

PELEBURAN BESI DAN BAJA DI DALAM TUNGKU LISTRIK INDUKSI TANPA INTI

(MELTING OF IRON AND STEEL IN CORELESS INDUCTION FURNACE)

Sonny Djatnika Sunda Djaja¹⁾ dan Hafied²⁾

¹⁾Tenaga Ahli Material & Konsultan Free Lance MIDC

²⁾Balai Besar Logam Mesin Bandung

Jl. Sangkuriang 12, Bandung 40292

hafidochan@yahoo.com

ABSTRAK

Reaksi kimia fisika peleburan di dalam tungku listrik induksi tanpa inti (IF) dibandingkan tanur kupola dan tungku busur nyala (EAF) tidak terlalu signifikan. IF merupakan pelebur paling ideal selama komposisi muatan terkendali, termasuk keahandalannya dalam aksi pengadukan leburan membuat tingkat kehomogenan komposisi kimia tuangannya lebih baik. Emisi gas dan asap yang dihasilkan sangat rendah selama bahan masuk bersih secara fisis. Kesulitannya adalah kepekaannya terhadap kebersihan komposisi, sehingga penggunaan bahan masukan IF lebih terbatas dibandingkan kupola. Skrap baja otomotif dan bahan besi spons (DRI) sulit dilebur di dalam tanur kupola dan IF. Besi wantah merupakan bahan baku siap lebur dengan komposisi besi tuang, sedangkan besi spons adalah bahan dengan komposisi besi murni ditambah pengotor. EAF merupakan tungku paling sesuai untuk besi spons karena adanya proses reaksi oksidasi dan reduksi, namun EAF sangat boros energi dibandingkan IF. Kemungkinan pergeseran teknologi peleburan besi dan baja tuang di dalam negeri menggunakan IF dan muatan DRI menjadi lebih besar di masa mendatang, terutama dikaitkan dengan kemungkinan penerapan teknologi pembuatan DRI yang lebih sederhana dan dalam skala yang disesuaikan dengan besaran investasi, serta cukup memadainya cadangan bijih besi dan batu bara. Bahasan ini diharapkan menjadi sumbangan pemikiran yang berarti, khususnya bagi pengembangan industri pengecoran di dalam negeri di masa mendatang.

Kata kunci : tungku listrik induksi tanpa inti, besi wantah, metalurgi terak, metalurgi ladai

ABSTRACT

Melting physical chemistry reaction in coreless induction furnace (IF) compared with cupola and electric arc furnace (EAF) are not really significant. IF was most ideal of melting furnace as long as capacity of composition were controlled in dissolved mixing that made better homogeneity rate of casting process chemical composition. Gas emission and smoked that resulting was very low during input material physically clean. The difficulty was sensitivity of cleanliness composition, with the result that utilization of input material IF was very limited compared with cupola. Steel scrap automotive and material sponge iron (DRI) very difficult to melt in cupola and IF. Pig iron was a ready raw material melt to meet compositions, meanwhile sponge iron was material with pure iron composition plus impurities. EAF were very ideal furnace for sponge iron, because there was a reaction process of oxidation and reduction, however the EAF was very energy consuming than IF. The possibility transferring technology of iron and steel casting in domestic region had

used IF and DRI capacity become more larger in the future, especially related to possibility of technology implementation of simplicity DRI and adapted scale with bigger investment, along with quite enough of iron ore reserve and coal. This study expected become to important thinking contribution, especially for foundry industry development in our region to the future.

Keywords : *coreless induction furnace, pig iron, slag metallurgy, ladle metallurgy.*

PENDAHULUAN

Penggunaan tungku listrik induksi tanpa inti (dalam tulisan disebut *IF*) dalam kegiatan pengecoran logam sudah mencapai tingkat teknologi tinggi, walaupun pekerjaan ini masih belum dapat digantikan dengan sistem otomatisasi penuh. Berbagai teknologi terkini telah diterapkan, seperti manipulator, robot, alat uji komposisi leburan dan sebagainya, dengan tingkat kecanggihan tinggi, namun "*dream no man in a foundry*" masih merupakan "*dream*".

Pustaka dan pengetahuan tentang IF di industri nasional tampaknya masih sangat terbatas. Dalam kegiatan produksi besi dan baja tuang mancanegara, kupola dan tungku busur nyala (*EAF*) masih menjadi andalan dalam mendapatkan mutu prima besi dan baja tuang, namun pertimbangan ekonomis, lingkungan dan SDM menyebabkan jumlah IF semakin banyak. Tingkat produktifitas tuangan *ferro* mancanegara umumnya di atas 60 ton-tuangan/orang/tahun, bahkan banyak yang mencapai di atas 120 ton. Sebagian besar pengecoran nasional masih banyak yang menggunakan jenis "*kupola tungkik*". Dalam kondisi perekonomian saat ini, produktifitas nasional tidaklah layak dihitung. Namun sebagai gambaran, pada dekade tahun 1980'an, produktifitas besi tuang nasional berkisar antara 7,5 ton sampai 25,0 ton. Peningkatan produktifitas besi tuang ini tidaklah nampak signifikan sampai sebelum 1997. Hal tersebut tidaklah mengherankan, mengingat bahan baku besi-baja wantah (*virgin*), pemuatan dan kokas sebagai bahan bakar tidak diproduksi oleh industri hulu nasional. Bahan-bahan tersebut, termasuk skrap, masih di impor.

Sebagai akibat tuntutan pasar dan/atau semakin mahalnya harga kokas, awal 1990'an tercatat beberapa pengecoran baru dibangun dengan instalasi IF, serta beberapa pengecoran yang sudah ada menggantikan kupola dengan IF. Diperkirakan, jumlah IF di Indonesia pada saat itu, mulai dari kapasitas beberapa kilogram

sampai 5,0 ton hanya sekitar 130 unit. Ternyata IF yang adapun masih beroperasi jauh di bawah kapasitas terpasangnya. Sebagai contoh, beberapa IF di Bandung dan sekitarnya dengan kapasitas 1-2 ton, umumnya hanya beroperasi dua peleburan per hari, serta hanya beberapa hari per minggu. Kesulitan catu daya listrik pada saat itu menjadi salah satu alasan terhambatnya instalasi IF, walau dimungkinkan penggunaan PLT-diesel yang investasi awalnya mahal namun biaya operasinya relatif murah. Pada saat ini biaya operasional PLT-diesel diperkirakan Rp 1.800/kWh (harga untuk wilayah industri di Pulau Jawa). Sedangkan listrik PLN hanya sampai Rp 625/kWh. Bandingkan dengan harga listrik di beberapa negara mancanegara yang masih di bawah USD 0.06/kWh. Kebergantungan industri pengecoran logam nasional tampaknya hanya akan tumbuh baik seandainya tersedia energi alternatif dengan harga relatif murah dan mudah.

Dalam sejarah peleburan, India merupakan negara pertama yang melebur baja lunak struktur (*mini steel mills*) dengan alur IF. Dalam periode tahun 2001-2002 saja produksi baja IF tercatat lebih dari 4,5 juta ton (pada saat ini produksi baja nasional masih kurang dari nilai tersebut). Bahan baku yang digunakan umumnya besi spons (*DRI*) penuh atau campuran *DRI* dengan baja skrap. Hal ini karena dianggap IF lebih hemat energi dibandingkan tungku busur nyala (*EAF*), tanpa konsumsi elektroda, konsumsi refraktori yang lebih rendah, serta investasi yang lebih murah⁽¹⁾. Selain itu sebagian pabrik baja tersebut menerapkan teknologi *integrated mini steel mills*, dimana pabrik di bangun di sekitar tambang bijih besi, batu bara dan kapur.

Kecenderungan pemanfaatan *DRI* India di pabrik baja mini dengan alur IF dengan kapasitas lebur sampai 16 ton/peleburan semakin meningkat untuk produksi billet canaian batangan, besi beton dan bentukan profil, juga untuk produksi billet mutu baja paduan dan baja tahan karat dengan

menambahkan sejumlah bahan pemadu. Walaupun peleburan bahan baku DRI dalam IF secara teknis dapat dilaksanakan, untuk mencapai kebersihan peleburan sangatlah sulit, akibat tingginya jumlah terak yang terbentuk⁽²⁾, mengakibatkan cacat tuang inklusi. Perlakuan secara metalurgi peleburan di dalam krusibel akan memperpanjang waktu peleburan dan naiknya jumlah kebutuhan bahan imbu. DRI merupakan bahan baku besi murni, tidak mengandung kadar unsur-unsur pemadu mikro berbahaya (*tramp element*) seperti yang sering dijumpai baja skrap. Penyebab inklusi adalah akibat oksida pengotor yang terkandung dalam DRI. Konsep metalurgi terak (*slag metallurgy*) dan metalurgi ladle (*ladle metallurgy*) sebagai bagian dari proses metalurgi sekunder dapat dijadikan pertimbangan di dalam penerapan teknologi ini.

KEEFEKTIFAN OPERASI

Keberhasilan peleburan di dalam tungku listrik induksi tanpa inti bergantung

kepada utilisasi perangkat dan efisiensi pengoperasiannya. Kombinasi hasilnya adalah keefektifan dari seluruh alur operasi peleburan, yang dinyatakan sebagai :

$$\text{Keefektifan (E)} = (\text{Utilisasi}) (\text{Efisiensi}) \dots (1)$$

Utilisasi didefinisikan sebagai suatu ketepatan dalam penggunaan dan biasa diukur sebagai prosentase dari "tepat waktu" dari suatu peralatan dengan jadwal (dalam jam) yang sudah ditentukan lamanya. Efisiensi adalah ukuran untuk mendapatkan suatu hasil dengan limbah yang minimum, yang dinyatakan sebagai prosentasi dari ketercapaian kerja minimum yang dibutuhkan untuk pencapaian yang sudah ditentukan, dibagi dengan total jumlah pekerjaan atau pencapaian yang dibutuhkan.

PENGARUH FREKUENSI LISTRIK IF

Rangkuman berbagai karakteristik IF berdasarkan frekuensi dapat dilihat pada Tabel 1.

Ada 6 (enam) bagian yang mempengaruhi frekuensi listrik IF, yaitu :

Tabel 1. Perbandingan karakteristik IF berdasarkan frekuensi listrik⁽³⁾

No	Karakteristik	Frekuensi Menengah dan Tinggi	Frekuensi Rendah	Frekuensi 50 Hz
1	Efisiensi Konversi	± 86 % (alternator) ± 95 % (konverter statis)	± 92 %	± 96 %
2	Daya terbuang	Antara peleburan, karena alternator tetap hidup saat kontraktor terhubung. Konverter statis : tidak ada	Tidak ada	Tidak ada
3	Rasio daya terhadap berat	Lebih tinggi dibanding frekuensi rendah dan 50 Hz	Lebih baik dibanding 50 Hz	Relatif rendah karena adanya aksi turbulensi
4	Memulai dari dingin	Tidak sulit melebur skrap kecil dingin. Tungku dapat digunakan untuk rangkaian peleburan dengan komposisi leburan berbeda	Dapat digunakan dengan baik untuk melebur muatan cam-puran ukuran kecil dan menengah seperti : skrap balik saluran tuang dan sebagainya.	Penting untuk memulai dengan "starting block" atau umpan lebur
5	Penerapan beban (daya penuh)	Beban penuh dapat langsung diterapkan selama peleburan	Beban penuh dapat langsung diterapkan bila dengan muatan ukuran besar, terutama bila bersifat magnetis. Untuk ukuran muatan yang lebih kecil, beban penuh dilakukan setelah muatan lebih dari setengah penuh	Beban penuh hanya dibo- lehkan pada saat muatan antara setengah dan dua pertiga penuh, tergantung pada jenis skrap yang digunakan.
6	Aksi pengadukan	Baik	Dahsyat, dibandingkan dengan 50 Hz, karena rasio daya : berat yang tinggi	Sangat dahsyat
7	Penggunaan lining basa	Memuaskan	Kesulitan sedikit bila dibandingkan dengan 50 Hz	Biasanya sulit
8	Pasokan daya minimum	20 kW	200 kW, kecuali untuk 450 Hz disarankan sampai 300 Hz	300 kW
9	Melebur skrap kecil	Mampu melebur skrap kecil basah	Skrap kecil harus kering	Skrap kecil harus kering
10	Pemasukan dan pengoperasian	Tidak ada kandungan unsur berbahaya	Seperti pada tungku 50 Hz	Pemasukan sulit untuk berlanjut saat memasukan muatan besar kecuali tungku dimatikan lebih dahulu. Akibatnya keluaran berkurang bila melebur skrap besar.

1. Pergerakan Induktif Leburan

Kriteria penting dalam awal pemilihan IF adalah batas kemampuan yang diijinkan dalam proses pergerakan induktif leburan (*stirring*, Gambar 1), yang ditentukan oleh besarnya arus dan medan elektromagnetik di dalam krusibel. Intensitas pergerakan leburan naik dengan naiknya daya, serta turun dengan naiknya frekuensi listrik. Secara matematis, Intensitas pergerakan leburan B dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$B = \frac{P}{\sqrt{f}} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan :

p = daya spesifik (dalam kW/t)

f = frekuensi listrik (Hz)

Dari Persamaan 2 di atas tampak bahwa menaiknya frekuensi listrik akan menaikkan beban IF, atau kapasitas IF akan berkurang bila beban dibuat konstan. Gambar 2 menunjukkan hubungan tersebut. Misalkan untuk IF dengan frekuensi 50 Hz dan kapasitas 5,0 ton, beban terpasang tungku yang mungkin adalah 1.500 kW, atau setara dengan 300 kW/t. Untuk kapasitas yang sama dengan frekuensi 250 Hz, beban terpasangnya adalah 3.550 kW.

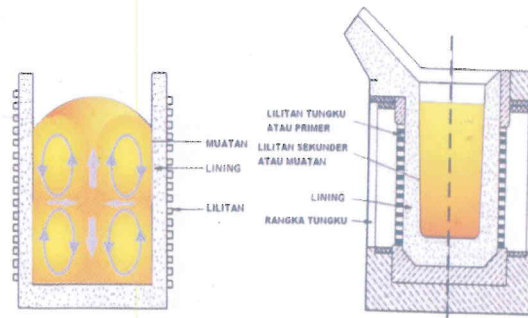
2. Batas Daya Listrik

Kriteria lainnya yang tak kalah penting adalah faktor yang mengatur batas atas daya yang dapat mengendalikan besar tegangan dan arus. Pentingnya pengendalian tegangan agar insulasi koil dapat berfungsi sempurna dalam waktu lama.

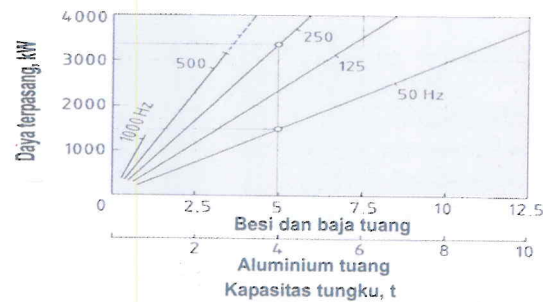
Besarnya tegangan berkisar antara 1.000 V untuk tungku kecil dan 3.000 V untuk tungku besar. Batas besarnya arus, berakibat kepada besarnya daya, berakibat langsung kepada kenaikan temperatur pelindung baja yang menahan medan elektromagnetik di luar krusibel (lihat Gambar 3).

3. Kapasitas Muatan IF

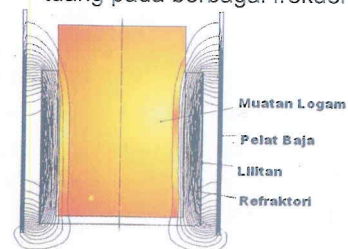
Untuk menjamin intensitas pergerakan leburan, pengendalian perangkat pelistrikan pada saat peleburan harus mengacu kepada tingkat efisiensi kelistrikan tertinggi yang mungkin dapat dicapai, yaitu keterkaitannya terhadap daya, kapasitas krusibel dan frekuensi yang dapat didukung oleh kelistrikan IF. Gambar 4 dan Tabel 2 menunjukkan hubungan antara ketiga parameter tersebut. Data-data tersebut di atas adalah berdasarkan



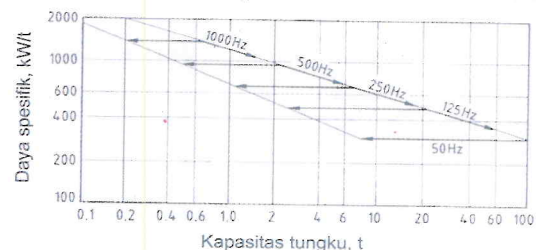
Gambar 1. Skema tungku listrik induksi tanpa inti, serta skema aksi pengadukan di dalam leburan.



Gambar 2. Perbandingan daya terpasang terhadap kapasitas tungku untuk peleburan besi, baja dan aluminium tuang pada berbagai frekuensi listrik.



Gambar 3. Medan listrik dari operasi arus bolak-balik pada tungku frekuensi 50 Hz.



Gambar 4. Hubungan antara daya spesifik maksimum, frekuensi dan kapasitas tungku untuk besi dan baja tuang (lihat juga Tabel 2) ⁴.

Tabel 2. Data teknis Gambar 4

Frekuensi (Hz)	1.000	500	250	125	50
Kapasitas (besi & baja, ton)	0,2-1,5	0,5-6	1,1-18	2,5-60	8-100
Daya spesifik maksimum (kW/t)	1.345	945	670	475	300

kumpulan dari sejumlah data beberapa jenis IF.

Untuk mendapatkan aksi pegerakan yang konstan, misalkan pada IF 300 kW/t pada 50Hz, daya spesifik maksimum menaik secara linier terhadap akar frekuensi sampai 1.345 kW/t pada 1.000 Hz. Daya spesifik terpasang IF kapasitas besar akan menurun oleh karena faktor pelistrikan (lihat garis tanda panah pada grafik bagian kanan di Gambar 4).

Kedalaman penetrasi, δ , adalah jarak dari sumber kerapatan medan arus listrik ke bagian krusibel. Besaran ini sesuai dengan :

$$\delta = C \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan :

C= konstanta

ρ = resistansi

μ = permeabilitas magnetis

f= frekuensi listrik

Efisiensi listrik akan tercapai sebagai akibat dari besarnya frekuensi dan kapasitas, ditunjukkan pada Gambar 5. Bila besaran bongkah muatan adalah d , daya P dan daya induksi P_i , maka P_i/P merupakan fungsi dari d/δ . Pada saat muatan tungku lebur d menjadi diameter dalam krusibel. δ menaik dengan turunnya frekuensi. Pada rasio $d/\delta \geq 10$, efisiensi mencapai maksimum.

Setiap ukuran diameter krusibel membutuhkan besar frekuensi tertentu. Hal ini memberi pengertian bahwa semakin kecil diameter dalam krusibel dan semakin kecil ukuran muatan, δ harus semakin rendah, atau frekuensi harus semakin tinggi. Ukuran frekuensi 500 Hz untuk IF 2,0 ton merupakan frekuensi tinggi, tetapi untuk IF 1,0 ton masih merupakan frekuensi menengah.

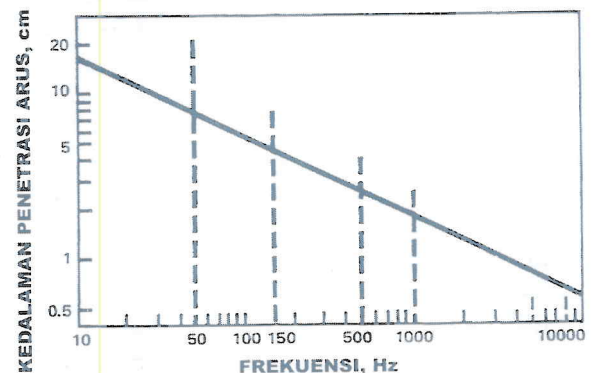
Dengan naiknya frekuensi maka kedalaman penetrasi akan menurun. Gambar 6 menunjukkan hubungan antara variasi penetrasi terhadap frekuensi untuk muatan non-magnetis, misalnya baja di atas titik temperatur Curie.

Penetrasi arus induksi seolah-olah bergerak dari lilitan permukaan dalam ke bagian sumbu krusibel. Bila kedalaman penetrasi semakin besar, penetrasi induksi akan saling berinterferensi dengan penetrasi induksi dari bagian dalam lilitan di hadapannya. Hal ini cenderung untuk saling menggagalkan daya arus induksi, sehingga menurunkan efek pemanasannya. Semakin kecil kedalaman

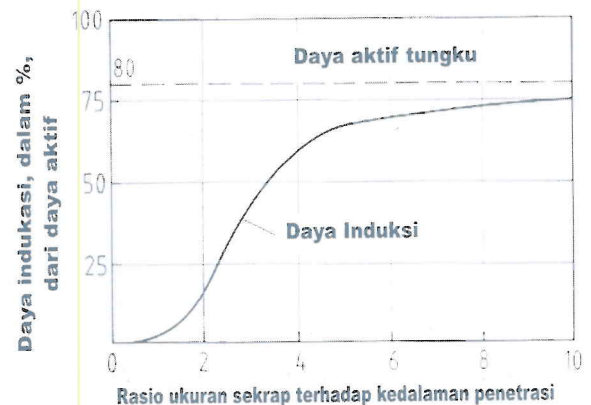
penetrasi, semakin kecil pula kehilangan panasnya. Oleh karenanya, semakin kecil kapasitas tungku, frekuensi dirancang menjadi semakin tinggi. Dalam perancangan, biasanya diameter dalam krusibel dibuat paling kecil empat kali kedalaman penetrasi. Jadi, untuk setiap frekuensi ada batasan ukuran minimum dari diameter lilitan. Untuk menjaga efisiensi daya, tinggi lilitan antara 0,8 - 1,2 diameter lilitan. Rasio di bawah 0,8 membutuhkan arus induksi tinggi, akibatnya tegangannya rendah, dan sebaliknya pada rasio di atas 1,2.

4. Jenis Bahan Leburan

Semakin tinggi frekuensi tungku, semakin mudah melebur muatan awal dingin. IF 50 Hz merupakan yang tersulit untuk memulai proses peleburan masukan dingin. Oleh karenanya tungku 50 Hz mempersyaratkan muatan berupa skrap yang besar dan tebal, bahkan kadang-kadang sengaja dibentuk sebagai *starting block*. Daya yang digunakan sangat tidak efisien pada saat awal peleburan. Saat muatan mulai meleleh,



Gambar 5 . Daya aktif tungku dan daya induksi sebagai fungsi dari rasio ukuran skrap terhadap kedalaman penetrasi



Gambar 6 . Variasi kedalaman penetrasi arus pada material yang memiliki permeabilitas magnetis seragam.

efisiensi meningkat. Untuk peleburan lanjutan, biasanya disisakan sekitar sepertiga sampai setengah penuh leburan.

Frekuensi rendah lebih mudah memulai peleburan dengan jenis muatan skrap balik (*foundry returns*) ukuran cukup besar dan tebal. Frekuensi menengah dan tinggi cukup muatan berupa skrap ukuran kecil. Peleburan lanjutan dengan menggunakan leburan sisa pada tungku frekuensi rendah sampai tinggi tidaklah penting, namun dapat memperbaiki daya awal.

Proses peleburan baja paduan dengan menggunakan tungku 50 Hz pada dengan spesifikasi yang selalu berubah pada setiap peleburan menjadi lebih sulit dan membutuhkan waktu relatif lebih lama. Jenis muatan skrap juga menentukan pemilihan frekuensi. Aksi pengadukan oleh gerakan induktif akan lebih dahsyat pada tungku frekuensi yang lebih rendah, sehingga sekrap ukuran kecil biasanya harus dipanaskan perlahan pada kondisi atmosfer oksidasi, sebelum masuk ke dalam leburan.

Pemanasan awal muatan tersebut akan meningkatkan perolehan (*yield*) logam. Besi tuang skrap ukuran kecil dan menengah merupakan muatan yang sangat ideal, tetapi dalam proses peleburan baja, namun cukup berbahaya karena tingginya kadar karbon, belerang dan fosfor. Muatan berupa skrap pengerjaan mesin ukuran halus akan mempersulit peleburan, kecuali dikemas-padatan terlebih dahulu dengan cara pembriketan. Kemasan padat tersebut harus bebas dari minyak, lemak dan kelembaban.

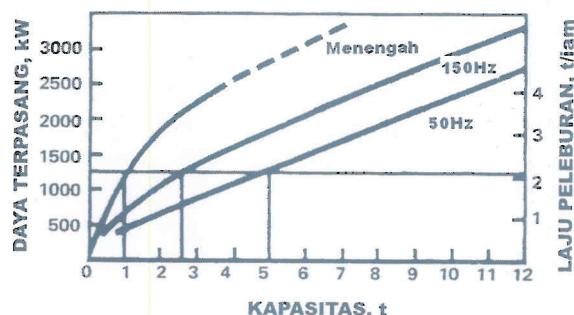
5. Masukan Daya

Besaran masukan daya maksimum dibatasi untuk setiap ukuran IF dengan tujuan mempertahankan besar aksi pengadukan leburan. Dipandang dari kehematan daya, semakin rendah frekuensi, semakin rendah pula daya terpasang dan laju peleburannya. Pada Gambar 7, ditunjukkan bahwa untuk laju peleburan 2,0 ton/jam dan daya terpasang 1.300 kW untuk IF 50Hz membutuhkan krusibel 5,0 ton, sedangkan pada frekuensi menengah hanya dibutuhkan krusibel 1,0 ton. Dengan perkataan lain, IF 1,0 ton, 1.300 kW dan frekuensi menengah pada peleburan lanjutan hanya akan membutuhkan waktu lebur 30 menit.

6. Efisiensi IF

Kehilangan energi terjadi pada seluruh sistem kelistrikan. Efisiensi IF 50Hz adalah

yang terendah karena hanya ada transformer tegangan. Pada frekuensi rendah, kehilangan dayanya lebih besar karena adanya transformer dan konversi frekuensi. Sedangkan pada frekuensi menengah atau tinggi, kehilangan akan terjadi pada motor, alternator dan transformer. Pemanfaatan teknologi konverter statis, memperbaiki kehilangan pada IF frekuensi rendah sampai tinggi yang setara dengan IF 50 Hz. Sejak tahun 1980-an, teknologi perangkat listrik thyristor dan kapasitor berteknologi semikonduktor mulai diterapkan yang berhasil dalam penghematan energi. Dengan sistem pelistrikan kualitas baik, efisiensi berada jauh di atas batas ambang standar 0,80, bahkan mencapai di atas 0,95. Mengacu pada teknologi terkini dan masa depan, penerapan teknologi energi bebas berbasis teknologi nano, penghematan akan mencapai tingkat mendekati ideal yang dapat mencapai nilai di atas 1,0 yaitu di atas kemampuan pencapaian standar ideal yang telah ada pada saat ini. Tabel 3 merupakan informasi yang dimiliki untuk IF sebelum 1980, yang mungkin dapat dipakai sebagai patokan untuk tungku-tungku berteknologi lama yang masih cukup banyak dipakai oleh pelebur dalam negeri pada saat ini.



Gambar 7 . Perbandingan antara daya dan kapasitas terhadap laju peleburan dari setiap ukuran IF komersial

Tabel 3 . Perbandingan kebutuhan daya untuk melebur besi tuang kelabu sampai 1.450 °C dalam IF produksi sebelum tahun 1980, yang beroperasi pada berbagai frekuensi listrik

Laju Peleburan (Ton/Jam)	Konsumsi Daya (kWh/t)		
	1.000 Hz	150 Hz	50 Hz
0.25	820	750	-
0.50	750	710	650
1.00	700	670	610
1.50	670	640	580
2.00	640	610	560
2.50	630	600	550

REFRAKTORI

Jenis bahan dinding krusibel (*lining*) adalah refraktori yang bersifat asam, basa atau netral, dengan bentukan bata api, krusibel atau monolitik. Jenis lining monolitik merupakan jenis yang paling banyak digunakan untuk peleburan besi baja dan untuk peleburan *non-ferro* kapasitas besar. Sebaran ukuran butiran bahan refraktori sangat penting untuk pencapaian kerapatan dan proses *sintering*. Biasanya butiran terdiri dari sebaran kasar 45%, menengah 10% dan halus 45%. Butiran halus, terdiri dari 20%-ukuran halus dan 25% sangat halus (-150 *mesh*) mengendalikan proses *sintering* yang lebih cepat dan pengikatan butiran yang lebih kuat. Hal yang perlu diperhatikan pada saat pemasangan lining monolitik adalah menjaganya agar ukuran selalu homogen, karena segregasi ukuran butiran terjadi saat pengangkutan dan transportasi.

Ada 3 (tiga) jenis refraktori, yaitu :

1. Refraktori Asam

Konduktifitas termal refraktori asam lebih rendah dibanding refraktori basa, sehingga panas hilang akibat konduksinya lebih kecil. Sebagai contoh pada tungku 500 Kg - 300 kW, 1/6 daya akan hilang melalui lining asam dibandingkan dengan 1/3 daya pada lining basa. Bahan lining asam yang paling banyak digunakan adalah *kuarsit*, batuan silika alam. Jenis bahan asam lainnya sudah jarang digunakan. Bahan imbuh pengikat butiran yang digunakan adalah asam borat dan/atau boraks. Silika murni akan memuai pada saat pemanasan sehingga tidak akan ada kebocoran leburan pada permukaan kontak (istilah untuk antar muka refraktori dengan leburan).

Silika tidak memiliki ketahanan yang baik terhadap terak (*slag*) besi oksida. Demikian juga terhadap terak yang mengandung kapur *fluorspar* dan mangan kadar tinggi. Keunggulan utama dari lining silika adalah harganya yang murah, serta tidak ada kontaminasi lining oleh leburan, sehingga tidak dibutuhkan pemanasan khusus untuk membersihkan kontaminan lining.

1. Refraktori Netral

Khromit, spinel FeO dan Cr_2O_3 , biasa digunakan sebagai bahan lining netral. Reduksi Cr_2O_3 menjadi khrom dan masuk ke dalam leburan menjadikan lining lebih mudah aus. Zirkon, $\text{ZrO}_2\cdot\text{SiO}_2$, juga biasa digunakan. Namun bahan ini sulit mencapai

ikatan butir yang baik sehingga unjuk kerja lining sangat bervariasi. Ketahanan lining netral terhadap terak yang mengandung FeO tidak sebaik lining basa. Jenis yang cukup populer untuk lining netral adalah *spinel* berbahan utama alumina, Al_2O_3 .

2. Refraktori Basa

Bahan lining basa yang umum digunakan adalah magnesita, MgO , disebut pula magnesit. Kebalikan dari bahan silika, magnesita akan menyusut pada saat pemanasan dan mengakibatkan retakan pada permukaan kontak. Meskipun halus, retak akan berlanjut sampai ke lilitan dan menyebabkan kerusakan tungku. Dengan mencampurkan borak, asam borat dan pasir silika ke magnesita, retak-susutan pada permukaan kontak menjadi lebih kasar, namun tidak berlanjut ke bagian dalamnya akibat pemuatan sehingga menghentikan laju peretakan ke arah lilitan. Pasir silika larut di dalam boraks membentuk gelas dan bereaksi dengan magnesita membentuk senyawaan forsterit, $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$, kemudian menyelubungi dan mengikat antara butiran magnesita. Pemuatan permanen kemudian dicapai untuk menutupi rongga antarbutiran. Pada temperatur tinggi orsterit melarut kembali, menyebabkan susutan dengan retakan besar pada permukaan kontak. Penambahan bahan pengikat sebaiknya tidak terlalu besar, karena akan menurunkan kekuatan lining pada suhu tinggi sehingga lebih mudah terkikis oleh pergerakan leburan logam.

Kelemahan magnesita adalah tingginya kontaminasi lining oleh leburan, akibat tertinggalnya sejumlah logam di dalam retakan setelah tungku berhenti beroperasi. Sisa leburan ini akan ikut ke dalam peleburan selanjutnya dan dapat merubah spesifikasi leburan.

Lining basa lainnya adalah magnesita-alumina ($\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$), magnesita-zirkon ($\text{MgO}\cdot\text{ZrO}_2\cdot\text{SiO}_2$) dan khrom-magnesit ($\text{Cr}_2\text{O}_3\cdot\text{MgO}$). Magnesita-alumina bereaksi membentuk spinel yang memuai atau menyusut pada pemanasan. Magnesita-alumina dengan kadar 30 % Al_2O_3 dan 70 % MgO dapat mencapai pemuatan yang diharapkan dapat mengantisipasi akibat kebocoran leburan. Jenis bahan ini banyak digunakan terutama karena tidak dijumpainya kelemahan kontaminasi paduan pada lining. Magnesita-zirkon memiliki ketahanan rendah terhadap terak dibandingkan magnesita

murni, sedangkan khrom-magnesia menyebabkan naiknya kadar khrom dalam leburan akibat terlarutnya khrom dari bahan *lining*. Jenis refraktori basa tidak lagi digunakan pada tungku 50 Hz karena retakan *lining* pada permukaan kontak lebih mudah tererosi oleh aksi turbulensi pengadukan leburan yang kuat.

BAHAN MUATAN PADA PELEBURAN BESI BESI DAN BAJA TUANG

Bahan muatan pada peleburan besi dan baja tuang di dalam tungku listrik induksi tanda inti, rinciannya dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Ukuran dan Kondisi Awal Muatan

Peleburan di dalam IF umumnya dilakukan secara tetap (pengertian dari *dead melting*, yaitu tanpa terjadinya proses perubahan komposisi dasar logam). Dengan tingkat kebersihan dan perhitungan bahan muatan yang baik, peleburan dapat dilakukan secepat mungkin. Kadang-kadang untuk melebur besi tuang kelabu lunak dalam IF 1 ton frekuensi menengah sampai tinggi membutuhkan waktu hanya 35 menit (pada peleburan lanjutan) dan langsung *tapping*. Sejumlah pelebur dalam negeri melakukan peleburan besi tuang di dalam IF 2,0 ton selama 90 menit. Hal tersebut masih dianggap normal karena pengaturan muatan berdasarkan ukuran skrap sulit digendalikan. Sejumlah pelebur besi tuang lainnya dengan IF yang sama masih di atas 120 menit, karena penggunaan bahan muatan pelat baja dengan ukuran yang relatif kecil dan tipis. Jenis bahan muatan seperti ini dapat menyebabkan kehilangan energi yang besar. Manajemen bahan skrap belum banyak mendapat perhatian. Di sejumlah negara, bahan sekrap baja ukuran kecil dan tipis (*boring*) dimasukan setelah tahapan peleburan awal dengan muatan skrap yang besar dan tebal. Dalam prosedur operasional standar (SOP), skrap kecil dan tipis sebaiknya sudah dipersyaratkan sebagai bahan muatan yang bersih dan sudah dipadatkan (pembriketan).

Muatan skrap balik untuk IF-basa biasanya terlebih dahulu diproses shot blasting, agar bebas dari sisa-pasir-silika cetakan yang dapat merusak lining. Sedang dalam IF asam skrap balik kadang-kadang tidak dibersihkan agar berfungsi sebagai material rinsing yang akan mengikat karat FeO. Bahkan apabila muatan skrap bersih

dari pasir, sedikit pasir silika atau abu sekam padi ditambahkan ke dalam leburan bersama-sama dengan bahan pengoksidasi lainnya. Aksi pengadukan yang merata akan membantu rinsing saat pemrosesan metalurgi terak, dimana terak sintesis dan/atau bahan fluxing ditambahkan saat leburan pada temperatur relatif tinggi. Skrap bekas bubutan dan sejenisnya harus benar-benar bebas dari minyak, agar peleburan tidak menimbulkan asap hitam pekat, percikan leburan yang berbahaya serta terlarutnya belerang ke dalam leburan. Muatan ukuran kecil dan tipis, bila tidak dibriket, hendaknya segera dimasukan ke dalam tungku pada saat muatan tebal mulai meleleh untuk menghindari oksidasi berlebih.

Pada prinsipnya, peleburan awal membutuhkan waktu relatif lebih lama karena operasi dimulai sejak krusibel dalam keadaan dingin. Pada peleburan lanjutan, IF 50 Hz lebih hemat bila memulai peleburan dengan cara *heel*, yaitu memulai dengan sisa leburan sebelumnya antara 1/3 sampai 1/2 isi krusibel. Pada peleburan *batch* (*batch melting*), peleburan lanjutan dimulai dengan muatan dingin. Berdasarkan Gambar 5 di atas, IF frekuensi rendah sampai tinggi dapat beroperasi tanpa *heel*, bahkan pada IF frekuensi menengah sampai tinggi dapat menggunakan ukuran skrap kecil, seperti yang dinyatakan dengan rasio ukuran d/δ di atas nilai 3,5. Mudah-mudahan memulai peleburan dengan muatan padat pada IF frekuensi menengah sampai tinggi adalah akibat tingginya tegangan listrik antarlilitan, sehingga bongkahan/serpihan skrap akan saling melaskan diri yang secara volumetris akan meningkatkan sifat pelistrikan muatan. Semakin tinggi frekuensi dan rapat daya listrik, akan semakin tinggi pula tegangan antarlilitan dan semakin baik pula sifat kelistrikan muatan IF. Tegangan antarlilitan IF 1,0 ton 500 Hz adalah 8x lebih besar dibandingkan IF 1,0 ton 50 Hz.

2. DRI (Direct Reduction Iron)

Prospek penggunaan DRI dalam peleburan besi baja tuang mancanegara semakin meningkat. DRI produksi PT. Krakatau Steel disarankan untuk tidak digunakan sebagai muatan dengan porsi tinggi di dalam IF asam⁽²⁾, karena bersifat basa⁽⁵⁾ serta tingginya kadar FeO, tingkat kebiasaan ≥ 1 dan FeO 12–16%, sehingga mudah merusak refraktori asam. Kebiasaan dinyatakan sebagai :

$$\text{Kebasaan} = \frac{[\text{CaO}] + [\text{MgO}]}{[\text{Al}_2\text{O}_3] + [\text{SiO}_2]} \geq 1 \dots\dots\dots(4)$$

Meningkatnya kecenderungan DRI untuk muatan IF mendorong perubahan komposisi dan teknik pembuatan *pellet* bijih besi. Komposisi DRI PT. Krakatau Steel sesuai untuk *smelting* di dalam EAF. Saat ini banyak dijual DRI yang sesuai untuk IF asam atau IF basa dengan kadar FeO rendah dan bahan pengikat lignit yang kaya akan karbon. Tingkat kebasaan di atur oleh besarnya kadar kapur dan dolomit yang juga berfungsi sebagai *flux*. Harga DRI relatif lebih mahal dibandingkan skrap baja karbon, tetapi lebih rendah dibandingkan besi wantah (*pig iron*), serta memiliki keunggulan dalam hal kebersihan dari unsur-unsur pemadu mikro berbahaya dan adanya FeO bermanfaat untuk pemrosesan metalurgi leburan didihan karbon (*carbon boil*). Dapatkah DRI menggeser besi wantah untuk produksi besi tuang dalam negeri ?

Muatan DRI dengan kadar pengotor 3,0 % berat akan membentuk terak sampai 10 % volume leburan. Hal ini akan mempersulit operasi peleburan. Oleh karena itu, penggunaan DRI harus disesuaikan untuk jenis refraktori IF. Bahan baku ini juga memiliki kepadatan volumetris yang rendah (1,6 ton/m³), selain pengisian tungku akan membutuhkan waktu lama, kebutuhan masukan daya pun menjadi besar.

3. Skrap Paduan Tinggi

Skrap paduan tinggi sangat bermanfaat untuk bahan baku tuangan paduan tinggi karena kehilangan unsur pemadu dalam proses peleburan IF adalah sangat rendah. Hal yang terpenting adalah gunakan skrap dengan kadar yang benar-benar diketahui. Baja skrap balik (berupa saluran tuang, pengumpukan dan tuangan gagal) paduan tinggi biasanya merupakan bahan yang dilebur berulang-ulang. Apabila akan digunakan pada peleburan tetap, gunakan dalam jumlah yang tidak terlalu besar. Suatu pengecoran besi baja tuang paduan tinggi umumnya memiliki perolehan tuangan yang rendah. Jumlah skrap balik dapat berkisar antara 40-60 %. Semakin lama, jumlah skrap balik pada persediaan semakin banyak. Ada dua cara untuk menjaga mutu tuangan dari hari ke hari : (1) gunakan besi baja wantah dalam jumlah campuran untuk substitusi skrap balik paling tidak setengahnya, atau (2) lakukan metalurgi peleburan dengan cara

didihan bijih dan atau metalurgi terak dan atau lakukan pemurnian secara metalurgi ladle.

PELEBURAN

Selama kebersihan bahan muatan IF selalu terkendali, IF merupakan pelebur yang paling ideal, termasuk kehandalannya dalam aksi pengadukan leburan membuat tingkat kehomogenan komposisi kimia tuangannya lebih baik. Emisi gas dan asap yang dihasilkan pun sangat rendah. IF merupakan unit pelebur yang ideal untuk baja paduan karena kehilangan pada peleburan atau pemurnian adalah kecil, sehingga muatan dapat dihitung untuk memperoleh komposisi leburan yang sesuai tanpa perlu menunggu hasil analisisnya terlebih dahulu.

Ada 4 (empat) macam peleburan di dalam tungku listrik induksi tanpa inti, yaitu :

1. Peleburan Tetap

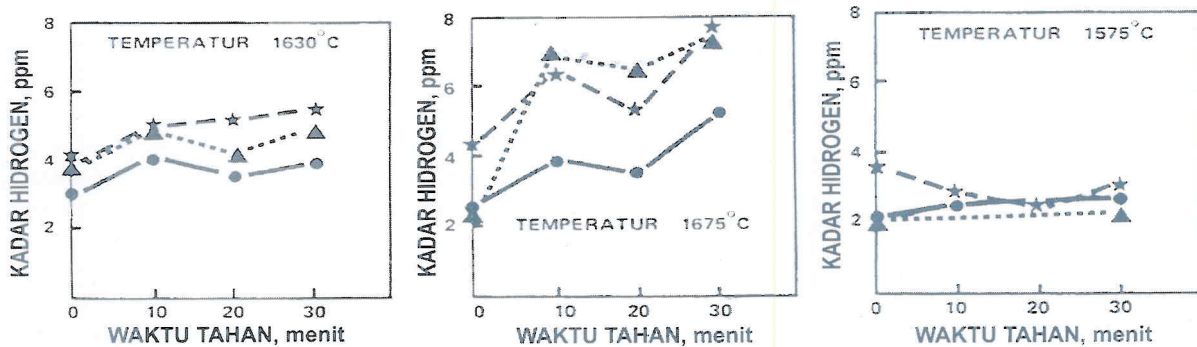
Dalam pelaksanaan peleburan tetap (*dead melting*) operasi dimulai dengan memasukkan muatan skrap, bahan lainnya dan pemadu *non-oxidisable*. Setelah bahan ini mencair seluruhnya, bila dibutuhkan, sejumlah unsur pemadu *oxidisable* ikut ditambahkan. Pemanasan berlebih (*super heating*) dilakukan sejak bahan pemadu terakhir yang ditambahkan melebur penuh sampai ke suhu leburan yang diinginkan, sebagai kompensasi kehilangan suhu dalam operasi *tapping*, pemrosesan *ladle* dan suhu tuang. Pemanasan berlebih dan *tapping* dilakukan secepat mungkin. Suhu dalam tungku naik dengan laju terukur, bergantung kepada besarnya masukan daya. Operator tungku yang sudah berpengalaman hanya mengukur suhu saat bahan terakhir melebur penuh dan memastikan waktu untuk *tapping* dengan baik tanpa harus mengukur kembali suhu. Deoksidasi akhir dapat dilakukan di dalam tungku sesaat sebelum *tapping*, di dalam ladle atau di dalam keduanya.

Kadar gas akan naik dengan cepat bila suhu leburan baja ditahan. Laju kenaikan pelarutan gas hidrogen, nitrogen dan oksigen dapat dilihat pada Gambar 8, Gambar 9 dan Gambar 10. Pada gambar tersebut tampak bahwa laju pelarutan hidrogen dan oksigen akan lebih cepat pada temperatur yang lebih tinggi, sedangkan pelarutan nitrogen semakin besar pada temperatur yang lebih rendah, namun sama sekali tidak terserap pada suhu tinggi.

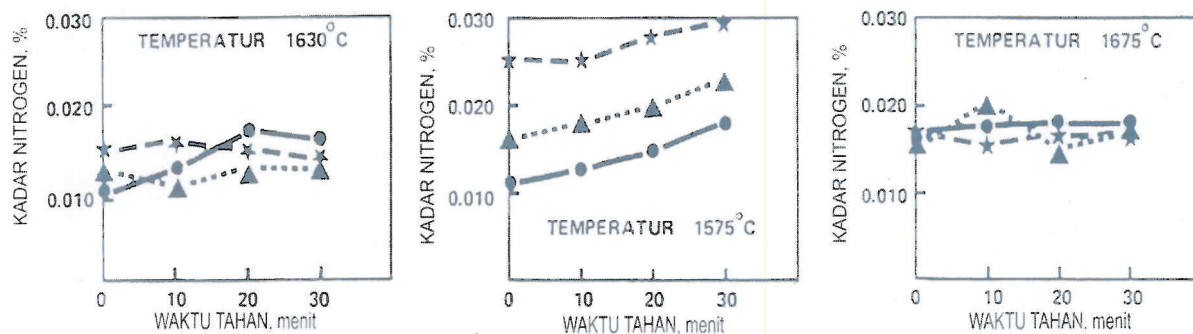
Peleburan tetap tampaknya mudah dilakukan dalam IF ukuran kecil dan di laboratorium dengan kondisi lingkungan dan komposisi muatan yang terukur. Pada peleburan komersial, tingkat kebersihan muatan atau kondisi lingkungan yang selalu berubah, terutama kelembaban udara di iklim tropis seperti di Indonesia, membuat teknik peleburan menjadi lebih sulit dibandingkan di negara subtropis. Kondisi yang mirip di negara subtropis dengan iklim tropis adalah pada saat musim panas. Pada saat itu banyak pengecoran tidak beroperasi penuh untuk memproduksi tuangan dengan spesifikasi yang ketat. Peleburan banyak dilaksanakan untuk membuat tuangan dengan spesifikasi tuangan yang biasa-biasa. Belajar dari kebiasaan produksi

tuangan di negara maju, sejumlah pencatatan temperatur ruang dan kelembaban selalu menjadi dasar yang diperhitungkan dalam perancangan proses peleburan. Di Jepang misalnya, pada musim panas jenis kegiatan yang paling banyak dilaksanakan adalah perbaikan peralatan, pembuatan pola tuangan, serta pekerjaan *finishing* dan perbaikan terhadap cacat tuangan.

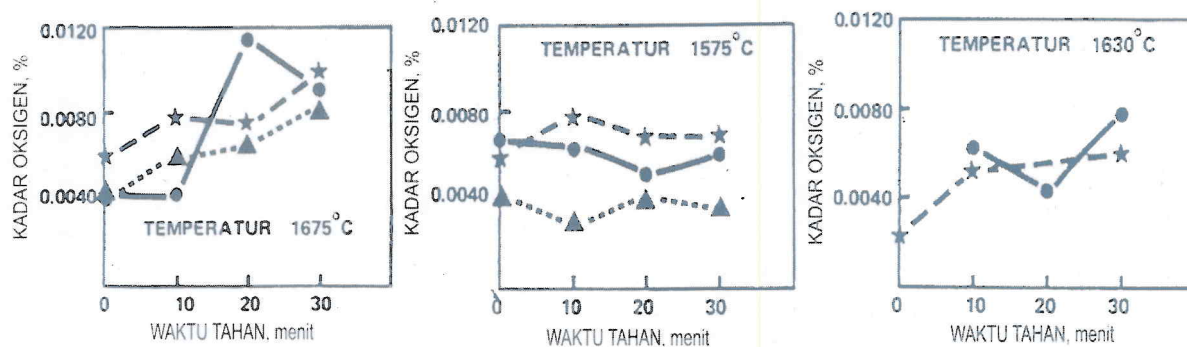
Keadaan iklim di Indonesia hendaknya jangan dijadikan alasan, walaupun untuk itu perlu banyak dilaksanakan pencatatan, riset terapan dan pengembangan teknik-teknik yang memudahkan dalam mengendalikan operasi peleburan. Catatan pengalaman peleburan di BBLM dan di sejumlah pengecoran dalam negeri yang menggunakan IF mudah-mudahan dapat dijadikan pustaka.



Gambar 8 . Penyerapan gas hidrogen oleh leburan baja 0,3 % -C akibat penahan pada suhu dan waktu tertentu ⁽³⁾.



Gambar 9 . Penyerapan gas nitrogen oleh leburan baja 0,3 % -C akibat penahan pada suhu dan waktu tertentu ⁽³⁾.



Gambar 10. Penyerapan gas oksigen oleh leburan baja 0,3 % -C akibat penahan pada suhu dan waktu tertentu ⁽³⁾.

2. Peleburan Besi Tuang Kelabu.

Dalam peleburan kupola, tetesan logam sepanjang ruang bakar mengalami proses deoksidasi oleh gas hasil reaksi oksidasi kokas serta pelarutan karbon pada saat bersinggungan dengan kokas. Di bagian penampung leburan, reaksi kokas dengan oksida mengakibatkan bentukan didihan karbon. Suhu peleburan kupola yang tidak terlalu tinggi serta udara hembusan yang kaya nitrogen menyebabkan kadar gas nitrogen dalam leburan relatif tinggi. Nitrogen akan mengikat unsur mikro dan membawanya masuk ke terak. Sisa gas nitrogen diprediksi akan terlarut dalam kadar rendah sebagai atom tunggal ke dalam leburan, dan pada saat besi tuang membeku, gas ini akan masuk ke dalam fasa austenit⁽⁶⁾, memperkuatnya dan pada suhu kamar akan menstabilkan cacat tuang lubang jarum atau pori mikron⁽⁷⁾. Di sisi lain pelarutan atom tunggal oksigen pada saat pembekuan tuangan akan memperkuat penggrafitan, sedang naiknya kadar belerang dari bahan kokas akan juga menstabilkan penggrafitan disamping menstabilkan karbida sementit⁽⁸⁾. Kelebihan belerang akan dikendalikan oleh mangan. Untuk sejumlah spesifikasi tuangan yang memiliki ketahanan bocor tinggi misalnya *engine crankcase, fitting, valve* dan sebagainya, secara metalurgis fasa sementit, Fe_3C , tersebar merata dalam jumlah sampai 0,4 % C dengan ukuran butir yang halus di sekitar sepihan grafit.

Sifat yang sama akan dicapai pada peleburan IF dengan proses penambahan bahan imbuhan nukleasi dan/atau penambahan pemadu sampai 1,0 %-Cu, 0,5 %-Ni dan/atau 0,2 %-Sn. Teknik metalurgis peleburan dengan menahan leburan pada temperatur rendah dan dengan aksi pelarutan gas nitrogen dari udara, atau dengan penambahan unsur-unsur yang mengandung nitrogen. Hal ini akan lebih murah dibandingkan dengan penambahan pemadu. Penambahan unsur pemadu Sn dalam proses IF dilakukan pada saat *tapping (stream alloying)* atau di dalam ladai, karena penahanan leburan dalam waktu lama, menyebabkan Sn menguap dalam bentuk Sn oksida yang berbahaya dan menyebabkan keracunan stanosis dalam tubuh manusia.

Hidrogen merupakan gas yang tidak diinginkan dalam besi tuang. Selain menyebabkan cacat tuang lubang jarum dan porimikro, pelarutan gas hidrogen ke dalam besi tuang pada saat membeku sebagai

atom tunggal yang akan berbahaya untuk bagian tuangan yang tipis, pada daerah cetakan yang diberi *chill* dan/atau pada penggunaan tuangan kemudian hari. Saat temperatur tuangan menurun melewati sekitar 400 °C, atom tunggal hidrogen terkonversi menjadi atom H_2 . Gas keluar dari butiran dan saat melewati batas butir menyebabkan retak batas butir. Pada permukaan tuangan, hal ini menyebabkan timbulnya retak mikro yang mengawali bentukan retak yang kasat mata. Pada bentukan tuangan semacam *crankcase* mesin bakar, retak batas butir menyebabkan perembesan likuid pada saat penggunaannya.

Dengan dasar seperti di atas, IF merupakan tungku pelebur ideal untuk besi tuang pada saat proses yang terjadi dapat menjamin terjadinya metalurgi peleburan statis akibat operasional tungku. Frekuensi akan memegang peran cukup besar dalam aksi *stirring* dan/atau *rinsing*. Untuk sasaran produksi berdasarkan pesanan dalam jumlah kecil dengan variasi spesifikasi yang besar dengan persyaratan ketat, pemilihan spesifikasi IF harus dipertimbangkan secermat mungkin. IF frekuensi menengah lebih sesuai untuk jenis besi tuang untuk tujuan aksi pengadukan yang relatif tidak terlalu besar tetapi dapat mencapai tingkat produksi yang baik terutama untuk ukuran kapasitas menengah. Refraktori asam sesuai untuk besi tuang kelabu dengan muatan terukur baik. Jenis lilitan yang umum pun akan cukup memuaskan. Pada saat muatan menggunakan campuran besi spons, atau muatan yang relatif kotor, disarankan menggunakan jenis refraktori netral. IF merupakan unit pelebur besi tuang kelabu regular/*pig iron* dan besi tuang kelabu sintesis. Masukan utama besi tuang kelabu regular adalah skrap besi tuang, skrap balik dan besi wantah. Besi tuang kelabu sintesis menggunakan bahan muatan utama baja karbon, *carburizer*, Fe-Mn dan Fe-Si. Pelarutan unsur ini membutuhkan waktu dan suhu relatif tinggi. Akibatnya untuk mencapai sifat metalografis dalam pembuatan *crankcase* tidaklah mudah, terutama pada frekuensi menengah sampai tinggi, dan kemungkinan kadar sementit yang terlalu tinggi menyebabkan susutan mikro yang menyebabkan tuangan mudah bocor pada bagian tuangan yang tipis. Kekerasan tidak merata akibat tingginya sementit menyebabkan *hard spot* yang memudahkannya retak mikro.

3. Peleburan Besi Tuang Noduler

Pada dasarnya, peleburan besi tuang noduler serupa dengan untuk besi tuang kelabu. Produksi besi tuang noduler dengan ukuran ketebalan tuangan di bawah 50 mm di dalam IF frekuensi menengah dan refraktori asam tidak mendapat kendala produksi yang berarti.

Sifat mekanis besi tuang noduler yang bersaing dengan baja tuang menyebabkan besi tuang noduler sering dilaksanakan dalam kegiatan produksi baja tuang paduan tinggi. Umumnya kegiatan produsen baja tuang paduan bersifat pesanan dalam jumlah kecil dengan variasi spesifikasi yang besar dan persyaratan yang ketat. Frekuensi IF yang sering digunakan adalah relatif tinggi dengan refraktori netral atau basa. IF 0,75 ton, 1.000 Hz dan 500 kW, dengan lilitan tunggal cukup memadai untuk memproduksi berbagai spesifikasi besi baja tuang paduan.

Misalkan pembuatan *crankshaft* mesin diesel, memiliki spesifikasi DIN EN 1563, EN-GJS-700-2 (GGG-70) dengan tebal tuangan imajiner di atas 50 mm, menggunakan cetakan pasir resin furan (*furanic resin*) dan tuangan *riserless*. Maka komposisi ditentukan dengan rasio C/Si antara 2,3–2,5. Nodulerisasi dilakukan di dalam *ladle* dengan proses *tundish cover* 250 kg. Target komposisi *as cast* dengan sifat mekanis dan metalografis adalah seperti pada Tabel 4. Secara teoritis sifat tersebut hanya dapat dicapai pada IF basa. Akan tetapi pada percobaan awal untuk menguji sifat-sifat produk, digunakan

refraktori asam. Peleburan besi tuang noduler di dalam IF basa bukan hal yang biasa dilakukan oleh pengecoran dalam negeri.

4. Peleburan Baja Tuang Paduan Tinggi

Umumnya peleburan baja paduan dilakukan dengan teknik peleburan tetap. Muatan terdiri dari skrap balik, baja karbon dan bahan imbuhan pemadu sesuai dengan spesifikasi yang diminta. Muatan dingin disusun rapat di dalam krusibel untuk mencapai masukan daya yang paling tinggi. Pelarutan gas oleh leburan dari skrap balik adalah sangat tinggi. Sehingga apabila porsi skrap balik di dalam muatan tinggi, gas yang terlarut dalam leburan pun akan tinggi. Besarnya jumlah skrap balik akan tampak signifikan, terutama apabila :

- Perolehan tuangan (*casting yield*) pada peleburan sebelumnya sangat rendah, sehingga jumlah sekrap balik yang dilebur ulang akan menjadi sangat banyak, bahkan juga dari yang peleburan sebelumnya. Perolehan tuangan baja relatif rendah dibandingkan besi tuang, yaitu di bawah 60%.
- Jumlah tuangan yang gagal relatif besar, maka simpanan sekrap balik total kadang-kadang di atas 60% dari setiap peleburan.
- Penggunaan cetakan pasir yang memungkinkan pembentukan gas yang cukup besar, seperti cetakan pasir basah dan cetakan pasir kimiawi.
- Penyerapan gas pada saat pemindahan leburan dari IF ke *ladle* dan dari *ladle* ke cetakan.

Tabel 4 . Hasil pengamatan pada percobaan awal pembuatan “ *crankshaft*” mesin 3 -silinder dan 6 -silinder, @ 45 kg, EN -GJS-700-2 (fasa perlitis 50%, 90 % -SG) pada IF 750Kg -1000Hz-500kW, *tundish cover ladle* 250 kg.

27-01-1993	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cu	% Mg
Komposisi umum	3.60	2.40	0.35	0.05	0.02	0.50	0.02
Komposisi target	3.70	1.50	0.20	0.04	0.01	0.50	0.04
IF asam							
Komposisi akhir	3.47	1.97	0.52	0.032	0.010	0.84	0.054
% SG	92 %						
Kuat tarik (kgf/mm ²)	65.55						
Kekerasan (HB/HRC)	240	/	22.5				
Kemuluran (%)	2.48 %						
% Perlit	n.a.						
IF basa							
Komposisi akhir	3.65	1.51	0.13	0.055	0.006	0.45	0.054
% SG	90 %						
Kuat tarik (kgf/mm ²)	n.a.						
Kekerasan (HB/HRC)	345	/	36.2				
Kemuluran (%)	1.07 %						
% Perlit	50 %						

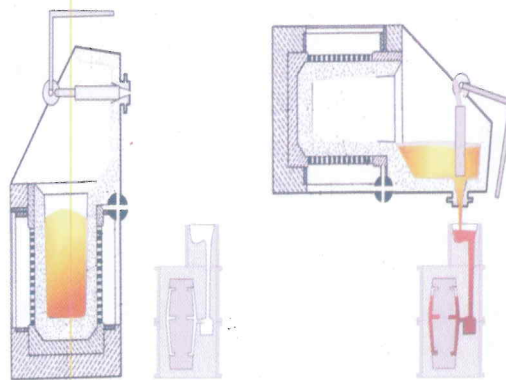
n.a. : data tidak tercatat. Pada IF basa dan dengan nilai kekerasan di atas 300 HB, untuk bentuk tuangan lainnya mencapai di atas 800 N/mm². Pada pencatatan IF-basa di atas, terjadi kegagalan dalam pengisian cetakan uji YB.

- Rancangan saluran tuang yang kurang tepat dan tidak digunakannya teknik pelapis permukaan rongga cetakan yang benar menyebabkan penyerapan gas-gas yang juga tinggi.
- Praktek deoksidasi saat *tapping* kurang efektif.

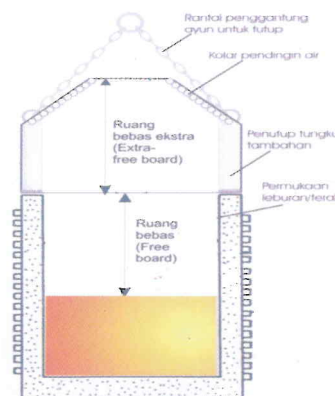
Beberapa cara fisis yang dapat digunakan untuk mengurangi kelarutan gas, antara lain dengan perpanjangan saluran tapping (Gambar 11) dan semivakum (Gambar 12). Dengan cara uji coba, masing-masing pengecor juga dapat mengurangi akibat pelarutan gas kedalam leburan dengan cara antara lain :

- Mempersyaratkan jumlah maksimum skrap balik, misalnya tidak lebih dari 40% saja.
- Melakukan peleburan penyegaran sekrap balik dengan perlakuan teknik metalurgi permurnian di dalam krusibel, teknik metalurgi terak dan/atau teknik metalurgi ladel, tanpa tujuan pembuatan tuangan serta menuangkannya ke dalam cetakan *ingot*. Penyegaran yang lebih mudah dapat dilakukan di dalam EAF.

Proses pemurnian langsung leburan baja dapat dilakukan di dalam IF bila memang dibutuhkan, terutama bila jumlah kandungan yang akan dimurnikan tidak terlalu besar. Peniupan gas oksigen O_2 atau Ar di dalam krusibel jarang dilakukan, demikian pula di dalam *ladle* kapasitas kecil. Pemurnian untuk menurunkan kadar C, Si, Mn, P dan S, serta unsur-unsur kadar rendah lainnya dapat dilakukan dengan mengatur kondisi-kondisi peleburan. Penurunan kadar H_2 dan O_2 yang biasa dilakukan adalah didihan bijih, didihan karbon dan proses terak sintetis Fe-Si, kapur dan *fluorspar*. Deoksidasi aluminium saat *tapping* sangatlah penting untuk menurunkan gas O_2 . Pelarutan gas N_2 di dalam IF adalah lebih besar dibandingkan EAF, sehingga praktek deoksidasi dengan Al berlebih menyebabkan cacat tuang retak antarbutir oleh endapan Al-N. Deoksidan Al dapat digantikan oleh deoksidan Ca dan Zr. Percepatan penaikan suhu sesaat setelah seluruh muatan melebur merupakan cara yang terbaik untuk menghindari pelarutan gas N_2 . Perlakuan metalurgi leburan dan terak di dalam krusibel akan menaikkan biaya peleburan akibat perpanjangan waktu peleburan dan jumlah analisis komposisi kimia.



Gambar 11 . Sketsa tungku dengan saluran tambahan: (a) pada posisi peleburan; (b) pada posisi penuangan langsung ke cetakan.



Gambar 12. Sketsa rancangan penutup semi-vakum IF untuk baja tuang paduan tinggi. Rantai penggantung ayun digunakan untuk dua tungku kembar (*twin-pack system*), karena penutupan hanya dilakukan selama peleburan muatan awal baja karbon⁽⁷⁾.

Baja Mangan Autenitik (BMA) diproduksi dalam IF basa dari muatan segar atau sekrap balik. Skrap balik digunakan maksimum 40%, karena akan menyerap banyak gas yang tidak dapat dikurangi walaupun dengan cara pemurnian didihan bijih, dimana mangan akan terlebih dahulu dioksidasi dan penyuntikan oksigen bukanlah hal yang umum didalam krusibel IF. Kadang-kadang BMA juga dihasilkan oleh IF asam dengan cara melebur baja karbon di dalam krusibel dan melebur/ memanaskan Fe-Mn-C di dalam ladel. Bahan mangan ini memiliki titik lebur rendah, 1.000-1.100 °C, sehingga mudah lebur. Untungnya BMA juga memiliki titik beku relatif rendah, 1400 °C, sehingga tidak dibutuhkan pemanasan lebih yang ekstrim untuk baja karbon.

Baja khrom-nikel autentik (BNKA) sangat sesuai dilebur di dalam IF, karena tidak adanya kemungkinan pelarutan karbon dari sumber seperti hanya pada EAF. Seperti halnya pada BMA, sekrap balik yang digunakan maksimum 40% untuk menghindari penyerapan gas. Pemurnian dilakukan pada baja paduan ini dengan tujuan menurunkan kadar karbon.

Pemurnian dengan didihan bijih hanya dapat dilakukan pada muatan baja karbon saat sebelum skrap balik dan pemadu lainnya dimasukkan. Pada proses didihan bijih, juga dapat dipersiapkan *free-board* ekstra yang biasanya ada pada teknik peleburan semi vakum (lihat Gambar 12), walaupun penurunan karbon tidak signifikan di dalam peleburan dan pemrosesan leburan secara vakum dan gas mulia. IF digunakan untuk BNKA-karbon ekstra rendah (ELC), kadar C < 0,03%, dengan proses seperti di atas dan dengan pengawasan yang lebih ketat dalam penggunaan bahan pemadu, serta dengan melakukan peleburan pembersihan *lining* (*wash heat*) terlebih dahulu. Teknik didihan bijih menjadi kurang menguntungkan karena akan memperpanjang waktu peleburan, sehingga umumnya mutu ELC ini dilakukan dengan muatan segar dan sekrap balik yang sama dengan komposisi akhir leburan.

Pelarutan N₂ di dalam BNKA bahkan dapat mencapai di atas 0,4% dengan menambahkan sejumlah pemadu nitrogen kadar tinggi dan/atau dengan tiupan gas N₂. Nitrogen terlarut ke dalam fasa austenit dan akan menstabilkan fasa tersebut⁹, sehingga dapat menurunkan kebutuhan jumlah pemadu nikel. Nitrogen dan paduan mikro Nb dan Ti akan membentuk endapan keras Nb-N dan Ti-N pada batas butir. Tidak seperti Al-N, endapan ini akan memberikan dampak sebagai penghenti pergerakan retak antarbutir, sehingga lebih tahan untuk penggunaan tuangan pada suhu yang berubah drastis atau pada proses pengelasan.

KESIMPULAN DAN SARAN

1. Penggunaan tungku listrik induksi tanpa inti (IF) di industri pengecoran logam masih terbatas, namun karena pertimbangan ekonomis saat ini jumlah IF semakin banyak di Indonesia.

2. IF merupakan pelebur yang paling ideal selama komposisi muatan terkendali, dan juga kehandalan dalam aksi pengadukan leburan membuat tingkat kehomogenan komposisi kimia tuangannya lebih baik.
3. Kemungkinan dimasa mendatang pengembangan bahan baku, seperti : besi spons bersifat asam di dalam IF dan ada pengembangan material refraktori.
4. Diskusi akhir pada konsep frekuensi tungku dikaitkan dengan jenis pekerjaan *job order* besi tuang kelabu dan noduler kemudian sampai baja paduan cukup menggunakan frekuensi menengah.
5. Kemajuan untuk membuat komposisi dalam IF pengecoran tetap dapat dicapai baik dan bersih dengan menggunakan komposisi muatan yang terseleksi.
6. Berdasarkan pengalaman produksi ELS mudah dicapai dalam IF.

DAFTAR PUSTAKA

1. R.R. Varshney, Jitendra Singh, "Modern Concepts of Steel Making Through Induction Furnaces", India, www.IndianSteels.org.
2. Sonny Djatnika SD, "Pemakaian Besi Spons Dalam Dapur Listrik Induksi Tanpa Inti Sebagai Campuran Untuk Besi Tua dan Besi Bekas Pada Pembuatan Besi Tuang Kelabu", Tugas Akhir Mahasiswa Departemen Tambang – Metalurgy, ITB, Bandung 1981.
3. W.J. Jackson & M.W. Hubbard, "Steelmaking for Steelfounders", SCRATA, Shiefield, 1979.
4. E.Dötsch and Herbert Doliwa Dortmund, "Economic Melting in Medium Frequency Crucible-Type Induction Furnaces", Casting Plant+Technology 1/88, German Foundrymen's Association – VDG, Düsseldorf, hal. 8-19.
5. Ir. E. Abdul Chalik M., "Proses Reduksi Langsung Bijih Besi HYL di PT. Krakatau Steel", Bulletin Metalurgi Ekstraktif LMN-LIPI No.3 Tahun 1979, Bandung, hal. 19-27.
6. Akio Kagawa & Dr.Eng. Taira Okamoto, "Behaviour of Nitrogen in Solidifying Cast Iron", Transactions of the Japan Foundrymen's Society, Vol. 2, April 1983, Tokyo, hal. 12-15.
7. J.J. Valencia & J. Beech, "Analysis of Blowhole in Iron-Carbon-Nitrogen Alloys", Solidification Technology in The Foundry and cast house, Proceedings, The Metals Society, Coventry, 1980, hal. 359-364.
8. M.F. Basdogan, G.H.J. Bennett & V. Kondic, "Effects of sulphur and oxygen on

- solidification of grey cast iron*", Solidification Technology in the foundry and cast house, Proceedings, The Metals Society, Coventry, 1980, hal. 240-247.
9. Sonny Djatnika SD, "A Study on Fe-22%Cr-4%Ni-2%Mo Nitrogen Alloyed Duplex Stainless Steels", Thesis, Departement of Metallurgy and Material Engineering, Katholieke Universiteit te Leuven, Belgium, 1986-1987.
 10. BCS, Incorporated, "Advanced Melting Technologies: Energy Saving Concepts and Opportunities For The Metal Casting Industry", ITP Metal Casting – Energy Efficiency and Renewable Energy Programms, U.S. Departement of Energy, November 2005.