

Peleburan Skrap Aluminium pada Tungku Krusibel berbahan Bakar Batubara Hasil Proses Aglomerasi Air-Minyak Sawit

Nukman, Agung Mataram dan Irsyadi Yani
Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya
Jalan Raya Prabumulih km 32 Indralaya (30662) Ogan Ilir Sumatera Selatan
Telepon: 0711-580272
ir_nukman2001@yahoo.com

Abstract

Smelting aluminum scrap in a small capacity can be done on a simple furnace crucible. As fuel furnaces used type of semi-anthracite coal briquettes, bituminous and sub-bituminous from Tanjung Enim which has been through the washing process by agglomeration method using water-oil palm. Calorific value, the contents of water and hydrogen calculated in the energy balance. Aluminum scrap smelted at a temperature 1023°K. Furnace by coal briquette which has a 23.38% efficiency,, crucible can melt 50 kg of aluminum scrap by 6.47 kg of briquettes for 1 hour 46 minutes.

Keywords: coal briquette, coal agglomeration, aluminum scrap, crucible furnace

PENDAHULUAN

Aktivitas manusia sehari-hari dengan berbagai jenis pekerjaan dan kegiatan, baik kegiatan dibidang industri, rumah tangga, olahraga, dan sebagainya, telah menimbulkan beberapa jenis limbah yang perlu ditangani. Penanganan limbah ini berhubungan dengan kelanjutan kenyamanan lingkungan, karena dari berbagai jenis limbah ini terdapat jenis limbah yang berbahaya baik bagi manusia maupun bagi lingkungan lainnya. Limbah daribahan plastik telah diketahui sulit untuk diurai, limbah beracun merusak lingkungan secara langsung dalam semua sendi kehidupan, dan juga sebetulnya limbah logam sebetulnya merusak lingkungan. Penanganan limbah dari berbagai sumber ini secara khusus telah diatur oleh kementerian Lingkungan hidup Republik Indonesia dengan mengeluarkan peraturan Menurut Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No.13 tahun 2012 pasal 1 poin ke-1: Kegiatan *reduce, reuse, dan recycle* atau batasi sampah, guna ulang sampah dan daur ulang sampah yang selanjutnya disebut Kegiatan 3R adalah segala aktivitas yang mampu mengurangi segala sesuatu yang dapat menimbulkan sampah, kegiatan penggunaan kembali sampah yang layak pakai untuk fungsi yang sama atau fungsi yang lain, dan kegiatan mengolah sampah untuk dijadikan produk baru [1]. Limbah logam yang paling banyak ditemui diantaranya limbah besi/baja dan aluminium, karena kedua jenis logam ini yang paling banyak dipakai oleh manusia.

Dalam skala besar beberapa industri peleburan telah memakai tungku dengan memanfaatkan panas dari energi listrik, minyak, gas, dan batubara, demikian juga halnya pada skala industri kecil. Kegiatan pemanfaatan limbah logam ini dapat dimasukkan ke dalam dua kategori, yaitu limbah logam sebagai bahan tambah,

dalam persentase tertentu dicampurkan ke dalam tungku peleburan logam primer dan dilebur tanpa menjadi bahan penambah, yang berarti hasil peleburan limbah logam dicor langsung menjadi barang jadi. Pada industri yang mengkhususkan dalam bidang pengelolaan logam limbah, logam cair dijadikan batangan atau bilet untuk kemudian dijual kepada industri pemakai lainnya. Tentunya hal ini berhubungan dengan tingkat kemurnian yang memberikan pengaruh yang tersendiri, baik dari segi kekuatan mekanis maupun aspek lain yang berimbas kemasalah keekonomian harga jual beli.

Beberapa pendapat telah mengemuka bahwa skrap aluminium yang diproses ulang telah dapat menghemat biaya energi. Dibandingkan dengan aluminium primer, maka teknologi pengolahannya saat ini dapat menghemat sekitar 95% energi, dengan kata lain bahwa skrap aluminium membutuhkan energi hanya 5% untuk didaur ulang [2]. Pada sisi lain, Puga et al (2009)[3] telah menyatakan bahwa, sisa hasil proses pemessinan berupa bram (*chips*) menjadi limbah proses yang besarnya sekitar 3 s.d. 5% dari berat awal.

Dilihat dari segi penggunaan energi, maka penghematan 95% ini sangat menguntungkan. Dengan teknologi pengolahan dan pembentukan logam saat ini dan masa mendatang, memungkinkan untuk didapat sifat yang sama antara material primer dan daur ulang. Disisi lain penghematan energi ini secara langsung memberi keuntungan lain, yaitu harga produksi menjadi lebih rendah. Namun bila ditinjau dari semakin banyaknya kebutuhan akan material aluminium

maka tidak dapat dihindari kebutuhan kebutuhan biaya energi juga meningkat.

Batubara telah lama dipakai sebagai sumber energi di Indonesia, batubara terbanyak jenisnya adalah batubara muda (*brown coal*), batubara jenis ini bernilai kalori rendah. Empat jenis batubara terdapat di sejumlah daerah pertambangan di Indonesia, antara lain batubara jenis antrasit (termasuk juga semi antrasit), bituminus, sub-bituminus dan lignit. Nilai kalori menjadi pertimbangan utama untuk memilih batubara sebagai sumber energi. Namun untuk menghindari pengaruh lingkungan maka kadar sulfur yang rendah menjadi syarat dalam perdagangan batubara, kemudian diikuti kadar air (*moisture*) yang tinggi menjadi pertimbangan juga karena kadar air yang tinggi menjadikan batubara sulit untuk dinyalakan. Dengan pertimbangan nilai kalori yang tinggi, maka batubara jenis antrasit menjadi mahal di dunia industri. Dalam proses pembakaran, nilai kalori dan kadar air menjadi bagian penting untuk diperhitungkan, karena berhubungan dengan banyaknya energi yang masuk dan hilangnya energi. Sulfur berhubungan dengan aspek lingkungan, padamana sulfur yang keluar dari gas buang dalam bentuk senyawa SO_2 akan mengakibatkan hujan asam. Kadar abu yang tinggi akan menghambat dan berpengaruh terhadap rambatan energi alam sistem tungku.

Memperhatikan aspek pemanfaatan peleburan daur ulang skrap aluminium dan pemanfaatan batubara dan unsur kadar bahanbakar maka hubungannya ini patut untuk dibahas. Tujuan daripada penulisan ini adalah menganalisa besarnya energi yang dipakai pada proses peleburan skrap aluminium didalam tungku yang dilengkapi dengan krusibel. Sehingga dengan besarnya volume yang ada antara krusibel dan tungku tempat pembakaran briket dapat diisi sesuai dengan kapasitas volume yang ada. Perhitungan efisiensi tungku dibuat untuk melihat efisiensi tungku untuk peleburan skrap aluminium. Sedangkan pembahasannya berkenaan dengan metodologi pembahasannya yaitu dengan memperhitungkan besaran data bahanbakar briket hasil proses aglomerasi air-minyak sawit dan dengan beberapa asumsi yang relevan meliputi dimensi tungku. Perhitungan dilakukan terhadap besaran energi, baik yang diserap untuk melebur skrap aluminium maupun energi yang dilepas ke sekeliling.

TUNGKU PELEBURAN, ENERGI BAHANBAKAR DAN SEKRAP ALUMINIUM

Tungku peleburan berdasarkan jenis umpan energi terdiri dari 4 (empat) macam yaitu tungku dengan energi listrik, minyak, gas dan batubara. Keempat macam ini dapat bekerja dalam beberapa kapasitas muatan peleburan. Juga keempat macam ini dapat berproses dengan cara umpan bahanbakar terus menerus dan tetap.

Dalam industri peleburan dan pengecoran logam dikenal beberapa type tungku peleburan antara lain:

- Kupola
- Tungku dengan bahanbakar dibakar mengarah secara langsung
- Tungku krusibel
- Tungku dengan busur nyala api listrik
- Tungku induksi.

Kupola umumnya dipakai dengan bahanbakar kokas dalam kapasitas logam yang besar. Untuk tungku dengan bahanbakar atau pemanas bahanbakar secara langsung ke permukaan logam yang akan dicairkan dipakai bahanbakar gas, biasanya tungku ini dipakai untuk melebur logam non ferro berbahan dasar paduan tembaga maupun aluminium, karena pembakaran diarahkan ke permukaan logam cair, maka pengeluaran logam cair melalui bagian bawah tungku. Untuk peleburan logam non ferro dengan kapasitas terbatas dapat dilakukan pada tungku yang dilengkapi dengan suatu krusibel. Padamana krusibel dipakai sebagai tempat logam untuk dilebur. Untuk tungku yang dilengkapi dengan krusibel ini, bahanbakar yang dipakai berupa padatan seperti batubara dan minyak yang dibakar untuk memanasi ruang bakar sekeliling maupun dari bagian bawah krusibel. Tngku dengan busur nyala api biasanya dipakai melebur logam bei tuang, kapasitas tungku seperti ini cukup besar dan tentunya mengkonsumsi energi listrik yang besar.

Logam-logam sangat memungkinkan didaur ulang dan bahkan kenyataan dalam persentase besar bahan logam secara efektif dapat didaur ulang. Logam bekas dikumpulkan, diubah menjadi bahan baru berkualitas yang sama atau serupa melalui proses metalurgi, termasuk peleburan dan pemurnian. Logam bekas yang dikumpulkan untuk didaur ulang adalah bahan yang tidak harus dikelola sebagai limbah. Ini adalah sumber daya berharga yang diubah menjadi komoditas bernilai tambah[4].

Aluminium adalah salahsatu logam yang kemanfaatannya hampir dapat ditemui pada setiap kegiatan manusia. Logam aluminium banyak dipakai karena beberapa kelebihan dibanding dengan logam lain. Sebagai logam non ferro, aluminium juga dapat didaur ulang. Daur ulang aluminium saat ini dan buat generasi mendatang sangat menguntungkan dengan konservasi energi dan sumber daya alam lainnya. Daur ulang skrap aluminium yang dalam hal ini termasuk skrap hasil proses pemessinan, kaleng minuman ringan, alat-instrumen listrik, komponen kendaraan bermotor, sekrap aluminium tua, alat rumah tangga, dan lainnya [5].

Daur ulang aluminium dapat menghemat sekitar 95% energi yang dibutuhkan untuk memproduksi aluminium utama, yang berarti juga

menghindari emisi gas buang produksi, yang termasuk dalam efek rumah kaca. Laju daur ulang secara global meningkat mencapai 90% bagi aplikasi dunia transportasi dan konstruksi dan 70% bagi kaleng minuman ringan. Transportasi dalam hal ini meliputi pesawat udara, peti kemas, kapal laut, otomotif, kereta api dan bus-bus, sedangkan dalam bidang konstruksi dipakai dalam bidang arsitektur bangunan [6].

Untuk peleburan aluminium 99,00 % murni yaitu 930°K [7], namun untuk mendapatkan kualitas yang lebih baik dengan memperhitungkan waktu penahanan sebelum pengecoran, maka sekrap aluminium dilebur hingga mencapai temperatur 1023 °K oleh Despinar and Campbell (2007) [8] menggunakan dapur induksi listrik, , sedangkan untuk tungku berbahan bakar gas temperatur dipertahankan konstan antara 1003 dan 1018 °K [5].

Temperatur briket menunjukkan temperatur oksidasi sempurna (pembentukan menjadi kokas) [9, 10]. Temperatur ini berada antara *soft coke* dan *hard coke* [11]. Dalam hal ini dihitung dengan menggunakan Thermogravimetry Analysis (TGA) [10, 11].

ANALISA KESETIMBANGAN ENERGI

Dalam tulisan ini, kesetimbangan energi dari tungku dihitung berdasarkan hal yang sama dengan yang dikemukakan oleh Rosen and Lee (2009) [12] yaitu: *Energi masuk sistem tungku = Energi keluar sistem tungku*.

Terdapat beberapa perbedaan banyaknya energi yang diperhitungkan yang disesuaikan dengan jenis bahan bakar dan rancangan tungku. Dimana jenis bahan bakar yang dipakai adalah briket dengan bahan batubara yang telah mengalami proses aglomerasi air-minyak sawit [9, 13-15]. (Lihat tabel 1)

Adanya uap air atau kandungan air dalam bahan bakar sangat berpengaruh terhadap perhitungan kesetimbangan energi. Beberapa faktor yang berkontribusi terhadap kehadiran uap air dalam proses pembakaran dan kehilangan energi yang dihasilkan, termasuk dari pembakaran hidrogen dalam bahan bakar, uap air hadir dalam bahan bakar, dan uap air yang ada di suplai udara pembakaran [16]. Uap air yang ada pada suplai udara pembakaran tidak diperhitungkan karena lebih kecil dibandingkan dengan banyaknya kadar air yang ada di briket batubara hasil proses pencucian air-minyak sawit.

Sehingga persamaan kesetimbangan energi dapat ditulis sebagai:

$$Q_{\text{masuk}} = Q_{\text{keluar}}$$

Atau:

$$Q_{\text{masuk}} (\text{energi hasil pembakaran bahan bakar}) = Q_{\text{keluar}} (\text{kerugian energi dan energi terserap})$$

Dimana:

$$Q_{\text{masuk}} = \text{Energi bahan bakar briket} = Q_{\text{br}}$$

$$Q_{\text{keluar}} = Q_{\text{sf}} + Q_{\text{mh}} + Q_{\text{mf}} + Q_{\text{bp}} + Q_{\text{kr}} + Q_{\text{al}} \text{ (kJ)}$$

Q_{sf} = energi yang hilang akibat gas buang (*dry flue gas*)

Q_{mh} = energi untuk menghilangkan kadar air dari pembakaran hidrogen

Q_{mf} = energi untuk menghilangkan kadar air yang ada pada bahan bakar

Q_{tabp} = energi yang diserap batu tahan api dan plat baja tungku

Q_{tup} = energi yang hilang melalui tutup tungku

Q_{kr} = energi yang diserap pada krusibel

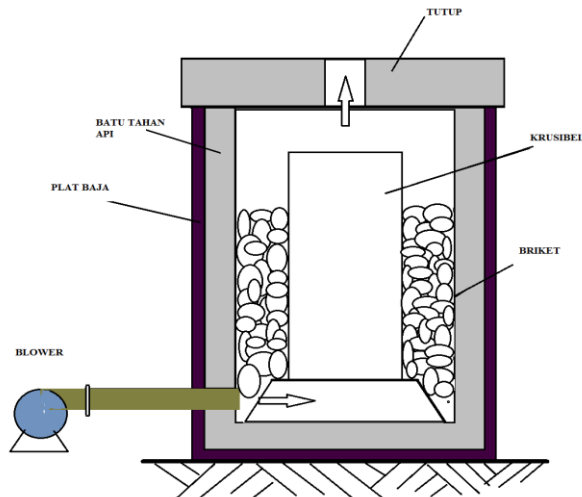
Q_{al} = energi yang dibutuhkan untuk peleburan sekrap aluminium

Tabel 1: Perbandingan Dasar Briket Aglomerat

Kode	Proksimat (%) [9]					Ultimat (%)					
	Kadar Air	Volatile Matter	Abu	Karbon Tertam bat	Nilai Kalori (kJ/kg) [9]	C	H	O	N	S [9]	Temperatur (°K) [9, 10]
SA60P10C15	0,49	20,3	4,79	74,42	33.973	86,9	5,24	5,09	1,23	1,54	1114
SAtc	0,69	12,45	6,22	80,64	33.038	87,5	3,44	6,01	0,98	2,07	973
B60P20C15	1,05	32,52	6,04	60,39	34.911	81,2	7,05	8,12	1,87	1,74	1160
Btc	0,33	20,45	13,32	65,9	31.819	82,5	6,82	7,43	1,42	1,86	1105
SB60P20C5	5,5	46,01	4,16	44,33	28.312	71,7	8,62	18,5	0,93	0,29	1155
SBtc	3,58	43,65	6,5	46,27	27.038	71,8	7,8	17,4	2,71	0,32	878

Keterangan:

- SA60P10C15 adalah Batubara Semi Antrasit ukuran 60 mesh, P adalah jumlah padatan batubara (10 gram batubara per 100 gram air, dengan persentase ditentukan 10%), dan C adalah CPO (Crude Palm Oil) adalah jumlah relatif terhadap berat batubara (15%).
- SAtc adalah batubara semi antrasit tanpa cuci.
- B adalah batubara jenis Bituminus, SB adalah batubara jenis Sub Bituminus.



Gambar 1: Bagan Tungku Krusibel

Banyaknya briket yang dapat dimasukkan ke dalam tungku diperhitungkan dari perkalian antara berat jenis briket dengan selisih antara volume dalam tungku dan bagian luar silinder krusibel. Dalam hal ini krusibel diasumsikan berbentuk silinder (lihat gambar 1) (adopsi dari [17]). Besar volume bahanbakar briket yang dapat dimasukkan ke dalam ruang pembakaran berdasarkan tabel 2 adalah

Volume ruang briket: $V_{br} = \frac{\pi}{4} [d_{dt}^2 - d_{dkr}^2] * L_{dt}$, dimana besaran d_{dt} adalah diameter dalam tungku = 0,4 m, d_{dkr} adalah diameter luar krusibel = 0,3 m dan L_{dt} adalah tinggi bagian dalam tungku atau ruang bakar = 0,3 m.

Untuk berat jenis briket rata-rata sebesar 1100 kg/m³, maka berat briket yang dapat dimasukkan ke dalam ruang bakar adalah 18 kg, namun akan dihitung kembali kebutuhan berat briket (m_{br}) dalam proses peleburan sekrap aluminium ini. Dengan catatan bahwa berat briket yang dimasukkan kurang daripada 14 kg karena briket dalam ruang tidak dapat disusun dengan beraturan.

Energi yang dihasilkan dari pembakaran bahanbakar briket.

Energi yang dihasilkan oleh pembakaran bahanbakar untuk tiap jenis batubara hasil proses aglomerasi dapat diperhitungkan:

Q_{br} = Nilai Kalori masing-masing briket (kJ/kg bahanbakar)

Energi yang diperhitungkan ini adalah *Low Heating Value* (LHV) karena masih mengandung kadar air (*moisture*) yang tinggi disebabkan pencampuran air-minyak waktu proses aglomerasi, yang untuk masing-masing briket seperti terlihat pada tabel 1.

Tabel 2: Besaran dan Asumsi Dalam Perhitungan

Spesifikasi				
Bahan Baku Aluminium (non Pure) (Skrap Aluminium)				
Titik Cair (°K) [17], $T_{al933}= 933$	Latent Heat Fusion, [1] $L_{al}= 388$ (kJ/kg)	Berat Jenis = 2700 (kg/m ³) [7][12]	Specific Heat, C_p (kJ/kg°K) [18] $C_{p1}= 0,903$ (T_{amb}) $C_{p2}=1,2$ (Temp titik lebur)	
Udara dan Flue Gas				
Temperatur Ambient (asumsi) $T_{amb}= 313$ (°K)	Temperatur Flue Gas (asumsi), $T_{flue}= 550$ (°K)	Specific Heat, [18] $C_{p3}= 1,040$ (kJ/kg °K) pada temp 550°K	Enthalpy, [19] $h_g=3110,2$ (kJ/kg)pada 550°K	Enthalpy, [19] $h_f=157,84$ (kJ/kg) pada 313°K
Koefisien dan dimensi untuk material Tungku dan krusibel				
Konduktifitas Thermal bata tahan api [20] $k_{ta}= 5,04$ (kJ/jam.m°K)(dinding) $k_{tup}= 4,9$ (kJ/jam.m°K) (tutup tungku).		Panas Jenis Krusibel Baja Karbon (1,5 % C), $C_p= 0,486$ kJ/kg °K [20] Berat Jenis, $\rho= 7753$ kg/m ³ [20] $k_{kr}= \text{konduktifitas termal}= k_{pb}111,6$ (kJ/jam.m°K) [21]		
Radius luar tungku: $r_{lta}= 0,3$ m.		Radius luar krusibel: $r_{lkr}= 0,15$ m		
Radius dalam tungku, $r_{dta}= 0,2$ m.		Radius dalam krusibel: $r_{dkr}= 0,12$ m		
Tebal batu tahan api tungku = $L_{ta}= 0,05$ m		Tinggi krusibel: $L_{kr}= 0,3$ m		
Tebal tutup tungku: $L_{tup}= 0,1$ m		Tebal Dasar: 0,01 m		

Energi yang hilang akibat gas buang (dry flue gas)

Perhitungan ini dikaitkan dengan massa udara atau suplai udara yang diberikan ke dalam sistem tungku, sehingga diperlukan perhitungan besarnya suplai udara lebih. Keating (2007) [16] menyatakan bahwa untuk bahanbakar yang bahan dasarnya dari *pulverized coal*, maka udara lebih (*excess air*) yang disuplai ke sistem pembakaran antara 15 s.d 20%. Untuk ini diambil sebesar 15%, sehingga udara lebihnya adalah $= \frac{0_2\%}{21\% - 0_2\%} \times 100\% = 250\%$ [22].

Secara teoritis, udara yang diperlukan untuk pembakaran yang sempurna bergantung dari perbandingan antara berat udara dan bahan bakar, yaitu = 1. Telah dipahami bahwa untuk membakar bahanbakar padatan diperlukan suplai udara lebih. Untuk pembakaran yang sempurna bagi batubara diperlukan udara sekitar 7 s.d 8 kg udara [23], dan hal ini disebut sebagai udara stoikiometri. Dalam pelaksanaannya, suplai udara didapat dari hembusan *blower*.

Dengan demikian, total udara yang disuplai ke dalam sistem tungku adalah $8 \text{ kg} \times (1 + 2,5) = 28 \text{ kg/kg}$ bahanbakar. Diasumsikan bahwa temperatur gas buang (*flue gas*) diperhitungkan dengan besaran yang tetap yaitu 550°K , dimana asumsi ketetapan temperatur ini diberlakukan sama untuk semua jenis briket didapat dengan cara mengatur besaran dimensi lubang keluar *flue gas* dengan cara buka tutup dengan menggunakan plat dan dikontrol dengan termokopel, sehingga:

$$\begin{aligned} Q_{sf} &= \text{k calor yang hilang akibat gas buang [16, 24],} \\ &= m_{\text{udara}} \times C_{p3} \times (T_{\text{flu}} - T_{\text{amb}}) \quad (\text{kJ/kg bahanbakar}) \\ &= 28 \times 1,040 \times (550 - 313) \quad (\text{kJ/kg bahanbakar}) \\ &= 6901,44 \quad (\text{kJ/kg bahanbakar}) \end{aligned}$$

Kalor untuk menghilangkan kadar air dari pembakaran hidrogen

Q_{mh} = kalor untuk menghilangkan kadar air dari pembakaran hidrogen [16]

$$Q_{mh} = \frac{9 \times H}{100} \times (h_g - h_f) \quad (\text{kJ/kg bahanbakar})$$

Dimana:

H = Hidrogen analisa ultimat yang besarannya berbeda untuk tiap jenis briket (tabel 1).

h_g = entalpi uap panas lanjut pada tekanan rendah [19]

h_f = entalpi jenuh pada temperatur suplai udara [19]

Sehingga:

$$Q_{mh} = 265,7 \times H \quad (\text{kJ/kg bahanbakar})$$

Hasil perhitungan Q_{mh} untuk tiap macam briket dapat dilihat pada tabel 3.

Kalor untuk menghilangkan kadar air yang ada pada bahan bakar

Q_{mf} = kalor untuk menghilangkan kadar air yang ada pada bahanbakar

$$[16]. Q_{mf} = \left(\frac{M_{1/100}}{1 - M_{1/100}} \right) \times (h_g - h_f) \quad (\text{kJ/kg bhnbakar})$$

Dimana:

M_1 = kadar air untuk tiap briket yang berbeda (analisa proksimat) (tabel 1).

$$Q_{mf} = 2952,4 \times \left(\frac{M_{1/100}}{1 - M_{1/100}} \right) \quad (\text{kJ/kg}$$

bahanbakar) Hasil perhitungan Q_{mf} untuk tiap macam briket dapat dilihat pada tabel 3.

Energi yang diserap batu tahan api dan plat baja tungku.

Q_{tapb} = energi yang diserap batu tahan api dan plat baja tungku.

Energi yang diserap batu tahan api dan plat baja tungku diperhitungkan atas kehilangan energi secara konveksi dan konduksi. Mempertimbangkan ruang bakar berisi briket batubara yang menghambat aliran udara suplai, maka sulit untuk mengategorikan aliran fluida sebagai udara yang mengalir baik secara laminar maupun turbulen. Untuk itu, maka dalam perhitungan konveksi, koefisien pindahan konveksi ruang bakar (h_{rb}) diambil sebesar $250 \text{ W/m}^2\text{K}$ atau $900 \text{ kJ/m}^2\text{.jam.}^\circ\text{K}$ untuk jenis aliran paksa [19]. Untuk itu diperhitungkan energi yang hilang secara konveksi akibat pergerakan udara panas ini. Dinding utama tungku atau ruang bakar direncanakan dari bahan tahan api yaitu susunan batu tahan api setebal 10 cm yang direkat dengan semen tahan api. Sedangkan, di bagian luarnya dipakai plat baja tipis dengan ketebalan 2 mm. Untuk kehilangan energi secara konduksi maka diperhitungkan karena adanya batu tahan api dan plat baja tipis ini. Kehilangan energi konveksi di bagian luar tungku tidak diperhitungkan karena diasumsikan udara luar tungku tidak bergerak mengalir.

Besarnya tahanan energi konveksi dan konduksi untuk bahan tungku yang terbuat dari batu tahan api dan plat baja tipis:

$$X_{tapb} = \frac{1}{2\pi * r_{lta} * L_{ta} * h_{rb}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{lta}}{r_{dta}}\right)}{2\pi * L_{ta} * k_{ta}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{ltpb}}{r_{dtpb}}\right)}{2\pi * L_{tpb} * k_{tpb}}$$

Dimana:

r_{lta} = Radius luar tungku batu tahan api

r_{dta} = Radius dalam tungku batu tahan api

L_{ta} = Tebal tungku batu tahan api

k_{ta} = Konduktifitas batu tahan api [21]

k_{tpb} = Konduktifitas plat baja [21]

Sehingga:

$$X_{tapb} = 0,0274$$

Sehingga kehilangan besar energi akibat konveksi dan konduksi ini atau energi yang diserap batu tahan api dan plat baja tungku adalah

$$Q_{tapb} = \frac{(T_{br} - T_{amb})}{X_{tapb}}$$

T_{br} adalah temperatur briket untuk tiap-tiap macam batubara hasil proses aglomerasi seperti pada tabel 2.

Sehingga:

$$Q_{tapb} = 36,5 \times (T_{br} - 313) \text{ (kJ/jam)}$$

Hasil perhitungan energi yang diserap batu tahan api dan plat baja seperti pada tabel 3.

Kehilangan kalor melalui tutup tungku.

Tutup tungku dibuat dari campuran semen batu (*concrete cement*).

Besarnya tahanan kalor konveksi dan konduksi untuk tutup tungku:

$$X_{ttp} = \frac{1}{A_{ttp} * h_{rb}} + \frac{L_{ttp}}{A_{ttp} * k_{ttp}}$$

Dimana:

$$A_{ttp} = \text{luas tutup tungku} \\ = 0,12 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$k_{ttp} = \text{koefisien konduksi [21]}$$

Sehingga:

$$X_{ttp} = 0,18.$$

Sehingga kehilangan kalor melalui tutup tungku:

$$Q_{ttp} = \frac{(T_{br} - T_{amb})}{X_{ttp}} \text{ (kJ)} \\ = 5,56 \times (T_{br} - 313) \text{ (kJ/jam)}$$

Hasil perhitungan energi yang diserap tutup tungku seperti pada tabel 3.

Energi yang dibutuhkan untuk peleburan skrap aluminium

Peleburan aluminium memerlukan tiga tahapan yaitu tahap pemanasan menjelang proses perubahan padat menjadi cair (temperatur 313 ke 933°K), proses perubahan padat menjadi cair (dari solid 933°K ke cair atau lebur 933°K) dan pemanasan untuk penuangan (dari 933°K ke titik tuang 1023°K).

Temperatur lebur aluminium adalah 933°K [17], namun untuk mengatasi kekentalan (solidifikasi) yang cepat, maka diambil temperatur yang lebih besar yaitu 1023°K [8] dengan pertimbangan bahwa skrap aluminium yang terdiri dari bermacam paduan tidak diketahui jenis atau paduan yang terkandung sebenarnya serta utamanya untuk menjaga temperatur menjelang penuangan untuk skrap aluminium.

Latent heat Fusion adalah kalor yang diserap sebagai suatu perubahan fasa dari liquid ke solid atau sebaliknya pada proses temperatur konstan.

Total energi yang diperlukan untuk melebur skrap aluminium:

$$Q_{al} = m_{al} \times [L + C_{p1} (T_{al933} - T_{amb}) + C_{p2} (T_{al1023} - T_{al933})]$$

Dimana:

m_{al} = berat sekrap aluminium didalam krusibel
volume krusibel x berat jenis.

$$= (0,0195 \text{ m}^3) \times (2700 \text{ kg/m}^3)$$

$$= 52,65 \text{ kg.}$$

Diambil: 50 kg.

L_{al} = Latent Heat Fusion [17]

C_{p1} = Specific Heat pada temperatur ambient [18].

C_{p2} = Specific heat pada temperatur titik lebur [18].

Sehingga:

$$Q_{al} = 50 * 1055,8 \text{ (kJ)}$$

$$= 52.790 \text{ (kJ)}$$

Perhitungan Waktu Peleburan

Waktu yang diperlukan untuk melebur sekrap aluminium dapat diperhitungkan dengan cara sebagai berikut:

t = waktu lebur

$$= \frac{Q_{al}}{Q_{kr}} \text{ (jam)}$$

$$= \frac{52790}{216,92 * (T_{br} - 1023)} \text{ (jam)}$$

$$= \frac{243,4}{(T_{br} - 1023)} \text{ (jam)}$$

Dengan demikian, waktu untuk peleburan skrap aluminium untuk masing-masing briket dapat dihitung dengan masing-masing temperatur briket. Hasil perhitungan dapat dilihat pada tabel 3.

Perhitungan Banyaknya Briket untuk Peleburan

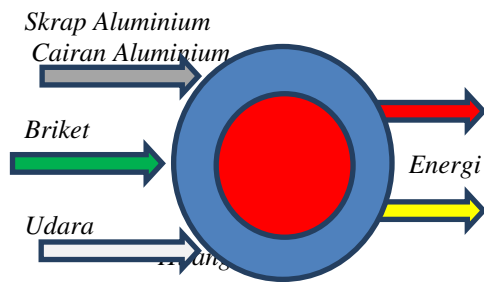
Berat briket masing-masing jenis yang diperlukan untuk peleburan skrap aluminium dapat dihitung dengan:

$$m_{br} = \frac{(Q_{tapb} + Q_{kr} Q_{kr}) * t + Q_{al}}{Q_{br} - (Q_{sf} + Q_{mh} + Q_{mf})} \text{ (jam)}$$

Hasil perhitungan dimasukkan ke dalam tabel 3.

Analisa Efisiensi Tungku

Perhitungan ini menunjukkan tingkat daya guna tungku dalam proses peleburan. Efisiensi 100% akan terjadi bilamana keseluruhan energi yang diberikan ke dalam tungku dapat seutuhnya melebur skrap aluminium. Hal ini tidak akan mungkin tercapai, karena banyaknya kerugian yang harus diatasi oleh sistem pembakaran.



Gambar 2: Ilustrasi energi masuk dan keluar sistem

Tabel 3: Energi untuk Tungku

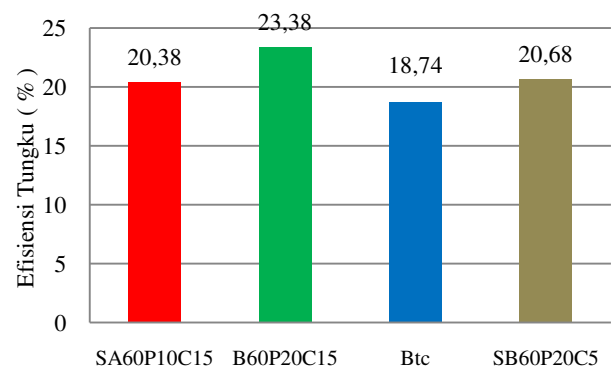
No	Kode	Q _{br} (kJ/kg bhbkr)	Q _{sf} (kJ/kg bhbkr)	Q _{mh} (kJ/kg bhbkr)	Q _{mf} (kJ/kg bhbkr)	Q _{tapb} (kJ/jam)	Q _{ttp} (kJ/jam)	Q _{al} (kJ)	Q _{kr} (kJ/jam)	t (jam)	m _{br} kg
1	SA60P10C15	33973	6901	1392.27	14.54	29236.5	4453.56	52790	19739.72	2.67	7.62
2	SAtc	33038	6901	914.01	20.51	24090.0	3669.60	52790	-	-	-
3	B60P20C15	34911	6901	1873.19	31.33	30915.5	4709.32	52790	29718.04	1.78	6.47
4	Btc	31819	6901	1812.07	9.78	28908.0	4403.52	52790	17787.44	2.97	8.85
5	SB60P20C5	28312	6901	2290.33	171.83	30733.0	4681.52	52790	28633.44	1.84	9.02
6	SBtc	27038	6901	2072.46	109.62	20622.5	3141.40	52790	-	-	-

Dari gambar 2 dapat dijadikan landasan dalam menghitung efisiensi tungku yaitu besarnya energi masuk dan energi keluar. Skrap aluminium dan udara masuk kedalam sistem dalam kondisi temperatur ambient, jadi tidak membawa energi, pada sisi keluar terbagi dua yaitu cairan aluminium yang berguna dan energi hilang dan terserap adalah merupakan rugi-rugi.

Sehingga dengan demikian efisiensi tungku dapat diperhitungkan dengan cara seperti berikut:

$$\% = \frac{Q_{al}}{Q_{br} * m_{br}}$$

Dengan memasukkan besaran-besaran Q_{al}, Q_{br} dan m_{br} yang terdapat pada tabel 3, maka masing-masing efisiensi tungku dapat dihitung dan hasilnya terdapat pada gambar 3.



Gambar 3: Efisiensi Tungku untuk berbagai briket

KESIMPULAN

Dapat disimpulkan bahwa energi yang diserap oleh krusibel untuk SA_{tc} dan SB_{tc} bernilai negatif. Hal ini karena temperatur briket SA_{tc} = 973 °K dan SB_{tc} = 878 °K, dan keduanya ini lebih rendah dari temperatur sekrap aluminium = 1023 °K. Dengan demikian energi yang diberikan oleh briket hanya banyak diserap bagian-bagian dari tungku tanpa mampu melebur sekrap aluminium di dalam krusibel. Kedua jenis briket ini bukan briket hasil pencucian (tc = tanpa cuci).

Efisiensi tungku menunjukkan kemampuan tungku melebur sekrap aluminium

berdasarkan perbandingan antara banyaknya energi yang diperlukan untuk melebur sekrup aluminium dengan energi yang disuplai briket, Hal yang sama ditunjukkan oleh Rosen and Lee (2009) dengan menghitung efisiensi tungku.

Efisiensi tertinggi dicapai B60P20C15, begitu juga dengan berat briket yang dimasukkan ke dalam ruang bakar sebesar 6,47 kg relatif lebih sedikit dengan jenis briket lainnya. Sedangkan terkecil tungku krusibel dengan batubara tanpa cuci jenis bituminus. Hal ini menunjukkan bahwa proses pencucian untuk batubara bituminus telah menaikkan efisiensi tungku, namun begitu juga dengan jenis batubara lainnya. Dengan temperatur penyalan yang tertinggi yaitu 1160 °K dapat dikatakan bahwa temperatur mempunyai faktor yang berpengaruh, juga demikian halnya bilamana dibandingkan dengan nilai kalorinya (lihat tabel1). Dalam hal ini dapat dipahami bahwa peningkatan temperatur hasil pencucian telah dapat meningkatkan efisiensi tungku. Membandingkan tungku krusibel ini dengan tungku lainnya, maka dapat dilihat bahwa berdasarkan [22], maka untuk batch type 813 s.d 1253°K dengan efisiensi termal berkisar antara 10 s.d. 30%, sehingga tungku krusibel ini mempunyai efisiensi yang cukup baik. Rosen and Lee [12], menghitung besarnya efisiensi yang didapat 10% untuk tungku peleburan berbahan bakar gas alam.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 13 Tahun 2012 Tentang Pedoman Pelaksanaan *Reduce, Reuse, Dan Recycle* Melalui Bank Sampah [Http://jdih.menlh.go.id/](http://jdih.menlh.go.id/), Diakses 27 Desember 2014
- [2] European Aluminium Association and Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters, 2006, Aluminium Recycling in Europe, The Road to High Quality Products, EAA/OEA Recycling Division, Brussels. <http://recycling.world-aluminium.org/uploads/media/fl0000217.pdf>. Diakses 27 Desember 2014.
- [3] Pugaa, H., J. Barbosaa, D. Soaresa, F. Silvaa, and S. Ribeirob, 2009, Recycling of aluminium swarf by direct incorporation in aluminium melts, *Journal of Materials Processing Technology*, 5195–5203.
- [4] Jolly,. Mark and Xiaojun Dai, Energy efficiency improvement by implementation of the novel CRIMSON aluminium casting process, The Minerals, Metals and Materials Society 2011 Annual Meeting and Exhibition-TMS 2011. Energy Technology 2011: Carbon Dioxide and Other Green House Gas Reduction and Technology and Waste Heat Recovery, 27 February–3 March 2011, San Diego, CA, USA, pp 55-64.
- [5] Schröder,. Dominik and Hermann J. Meyer, Aluminium Recycling – Latest plant technology for energy efficiency and environmental protection, Heat Processing, Vulkan-Verlag, 2/2011, Essen-Germany.
- [6] Global Aluminium Recycling: A Cornerstone of Sustainable Development , ©2009 International Aluminium Institute , INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE , European Aluminum Association, Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters, http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2013/01/15/fl0000181.pdf, diakses pada 27 Desember 2014.
- [7] Totten, George E and D .Scott Mackenzie, 2003. Handbook of Aluminium: Volume 1 - Physical Metallurgy and Process, Marcel Dekker, Inc, New York. page 7, 37
- [8] Dispinar, Derya., and John Campbell, 2007. Effect of casting conditions on aluminium metal quality, *Journal of Materials Processing Technology* 182 (2007) 405–410.
- [9] Nukman, 2007, Proses Aglomerasi Air-Minyak Sawit untuk Menurunkan Kadar Abu dan Sulfur serta Meningkatkan Nilai Kalori Batubara Semi Antrasit, Bituminus dan Sub Bituminus, Disertasi Program Doktor Universitas Indonesia.
- [10] Dekomposisi Volatile Matter dari Batubara Tanjung Enim dengan Menggunakan Alat Thermogravimetry Analyzer (TGA). Jurnal MAKARA seri Teknologi, Volume 12, Nomor 2, Nopember 2008, , ISSN 1693-6698, Halaman 66-69.
- [11] Unit 3 Types Of Fuels And Their Characteristics, <http://www.ignou.ac.in/upload/unit-.pdf>, page 42, diakses 27 Desember 2014.
- [12] Roosen,. Marc A., Dennis L. Lee, 2009, Exergy-based Analysis and Efficiency Evaluation for an Aluminium Melting Furnace in a Die-casting Plant, Proceedings of the 4th IASME / WSEAS International Conference on ENERGY & ENVIRONMENT (EE'09),<http://www.wseas.us/e-library/conferences/2009/cambridge/EE/EE22.pdf> , diakses pada 27 Desember 2014.
- [13] Nukman dan Suhardjo Poertadji, 2007, Peningkatan nilai kalori batubara semi antrasit dengan aglomerasi air-minyak sawit, Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, POROS, Volume 10, Nomor 3, Juli 2007, ISSN 1410-6841, Halaman 178-186.
- [14] Nukman dan Suhardjo Poertadji, 2006, Metode Aglomerasi Air-Minyak Sawit

- untuk menurunkan kadar Sulfur pada batubara Bituminus, Jurnal Teknologi, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Edisi No. 4, Tahun XX, Desember 2006, ISSN 0215-1685, Halaman 279-286.
- [15] Nukman dan Suhardjo Poertadji, 2006, Pengurangan Kadar Abu dan Sulfur pada Batubara Sub Bituminus dengan metode aglomerasi air-minyak sawit, Jurnal Sains Materi Indonesia, Volume 7, Nomor 3, Juni 2006, ISSN 1411-1098, Halaman 31-36.
- [16] Keating, Eugene L., 2007, Applied Combustion, second edition, CRC Press-Taylor & Francis Group, pages 228, 239, 240, 243.
- [17] Crucible furnace,
http://materialrulz.weebly.com/uploads/7/9/5/1/795167/crucible_furnace__some_more.pdf - diakses 31 Desember 2014.
- [18] Beeley, Peter, 2001, Foundry Technology, Butterworth-Heinemann, Oxford. Page 488
- [19] Incropera, Frank P., David P. Dewitt, Theodore L. Bergman, and Adrienne S. Lavine, 2007, Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley & Sons, Inc, page 929, 941
- [20] Moran, Michael J., and Howard N. Shapiro, 2006, Fundamentals of engineering thermodynamics, SI version-5th ed, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, England, pages 47, 772
- [21] Holman, J.P, 1992, Heat Transfer in S.I Units, McGraw-Hill Book Company, London. page 651, 654
- [22] [Http://www.beeindia.in/energy_managers_auditors/documents/guide_books/2Ch4.pdf](http://www.beeindia.in/energy_managers_auditors/documents/guide_books/2Ch4.pdf), pages 99, 100, diakses 28 Desember 2014.
- [23] Bureau of Energy Efficiency, Fuels And Combustion,
http://www.beeindia.in/energy_managers_auditors/documents/guide_books/2Ch1.pdf, page 22, diakses 28 Desember 2014.
- [24] Bureau of Energy Efficiency, Fuels And Combustion,
http://www.beeindia.in/energy_managers_auditors
- /documents/guide_books/4Ch1.pdf, page 16, diakses 28 Desember 2014.