksi fasa TiO₂ dari 27,83 % menjadi 67,95 % yaitu lebih dari 2 kalinya.

Tabel 2. Hasil identifikasi pola difraksi *Iron Ore* + C + HCl

No	Pengukuran	Teori / ICDD		Keterangan
	Nilai d	Nilai d	Senyawa	Pdf-no :
1	3,7256	3,7056	FeTiO ₃	75-1212

2	3,2804	3,2846	TiO ₂	76-0324
3	2,7293	2,7233	FeTiO ₃	75-1212
4	2,5391	2,5280	FeTiO ₃	75-1212
		2,5211	TiO ₂	76-0324
5	2,2202	2,2196	FeTiO ₃	75-1212
		2,2158	TiO ₂	76-0324
6	1,8565	1,8528	FeTiO ₃	75-1212
7	1,7035	1,7087	FeTiO ₃	75-1212
		1,7082	TiO ₂	76-0324
8	1,4907	1,4944	FeTiO ₃	75-1212
9	1,4595	1,4595	FeTiO ₃	75-1212

Perolehan TiO₂

Sebagaimana yang telah disebutkan terdahulu bahwa fraksi massa TiO₂ dalam *iron ore* adalah 21,21 % yaitu dihitung berdasarkan fraksi fasa FeTiO₃ sebesar 40,29 % yang terdapat dalam *iron ore*.

Berikut disampaikan hasil hitungan perolehan TiO₂ berdasarkan jumlah material hasil proses reduksi dan pelarutan serta analisis kuantitatif dari pola difraksi material hasil proses.

Pada tahapan reduksi karbon *iron ore* sebanyak ~ 34,27 gram pada temperatur 1000 °C selama 1 jam diperoleh jumlah material hasil reduksi sebesar 19 gram. Berdasarkan hasil analisis kuantitatif pola difraksinya material hasil reduksi tersebut terdiri dari □-Fe sebesar 9,94 gram ; FeTiO₃ = 3,77 gram dan TiO₂ = 5,29 gram. Jadi TiO₂ total yang terdapat dalam material hasil reduksi adalah 7,27 gram atau hanya 38,26 % dari jumlah total material hasil reduksi. Pasca tahapan pelarutan HCl terhadap material hasil reduksi diperoleh jumlah endapan sebesar 7,9 gram yang terdiri dari fasa FeTiO₃ dengan fraksi massa 32,05 % dan fasa TiO₂ dengan fraksi massa sebesar 67,95 %. Dengan komposisi massa material endapan seperti ini, jumlah TiO₂ total yang diperoleh dari material endapan adalah sebesar 5,36 gram. Masih terdapat TiO₂ sebesar 2,53 gram yang terikat dalam senyawa FeTiO₃. Dengan demikian, bila perolehan TiO₂ diartikan sebagai ratio antara massa TiO₂ yang diperoleh dan massa TiO₂ yang terdapat dalam *iron ore* maka diperoleh nilai ~ 73,73 %.. Jadi tingkat perolehan TiO₂ pada proses gabungan reduksi dan dilanjutkan dengan pelarutan asam dalam penelitian ini dapat mencapai lebih dari 73 %. Tingkat perolehan ini tentu masih dapat dicapai lebih tinggi lagi bila karbon pada

tahapan reduksi dan HCl pada tahapan pelarutan menggunakan material dengan kemurnian tinggi.

KESIMPULAN

Dari hasil dan diskusi yang telah dipaparkan dapat ditarik kesimpulan bahwa *iron ore* yang diteliti memiliki sumber TiO₂ sebesar 21,21 % berasal dari senyawa utama berupa FeTiO₃ (*ilmenite*) yang menyusun komposisi *iron ore* mencapai 59,71 %.

Proses reduksi karbon terhadap *iron ore* dengan ratio 1:1 pada temperatur 1000 °C selama 1 jam dapat mereduksi senyawa utama menjadi Fe dan TiO₂ dan masih terdapat fasa FeTiO₃ yang belum tereduksi. Perolehan TiO₂ dapat ditingkatkan dengan mengeliminasi Fe menjadi FeCl₂ pada proses pelarutan HCl baik yang berasal dari proses reduksi karbon maupun dekomposisi senyawa FeTiO₃ tersisa. Tingkat perolehan TiO₂ pada kombinasi reduksi dan pelarutan HCl terhadap *iron ore* mencapai 73,73 %.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis utama mengucapkan banyak terima kasih kepada program studi Ilmu Material Program Pascasarjana FMIPA UI yang telah menyediakan fasilitas penelitian sehingga terselenggaranya penelitian ini. Penulis utama juga mengucapkan terima kasih kepada dekan FTIISTN Jakarta yang telah memberikan izin penulis untuk studi di Universitas Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 Mirko Komatina, Heinrich, W. Gudeau, "The Sticking Problem During Direct Reduction of Fine Iron Ore in The Fluidized bed" *Journal of Metallurgy*. 310, 2004
- 2 J. F. Gransden, J. S. Sheasby, "The Sticking of Iron Ore During Reduction by hydrogen in a Fluidized bed", *Can. Metall. Quarterly* .13. 649-657,1974
- 3 B. Anameric, K.B. Rundman and S.K. Kawatra "Carburization Effects on Pig Iron Nugget Making" *Minerals & Met. Process*. Vol. 23.139-150, 2006
- 4 Constantin C., Mihai T., Dobrescu C., Constantin N, "Reability and Systems Energy Quality Services" *Journal of Sustainable Energy* Vol. II, NO. 2, 43 - 47, 2011.
- 6 Richard S. Treptow, Luckner Jean, *The Iron Blast Furnace, A Study in Chemical, Hermodyna- mics* *J.Chem.Educ.* 75(1). 43, 1998
- 7 Singh, Santokh R and Virdhi P S and Chatterjea," Production of Molten Pig iron Fine Grained Iron Ore" *A B NML Technical Journal*, 15 (2). 36-41, 1973
- 8 Mehdilo and M. Irannajad,"Applied Mineralogical : Studies on Iranian Hard Rock Titanium Depositi" *J. Minerals & Materials Characterization & Engineering*, Vol. 9, No.3 (2010) 247-262, 2010
- 9 A.F. Buddington, Joseph Fahey, Angelina Vlisidis, "Degree of Oxidation of Adirondack Iron Oxide Minerals in Relation to Petrogeny" *Journal of Petrology*, Vol. 4, No. 1 138-169, 1963
- 10 9 Sadoon Morad, "Diagenesis of Titani ferrous minerals in Jurassic Sandstone from the Norwegia Sea" *Sedimentary Geology*, Vol.57. 17 – 40, 1988

- 11 10 K.Mondal, H.Lorethova, E. Hippo, J.Wiltowsky, S.B. Lalvani, "Reduction of Iron Oxide in Carbon Monoxide atmosphere-reaction controlled Kinetics" Processing Technology, Vol. 86, 33-37, 2004
- 12 11 M.H.H. Mahmoud, A.A.I. Afifi, I.A. Ibrahim, "Reductive Leaching of ilmenite oer in hydrochloric Acid for Preparation of Rutile" Hydrometallurgy, Vol. 73. 1-2 . 99-109, 2004