

# SURVEI TEKNOLOGI PENYORTIRAN DAN PENGHILANG PENGOTOR DALAM MENINGKATKAN DAUR ULANG ALUMINIUM

Benediktus Ma'dika

Teknik Metalurgi dan Material UI

Jalan Professor Doktor Miriam Budiardjo, Srengseng Sawah, Jakarta Selatan, INDONESIA

benidictinem@gmail.com

## Abstrak

Limbah aluminium di Indonesia terus meningkat dari tahun ke tahun. Masalah ini perlu ditangani dengan cara melakukan daur ulang terhadap limbah tersebut. Daur ulang aluminium memiliki sejumlah manfaat bagi lingkungan dan keuntungan ekonomi. Melihat dari sisi energi dan penghematan biaya, banyak produsen saat ini menargetkan untuk meningkatkan penggunaan bahan sekunder (*secondary materials*). Namun demikian, akumulasi pengotor dalam bahan sekunder menjadi penghalang yang signifikan untuk mencapai tujuan tersebut. Banyak studi dan literatur menunjukkan bahwa akumulasi elemen yang tidak diinginkan menjadi masalah dalam kasus daur ulang aluminium. Penghilangan elemen yang tidak diinginkan dalam berkas scrap ditentukan oleh pertimbangan energi dari proses peleburan. Jika dibandingkan dengan logam-logam lain, elemen pengotor pada aluminium sangat sulit untuk disepariasi. Oleh karena itu, tanpa solusi termodinamika sederhana produsen harus merancang strategi selama proses produksi untuk mengurangi akumulasi pengotor. Terdapat berbagai solusi untuk menangani akumulasi elemen yang tidak diinginkan. Masing-masing solusi menyajikan *trade-off* antara biaya dan kemanjuran (*tramp removal*). Pengenceran primer adalah solusi yang paling umum digunakan dalam industri saat ini namun memiliki dampak negatif dalam hal laju daur ulang dan kualitas yang diharapkan. Oleh karena itu, artikel ini memberikan ikhtisar tentang perluasan teknologi mutakhir untuk skala industri dan laboratorium dalam memfasilitasi daur ulang dan kemurnian scrap aluminium.

**Kata Kunci :** Aluminium, Akumulasi pengotor, Daur Ulang, Teknologi Pemutakhiran

## I. PENDAHULUAN

Dilihat dari sisi produksinya, industri aluminium di Indonesia terus meningkat dari tahun ke tahun. Produksi aluminium sheet meningkat menjadi sebesar 61,9 ribu ton pada 2008 dibandingkan dengan 2004 masih 54,4 ribu ton. Demikian halnya dengan produksi aluminium foil dari sebesar 13,2 ribu ton pada 2004, naik menjadi sebesar 13,6 ribu ton pada 2008 [1]. Namun demikian, kita tidak menyadari bahwa aluminium sekunder atau bekas yang merupakan material sisa dari penggunaan masyarakat Indonesia terus meningkat pula dan jarang untuk dimanfaatkan kembali karena kesulitan dalam menghilangkan pengotornya. Oleh karena itu, untuk mendapatkan keuntungan dari aluminium bekas tersebut perlu ditemukan suatu metode yang bisa mengubahnya menjadi material yang bisa dimanfaatkan kembali. Metode yang bisa menangani masalah itu adalah perluasan teknologi mutakhir dalam proses daur ulang aluminium sekunder atau bekas.

Daur ulang aluminium memiliki sejumlah manfaat bagi lingkungan dan manfaat ekonomi. Dibandingkan dengan bahan lain, produksi aluminium memiliki perbedaan energi terbesar antara produksi primer dan sekunder: 186 Megajoule/kg untuk primer dan 10-20 Megajoule/kg untuk sekunder [2]. Dengan meninjau penghematan

energi dan biaya, banyak produsen saat ini memiliki target untuk meningkatkan penggunaan bahan sekunder. Namun demikian, akumulasi pengotor dalam berkas material yang didaur ulang menjadi penghalang jangka panjang yang cukup signifikan untuk mencapai tujuan tersebut [3].

Banyak penelitian dan literatur menunjukkan bahwa akumulasi unsur pengotor menjadi masalah dalam daur ulang material yang didaur ulang. Dalam kasus aluminium, kotoran yang problematik biasanya berupa Si, Mg, Ni, Zn, Pb, Cr, Fe, Cu, V, dan Mn [4]. Daur ulang logam adalah proses metalurgi dan oleh karena itu diatur oleh hukum termodinamika. Penghilangan elemen yang tidak diinginkan dalam berkas scrap ditentukan oleh pertimbangan energi peleburan. Dibandingkan dengan logam lain, aluminium memberikan tingkat kesulitan yang tinggi dalam menghilangkan elemen pengotor yang disebabkan oleh masalah termodinamika. Oleh karena itu, tanpa solusi termodinamika yang sederhana, produsen harus merancang rencana strategis selama proses produksi untuk memantau akumulasi elemen yang tidak diinginkan.

Ada berbagai solusi untuk mengatasi akumulasi unsur-unsur pengotor. Masing-masing menyajikan *trade-off* antara biaya dan potensi peningkatan pemanfaatan scrap (daur ulang).

Pengenceran primer adalah solusi yang paling umum digunakan dalam industri saat ini tetapi memiliki dampak negatif dalam hal laju daur ulang dan kualitas yang diharapkan. *Down-cycling* adalah metode di mana material didaur ulang menjadi produk yang bernilai lebih rendah. Metode ini umumnya digunakan untuk menangani bahan-bahan sekunder yang terkontaminasi oleh pengotor. Selain itu, metode ini juga memungkinkan penggunaan skrap yang lebih tinggi dapat didaur ulang namun berdampak negatif terhadap *recycling economics*. Contoh spesifik dari *down-cycling* adalah penggunaan skrap tempa dalam produk cor karena memiliki kemampuan untuk mengakomodasi kontaminasi silikon yang tinggi.

Artikel ini bertujuan untuk memberikan gambaran tentang teknologi mutakhir yang memiliki dua mekanisme utama yaitu (1) pemisahan secara fisika aliran berkas skrap padat untuk mencegah pencampuran logam dan (2) penyempurnaan teknologi penghilang elemen yang tidak diinginkan dalam cairan secara kinetika dan kimiawi.

## II. TEKNOLOGI PRA-PENCAIRAN UNTUK TAHAP PEMISAHAN FISIKA

Teknologi pemisahan fisik dapat diaplikasikan ke berbagai rana berkas skrap. Biasanya digunakan untuk skrap yang telah dihancurkan [5]. Sebelum menggunakan teknologi mutakhir pemisahan fisika yang dijelaskan dibawa ini, terdapat pemisahan umum yang didasarkan pada ukuran partikel dan sering diaplikasikan dalam berbagai metode skrining (*screening method*). Proses *de-lacquering* juga cukup umum digunakan untuk memanaskan skrap sehingga cat, kertas, label plastik, dan pelapis lainnya dapat dihilangkan.

Berikut diuraikan metode-metode yang dapat dilakukan dalam pemisahan secara fisika.

### i. Pemisahan Magnetik (*Magnetic Separation*)

Pemisahan magnetik adalah cara untuk memisahkan komponen skrap besi dan non-besi. Biasanya, sabuk konveyor dengan material skrap dijadikan umpan didekat dekat sabuk konveyor lain yang dilengkapi dengan magnet NdFeB. Ketika skrap dekat dengan magnet, bagian feromagnetik (terutama baja dan besi) tertarik ke magnet dan kemudian didorong ke sabuk konveyor lain sementara porsi non-besi jatuh ke dalam pembuangan pengotor. Teknologi ini banyak digunakan dalam industri aluminium sekunder. Keterbatasan utamanya adalah bahwa pemisahan

lebih lanjut dari berkas skrap non-besi tidak memungkinkan dan mungkin masih mengandung partikel non-magnetik dari plastik, kaca, karet, baja tahan karat, tembaga, seng, magnesium dll.

### ii. Pemisahan Udara (*Air Separation*)

Teknologi yang menggunakan udara untuk memisahkan berkas skrap dikenal dengan beragam nama seperti *windsifting*, *air-knives*, *elutriation*, menampi, kolom udara, dll. Perbedaan penamaan mengacu pada mekanisme kerja yang sedikit berbeda. Sistem sabuk konveyor sering menggunakan pengisap untuk menarik bahan ringan dari *shredded automobile* seperti plastik, karet, dan busa. Komponen-komponen ringan ini sering disebut sebagai "*shredder residue*" dan biasanya dibuang [6]. Dalam sistem pemisahan udara secara vertikal, berkas material yang didaur ulang diberi umpan melalui kolom vertikal sementara itu udara ditiupkan ke atas di dalam kolom. Logam berat berkumpul di bagian bawah kolom dan material ringan lainnya didorong jauh ke atas kolom melalui beragam umpan. Kebanyakan fasilitas *remelter* sekunder menggunakan semacam teknik pemisahan udara untuk membentuk berkas skrap logam besar. Kekurangan utamanya adalah hilangnya produk logam ringan seperti kaleng minuman bekas dan potongan partikel yang lebih kecil [7].

### iii. Pemisahan Arus Eddy (*Eddy Current Separation*)

Penggunaan arus eddy menjadi praktik standar industri untuk memisahkan lebih lanjut residu *shredder* otomotif non-besi. Pemisahan arus eddy mirip dengan pemisahan magnetik. Sebuah rotor dibatasi oleh magnet NdFeB dengan kutub utara dan selatan secara bergantian. Rotor menghasilkan medan magnet eksternal yang menolak logam konduktif, nonmagnetik dan logam yang bermuatan listrik. Dengan demikian, partikel yang tidak diinginkan dari berkas skrap dapat meninggalkan partikel non-logam. Medan magnet dapat dikendalikan oleh kecepatan rotor. Arus eddy (i) yang dihasilkan dalam skrap logam diberikan oleh persamaan:

$$i = \frac{(K * v * B) * \sigma * A}{L}$$

A (area *cross-sectional*), L (ketebalan),  $\sigma$  (konduktivitas), B (kerapatan fluks magnetik),  $v$  (frekuensi osilasi), dan  $(K * \beta * B)$ , perbedaan potensial dalam fragmen skrap. Karena teknologi ini bergantung pada gaya tolakan magnetik yang dihasilkan dalam material maka terdapat beberapa bentuk seperti kabel dan foil gagal dipisahkan

karena arus eddy tidak mencukupi. Ekstensi dari teknologi ini berdasarkan fakta bahwa logam dengan berbagai konduktivitas akan menghasilkan arus eddy yang berbeda-beda dan oleh karena itu akan terlempar ke jarak yang berbeda-beda. Dengan mengatur tempat koleksi pengotor di jarak yang berbeda-beda dari rotor, maka berkas skrap dapat dipisahkan oleh logam dasar.

iv. *Sink Float Separation*

Pemisahan *Sink Float* menggunakan sluri berbasis air dengan bantuan gravitasi untuk memisahkan material non-besi yang massa jenisnya berbeda-beda. Sebagai contoh, dalam kasus berkas skrap otomotif *shredded*, banyak komponen memiliki kerapatan yang berbeda sehingga *Sink float separation* bisa diaplikasikan dengan baik dalam teknologi ini. Beberapa kekurangan dari teknologi ini termasuk biaya tinggi dalam pemeliharaan kekonstanan densitas cairan serta kehilangan komponen logam berongga (*boat-shaped metal*).

v. *Sortasi warna (by hand and spectrographic technologies)*

Sortasi warna dilakukan berdasarkan perbedaan warna antara skrap untuk memisahkan seng, tembaga, kuningan dan baja tahan karat dari aluminium dalam berkas skrap non-besi. Aplikasi sortasi warna yang paling dasar adalah ketika logam disortir dengan menggunakan tangan. Teknik ini telah menjadi praktek yang lazim di negara-negara dengan biaya tenaga kerja rendah. Telah diperkirakan bahwa pekerja di Cina dapat mencapai akurasi hingga 99% ketika menyortir serpihan otomotif non-besi dengan menggunakan tangan [8] dan juga telah dikutip bahwa penyortiran tangan mampu menyortir fraksi aluminium tempa karena masing-masing memiliki karakteristik permukaan yang khas [9].

Penyortiran warna juga bisa terjadi secara otomatis. Komputer menganalisis gambar setiap skrap berdasarkan rentang warna yang telah ditentukan. Teknologi ini tidak dipengaruhi oleh ukuran partikel atau bentuk skrap sehingga memiliki banyak kekurangan dalam media berat dan pemisahan arus eddy. Untuk memisahkan fraksi logam non-besi lebih lanjut, etsa kimia sering digunakan bersama dengan penyortiran warna. Teknologi ini memiliki kemampuan untuk memisahkan aluminium dari paduannya. Namun demikian, terdapat dua hambatan utama yang ada dalam metode ini yaitu (1) dampak terhadap

lingkungan dan harga bahan etsa yang cukup mahal dan (2) kekasaran permukaan dan pengaruh perlakuan panas dalam pemrosesan dapat mempengaruhi warna skrap.

vi. *Teknik Spektrografi Lain*

Dalam teknologi ini, berbagai macam potongan skrap melewati jajaran sensor yang memicu salah satu dari tiga metode aktivasi utama yaitu sinar-X, fluks neutron, dan pulsa laser. Sumber yang berkaitan mengenai logam yang menghasilkan emisi yaitu fluoresensi sinar-X oleh sinar-X, fluoresensi sinar gamma oleh fluks neutron, dan emisi optik oleh pulsa laser. Spektrum ini dibaca oleh berbagai jenis detektor dan komputer kemudian mengirim sinyal yang diterima selanjutnya sinar tersebut mengirimkan potongan skrap ke tempat yang sesuai. Untuk XRF (*X-ray fluorescence*) rasio spektral material skrap ditentukan sesuai dengan elemen paduan utamanya karena aluminium memiliki karakteristik radiasi yang sangat rendah sehingga tidak dapat dibaca kecuali di dalam kondisi vakum. Studi penerapan XRF secara komersial dalam menyortir telah menunjukkan kemampuannya untuk memisahkan alloy tetapi tidak dapat menspesifikasikan alloy [10]. Aktivasi neutron membutuhkan waktu paparan yang lama terhadap fluks neutron karena intensitasnya yang terbatas sehingga belum bisa dikomersilkan.

Salah satu teknologi khususnya *Laser Induced Breakdown spectroscopy* (LIBS) yang memanfaatkan pulsa laser dan spektroskopi emisi optik telah menunjukkan kemampuannya untuk menyortir aluminium tempa dan aluminium cor. Dalam metode ini, sensor mendeteksi potongan skrap yang mengaktifkan laser pulsa. Laser menumbuk permukaan logam dan menghasilkan emisi atom. Spektrum optik dibaca oleh polikromator dan detektor fotodioda yang mengirim sinyal ke sistem komputer. Sistem itu kemudian mengarahkan potongan skrap ke tempat yang tepat dengan menggunakan lengan mekanik (*mechanical arm*). Sistem lain yang sedang dikembangkan memanfaatkan meja udara (*air table*). Dalam sistem ini detektor mengirimkan sinyal yang dapat memicu semburan udara di bawah skrap besi sehingga mengeluarkannya ke dalam wadah yang sesuai. LIBS memiliki banyak keunggulan dibandingkan teknologi pemisahan saat ini untuk aplikasi otomotif dan *aerospace* karena memiliki kecepatan tinggi dan volume yang besar. LIBS memiliki kemampuan untuk memisahkan paduan tempa dan paduan cor serta dapat menyortir paduan tempa dari kelompok paduan lain [11]. Namun demikian, masih terdapat

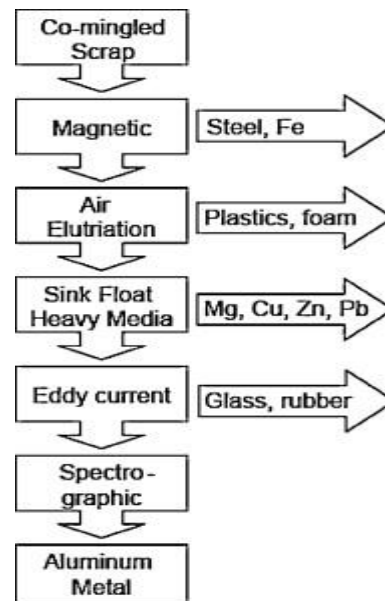
beberapa kelemahan untuk digunakan secara komersial. Puls laser hanya dapat menembus jarak kecil ke permukaan logam, dan oleh karena itu skrap harus bebas dari pelumas, cat, dan pelapis lainnya. Bahkan ketika skrap bersih dari pengotor seperti itu, pembentukan oksida di permukaan juga bisa menyebabkan kesalahan pembacaan.

vii. Hot Crush

Proses *hot crush* adalah metode pemisahan termal-mekanik yang dapat memisahkan paduan aluminium tempa dan cor di industri. Proses ini bekerja berdasarkan temperatur eutektik rendah dari *cast alloy* yang memiliki silikon tinggi. Karena paduan cor memiliki suhu leleh yang lebih rendah daripada paduan tempa, *hoding* atau *saoking* campuran skrap pada suhu di bawah eutektik (~550°C) dapat mengakibatkan melemahnya coran di sepanjang batas butir. penggilingan mekanis berikutnya kemudian menyebabkan paduan tersebut patah dan dapat dipisahkan dari tempa dengan berbagai proses penyaringan berdasarkan ukuran partikel. Efek positif dari tahap pemanasan adalah skrap yang dicat juga mengalami *de-lacquering*. Studi telah menunjukkan bahwa teknologi ini dapat bekerja secara efektif hingga 96% dalam memisahkan berkas campuran aluminium tempa [12].

viii. Ringkasan pemisahan Secara Fisika

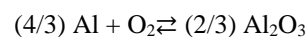
Seringkali, terutama dalam bidang otomotif, pecahan skrap diproses oleh berbagai teknologi pemisahan fisika untuk mendapatkan berkas aluminium skrap yang relatif murni. Teknologi yang digunakan dan urutan penggunaannya bervariasi antara produsen sekunder yang satu dengan yang lainnya. Urutan pemisahan fisik ditunjukkan oleh Gambar 1.



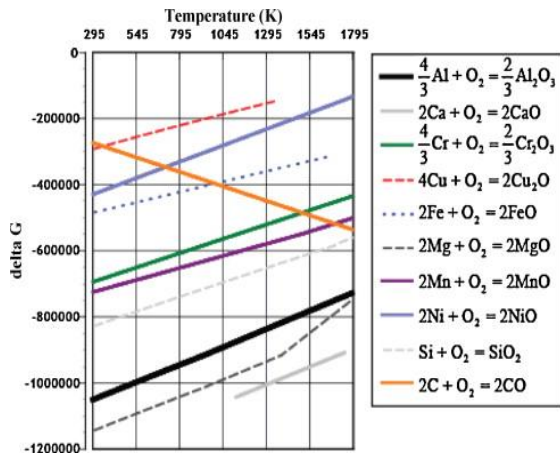
Gambar 1. Diagram Ringkasan Metode Pemisahan Fisika

### III. TEKNOLOGI PELEBURAN DALAM TAHAP PEMURNIAN

*Melting* adalah proses metalurgi dan karena itu diatur oleh hukum termodinamika. Penghilangan elemen yang tidak diinginkan dalam berkas skrap ditentukan oleh pertimbangan energi peleburan. Untuk kasus aluminium, hukum termodinamika untuk menghilangkan sebagian besar elemen pengotor memiliki penghalang yang cukup besar. Gambar 2. menunjukkan Diagram Ellingham untuk reduksi alumina dan perubahan Energi Bebas Gibbs sebagai fungsi temperatur untuk berbagai reaksi oksidasi. Reaksi utama dari pengurangan alumina menjadi logam aluminium adalah garis hitam tebal di tengah Gambar 2. Kita dapat melihat bahwa mayoritas garis keseimbangan berada pada energi bebas yang lebih tinggi daripada aluminium. Hal ini menunjukkan bahwa tidak ada tekanan parsial oksigen yang memungkinkan untuk mengoksidasi aluminium menjadi terak. Reaksi oksidasi logam aluminium ditunjukkan oleh persamaan reaksi berikut:



Peleburan selektif atau *sweating* sering dilakukan untuk memisahkan logam pengotor yang belum dihilangkan dengan teknik pemisahan fisik terutama ketika bagian-bagian logam dilas secara bersama.



Gambar 2. Digram Ellingham untuk Reaksi Oksidasi Beberapa Logam

Berikut beberapa metode yang dipakai untuk tahap pemurnian.

i. Peremajaan (*Fluxing*)

Teknologi paling umum yang bertujuan untuk menghilangkan kotoran dari cairan adalah peremajaan sederhana (*fluxing*). *Fluxing* dilakukan ketika berbagai senyawa (biasanya garam anorganik), bahan kimia, dan gas ditambahkan untuk mengurangi oksidasi dan mendorong unsur-unsur tertentu bermigrasi ketempat pembuangan atau ke lapisan atas lelehan sehingga meningkatkan fluiditas atau *wettability* dari lelehan dan memfasilitasi pemisahan inklusif, menghilangkan gas hidrogen, nitrogen, dan menghilangkan Ca, Sr, Na, Mg, dan Li [13]. Fluks dapat menghilangkan kalsium, magnesium, natrium, dll dari aluminium dengan berperan sebagai katalisis. Fluks kemudian membentuk klorida dan fluorida yang lebih stabil daripada aluminium yang dapat dihilangkan dari cairan melalui proses sedimentasi. Fluks padat yang paling umum digunakan yaitu KCl, NaCl, NaF, AlF<sub>3</sub>, dan MgCl<sub>2</sub> dan penambahan garam fluorida seperti *cryolite*, CaF<sub>2</sub>, dan Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>. Dalam proses ini klorida dan fluorida yang dihasilkan harus disaring dari gas emisi karena menghasilkan gas beracun.

ii. Proses Hoopes

Proses Hoopes merupakan proses pemurnian umum yang terdiri dari tiga lapisan. Ketiganya dipisahkan oleh paduan aluminium – tembaga. Di lapisan paling bawah berfungsi sebagai anoda (lapisan elektrolit cair) dan lapisan atas mengandung aluminium cair yang telah dimurnikan. Skrap aluminium ditambahkan ke lapisan anoda dan dimurnikan ketika elektrolit diangkat ke lapisan

katoda karena pengotor tidak akan bermigrasi. Proses elektrolisis tiga lapis membutuhkan suhu tinggi (700–900 °C) dan energi yang sangat intensif (17–18 kWh / kg).

iii. Elektrolisis Temperatur Rendah

Metode pemurnian elektrolisis suhu rendah (~100°C) telah terbukti menghasilkan aluminium dengan kemurnian 99,89% [14]. Elektrolisis suhu yang rendah dapat menghemat energi selama proses Hoopes. Untuk hal ini, aluminium klorida anhidrat digunakan untuk membentuk cairan ionik yaitu aluminium. Aluminium yang dihasilkan dalam proses ini perlu disempurnakan dan ditempatkan dalam larutan sehingga menjadi anoda. Aluminium yang dimurnikan dielektrodeposisi pada katoda aluminium atau tembaga murni sesuai dengan reaksi elektro-kimia berikut:

- Al paduan (anoda) + 7AlCl<sub>4</sub><sup>-</sup> → 4Al<sub>2</sub>Cl<sub>7</sub><sup>-</sup> + 3e<sup>-</sup>
- 4Al<sub>2</sub>Cl<sub>7</sub><sup>-</sup> + 3e<sup>-</sup> → Al murni (katoda) + 7AlCl<sub>4</sub><sup>-</sup>.

Elektrolisis ini mampu menghilangkan Mn, Fe, Si, Cu, Zn, Ni, dan Pb. Karena cairan ionik stabil pada suhu operasi yang lebih rendah, maka dapat digunakan kembali dalam proses yang sama sehingga membuat proses ini lebih efisien dan ramah lingkungan.

iv. Pemisahan (*segregation*)

Proses segregasi dibagi menjadi dua kategori yaitu solidifikasi tidak langsung dan kristalisasi fraksional. Solidifikasi tidak langsung juga disebut sebagai peleburan zona dimana masih dalam tahap penelitian dan pengembangan namun telah menunjukkan kemampuan untuk memurnikan batang aluminium [15]. Dengan mengontrol pencairan dan pematatan kembali logam secara ketat, teknologi ini menyebabkan elemen pengotor yang tidak diinginkan untuk bermigrasi atau berkonsentrasi di satu tempat. Hal ini dilakukan dengan cara menarik batang aluminium melalui tungku berbentuk cincin secara perlahan-lahan. Saat batang mendingin, kristal yang dimurnikan dari aluminium akan terbentuk dan elemen pengotor akan tetap berada di zona cair. Unsur-unsur pengotor kemudian dapat dikondensasikan di ujung sampel batang kemudian bagian ini dapat dihilangkan. Peleburan zona memiliki rasio pemurnian yang lebih rendah daripada kristalisasi fraksional tetapi beberapa penelitian menunjukkan mungkin lebih cocok untuk digunakan dalam produksi massal [16].

Proses pemurnian kristalisasi fraksional biasanya digunakan untuk menghilangkan kotoran

dari aluminium primer untuk menghasilkan aluminium dengan kemurnian yang tinggi (> 99,97%). Kristalisasi fraksional lebih hemat biaya dibandingkan dengan pemurnian elektrolitit tiga lapisan dan pemurnian zona [17]. Metode kristalisasi fraksional Alcoa telah terbukti menghasilkan aluminium dengan kualitas 3N7 hingga 6N. Aplikasinya dapat berupa disk memori, foil kapasitor, dan aplikasi elektronik lainnya [18]. Dalam proses kristalisasi fraksional, permukaan yang meleleh didinginkan dengan cepat untuk membentuk kristal-kristal aluminium. Kristal yang dimurnikan ini kemudian mengendap di bagian bawah tungku dan cairan yang tersisa terus mengakumulasi kotoran. Aluminium cair yang tersisa (mengandung tingkat kotoran yang tinggi) dikeluarkan dari tungku terlebih dahulu. Material ini disebut sebagai *downgrade*. Kristal yang dimurnikan yang tersisa di bagian bawah tungku kemudian dicairkan kembali dan dihilangkan. Material ini disebut sebagai *upgrade*. Proses ini dapat dilakukan dalam beberapa langkah pemurnian untuk mencapai logam dengan kemurnian tinggi.

Teknologi ini bekerja berdasarkan perilaku termodinamika sistem biner eutektik encer. Khususnya di atas suhu eutektik, material terlarut berwujud cair sementara padatan membentuk aluminium yang memiliki kemurnian tinggi. Kita dapat memperkirakan sejauh mana suatu elemen dapat dihilangkan dengan cara memeriksa diagram fase biner dan menghitung koefisien distribusi termodinamika atau kesetimbangan. Dalam literatur, koefisien distribusi ekuilibrium dihitung dalam dua cara yaitu (1) rasio konsentrasi zat terlarut dalam padatan terhadap konsentrasi zat terlarut dalam cairan atau (2) rasio konsentrasi zat terlarut dalam padatan terhadap konsentrasi awal zat terlarut. Unsur-unsur yang membentuk peritektik dalam diagram fase biner aluminium akan memiliki koefisien distribusi ekuilibrium lebih besar dari Cr, V, Zr, Ti dan karena itu akan terakumulasi di bagian *upgrade* dari lelehan. Kotoran ini harus dihilangkan dari pencairan sebelum proses pemurnian yang biasa dilakukan dengan menggunakan formasi boride. Semakin rendah koefisien distribusi, semakin banyak ketidakmurnian yang akan dipartisi dalam cairan.

v. Teknologi Distilasi

Peningkatan jumlah lithium yang terkandung dalam paduan aluminium (biasanya 2% berat Li) telah memfokuskan metode yang bisa menghilangkan kelebihan lithium dari paduan

tersebut. Distilasi vakum telah diidentifikasi sebagai salah satu dari beberapa teknik yang hemat biaya untuk menghilangkan lithium [19]. Dalam kebanyakan proses distilasi, pencairan logam dilakukan pada suhu terkendali dan tekanan uap. Lelehan ini dibawa ke atas titik didih dari elemen yang akan dihilangkan dan tetap jauh di bawah titik didih aluminium dan beberapa logam lainnya seperti yang ditunjukkan dalam tabel 1.

Logam	Titik didih(° C)	Logam	Titik didih(° C)
Zn	907	Al	2467
Mg	1107	Cu	2567
Pb	1740	Cr	2672
Mn	1962	Ni	2732
Si	2355	Fe	2750

Tabel 1. Titik didih beberapa logam.

Distilasi seng digunakan untuk meningkatkan seng yang mengandung berkas skrap logam dalam industri pengolahan sekunder seng. Namun demikian, untuk menghilangkan seng dari lelehan aluminium masih dalam tahap penelitian dan pengembangan. Koefisien perpindahan massa, *K*, dihitung melalui persamaan berikut.

$$K = \ln\left(\frac{C}{C_0}\right) \frac{V}{At}$$

dimana *C*, konsentrasi seng, *C<sub>0</sub>*, konsentrasi seng awal, *A*, luas permukaan lelehan, *V*, volume lelehan, dan *t*, waktu penahanan. Distilasi memberikan manfaat yang besar dalam pengolahan aluminium karena dapat menghilangkan elemen pengotor dari aluminium dan pengotor tersebut dikumpulkan kembali dengan kemurnian tinggi sehingga bisa digunakan kembali.

#### IV. TEKNOLOGI DALAM TAHAP INKLUSI DAN PENGHILANGAN GAS HIDROGEN

Penghilangan inklusi biasanya dilakukan dengan salah satu dari tiga cara yaitu sedimentasi, flotasi, dan penyaringan.

##### 1. Sedimentasi (*Sedimentation*)

Sedimentasi adalah suatu proses membiarkan partikel inklusi dengan kepadatan tinggi mengendap di bagian bawah tungku pembakaran. Proses ini mungkin memerlukan waktu penahanan peleburan tambahan dan oleh karena itu memerlukan energi dan biaya yang lebih besar. Proses ini juga berlaku untuk setiap logam yang dapat teroksidasi dari lelehan (terutama kalsium dan magnesium). Proses sedimentasi diatur oleh hukum Stokes sehingga

demikian, semakin kecil inklusi, semakin lambat mengendap di dasar tungku. Dengan menggunakan persamaan Navier-Stokes, kita dapat menghitung kecepatan pengendapan dengan menggunakan persamaan berikut

$$V_s = \frac{2(\rho_{partikel} - \rho_{fluida})}{9\mu} gr^2$$

i. Pengapungan (*Flotation*)

Flotasi digunakan untuk menghilangkan hidrogen yang terperangkap dalam lelehan aluminium cor. Hidrogen adalah satu-satunya gas yang memiliki kelarutan dalam aluminium dimana kelarutannya meningkat seiring dengan peningkatan suhu pelelehan. Hal ini yang menjadi penyebab utama porositas dalam coran dan ingot. Untuk proses flotasi, campuran gas klorin dan argon diinjeksikan di bagian bawah lelehan. Ketika gelembung naik, atom hidrogen berdifusi ke permukaan gelembung dan menghasilkan gas hidrogen di dalam rongga gelembung tersebut sehingga menyebabkan gelembung berekspansi. Ketika gelembung mencapai permukaan leleh gas hidrogen dilepaskan. Gelembung juga membantu inklusi padatan lainnya yang memiliki densitas rendah untuk bermigrasi ke lapisan pengotor di permukaan lelehan. Keberadaan klorin dalam gas membantu menghilangkan kotoran alkali.

## V. DISKUSI DAN KESIMPULAN

Perlu dicatat bahwa banyak teknologi yang tidak dibahas di sini karena masih dalam tahap penelitian dan pengembangan. Ketidakpastian seputar peningkatan teknologi ini dikombinasikan dengan teknologi dalam rana yang luas yang sudah siap menyoroiti fakta bahwa model diperlukan agar produsen memilih dengan tepat teknologi mutakhir mana yang dapat memberikan manfaat paling besar dalam hal nilai dan peningkatan pemanfaatan material sekunder untuk keperluan produksi.

Menciptakan model untuk mengeksplorasi isu-isu akumulasi komposisi melalui teknologi mutakhir membutuhkan pemahaman tentang (1) aliran bahan sisa akhir-hidup (*end-of-life*), (2) metode untuk mengevaluasi bagaimana ekonomi produksi dipengaruhi oleh perubahan teknologi, dan (3) bagaimana karakterisasi parameter daur ulang

dimana  $V_s$ , kecepatan pengendapan,  $\rho$ , densitas,  $\mu$ , kecepatan dinamis dari fluida,  $g$ , gravitasi dan  $r$ , jari-jari partikel (dengan asumsi partikel itu bulat). Engh menemukan bahwa untuk inklusi ukuran sekitar 100  $\mu\text{m}$  yang biasanya ditemukan dalam aluminium lelehan kecepatan pengendapannya sangat lambat (~8 cm / menit) sehingga berguna di sebagian besar aplikasi industri.

ii. Filtrasi (*Filtration*)

Filtrasi adalah pemindahan secara mekanis partikel dan inklusi yang tidak diinginkan. Terdapat dua jenis filtrasi yang paling umum digunakan yaitu *cake filtration* dan *deep bed filtration*. Dalam *cake filtration* logam cair dilewatkan melalui filter atau layar kecil yang menyebabkan partikel dan inklusi dihentikan dan mulai terakumulasi menyerupai kue. Ketika bentukan mirip kue ini semakin besar, kemampuan penyaringannya meningkat. Studi telah menemukan bahwa *cake filtration* berhasil menghilangkan inklusi yang lebih besar dari 0,03 cm [20]. Jenis filtrasi yang lebih umum dalam proses pelelehan aluminium adalah *deep bed filtration*. Filter yang lebih besar dengan porositas yang lebih kompleks digunakan dalam proses ini sehingga dapat meningkatkan jalur yang harus dilalui partikel dan inklusi dalam lelehan. Partikel tersebut kemudian terperangkap dalam filter yang disebabkan karena adanya gesekan, kurungan, gaya elektrostatis, dan ikatan kimia.

mempengaruhi akumulasi dalam aliran daur ulang. Masing-masing topik ini telah dieksplorasi di artikel ini dan masing-masing memiliki sejumlah literatur yang sesuai. Analisis aliran material yang melacak potongan aluminium *end-of-life* telah dieksplorasi oleh *International Aluminium Institute* [21] serta perusahaan seperti Alcoa.

Dengan memanfaatkan dan mengembangkan lebih lanjut beberapa teknologi mutakhir yang telah dibahas dalam artikel ini, maka daur ulang aluminium sekunder atau aluminium hasil pakai dapat dilakukan dengan mudah dan efisien. Alhasil, nilai tambah dan keuntungan produksi dari aluminium sekunder ditingkatkan serta dampak negatifnya terhadap lingkungan dapat direduksi.

## REFERENSI

- [1] Informasi dari <http://www.datacon.co.id/Al-Stainless1-2009.html> Diakses pada Minggu, 15 Juni 2018 pukul 01:21
- [2] J.A.S. Green, *Aluminum recycling and processing for energy conservation and sustainability* ASM International, Materials Park, OH, 2007.
- [3] Z.-K. Liu, *Effect of impurities on alloys. I. T. Program, Energy Efficiency and Renewable Energy*, US Department of Energy, Washington, DC, 2003.
- [4] J.-Y. Kim, S.-J. Kim, I.-K. Song, J.-H. Han Aging, *characteristics of recycled ACSR wires for distribution lines* *Electrical insulation conference and electrical manufacturing & coil winding conference*, Rosemont, IL, 1997.
- [5] R.J. Wilson, T.J. Veasey, D.M. Squires, *The application of mineral processing techniques for the recovery of metal from post-consumer wastes* *Minerals Engineering*, 1994.
- [6] A. Gesing, *Recycling light metals from end-of-life vehicles*, *Journal of Materials*, 53 (11), 2001.
- [7] T.J. Veasey, R.J. Wilson, D.M. Squires, *The physical separation and recovery of metals from wastes*, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 1993.
- [8] Minter, *Where America recycles*, The Atlantic, Washington, DC, 2006.
- [9] S.R. Rao, *Resource recovery and recycling from metallurgical wastes*, Elsevier, Oxford, UK, 2006.
- [10] M. Krotkov, I. Satayev, D. Shepelev, *Technology and equipment for X-ray radiometric sorting of secondary metallic raw materials*, XVIII international mineral processing congress, Sydney, Australia 1993.
- [11] A. Gesing, L. Berry, R. Dalton, R. Wolanski, *Assuring continued recyclability of automotive aluminum alloys: grouping of wrought alloys by color, X-ray absorption and chemical composition based sorting* *TMS*, Seattle, WA, 2002.
- [12] J. DeGaspari, *Making the most of aluminum scrap*, *Mechanical Engineering - CIME*, 121 (11), 1999.
- [13] T.A. Utigard, K. Friesen, R. Roy, J. Lim, A. Silny, C. Dupuis, *The properties and uses of fluxes in molten aluminum processing*, *Journal of Materials*, November, 1998.
- [14] V. Kamavaram, D. Mantha, R.G. Reddy, *Electrorefining of aluminum alloy in ionic liquids at low temperatures*, *Journal of Mining and Metallurgy*, 39 (1-2), pp. 43-58, 2003.
- [15] W.H. Sillekens, J.A.F.M. Schade Van Westrum, O.S.L. Bruinsma, B. Behmetaj, M. Nienoord, *Refining aluminum scrap by means of fractional crystallisation: basic experimental investigations*, *Fourth international symposium on recycling of metals and engineered materials*, TMS: The Minerals, Metals, & Materials Society, 2000.
- [16] S.R. Rao, *Resource recovery and recycling from metallurgical wastes*, Elsevier, Oxford, UK, 2006.
- [17] A.I. Kahveci, A. Unal, *Refining of a 5XXX series aluminum alloy scrap by alcoa fractional crystallization process*, *Fourth international symposium on recycling of metals and engineered materials*, TMS: The Minerals, Metals, and Materials Society, 2000.
- [18] A.I. Kahveci, A. Unal, *Refining of a 5XXX series aluminum alloy scrap by alcoa fractional crystallization process*, *Fourth international symposium on recycling of metals and engineered materials*, TMS: The Minerals, Metals, and Materials Society, 2000.
- [19] S.R. Rao, *Resource recovery and recycling from metallurgical wastes*, Elsevier, Oxford, UK, 2006.
- [20] F. Frisvold, T.A. Engh, S.T. Johansen, T. Pedersen, *Removal of inclusions - a survey and comparison of principles*, TMS: The Minerals, Metals, and Materials Society, 1992.
- [21] U.J.M. Boin, M. Bertram, *Melting standardized aluminum scrap: a mass balance model for Europe*, *Journal of Materials*, 57 (8), pp. 26-33, 2005.