

# **SIMULASI ELIMINASI PENGOTOR PADA PROSES PELEBURAN BESI/BAJA DARI BAHAN BAKU SKRAP DAN PASIR BESI DENGAN METODE *COMPOUND SEPARATION***

**Agus Sukarto Wismogroho dan Nurul Taufiq Rochman**

*Pusat Penelitian Fisika (P2F) - LIPI*

*Kawasan Puspiptek, Serpong 15310, Tangerang*

## **ABSTRAK**

**SIMULASI ELIMINASI PENGOTOR PADA PROSES PELEBURAN BESI/BAJA DARI BAHAN BAKU SKRAP DAN PASIR BESI DENGAN METODE *COMPOUND SEPARATION*.** Untuk memenuhi kebutuhan bahan baku besi/baja cor industri pengecoran di Indonesia, dikembangkan peleburan besi/baja dari skrap dan pasir besi lokal. Namun demikian di dalam skrap besi/baja terdapat pengotor seperti Ni, Cu, Pb, Sn, Al, Ti, dan V yang dalam jumlah relatif banyak dapat menimbulkan masalah pada produk akhir. Sementara itu, pasir besi lokal banyak mengandung unsur Ti dan V yang juga dapat menggumpal pada dasar tungku saat proses peleburan dengan menggunakan kupola. Untuk meningkatkan efisiensi eliminasi pengotor, seperti Ti, V dan Al, dalam paper ini akan disimulasikan metode *compound separation* dengan mengikat/ mereaksikan unsur pengotor dengan unsur lain sehingga terjadi perbedaan berat jenis yang menyebabkan terjadinya pemisahan pengotor dari besi lebur. Simulasi dilakukan dengan perhitungan perubahan ( $\Delta$ ) energi standar bebas *Gibbs* dari reaksi-reaksi antara unsur pengikat, besi, dan pengotor (Ti, V dan Al) dengan menggunakan *software HSC Chemistry 5.0*. Hasil perhitungan menunjukkan perbandingan kualitatif reaksi antara masing-masing paduan yang terbentuk. Dengan perhitungan berat jenis, fasa, dan kecepatan reaksi dari paduan yang terbentuk, dapat ditentukan unsur yang paling tepat untuk pembersihan (eliminasi) pengotor-pengotor tersebut. Hasil simulasi menunjukkan bahwa Ti, V dan Al dapat dieliminasi dengan *bubbling* dan penambahan  $\text{CaF}_2$ . Simulasi ini diharapkan dapat diterapkan dalam teknologi *compound separation* sehingga dapat dipakai untuk mengontrol komposisi besi/baja sesuai dengan standar yang diinginkan dan dapat ditransfer teknologinya pada industri pengecoran di Indonesia.

**Kata kunci :** Simulasi, energi standar bebas *Gibbs*, metode *compound separation*, pengotor, skrap besi/baja, pasir besi

## **ABSTRACT**

**SIMULATION ON ELIMINATION OF IMPURITIES IN MOLTEN IRON MADE FROM SCRAP AND IRON SAND BY COMPOUND SEPARATION METHOD.** In order to meet the demand for the raw material of steel for local casting industry, the iron/steel making from scrap and sand iron was developed. However, scrap iron/steel contains many impurities such as Ni, Cu, Pb, Sn, Al, Ti, and V, that in a certain concentration will cause a problem in final product. On the other hand, iron sand contains Ti and V that can precipitate in the bottom of the crucible during iron making by cupola. In order to increase the efficiency of the elimination process, in this paper, the compound separation method will be simulated based on the change of the standard free energy Gibbs using software HSC Chemistry 5.0. The impurities will react with aggregation agents to form larger and lighter compounds so that they will float in the surface of the molten brass to make them easy to be separated. The simulation results show that Ti, V and Al can be removed by combination of bubbling and  $\text{CaF}_2$  compound addition. These results are expected to be applied in removing the impurities and controlling iron/steel composition as the desired purpose and the proposed compound separation method can be applied in local industries.

**Key words :** Simulation, standard free energy Gibbs, compound separation method, impurities, scrap iron/steel, iron sand

## **PENDAHULUAN**

Besi/baja merupakan tulang punggung utama bagi pengembangan industri suatu bangsa. Kesejahteraan suatu bangsa dapat diukur dari besar konsumsi baja perkapitanya. Di negara maju, konsumsi baja mencapai 700kg/orang/tahun. Sementara itu, kebutuhan masyarakat Indonesia terhadap baja

saat ini mencapai 6 juta ton/tahun, atau sekitar 26 kg/orang/tahun. Dengan harga baja yang mencapai USD 600/ton, maka nilai ekonominya mencapai 30 triliun/tahun dan akan terus meningkat seiring dengan pertumbuhan industri di Indonesia[1]. Namun demikian, produksi baja dalam negeri hanya 2 juta ton/tahun, yang

bahan bakunya berupa pelet 100% dan skrap besi 70% masih mengimpor dari luar negeri[2].

Akhir-akhir ini terjadi krisis kelangkaan bahan baku baja di dunia sebagai akibat dari penyedotan oleh industri otomotif China yang maju pesat. Ratusan industri pengecoran baja di Jawa Tengah ambruk dan sebagian lagi pindah bidang garapan [3-4]. Sementara itu, teknologi untuk memperoleh baja dari bijih besi dengan bahan baku pasir besi yang berjumlah 170 juta ton dan laterit, 1 milyar ton, masih belum bisa dikuasai karena adanya pengotor seperti Ti, V, Ni, dan Co dan. Pengotor Ti sangat mengganggu pada proses pembuatan *pig iron* karena mengendap lebih cepat dan menempel di dinding tungku peleburan. Demikian juga pengotor-pengotor yang lainnya.

Sementara itu, skrap baja biasa umumnya telah tercampur dengan logam lain saat proses daur ulang. Ditambah lagi, banyaknya penggunaan pelapisan baja oleh Cr, Ni, Zn, Pb dan Al guna memenuhi suatu fungsi tertentu, seperti ketahanan korosi, keindahan dan lain sebagainya. Penambahan Pb dilakukan untuk memperbaiki sifat permesinannya. Pada baja yang diperkuat, sering ditambahkan unsur-unsur lain seperti Ti, Cr, Ni, Co, V dan W. Sementara itu, teknologi pengeliminasi unsur-unsur pengotor ini masih belum banyak diketahui, sehingga baja cor yang dihasilkan kurang memenuhi kualitas standar yang diharapkan. Misalnya keberadaan Al dan Zn yang tidak terkontrol pada baja dapat menimbulkan *pin hole* [5] yang sangat merusak hasil cor. Keberadaan Cu akan mengakibatkan hasil cor pecah, karena perbedaan titik leleh Cu dengan baja. Demikian juga keberadaan Pb, Sn, Ti, dan V mengakibatkan akan menimbulkan hilangnya kelenturan, berkurangnya kekuatan baja cor dan lain sebagainya. Tabel 1 menunjukkan pengaruh unsur pengotor pada baja yang menimbulkan permasalahan yang serius.

Dewasa ini, untuk memenuhi kebutuhan bahan baku besi/baja cor industri pengecoran di Indonesia, dikembangkan peleburan besi/baja dari skrap dan pasir besi lokal. Dalam penelitian sebelumnya, pengotor Pb telah berhasil dieliminasi dari paduan tembaga dengan menggunakan metode *compound separation* [6-7]. Diketahui bahwa metode ini juga dapat diterapkan pada eliminasi pengotor dari besi/baja. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan disimulasikan metode *compound*

*separation* untuk mengeliminasi pengotor Ti, V dan Al dari besi lebur dari bahan baku skrap dan pasir besi. Simulasi dilakukan dengan perhitungan delta energi standar bebas *Gibbs* dari reaksi-reaksi antara unsur pengikat, besi, dan pengotor (Ti, V dan Al) dengan menggunakan *software HSC Chemistry 5.0*. Dengan perhitungan berat jenis, fasa, dan kecepatan reaksi dari paduan yang terbentuk, dapat ditentukan unsur yang paling tepat untuk pengeliminasian pengotor-pengotor tersebut. Simulasi ini diharapkan dapat diterapkan dalam teknologi *compound separation* sehingga dapat dipakai untuk mengontrol komposisi besi/baja yang dapat ditransfer teknologinya dalam industri pengecoran di Indonesia.

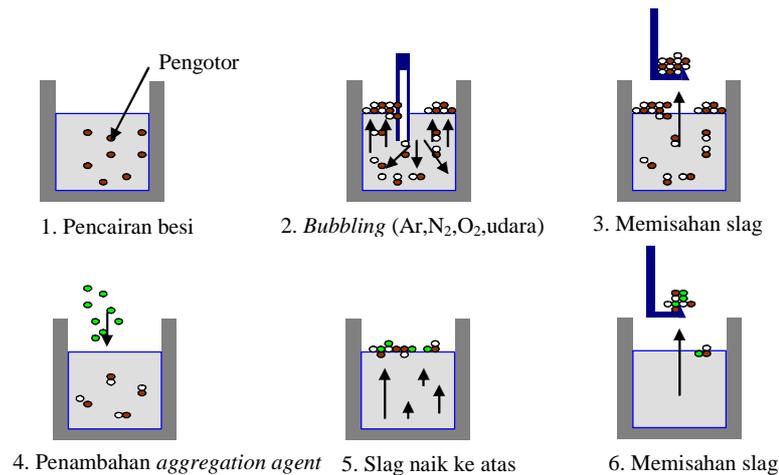
## TEKNOLOGI ELIMINASI PENGOTOR

Pengeliminasian unsur-unsur pengotor dengan metode *bubbling* telah lama diketahui. Dengan *bubbling* udara atau  $O_2$ , unsur-unsur yang memiliki kemampuan oksidasi diatas FeO seperti Si, Mn, B, dan Al lebih mudah dihilangkan daripada unsur-unsur yang memiliki kemampuan oksidasi di bawahnya seperti Pb, Cu, Ni, dan Co [8]. Telah dilakukan eliminasi Al dan Zn dengan menggunakan teknologi *bubbling* [9]. Pada eliminasi Zn, unsur Zn mudah hilang dengan penguapan, sedangkan Al dapat dipisahkan dengan efektif melalui oksidasi dengan  $O_2$ . Pengoptimalan *bubbling* akan meningkatkan kecepatan pembersihan Zn, dan pengecilan gelembung-gelembung udara *bubbling* akan mempercepat proses oksidasi pada pembersihan Al. Namun demikian, di samping waktu prosesnya yang lama, metode ini hanya dapat mengeliminasi unsur-unsur tertentu saja tergantung sifat reaksi dan berat jenis masing-masing unsur[9].

Metode lain yang dikembangkan yaitu *compound separation*. Telah dicoba mengeliminasi Pb dari kuningan dengan menambahkan Ca dan penyaringan dengan menggunakan peralatan khusus seperti kompresor[8], sedang cara teknisnya telah dipatenkan di Japan Patent. Namun demikian, pengeliminasian Pb tersebut kurang efektif karena keberadaan pengotor Pb yang berukuran kecil dan menyebar di dalam cairan. Telah berhasil mengoptimalkan pengeliminasian Pb dari paduan tembaga dengan menambahkan *aggregations agents* Ca-Si dan NaF, dengan mekanisme

Tabel 1. Pengaruh unsur-unsur pengotor pada produk besi/ baja dan sumbernya

Nama Unsur	Level kesukaran	Pengaruh pada produk besi/baja	Sumber
Cu	Sangat susah	Kerusakan pada deformasi panas	Koil, kabel, motor dll
Sn	Sangat susah	Kerusakan pada deformasi panas dan dingin	Kaleng, pelapisan besi dll
Ni	Susah	Terlalu keras pada pembuatan plat baja	Baja paduan, pelapisan, dll
Zn	Menguap	Timbul uap putih pada saat casting	Pelapisan dll
Pb	Menguap (beracun)	Kerusakan pada deformasi panas	Paduan, pelapisan, dll



**Gambar 1.** Mekanisme pengeliminasi pengotor dengan menggunakan metoda compound separation dengan kombinasi bubbling dan penambahan aggregation agent.

pengeliminasi Pb dari paduan tembaga tersebut telah berhasil ditemukan secara sederhana[6,7,11]. Teknik tersebut telah dipatenkan oleh Nurul T. R. dkk di *Japan Patent*[12]. Prinsip dasar proses eliminasi pengotor pada paduan tembaga tidak berbeda dengan pada besi/baja. Untuk itu, proses yang telah dikembangkan pada paduan tembaga diharapkan dapat diterapkan juga pada besi/baja.

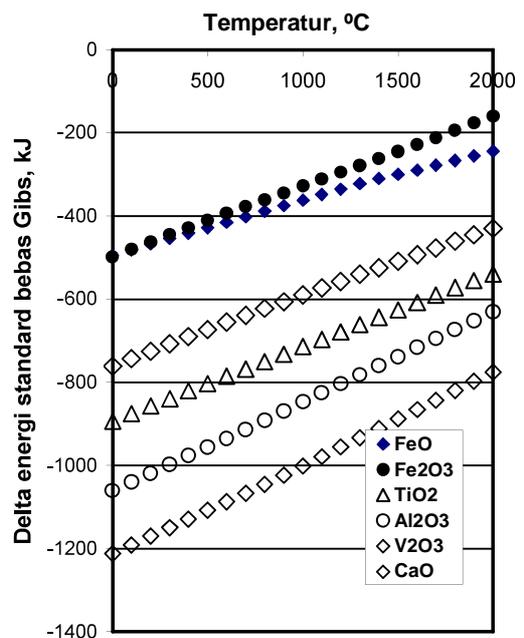
## DESAIN TEKNOLOGI

Perhitungan secara teoritis mengenai pemisahan unsur-unsur pengotor berdasarkan berat jenis paduan yang terbentuk ketika unsur pengotor itu direaksikan dengan *aggregation agent* adalah kunci keberhasilan penelitian ini. Caranya adalah dengan menghitung delta energi standar bebas *Gibbs* reaksi antara unsur-unsur yang memungkinkan untuk digunakan sebagai pengikat unsur pengotor maupun besi dengan menggunakan *database* termodinamika. Gambar 1 menunjukkan mekanisme pengeliminasi pengotor dengan metode *compound separation* dengan kombinasi *bubbling* dan penambahan *aggregation agent*. Pertama, besi/baja dileburkan sehingga unsur-unsur pengotor dapat bergerak dengan bebas dalam cairan panas besi. Kemudian, ditiupkan (*bubbling*) udara atau gas tertentu sehingga dapat bereaksi dengan beberapa unsur pengotor. Setelah bereaksi dan terbentuk paduan atau oksida maka berat jenisnya akan lebih kecil dibanding besi cair sehingga akan naik ke atas mengapung dan memudahkan untuk diambil dengan menggunakan batang pengambil *slag* yang terbuat dari besi. Untuk mengeliminasi unsur-unsur pengotor yang tersisa maka ditambahkan *aggregation agent* seperti Ca-Si, CaF<sub>2</sub> atau NaF. Setelah pengadukan dan terjadi reaksi, paduan yang terbentuk berukuran besar dan mengambang ke permukaan sehingga mudah dipisahkan. Pengulangan

*bubbling* beberapa kali mungkin perlu dilakukan untuk membantu proses pengadukan dan pengangkatan paduan yang terbentuk ke atas permukaan sehingga mempercepat proses eliminasi. Setelah semua unsur pengotor dapat dipisahkan dari cairan besi, dilakukan proses rekompresi besi/baja sesuai dengan standar yang diinginkan.

## HASIL SIMULASI

Gambar 2 menunjukkan hubungan antara perubahan (delta) energi standar bebas *Gibbs* dan suhu dari reaksi antara Besi (Fe), Titan (Ti), Vanadium (V),



**Gambar 2.** Hubungan delta energi standar bebas *Gibbs* dan suhu dari reaksi antara Besi (Fe), Titan (Ti), Vanadium (V), Aluminium (Al) dengan Oksigen (O<sub>2</sub>).

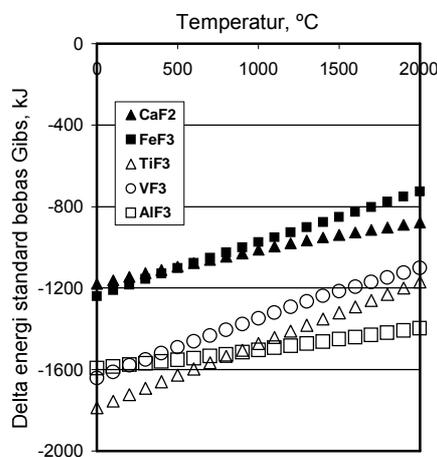
Aluminium (Al) dengan Oksigen ( $O_2$ ). Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa semakin rendah nilai perubahan energi standar bebas *Gibbs*, maka semakin mudah terjadi pembentukan paduannya. Delta energi standar bebas *Gibbs* dari oksida Al memiliki nilai paling rendah dan diikuti oleh oksida Ti, dan V, baru kemudian Fe. Ini menunjukkan bahwa secara teoritis, Al, Ti, V akan bereaksi dahulu dengan  $O_2$  sebelum Fe dengan  $O_2$ .

Tabel 2 menunjukkan perbandingan massa jenis antara besi dengan oksida yang terbentuk setelah direaksikan dengan oksigen. Besi memiliki massa jenis yang lebih besar dari semua paduan/oksida yang ada, artinya dengan mereaksikan dengan oksigen, maka unsur-unsur pengotor tersebut dimungkinkan untuk terapung ke atas dan dapat dipisah dari besi cair. Namun demikian, Dilaporkan bahwa pengeliminasian dengan *bubbling* memerlukan waktu yang relatif lama khususnya pada oksidasi unsur pengotor yang mempunyai massa jenis yang tidak terlalu berbeda dengan besi [9]. Oleh karena itu penambahan *aggregation agent* diperlukan untuk mempercepat pengapungan pengotor.

**Tabel 2.** Perbandingan massa jenis antara besi dengan oksida yang terbentuk.

Unsur/ paduan	Massa jenis (g/cm <sup>3</sup> )
Fe	7.86
FeO	6.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.24
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.965
TiO <sub>2</sub>	4.23

Gambar 3 menunjukkan hubungan antara delta energi standar bebas *Gibbs* dan suhu dari reaksi antara Fe, Ti, V dan Al dengan unsur F dari *aggregation agent*  $CaF_2$ . Terlihat bahwa  $CaF_2$  akan terurai dan unsur F akan beraksi dengan unsur-unsur pengotor Ti, V dan Al membentuk  $TiF_3$ ,  $VF_3$  dan  $AlF_3$ . Sementara itu



**Gambar 3.** Hubungan antara delta energi standar bebas *Gibbs* dan suhu dari reaksi antara Fe, Ti, V dan Al dengan unsur F dari *aggregation agent*  $CaF_2$ .

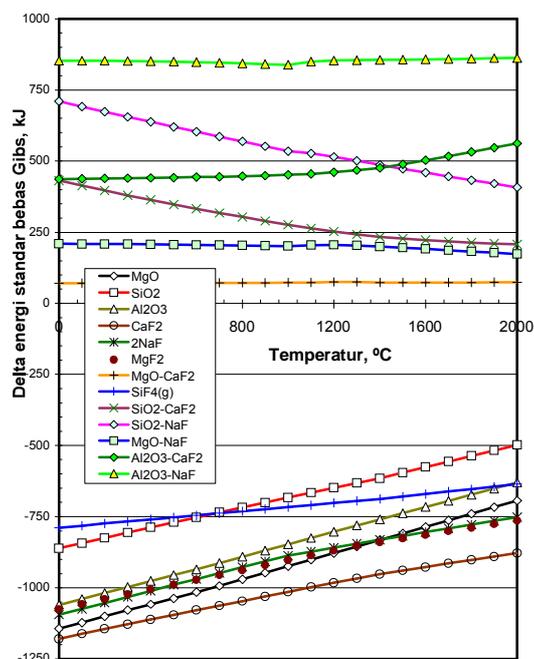
pembentukan  $FeF_3$  juga terjadi namun memerlukan energi yang relatif lebih besar. Di lain sisi, unsur Ca yang terurai dapat dengan mudah bereaksi dengan oksigen membentuk  $CaO$  dan akan mengapung dipermukaan. dengan mudah seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Tabel 3 menunjukkan perbandingan massa jenis antara besi dengan paduan yang terbentuk setelah direaksikan dengan  $CaF_2$ . Dari Tabel 3 diketahui bahwa massa jenis paduan florida yang terbentuk jauh lebih ringan dibanding Fe (lebih kurang 1/2 dari massa jenis Fe). Oleh karena itu, dapat diyakinkan bahwa setelah terjadi reaksi pembentukan paduan florida, pengotor-pengotor tersebut dengan cepat naik ke atas sehingga memudahkan untuk dipisah.

**Tabel 3.** Perbandingan massa jenis antara besi dan paduan florida yang terbentuk.

Unsur/paduan	Massa jenis (gr/cm <sup>3</sup> )
Fe	7.86
$TiF_3$	2.98
$VF_3$	3.363
$AlF_3$	3.1
$CaF_2$	3.18
CaO	3.34

Sementara itu, penambahan unsur pengikat (*aggregation agent*) seperti  $CaF$  atau  $NaF$  dikhawatirkan akan merusak tungku pemanas yang umumnya terbuat dari keramik seperti  $MgO$ ,  $SiO_2$  atau  $Al_2O_3$ . Gambar 4 menunjukkan hubungan antara delta



**Gambar 4.** Hubungan antara delta energi standar bebas *Gibbs* dan suhu pada reaksi antara *aggregation agent* ( $NaF$  dan  $CaF_2$ ) dan  $MgO$ ,  $SiO_2$ , dan  $Al_2O_3$ .

energi standard bebas Gibbs dan temperatur pada reaksi antara *aggregation agent* (NaF dan CaF<sub>2</sub>) dan MgO, SiO<sub>2</sub>, dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Dari gambar tersebut diketahui bahwa pembentukan AlF<sub>3</sub> memerlukan energi yang sangat rendah dibanding Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Oleh karena itu, penggunaan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebagai *chamber* tungku pemanas dalam penelitian ini tidak direkomendasikan. Sebagai alternatif, perlu dilakukan pelapisan *chamber* terlebih dahulu dengan keramik lain yang tidak bereaksi secara aktif dengan F. Sementara itu, nilai delta energi standar bebas Gibbs dari MgF<sub>2</sub> dan SiF<sub>4</sub> masing-masing sedikit lebih besar di atas MgO dan SiO<sub>2</sub> pada sekitar suhu 1200 °C dan 600°C. Namun demikian, nilai CaF<sub>2</sub> masih di bawah nilai-nilai tersebut di atas sehingga kemungkinan tidak terlalu merusak *chamber* tungku pemanas. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dianjurkan untuk menggunakan tungku yang terbuat dari MgO atau SiO<sub>2</sub>.

## KESIMPULAN

Dalam penelitian ini telah dilakukan simulasi pengeliminasian unsur-unsur pengotor Ti, V dan Al dari besi/ baja cair dengan metode *compound separation*. Unsur-unsur pengotor Ti, V dan Al dapat dieliminasi secara teoritis dengan kombinasi *bubbling* dan penambahan *aggregation agent* CaF<sub>2</sub>. Hasil simulasi ini diharapkan dapat diterapkan pada pembuatan *ingot* besi/baja dari skrap lokal dan pasir besi untuk mensuplai bahan baku industri pengecoran di Indonesia.

## DAFTARACUAN

- [1]. "Harga Baja Masih Tinggi, Tahun Depan, Konsumen Mulai Rasakan Kenaikan Harga", Pikiran Rakyat, 13 April 2004.
- [2]. "Harmonisasi tarif BM baja, penantian yang melelahkan", Bisnis Indonesia, 03 Agustus 2004.
- [3]. "Industri Pengecoran Logam di Ceper", Tinggal Lima Persen yang Beroperasi, Kompas, Rabu, 17 Maret 2004.
- [4]. "Industri Cor Logam Ceper Makin Parah", Kompas, Sabtu, 26 Juni 2004.
- [5]. SENDA, "50 years of Iron Casting", Lecture of Technology Japan Cast Iron Foundry, 1982, 5, 1.
- [6]. K. YAMADA, NURUL T. R., R. FUJIMOTO, S. SUEHIRO and H. SUEYOSHI, Removal Pb from Scrap Brass, *Journal of Advanced Science*, **13**, (3) (2002) 273-276
- [7]. NURUL T. R. A. NAKANO and H. SUEYOSHI, Pb-Less Brass with High Dezincification in LCA Perspective, *Proceedings of EcoMaterials and EcoProcesses*, COM 2003, August 24-27, 2003, Vancouver, Canada, p.245-253.
- [8]. ANONYM, Ferrous Process Metallurgy, *The Japan Institute of Metals*, (2000) 3, 20
- [9]. H. NAKAE, Technical Review for Cast Iron Melting and Quality of Castings, *Journal of Japan Foundry Engineering Society*, **73** (2) (2001) 128-133.
- [10]. K. KUNII, K. OOSUMI, E. YOSHIDA, J. MASUDA, H. OKADA AND T. NAKAMURA, Removal of Pb and Impurities from Molten Brass by Ca Addition, *Journal of Japan Copper and Brass Research Association*. **36**: 132-136.
- [11]. NURUL T. R., S. SUEHIRO, K. HIGASHIIRIKI, A. NAKANO, K. YAMADA, K. HAMAISHI, S. NAKAMURA, Y. SECHI, T. MATSUDA and H. SUEYOSHI, Pb-Free Brass from Scrap by Compound-Separation Method, *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, **29** (5) (2004)
- [12]. NURUL T. R., K. YAMADA, K. HAMAISHI, and H. SUEYOSHI, Methods for Removing Pb from Copper Alloys, *Japanese Patent, No granted 2005-8970 (P2005-8970A)*, 13 Januari 2005.