

ULASAN KAEDAH KITAR SEMULA SISA BATERI

Farhah Abdillahil Muktamin^a, Goh Choo Ta^{a*}, Mazlin Mokhtar^c
Mohd Rozaimi Ariffin^b

^aInstitut Alam Sekitar dan Pembangunan (LESTARI), Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM), 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

^bPusat Pengajian Sains Pembangunan dan Persekitaran
Fakulti Sains Sosial dan Kemanusiaan, Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM), 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

Article history

Received

20 July 2015

Received in revised form

22 April 2016

Accepted

15 August 2016

*Corresponding author
gohchoota@ukm.edu.my

Abstract

The generation of waste batteries is increasing due to the wide application and short life span of batteries. The heavy metals used inside a battery are highly toxic and can cause harm to humans and to the environment. However, if waste batteries are recovered properly through a recycling process, precious metals inside the batteries can be extracted. In general, there are three methods for recycling waste batteries, namely pyrometallurgy, hydrometallurgy and bio-hydrometallurgy. This article reviews and discusses the efficiency and effectiveness of these methods in recycling waste batteries. Based on the review, each recycling method has its specific characteristics. The hydrometallurgy method tends to be used for recycling Li-ion batteries while the pyrometallurgy method tends to eliminate plumbum in automotive waste batteries. In general, the hydrometallurgical method is commonly used for recycling batteries due to its shorter process and lower cost.

Keywords: Battery waste, recycling, pyrometallurgy, hydrometallurgy, bio-hydrometallurgy

Abstrak

Sisa bateri mengundang kepada masalah lambakan sisa tanpa kawal kerana jangka hayat bateri yang semakin rendah. Logam dalam sisa bateri mengandungi ketoksikan yang tinggi dan boleh memberi ancaman kepada manusia dan alam sekitar. Walau bagaimanapun, sekiranya sisa bateri dipulih dengan betul dengan kaedah kitar semula, ia menguntungkan dari aspek ekonomi kerana logam dalam sisa bateri sangat berharga. Kitar semula sisa bateri pula mempunyai tiga kaedah iaitu pirometalurgi, hidrometalurgi dan bio-hidrometalurgi. Justeru, kajian artikel ini mengulas dan membincangkan kecekapan dan keberkesanan ketiga-tiga kaedah kitar semula sisa bateri terhadap jenis bateri. Kajian ini mendapati ketiga-tiga kaedah mempunyai pencirian yang tersendiri dalam melaksanakan kitar semula sisa bateri. Walau bagaimanapun, kaedah hidrometalurgi lebih cenderung untuk mengitar semula sisa bateri ion-Li manakala kaedah pirometalurgi pula cenderung kepada penyingkiran logam plumbum dalam sisa bateri automotif. Secara umum, kaedah hidrometalurgi juga lebih cenderung digunakan ketika kitar semula sisa bateri berbanding kaedah lain kerana tempoh proses yang lebih singkat dan penggunaan kos yang lebih rendah.

Kata kunci: Sisa bateri, kitar semula, pirometalurgi, hidrometalurgi, bio-hidrometalurgi

© 2016 Penerbit UTM Press. All rights reserved

1.0 PENGENALAN

Bateri memainkan peranan yang penting dalam proses pembangunan teknologi elektrik dan

elektronik kerana bateri membekalkan sumber tenaga dan tanpanya produktiviti dan kehidupan manusia akan terganggu [1, 2, 3, 4]. Penggunaan bateri menjadi pilihan utama pengguna disebabkan oleh ketumpatan tenaga yang tinggi, pelepasan diri

yang rendah dan ia amat mudah dikendalikan [5, 6]. Secara amnya, bateri mempunyai tiga kumpulan iaitu bateri mudah alih, bateri industri dan bateri automotif [7, 8]. Bateri mudah alih bermaksud bateri yang boleh termeterai dan boleh dibawa ke mana sahaja yang mana ia terdiri daripada bateri primer dan bateri sekunder. Bateri primer merupakan bateri yang tidak boleh dicas semula yang terdiri daripada bateri mangan, bateri alkali, bateri zink karbon, bateri silver oksida, bateri litium dan bateri butang. Manakala bateri sekunder pula bateri yang boleh dicas semula seperti bateri asid plumbum, bateri nikel kadmium (NiCd), bateri alkali, bateri ion litium (ion-Li), bateri nikel metal hidrida (Ni-MH). Bagi bateri industri, ia direka khas untuk kegunaan profesional atau digunakan dalam apa-apa jenis peralatan atau jentera. Manakala bateri automotif pula digunakan dalam kenderaan bagi menghidupkan kenderaan [7, 8]. Bateri banyak digunakan dalam peralatan elektronik seperti laptop, kamera, video, alat permainan kanak-kanak, alat kawalan jauh, jam dan sebagainya. Walaupun bateri berfungsi dalam pelbagai aplikasi penggunaan harian, bateri mengandungi bahan-bahan berbahaya yang boleh mengganggu kesihatan manusia dan ekologi alam sekitar. Bahan-bahan berbahaya yang terkandung dalam bateri terdiri daripada pelbagai logam berat seperti kadmium (Cd), litium (Li), mangan (Mn), merkuri (Hg), plumbum (Pb), nikel (Ni), argentum (Ag) dan zink (Zn) [9] di mana logam-logam tersebut adalah penting dalam pembangunan industri [10].

Penggunaan bateri dalam pasaran komuniti di Kesatuan Eropah semakin banyak dan dianggarkan sebanyak 800,000 tan terdiri daripada bateri automotif, 190,000 tan bateri industri dan 160,000 bateri mudah alih [11]. Manakala, kajian penduduk di Amerika menggunakan bateri jenis sel kering iaitu bateri mudah alih antara purata 35 hingga 90 bateri untuk setiap tahun [9]. Anggaran daripada penggunaan tersebut, penduduk di Amerika membuang sisa bateri adalah sebanyak 179,000 tan bateri setiap tahun yang mana 14,000 tan merupakan bateri sekunder [12] manakala sisa bateri yang dihasilkan di United Kingdom (UK) adalah di antara 20,000 tan hingga 30,000 tan setiap tahun [13].

Permintaan terhadap bateri semakin meningkat kerana peralihan teknologi yang semakin moden. Akibatnya, sisa bateri yang dijanakan turut meningkat kerana jangka hayat bateri yang rendah dan menjadi lambakan sisa bateri tanpa kawal. Lambakan sisa bateri menjadi masalah serius kerana bateri digunakan secara meluas dan menjadi keperluan utama isi rumah dan sektor perindustrian bagi menampung pelbagai kegunaan harian [14]. Kebanyakan sisa bateri masih dibuang di tapak pelupusan atau dibakar, bukannya dikumpulkan atau dikitar semula [15]. Masalah sisa bateri yang berakhir di tapak pelupusan akan memberi masalah larut lesap [16]. Hal ini kerana logam yang terkandung dalam sisa tersebut mempunyai ketoksikan yang tinggi dan boleh mengganggu

sumber bekalan air [14, 17]. Walaupun sisa bateri mengandungi ketoksikan yang tinggi [14, 17], sesetengah kandungan logam dalam bateri menguntungkan dari aspek ekonomi kerana ia merupakan logam berharga sekiranya dipulih dengan betul [14]. Justeru, sisa bateri bertoksik yang mengandungi logam berharga perlu dikitar semula supaya lambakan sisa bateri dapat diminimumkan sebelum ia dilupuskan dengan sistematik dan selamat [18].

2.0 OBJEKTIF

Kitar semula sisa bateri dapat dilaksanakan melalui beberapa proses, iaitu proses secara hidrometalurgi, pirometalurgi dan bio-hidrometalurgi [19, 20, 21]. Objektif kajian ini adalah untuk membincangkan kecekapan dan keberkesanan ketiga-tiga kaedah kitar semula sisa bateri terhadap jenis sisa bateri.

3.0 SOROTAN KAJIAN KES

Kitar semula merupakan kaedah pengurusan sisa yang mesra alam kerana ia boleh mengurangkan pencemaran alam sekitar dan menguntungkan aspek ekonomi [19, 22, 23]. Kitar semula juga boleh meningkatkan kitaran hidup [17] yang mana ia dapat memulihara sumber [20] dan mengekalkan kelestarian sumber semula jadi [23]. Tambahan pula, kitar semula dapat membentuk persekitaran yang lebih sihat, mengurangkan pencemaran, penjimatan kos dan tenaga [24]. Oleh itu, bagi menyelesaikan masalah lambakan sisa bateri yang kian meningkat, kaedah mesra alam seperti kitar semula sisa bateri sangat diperlukan [5].

Terdapat beberapa kajian yang membuktikan kitar semula dapat memberi manfaat kepada pengurusan sisa. Kajian lepas mendapati permintaan terhadap bateri ion litium sangat tinggi kerana penggunaan bateri ion litium sering dijumpai dalam aplikasi moden seperti dalam telefon bimbit, laptop, video kamera, kamera dan alat peranti elektronik lain [6, 19, 25, 26]. Kitar semula sisa bateri terutama bateri ion litium dapat mengurangkan pencemaran toksik di tapak pelupusan kerana kehadiran logam yang bersifat toksik dan mudah terbakar. Jangka hayat bateri boleh mempengaruhi kandungan logam dalam bateri terutamanya bateri sekunder [18]. Bateri sekunder tersebut mempunyai kapasiti dan jangka hayat yang tinggi sehingga menyebabkan logam yang terkandung dalam bateri bersifat lebih toksik [18]. Kitar semula amat berguna untuk bateri automotif yang mana kandungan plumbum dalam bateri dapat dipulih dan diguna semula sebagai sumber sekunder [17]. Logam plumbum perlu dilindungi daripada manusia kerana bertoksik tinggi dan berisiko kepada kesihatan manusia yang boleh menyebabkan keracunan terutamanya kepada kanak-kanak [17].

Selain itu, pelaksanaan kitar semula sisa bateri dapat memulihkan logam nikel kerana ia memberi keuntungan yang tinggi dari sudut insentif ekonomi dan mendorong kepada teknologi pemuliharaan dengan lebih berkesan [18, 27]. Didapati juga, kitar semula logam kobalt mempunyai pengaruh yang kuat ke atas kecekapan ekonomi kerana ia merupakan logam yang bernilai dan mahal [18, 28, 29]. Penggunaan logam kobalt terkandung dalam bateri ion litium yang banyak digunakan dalam telefon bimbit dan laptop [28]. Oleh itu, pemuliharaan

logam dalam pelaksanaan kitar semula sisa bateri dapat mengurangkan permintaan terhadap perlombongan logam primer [18]. Justeru, perlombongan logam primer dapat dilindungi bagi penggunaan generasi akan datang [28, 30].

Beberapa negara telah mengambil inisiatif untuk mengurangkan penghasilan sisa bateri melalui pelaksanaan kitar semula sisa bateri. Antara beberapa negara yang telah melaksanakan kitar semula sisa bateri melalui pelaksanaan polisi seperti yang diringkaskan dalam Jadual 1.

Jadual 1 Huraian beberapa polisi pelaksanaan kitar semula sisa bateri secara ringkas di beberapa negara

Negara	Polisi	Huraian polisi	Rujukan
Kesatuan Eropah	Battery directive 2013/56/EU	Tujuan utama Arahan Bateri ini dilaksanakan bagi melindungi alam sekitar dan membantu fungsi pasaran Eropah dengan betul. Matlamat Arahan ini untuk mereka bentuk semua bateri baru dan memerlukan pengumpulan secara berasingan; rawatan dan kitar semula sisa bateri dan akumulator bagi mengurangkan pelupusan bateri dan akumulator dalam aliran sisa pepejal. Keperluan utama untuk menyekat penggunaan kadmium dan merkuri dalam reka bentuk dan pembuatan bateri baru kecuali bateri yang digunakan dalam alat kuasa tanpa wayar (CPTs); dan bateri butang dengan kandungan merkuri yang kurang daripada 2%. Bateri dan akumulator, yang memenuhi syarat-syarat asal, diletakkan di pasaran sebelum tarikh permohonan keperluan baru boleh terus dipasarkan dan dijual sehingga stok habis. Dalam Arahan tersebut, pihak pengeluar perlu mereka bentuk peralatan dengan apa jua cara yang mudah untuk memudahkan pengguna mengeluarkan bateri dan akumulator selepas tidak digunakan. Segala maklumat juga perlu dimaklumkan kepada pengguna berkenaan jenis-jenis bateri atau akumulator yang dimasukkan ke dalam peralatan. Beberapa syarat berkenaan prosedur pendaftaran juga dilampirkan dalam Arahan tersebut	[31]
United Kingdom	Peraturan Bateri dan Akumulator	Sisa dan Peraturan Sisa Bateri dan Akumulator (The Waste Batteries and Accumulators Regulations) telah berkuat kuasa di United Kingdom pada 5 Mei, 2009 bagi mengurangkan jumlah bateri yang digunakan berakhir di tapak pelupusan. Peraturan ini terpakai kepada semua jenis bateri tanpa mengira daripada bentuk, isi padu, berat, komposisi bahan atau penggunaannya; dan sama ada atau tidak bateri yang dimasukkan ke dalam perkakas. Peraturan ini tidak terpakai untuk bateri yang digunakan di peralatan yang berkaitan dengan perlindungan atau kepentingan-kepentingan keselamatan penting dalam EEA (European Economic Area) seperti senjata, peluru dan bahan perang yang bertujuan khusus untuk tentera atau peralatan yang dihantar ke angkasa lepas. Keperluan peraturan ini berbeza mengikut setiap jenis bateri iaitu bateri mudah alih, bateri automotif dan bateri perindustrian. Keperluan yang diperlukan oleh bateri mudah alih ialah pihak pengeluar perlu menyertai Skim Pematuhan Bateri, pengedar perlu mengambil semula sisa bateri tanpa bayaran daripada pengguna akhir dan pemantauan kitar semula sisa bateri melalui nota bukti iaitu <i>Batteries Evidence Notes</i> . Bateri mudah alih perlu dirawat dan di kitar semula bagi mencapai piawai kecekapan kitar semula sisa bateri. Bertlainan pula dengan sisa bateri industri dan bateri automotif dalam peraturan ini, pengeluar bateri industri tidak perlu menyertai skim pematuhan tetapi perlu berdaftar dengan BERR (Business Enterprise and Regulatory Reform). Tiada sasaran diperlukan untuk pengumpulan bateri industri dan automotif tetapi peraturan ini telah mengharamkan bateri industri dan automotif untuk dilupuskan di tapak pelupusan dan insinerator.	[32]
Australia	Akta Produk Stewardship 2011	Bateri mudah alih telah dikategorikan di bawah Akta Produk Stewardship 2011. Bateri mudah alih di bawah akta ini perlu mempunyai berat kurang daripada 2kg. Terdapat tiga skim yang dilaksanakan di bawah akta ini iaitu secara mandatori, <i>co-regulatory</i> dan sukarela. Akta tersebut ditubuhkan bagi membantu mengurangkan sisa dan mengelakkan bahan-bahan berbahaya daripada memasuki tapak pelupusan dengan meningkatkan kitar	[33]

Negara	Polisi	Huraian polisi	Rujukan
Jepun	<i>Law for the Promotion of Utilization of Recycle Resources</i>	semula dan penggunaan semula bahan-bahan berharga daripada produk. Antara pihak yang terlibat dalam akta ini ialah pengimport; sektor industri kitar semula dan sisa; sektor pengangkutan dan logistik; kerajaan tempatan dan operasi pelupusan; kerajaan negeri dan wilayah; kerajaan Australia dan kumpulan komuniti dan alam sekitar Undang-undang bertujuan untuk menggalakkan pengurangan sisa, penggunaan semula bahan dan kitar semula produk yang digunakan sebagai bahan mentah. Undang-undang ini juga memperuntukkan langkah-langkah yang perlu diambil oleh pengeluar seperti langkah-langkah 3R yang berkaitan dengan peringkat pengeluaran, 3R pada peringkat mereka bentuk produk, pelabelan bagi koleksi terpilih dan pembangunan sistem kitar semula. Terdapat 69 produk di bawah kawalan undang-undang ini dalam mengaplikasikan konsep 3R (pengurangan, penggunaan semula, kitar semula). Antara produk tersebut adalah bateri di bawah kategori produk penggunaan semula-kitar semula. Bateri yang dikawal dalam undang-undang ini merupakan bateri yang boleh dicas semula seperti bateri asid plumbum, bateri Ni-Cd, bateri Ni-MH dan bateri ion-Li. Pelabelan dengan simbol kitar semula perlu diletakkan pada setiap bateri yang dikawal. Pihak yang perlu bertanggungjawab seperti yang dinyatakan dalam perundangan ini ialah pihak yang menjalankan perniagaan iaitu pengeluar dan pengedar; pengguna dan kerajaan tempatan dan negeri	[34]
Malaysia	Peraturan Kualiti Alam Sekeliling (Buangan Terjadual) 2005	Peraturan berkenaan bahan buangan kimia berbahaya telah dilaksanakan sejak tahun 1984 dan telah dipinda pada tahun 2005 iaitu Peraturan Kualiti Alam Sekeliling (Buangan Terjadual) 2005. Peraturan ini dilaksanakan bagi menguruskan kaedah bahan buangan terjadual dengan baik dan bertindak sebagai panduan kepada pihak yang menggunakan atau menghasilkan bahan buangan seperti industri yang mengeluarkan bahan buangan, kontraktor bahan buangan dan operator pelupusan bahan buangan. Sisa bateri telah dikategorikan di bawah bahan buangan terjadual. Sisa bateri yang dirawat dan dilupuskan di bawah peraturan ini merupakan bateri yang boleh dicas sahaja seperti bateri yang mengandungi logam merkuri, nikel atau ion litium. Sisa bateri ini dikategorikan di bawah kod SW103 manakala bateri asid plumbum juga berada dalam kod SW102	[35]

Banyak negara yang telah menyedari bahawa sisa bateri berbahaya dan melaksanakan kitar semula sisa bateri. Walaupun begitu, tidak semua negara yang akan dibincangkan dalam ulasan ini. Negara yang akan dibincangkan dalam ulasan ini adalah negara Jepun dan negara Australia.

3.1 Jepun

Dalam satu kajian di Jepun, kadar pengumpulan dan kitar semula sisa bateri agak rendah. Hampir 70% penduduk di Jepun tidak mengeluarkan bateri daripada produk elektronik ketika hendak dilupuskan [14]. Hanya 10% sahaja bateri yang berjaya dikumpulkan manakala baki daripada bateri tersebut dilupuskan dengan cara pembakaran dan dibawa ke tapak pelupusan bersama sisa pepejal yang lain [14].

Jepun telah mengambil inisiatif dengan melaksanakan undang-undang bagi menggalakkan pengumpulan dan kitar semula sisa bateri di kalangan pengguna dan pengilang bateri secara sukarela terutama kepada empat jenis bateri sekunder iaitu bateri simpanan kecil yang boleh dimeteraikan, bateri Ni-Cd, bateri Ni-MH dan bateri

ion-Li. Undang-undang tersebut telah dinamakan dengan *Law for the Promotion of Utilization of Recycle Resources* dan dikuatkuasakan pada April 2001 [14, 34, 36]. Walau bagaimanapun, undang-undang tersebut tidak memfokuskan kepada bateri jenis primer tetapi terdapat tiga jenis skim yang bagi pengumpulan bateri yang boleh dicas semula seperti dalam Jadual 2. Skim utama di Jepun yang dikendalikan oleh sebuah organisasi yang dikenali sebagai *Japan Rechargeable Battery Recycling Center* (JBRC) merupakan organisasi tanggungjawab pengeluar. Organisasi tersebut mengumpul ketiga-tiga jenis bateri (Ni-Cd, Ni-MH, ion-Li) dan bateri asid plumbum tetapi dalam kuantiti yang sedikit. Bagi *Mobile Recycle Network* (MRN), ia hanya memfokuskan kepada pengumpulan bateri ion-Li kerana ia bertindak sebagai pembekal perkhidmatan komunikasi. Skim oleh MRN menggunakan sistem ambil-baik (*take-back*) bagi mengumpul tiga item utama iaitu telefon bimbit, pengecas dan bateri ion-Li. Manakala kebanyakan bateri asid plumbum pula dikumpul oleh pengeluar individu [37]. Keberkesanan undang-undang ini telah memberikan kejayaan apabila bateri ion-Li pada telefon bimbit dapat dikitar semula sebanyak 20% [36]. Walaupun nilai peratusan kitar semula tidak

tinggi, ia memberi impak positif dan menunjukkan pengguna dan pengeluar bateri di Jepun menyedari bahawa sisa bateri tidak boleh dibuang bersama sisa pepejal yang lain. Sedikit sebanyak undang-

undang tersebut menggalakkan pengguna dan pengeluar melakukan aktiviti kitar semula sisa bateri secara sukarela.

Jadual 2 Skim bagi pengumpulan bateri sekunder di Jepun

Skim	Jenis bateri			
	NiCd	NiMH	Ion-Li	Asid Plumbum
JBRC	/	/	/	Jumlah yang sangat sedikit
MRN			/	/
Pengeluar individu bateri asid plumbum dimeterai				/

/ = Jenis sisa bateri yang dikumpul.
Sumber [37]

3.2 Australia

Australia telah melaksanakan pengumpulan sisa bateri melalui program produk *stewardship* tetapi sisa bateri tersebut dihantar ke Singapura bagi tujuan kitar semula dan pemulihan bahan yang berharga dalam sisa bateri [38, 39]. Organisasi yang terlibat bagi menguruskan sisa bateri di Australia sangat aktif dan dikenali sebagai ABRI iaitu *Australian Battery Recycling Initiative*. Hasil daripada inisiatif mereka, sisa bateri yang dapat dikumpulkan bagi tujuan kitar semula sebanyak 20 tan sejak tahun 2009 ia ditubuhkan. Pada tahun 2010, ABRI telah melaksanakan kajian mengenai sikap pengguna terhadap kitar semula sisa bateri di Australia. Penggunaan bateri di Australia telah mencapai satu jumlah yang agak besar iaitu 345 juta. Walau bagaimanapun, sepanjang kajian tersebut, sikap pengguna di Australia terhadap kitar semula sisa bateri masih rendah kerana pembuangan bateri di tapak pelupusan masih tinggi iaitu sebanyak 67.4% [40]. Sepanjang kajian, mereka menyetujui bahawa sisa bateri perlu dikitar semula tetapi pengetahuan mereka tidak seiring dengan amalan yang mereka laksanakan. Mereka tetap membuang sisa bateri ke dalam tong sampah bersama sisa pepejal lain. Akibat daripada sikap kesedaran pengguna yang agak rendah dalam mengitar semula sisa bateri, ABRI telah menggalakkan perniagaan yang terlibat seperti pengeluar dan pengedar bateri supaya mengambil bahagian dalam usaha untuk meningkatkan kadar kitar semula sisa bateri di Australia dengan menyediakan kemudahan yang lebih banyak. Selain itu, mereka juga menggalakkan penglibatan di tempat kerja sebagai inisiatif membangunkan kitar semula sisa bateri agar dapat meningkatkan kesedaran di kalangan orang awam Australia tentang faedah daripada kitar semula tersebut [40].

Pada mulanya bateri di Australia tidak dikawal selia. Walau bagaimanapun, pada Jun 2013, Kerajaan Australia telah mengeluarkan satu senarai utama yang menyatakan beberapa produk tertentu telah dipertimbangkan di bawah Akta Produk Stewardship 2011 yang mana bateri merupakan

salah satu produk tersebut. Akta tersebut ditubuhkan bagi membantu mengurangkan sisa dan mengelakkan bahan-bahan berbahaya daripada memasuki tapak pelupusan dengan meningkatkan kitar semula dan penggunaan semula bahan-bahan berharga daripada produk. Bateri yang dikawal selia oleh Akta tersebut bergantung pada tiga jenis skim iaitu secara sukarela, selia bersama (*Co-Regulatory*) atau secara mandatori. Kerajaan Australia juga sangat menitik-beratkan mengenai kebahayaan bateri dalam Pelan Pelaksanaan dan Hala Tuju Strategik 2011-15 (*NSW Waste Avoidance and Resources Recovery Strategy*). Dalam pelan tersebut juga menyatakan bahawa sisa bermasalah seperti E-waste dan sisa bateri dilarang masuk ke tapak pelupusan sampah mahupun komponennya sudah diasingkan [41].

4.0 KAEDAH KITAR SEMULA SISA BATERI

Beberapa kajian telah dilakukan mengenai kitar semula sisa bateri dan terdapat tiga pilihan kaedah yang boleh dijalankan ketika ia dikitar semula. Kaedah tersebut ialah kaedah hidrometalurgi [26, 28, 42], kaedah pirometalurgi [21, 43, 44] dan kaedah bio-hidrometalurgi [19, 45].

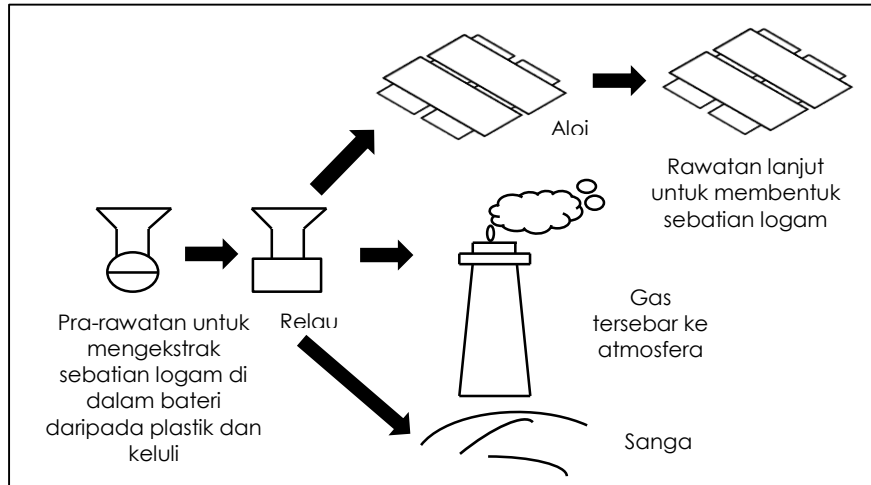
4.1 Kaedah Pirometalurgi

Kebanyakan kitar semula bateri di Eropah telah menggunakan kaedah pirometalurgi yang banyak digunakan dalam perindustrian seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1 [21, 43, 44].

Beberapa teknik yang digunakan dalam kaedah pirometalurgi seperti peleburan (*smelting*), pemanggaan (*roasting*), penukaran (*converting*) dan penapisan (*refining*) [10]. Huraian secara ringkas berkenaan teknik yang digunakan dalam kaedah pirometalurgi seperti dalam Jadual 3. Kaedah pirometalurgi secara tradisional iaitu dikenali sebagai teknik peleburan tidak kerap digunakan kerana ia berbahaya kepada alam sekitar apabila sebahagian besar logam yang dikitar semula tersejat

dan terbebas ke dalam atmosfera [5,36]. Walau bagaimanapun, kaedah tradisional tersebut boleh membakar semua elektrolit organik dan membuatkan pengasingan logam secara larut lesap lebih mudah [46]. Menurut dalam kajian Li et al. [6], kaedah pirometalurgi kerap dikaitkan dengan kandungan dioksin sangat tinggi dalam udara dan menyebabkan pencemaran udara [47]. Oleh itu,

salah satu piawaian yang lebih cekap diperlukan bagi melakukan sistem penapisan udara untuk mengelakkan pencemaran [6,23,48]. Piawaian tersebut telah dilaksanakan sejak tahun 2000 dan dioksin perlu dilepaskan kurang daripada nilai 1.0 ng TEQ/Nm³ [49].



Rajah 1 Proses bagi kitar semula sisa bateri secara pirometalurgi. Sumber [50]

Jadual 3 Ringkasan teknik dalam kaedah pirometalurgi

Jenis Bateri	Teknik	Huraian teknik	Rujukan
Ni-Cd	Penyejatan	Kaedah pirometalurgi digunakan bagi mengitar semula logam kadmium dalam bateri Ni-Cd. Terdapat dua teknik utama yang digunakan iaitu penyejatan dalam relau terbuka dan kadmium dipulih dalam bentuk serbuk kadmium oksida. Teknik kedua, penyulingan kadmium dalam relau tertutup yang mana gas yang dihasilkan tersebar ke atmosfera bagi menghasilkan logam kadmium dan kandungan aloi nikel yang tinggi seperti dalam Rajah 1. Selain itu, pengklorinan bateri juga digunakan dalam kaedah pirometalurgi yang mana bateri dimasukkan ke dalam klorin atau asid hidroklorik dan membentuk kadmium klorida. Kemudian, sebatian dipanaskan pada suhu 1233K bagi proses penyulingan	[21]
	Pemisahan	Menggunakan <i>vacuum metallurgy separation</i> (VMS) juga di bawah kaedah pirometalurgi untuk mengasingkan logam kadmium dalam bateri Ni-Cd. Suhu amat mempengaruhi penggunaan teknik VMS bagi mengitar semula kadmium iaitu 1073 K dan diikuti oleh tempoh pemanasan selama 2.5 jam. Kecekapan kadmium dalam VMS paling tinggi dengan menggunakan tenaga yang rendah dan bersifat mesra alam sekitar	[5]
Ion-Li	Peleburan	Teknik peleburan digunakan dalam pengasingan logam litium dalam bateri. Bateri ion-Li yang terdiri daripada sebatian litium kobalt oksida (LiCoO ₂). diproses dalam relau pada suhu yang tinggi dan membentuk sanga. Komponen elektrolit dan plastik dalam bateri tersebut dibakar bersama dan membekalkan sebahagian tenaga untuk peleburan. Kemudian sebatian LiCoO ₂ telah dipisahkan kepada kepada aloi tembaga, kobalt, nikel dan besi	[51]
Asid Plumbum	Pemisahan	Kaedah pirometalurgi digunakan bagi memisahkan logam plumbum dalam bateri automotif di Brazil. Kaedah ini melibatkan empat peringkat iaitu mengisar bateri bagi mengasingkan plastik, elektrolit dan plate plumbum; pengurangan plumbum dalam relau berputar; pengasingan logam plumbum daripada sanga dan menapis plumbum yang telah dikitar semula. Kaedah ini memerlukan tindak balas redoks untuk mengasingkan logam plumbum dalam bateri pada suhu yang sangat tinggi sehingga 1000°C	[17]

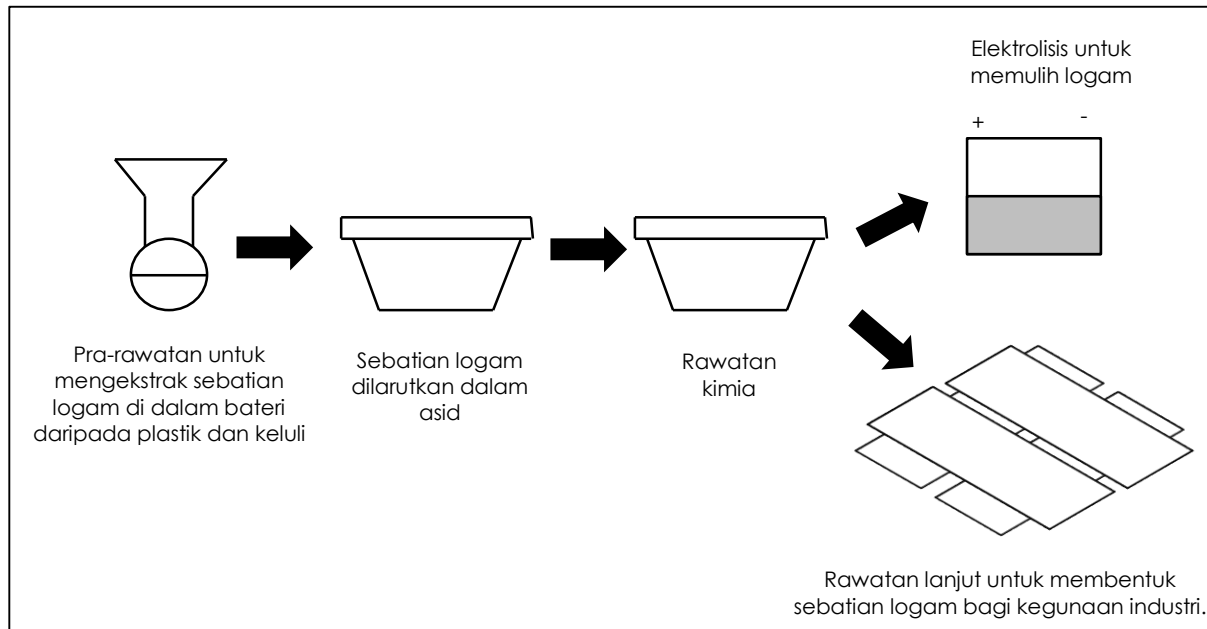
2.1 Kaedah Hidrometalurgi

Kaedah hidrometalurgi merupakan salah satu kaedah yang efisien bagi pengekstrakan logam daripada bahan mentah yang mana ia bertindak balas dengan bahan kimia yang dilakukan dalam larutan akues atau organik bagi memulih dan mendapatkan logam [6, 10]. Kaedah ini dicadangkan dalam kitar semula sisa bateri kerana ia merupakan teknologi yang serba boleh dalam pemisahan dan pemuliharaan semula logam yang tinggi [20]. Kaedah hidrometalurgi akan melarutkan logam dalam larutan berasid dengan menggunakan beberapa teknik yang terpilih iaitu pemendakan kimia, pengapungan ion, pertukaran ion, kaedah penurasan membran, penjerapan, pengekstrakan pelarut dan elektrokimia [38, 52]. Antara kaedah hidrometalurgi yang menggunakan kepekatan asid yang tinggi seperti dalam Rajah 2 bagi

mengasingkan logam aluminium, kobalt, kuprum dan litium, daripada bateri ion-Li [53].

Selain itu, kaedah hidrometalurgi dikenali sebagai larut lesap atau *leaching* yang melibatkan logam tersebut terlarut dalam sisa buangan. Ia melibatkan penggunaan bahan kimia berakues dan menggunakan suhu yang rendah untuk mengasingkan logam. Logam dipulih melalui proses elektrolisis seperti dalam Rajah 2. Sekiranya logam yang diperolehi daripada proses elektrolisis mengandungi kekotoran, proses penapisan khas diperlukan.

Antara kelebihan kaedah ini ialah logam diasingkan secara lengkap; produk ketulenan yang tinggi, keperluan tenaga yang rendah dan mengelakkan pelepasan efluen. Kaedah hidrometalurgi ini merupakan kaedah yang sukar untuk dipraktikkan kerana ia adalah sangat rumit [54]. Jadual 4 menerangkan beberapa teknik yang digunakan dalam kaedah hidrometalurgi.



Rajah 2 Proses bagi kitar semula sisa bateri secara hidrometalurgi. Sumber [50]

Jadual 4 Antara teknik yang digunakan dalam kaedah hidrometalurgi

Jenis Bateri	Teknik	Huraian Teknik	Rujukan
Ni-Cd	Pemendakan kimia	Teknik pemendakan kimia memisahkan logam nikel sehingga pH mencapai nilai 9-10 dan logam tersebut berubah menjadi sebatian yang sangat tidak larut iaitu nitrogen hidroksida, Ni(OH) ₂ . Sebatian nikel kadmium dalam bateri dilarutkan dalam larutan akues polimetalik yang berasid untuk memisahkan logam nikel dan kuprum. Kecekapan teknik ini akan meningkat sekiranya kepekatan nikel tinggi walau bagaimanapun kecekapan akan berkurang apabila ketumpatan dan suhunya meningkat.	[52]
	Pengekstrakan pelarut	Teknik pemendakan kimia dan penganapan digunakan untuk memisahkan logam kadmium. Elektrod kadmium dilarutkan dalam asid sulfurik pada suhu 298K dan pH 0.571 manakala sebatian nikel kadmium dilarutkan dalam larutan natrium hidroksida pada dua suhu yang berbeza iaitu 281K dan 298K. Pembentukan logam kadmium dapat dilihat melalui analisis pembelauan sinar-X kerana sebatian kadmium hidroksida, Cd(OH) ₂ lebih stabil pada suhu 298K.	[55]
Ion-Li	Pengekstrakan pelarut	Pengasingan logam kadmium, kobalt dan nikel daripada bateri nikel kadmium menggunakan pengekstrakan pelarut. Sisa bateri diekstrak menggunakan Cyanex 923 dan 272 kemudian dicairkan dalam kerosin yang bertindak sebagai agen pengekstrak. Didapati, pemisahan kadmium lebih berjaya berbanding kobalt dan nikel menggunakan Cyanex 923 pada pH 1.0 yang mana pemulihan adalah 99.9% berkesan dalam pengekstrakan pelarut.	[56]
	Pemendakan kimia	Teknik pemendakan kimia digunakan bagi mengasingkan logam kobalt daripada sisa bateri yang terdiri daripada sebatian LiCoO ₂ . Sebatian tersebut dilarutkan ke dalam larutan asid hidroklorik yang mana ia dipulih sebagai kobalt hidroksida, Co(OH) ₂ . Pemendakan Co(OH) ₂ bermula pada pH 6 dan ia lengkap sepenuhnya pada pH 8. Pemendakan ini terhasil melalui agen yang digunakan iaitu larutan ammonia bertindak sebagai bes yang lemah. Pemendakan Co(OH) ₂ akan menjadi lebih mudah untuk dipisahkan daripada larutan melalui penapisan, seterusnya dikitar semula.	[19]
Ni-MH	Elektrokimia	Dalam bateri ion-Li terdapat sebatian litium kobalt oksida, (LiCoO ₂). Sebatian LiCoO ₂ dilarutkan dalam larutan asid sulfurik (pH 2.0-3.0) untuk mengasingkan kobalt oksida, Co(OH) ₂ menggunakan proses elektrolisis pada suhu 70°C. Hampir 100% logam kobalt yang berketulenan tinggi dapat diasingkan daripada sebatian bateri tersebut. Proses elektrolisis ini dapat mengurangkan logam kobalt yang tidak tulen, walau bagaimanapun proses ini mempunyai kelemahan yang mana menggunakan tenaga elektrik yang terlalu banyak.	[19]
	Elektrokimia	Menggunakan kitaran voltametrik dalam teknik elektrokimia bagi mengasingkan logam nikel, kobalt zink dan mangan dalam bateri Ni-MH. Bateri Ni-MH dilarutkan dalam asid borik (H ₃ BO ₃) dan ammonium sulfamate (H ₂ N ₂ O ₃ S) pada nilai pH 1.5. Antara ketiga-tiga logam tersebut, logam nikel sahaja yang dapat dikesan ketika analisis menggunakan pembelauan sinar-X.	[57]

4.3 Kaedah Bio-Hidrometalurgi

Selain daripada kaedah pirometalurgi dan hidrometalurgi, kaedah yang digunakan secara bioteknologi bagi mengitar semula sisa bateri ialah kaedah bio-hidrometalurgi yang mana kaedah ini merupakan sub kepada kaedah hidrometalurgi [6, 58]. Kaedah bio-hidrometalurgi ini mempunyai kecekapan yang lebih tinggi berbanding dua proses tersebut dan lebih mesra alam sekitar [6,23]. Unikunya kaedah ini kerana ia melibatkan penggunaan mikroorganisma untuk menghasilkan pengoksidaan kimia seperti ion ferik dan keasidan proton [58]. Antara fungsi utama mikroorganisma yang digunakan dalam kaedah ini ialah mikroorganisma

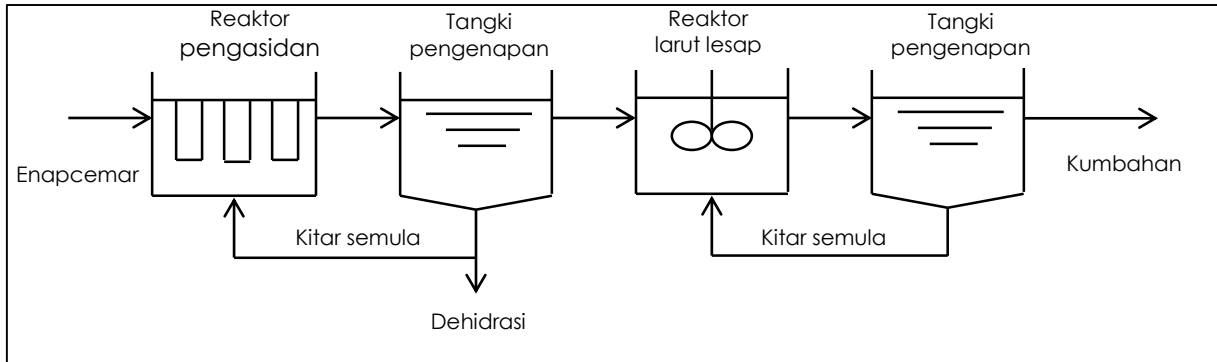
dapat mempercepatkan suatu tindak balas kimia [59]

Teknik yang digunakan dalam kaedah ini ialah *bioleaching* iaitu proses larut lesap secara biologi yang mana ia berdasarkan kepada keupayaan semula jadi mikrob untuk mengubah sebatian logam pepejal kepada bentuk yang boleh larut [60] di bawah keadaan bersuhu bilik yang sederhana [61]. Proses ini menggunakan mikroorganisma daripada kumpulan bakteria Acidophilic seperti *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*; dan *Sulfolobus sp.* [59, 60, 62] dan larutan bahan kimia organik seperti *chemolithotrophic* (sebatian inorganik) [23]. Dalam proses ini, mikroorganisma akan berperanan aktif dalam pembentukan dan

penguraian bahan inorganik dan bahan organik pada kerak bumi [60].

Teknik *bioleaching* yang digunakan dalam kitar semula sisa bateri biasanya untuk memulihkan logam kuprum [58]. Teknik ini dijalankan dengan menggunakan dua langkah sistem aliran larut lesap

yang berterusan iaitu reaktor pengasidan dan reaktor larut lesap [63]. Reaktor pengasidan telah digunakan untuk menghasilkan asid biosulfurik melalui pengoksidaan sulfur dan dikulturkan menggunakan *thiobacillus* asli dalam kumbahan enapcemar seperti dalam Rajah 3 [63].



Rajah 3 Diagram sistem aliran larut lesap yang berterusan. Sumber [63]

Enapcemar dimasukkan ke dalam reaktor pengasidan yang beroperasi pada suhu yang tetap. Kemudian, enapcemar akan menebal dalam tangki penganapan pertama dan membolehkan kitar semula dijalankan untuk reaktor pengasidan bagi mengekalkan kepekatan asid thiobacilli secara aktif. Supernatan dari tangki penganapan pertama akan dibawa dan diproses ke dalam reaktor

larut lesap yang mengandungi bahan-bahan yang diperolehi daripada bateri Ni-Cd. Logam berat yang dapat diasingkan iaitu Ni, Cd dan Co akan dikitar semula manakala baki larutan lain akan dibawa melalui tangki penganapan kedua dan keluar sebagai kumbahan [63]. Jadual 5 menerangkan mengenai beberapa kajian yang menggunakan teknik *bioleaching* dalam kaedah bio-hidrometalurgi.

Jadual 5 Antara kajian yang menggunakan teknik *bioleaching* dalam kaedah bio-hidrometalurgi

Jenis Bateri	Teknik	Huraian Teknik	Rujukan
Zinc-C (Saiz C)	<i>Bioleaching</i> dan <i>chemical leaching</i>	Teknik yang dilakukan dalam kajian ini hasil gabungan dua teknik iaitu larut lesap secara kimia (<i>chemical leaching</i>) dan larut lesap secara biologi (<i>bioleaching</i>) menggunakan sistem ujian klorida dan sistem ujian sulfat. Teknik yang dijalankan ini mempunyai 2 fasa dan beberapa peringkat iaitu : 1) Larut lesap secara kimia – a) dilarutkan dalam asid hidroklorik dan asid sulfurik selama 3 hari; b) kemudian dilarutkan dalam larutan ferik klorida dan ferik sulfurik selama 10 hari; 2) Larut lesap secara biologi – a) selepas dilarutkan dalam larutan ferric selama 10 hari, larutan ditapis dan baki diasingkan; b) larutan di autoklaf iaitu disterilkan pada suhu 121°C selama 15 minit; c) teknik <i>bioleaching</i> dijalankan selama 30 hari pada suhu 70°C.	[64]
Ion-Li	<i>Bioleaching</i>	Logam mangan (45.76%) dan zink (12.78%) dapat diasingkan dan ditentukan melalui spektroskopi penyerapan atom. Sebatian LiCoO ₂ daripada bateri ion-Li telah dilarutkan dalam larutan asid sulfurik pada pH 2.5. Kemudian ia dilarutkan dalam larutan ferik sulfurik yang bertindak sebagai tenaga untuk bakteria. Bakteria yang digunakan ialah <i>A.ferrooxidants</i> dan larutan dieram pada suhu 30°C. Daripada teknik ini logam kobalt terlarut lesap lebih cepat berbanding logam litium.	[62]
Ni-Cd	<i>Bioleaching</i>	Sebatian nikel kadmium diasingkan menggunakan dua tangki penganapan. Tangki penganapan pertama menghasilkan bioreactor daripada asid sulfurik dan sulfur dimasukkan pada pH 2.0. kemudian, ion ferum dimasukkan ke dalam tangki penganapan dan bakteria <i>Thiobacillus ferrooxidants</i> disuntik dan dikulturkan. Suhu dikekalkan pada 30°C. Sistem berulang sehingga bioreactor dapat menghasilkan	[65]

Jenis Bateri	Teknik	Huraian Teknik	Rujukan
		kadar asid sulfurik yang stabil. Sebatian nikel kadmium daripada bateri dimasukkan ke dalam tangki pengenapan kedua dan bakteria <i>Thiobacillus ferrooxidans</i> semakin bertambah pada pH1.0. Larutan akan ditapis. Apabila pH mencapai 2.5 atau tiada perubahan pada kepekatan larutan, ini bermakna, logam sudah diasingkan. Larutan ini dilarutkan selama 93 hari. Logam yang dapat dipulihkan ialah kadmium (100%), nikel (96.5%) dan ferum (95.0%).	

Setiap daripada ketiga-tiga kaedah kitar semula sisa bateri tersebut mempunyai pencirian dan kesesuaian masing-masing. Dari segi penyelidikan, hasil daripada beberapa kajian mendapati penyelidik lebih cenderung untuk mengitar semula sisa bateri menggunakan kaedah hidrometalurgi [54] seperti dalam Jadual

6 kerana kaedah tersebut sangat mudah untuk diproses kerana memerlukan hanya tenaga yang rendah seperti dalam Jadual 8 [5, 6, 23]. Walau bagaimanapun, logam dalam proses ini masih berbentuk sebatian dan memerlukan rawatan lanjutan untuk menulennanya [5, 21, 52].

Jadual 6 Senarai jenis bateri dan E-waste terhadap kaedah kitar semula di beberapa buah negara

Jenis Bateri	Kaedah Kitar Semula Sisa Bateri			Negara	Rujukan
	Hidrometalurgi	Pirometalurgi	Bio-hidrometalurgi		
Bateri yang boleh dicas semula	/			Brazil	[28]
E-waste	/	/	/	India	[45]
E-waste (telefon bimbit)	/			Malaysia	[39]
Asid Pb	/	/		Greece	[66]
Ion-Li	/			Bangladesh	[26]
Ion-Li	/			China	[46]
Ni-Cd	/			Itali	[67]
Bateri alkali		/		Perancis	[68]
Bateri alkali, Zn-Ca	/			Romania	[42]
Automotif ion-Li		/		United States	[25]

5.0 PERBINCANGAN

5.1 Kecekapan Kaedah Kitar Semula Sisa Bateri

Pemisahan logam zink daripada sisa bateri lebih berkesan menggunakan rawatan haba (*thermal treatment*) berbanding logam mangan (Mn) kerana ia mempunyai kadar pemulihan yang lebih tinggi seperti dalam Jadual 7. Walau bagaimanapun, logam zink boleh dipulihkan secara lebih cekap dan boleh mencapai

sehingga 98% dengan menggunakan penapisan haba (*thermal refining*). Pemisahan logam mangan hampir 86% terpisah daripada kandungan sisa bateri dan didapati peratusan tersebut sedikit rendah berbanding logam zink kerana terdapat perbezaan analisis yang dijalankan dalam tempoh yang berbeza. Pemisahan logam mangan yang lemah mungkin disebabkan oleh analisis yang dijalankan tidak menggunakan proses pemeruapan[38].

Jadual 7 Kecekapan kaedah kitar semula bateri

Jenis bateri	Logam	Proses	R(%)	Masa, t (jam)	Suhu, T (°C)	Reagen	pH	Rujukan
Zn Karbon	Zn	Pirometalurgi	97	0.5	1200	-	-	[38]
	Mn	- rawatan haba	86					
Zn Karbon	Zn	Hidrometalurgi	82	2	80	NaOH	-	[42]
		- larutan asid						
	Zn	Hidrometalurgi	96	1	80	H ₂ SO ₄		
	Mn	- larut lesap	40					[42]
Alkali	Zn	Hidrometalurgi	64	1	80	NaOH	-	
		- larutan asid						
Ion-Li	Co	Hidrometalurgi	95	1	80	NaOH	11-	[26]
	Li		93				12	

Jenis bateri	Logam	Proses	R(%)	Masa, t (jam)	Suhu, T (°C)	Reagen	pH	Rujukan
	Co Li	Hidrometalurgi	100	1	80	4.0 mol l ⁻¹ HCl	-	[69]
	Co Li	Hidrometalurgi	95 100	0.67	90	Larutan asid DL-malic	-	[6]
	Co	Hidrometalurgi - Elektrokimia	96	-	50	Larutan Mn & (NH ₄) ₂ SO ₄	4	[25]
	Co Li	Hidrometalurgi	99	1.25	90	5 vol. % H ₂ O ₂	-	[46]
Automotif	Pb	Pirometalurgi	82.28	72	900	Arang	-	[17]

R = Kadar pemulihan logam yang diasingkan

Logam kobalt dan litium dalam kajian lepas menunjukkan sebanyak hampir 100% logam dapat diasingkan melalui kaedah hidrometalurgi [69]. Hal ini kerana jenis asid yang dilarutkan mempengaruhi peningkatan kecekapan logam. Dalam Zhang *et al.* telah menggunakan asid hidroklorik, HCl sebagai reagen [69]. Selain itu, agen penurunan tidak digunakan dalam kajian memberikan kesan yang lebih baik kepada kecekapan dalam pemisahan logam. Begitu juga dengan kajian Shuva & Kurny, peratusan yang tinggi didapati dalam memisahkan logam Co dan Li kerana menggunakan larutan berakues jenis alkali iaitu natrium hidroksida, (NaOH) [26]. Selain penggunaan HCl dan NaOH sebagai reagen, sisa bateri yang dilarutkan dalam larutan asid DL-malic juga mempengaruhi kecekapan logam di mana dalam kajian Li *et al.* mencapai 95% dan ke atas [6].

Terdapat kajian yang mengitar semula sisa bateri ion-Li menghasilkan peratusan dalam memulihkan kobalt sebanyak 96% walaupun suhu sedikit rendah berbanding kajian lain yang puratanya menggunakan suhu antara 80°C hingga 90°C [25]. Hal ini kerana julat suhu yang digunakan merupakan suhu sederhana ketika menjalankan kaedah hidrometalurgi berbanding suhu dalam proses lain [52]. Peratusan pengasingan logam tinggi [25] kerana menggunakan teknik elektrokimia yang mana logam kobalt boleh mencapai ketulenan yang sangat tinggi daripada sisa bateri ion-Li. Hal ini kerana teknik ini tidak bercampur dengan bahan-bahan lain [19]. Walau bagaimanapun, penggunaan elektrik yang terlalu banyak ketika teknik ini dijalankan berbanding dengan kaedah pirometalurgi dengan bio-hidrometalurgi seperti dalam Jadual 8.

Larutan hidrogen peroksida (H₂O₂) juga mempengaruhi kecekapan dalam pemulihan pengasingan logam apabila peratusan yang dicapai pada sisa bateri ion-Li adalah 99%. Sekiranya peningkatan kepekatan H₂O₂ bertambah, hasil akan menunjukkan tiada peningkatan yang ketara terhadap pemulihan logam kobalt dan litium. Ini kerana kecekapan logam sudah mencapai tahap ketepuan apabila isi padu H₂O₂ mencapai 5% [46]. Dalam kitar semula sisa bateri automotif

menggunakan proses pirometalurgi, logam plumbum yang diasingkan bertindak sebagai sumber sekunder dalam proses pengeluaran bagi penghasilan produk baru [17]. Penggunaan arang memberi kesan kepada kecekapan logam yang mana kualiti arang yang lebih baik akan mempengaruhi kuantiti logam plumbum yang dihasilkan [17].

5.2 Keberkesanan Kaedah Kitar Semula Sisa Bateri

Ketiga-tiga kaedah kitar semula sisa bateri ini mempunyai matlamat yang sama iaitu mengasingkan dan memulihkan logam daripada sisa bateri. Selain sisa bateri, kaedah tersebut juga digunakan dalam kebanyakan perindustrian sisa bagi tujuan yang sama. Kebanyakan kajian kitar semula sisa bateri menggunakan kaedah hidrometalurgi seperti dalam Jadual 6 kerana kos kaedah ini murah tetapi ia juga bergantung pada teknik yang digunakan [19]. Tidak semua teknik yang terdapat dalam kaedah hidrometalurgi murah kerana sebahagian daripada teknik tersebut memerlukan rawatan lanjut setelah menghasilkan pengasingan logam daripada sisa bateri. Oleh itu, kos tambahan diperlukan kerana kebanyakan rawatan lanjut memberi kesan yang negatif kepada alam sekitar dengan penghasilan sisa lain [5, 21, 52]. Selain itu, kaedah hidrometalurgi boleh meminimalkan air sisa [6] tetapi terdapat kajian yang menyatakan bahawa kaedah hidrometalurgi menghasilkan air sisa yang mengandungi fluorin dan boleh mencemarkan alam sekitar akibat daripada proses kitar semula yang tidak lengkap [46]. Oleh itu, kos rawatan menjadi mahal akibat perawatan penghasilan air sisa. Dalam kaedah hidrometalurgi didapati tiada masalah dalam pencemaran udara ke atmosfera [70].

Kaedah pirometalurgi sememangnya memerlukan suhu yang tinggi ketika proses pemanasan bagi menguraikan kandungan logam dalam bateri [21, 23]. Kebanyakan kajian dalam pelaksanaan kaedah pirometalurgi mengenakan suhu yang tinggi berbanding dua kaedah lain [17, 23, 52]. Suhu yang tinggi dalam kaedah

pirometalurgi amat penting bagi memudahkan logam dan kekotoran dapat diasingkan dalam satu fasa yang berbeza. Penggunaan suhu yang tinggi menyebabkan penggunaan tenaga yang tinggi juga. Oleh itu, peralatan yang besar dan mahal diperlukan bagi menampung keupayaan ketika menjalankan proses pemanasan dan perawatan haba [71]. Kaedah pirometalurgi sesuai digunakan dalam skala yang besar. Disebabkan itu, kos yang lebih besar dan tinggi diperlukan untuk menyediakan peralatan dalam kaedah tersebut [71].

Aspek penggunaan elektrik mendapati bahawa kaedah hidrometalurgi menggunakan kuantiti elektrik yang banyak ketika menjalankan teknik elektrokimia [19]. Walau bagaimanapun, tidak semua teknik dalam kaedah hidrometalurgi menggunakan elektrik yang banyak. Kecekapan bagi kaedah hidrometalurgi lebih cekap berbanding kaedah pirometalurgi dalam memulih logam daripada bahan mentah [72] kerana lebih mesra alam sekitar dan penggunaan tenaga yang rendah. Manakala kaedah bio-hidrometalurgi mempunyai kecekapan yang lebih tinggi disebabkan oleh

kaedah ini menghasilkan jumlah sisa yang sangat sedikit dan tidak memberi pencemaran alam sekitar. Oleh itu, kaedah bio-hidrometalurgi sesuai digelar sebagai teknologi hijau [59]. Jadual 8 menunjukkan perbandingan ketiga-tiga kaedah kitar semula sisa bateri.

Kos antara kaedah hidrometalurgi dan bio-hidrometalurgi adalah rendah [6, 10, 23] tetapi didapati sebahagian kaedah hidrometalurgi memerlukan kos yang tinggi sekiranya digunakan pada skala industri terutama dalam penggunaan teknik pengekstrakan pelarut [19]. Bagi kaedah pirometalurgi pula adalah sebaliknya di mana proses tersebut menggunakan kos yang tinggi kerana tenaga yang tinggi diperlukan bagi menjalankan pemprosesan termal [10, 21]. Tetapi, menurut kajian Huang *et al.* tenaga yang diperlukan dalam proses pirometalurgi adalah rendah. Hal ini kerana kajian tersebut menggunakan teknik yang dikenali sebagai *vacuum metallurgy separation* (VMS) yang dapat merendahkan penggunaan tenaga dan meningkatkan kecekapan kaedah pirometalurgi [5].

Jadual 8 Perbandingan ketiga-tiga kaedah kitar semula sisa bateri

	Hidrometalurgi	Pirometalurgi	Bio-hidrometalurgi
Definisi	Proses yang mana tindak balas bahan kimia dilakukan dalam larutan akues atau organik bagi mendapatkan logam.	Menggunakan rawatan haba dengan membawa kepada perubahan fizikal dan kimia bagi memulihkan logam berharga	Adaptasi daripada proses hidrometalurgi dengan pencirian bioteknologi
Skala	Skala industri pada teknik pengekstrakan pelarut	Pelaksanaan dalam skala industri	Digunakan dalam kebanyakan perindustrian
Teknik	i. Larut lesap atau leaching ii. Pengekstrakan pelarut iii. Pemendakan kimia iv. Elektrokimia	i) Peleburan, ii) Pemanggangan, iii) Penukaran dan iv) Penapisan	i) <i>Bioleaching</i>
Suhu	Suhu bersederhana di bawah 100°C	Suhu tinggi sehingga mencapai 1200°C	Suhu dijalankan di bawah 100°C
Penggunaan elektrik	Menggunakan elektrik yang banyak	-	-
Kecekapan	Lebih cekap daripada proses pirometalurgi untuk melindungi logam daripada bahan mentah.	Kecekapan yang tinggi	Kecekapan yang tinggi
Kos	Kos murah tetapi bergantung pada teknik yang digunakan.	Kos yang tinggi bagi menyediakan peralatan yang besar dan mahal untuk menampung proses pemanasan dan perawatan haba.	Kos yang rendah. Bergantung kepada isipadu tangki dan kos operasi
Tenaga	Keperluan tenaga yang rendah	Pemprosesan termal yang memerlukan tenaga yang tinggi	Keperluan tenaga yang rendah
Jenis logam yang diasingkan	Li, Ni & Co	Pb, Zn, Mn Argentum dalam sel butang.	Co
Tempoh proses	Jangka masa singkat	Memerlukan pemulihan jangka masa yang lama.	Mengambil jangka masa yang lama.
Alam sekitar	Mesra alam sekitar	Alam sekitar yang lebih baik	Persekitaran yang serasi
Kelebihan	Meminimalkan air sisa. Tiada pencemaran udara. Lebih baik dari aspek alam sekitar	Berupaya untuk mengitar semula pelbagai jenis bateri yang mengandungi pelbagai bahan organik	Kesan alam sekitar yang rendah. Teknologi hijau. Mesra alam sekitar

	Hidrometalurgi	Pirometalurgi	Bio-hidrometalurgi
Kelemahan	Tenaga yang rendah tetapi menghasilkan sisa lain yang memerlukan tambahan rawatan	Menyebabkan pencemaran udara. Logam litium tidak boleh dipulihkan menggunakan proses ini	Menghasilkan bakteria yang mana bakteria tersebut sukar untuk mengeram (<i>incubate</i>)
Kesan	Tiada masalah pencemaran terhadap atmosfera	Masalah bunyi dan pelepasan gas. Banyak mengeluarkan kuantiti debu	Pembangunan aplikasi bioleaching dalam industri terhad disebabkan oleh kadar larut lesap yang perlahan

Jadual 7 menunjukkan kaedah hidrometalurgi menggunakan tempoh dalam masa yang singkat antara satu hingga dua jam manakala kaedah pirometalurgi dan kaedah bio-hidrometalurgi menggunakan jangka masa yang lama untuk menyingkirkan logam daripada sisa bateri. Daripada Jadual 7 juga menunjukkan kaedah pirometalurgi mengambil tempoh selama tiga hari untuk menyingkirkan logam plumbum daripada bateri automatif [17]. Kaedah pirometalurgi berkeupayaan untuk mengitar semula pelbagai jenis sisa bateri yang mengandungi pelbagai bahan organik [73] kecuali sisa bateri yang mengandungi logam litium [27]. Kebanyakan logam litium diproses menggunakan kaedah hidrometalurgi seperti kajian dalam Jadual 7. Kebanyakan penyelidik mengitar semula sisa bateri ion litium bagi menyingkirkan logam litium dan kobalt dengan menggunakan kaedah hidrometalurgi kerana pencapaian kecekapan melebihi 95%. Hasil daripada beberapa kajian, dapat dilihat satu-satu kaedah amat cenderung untuk menyingkirkan logam yang sama tetapi menggunakan larutan yang berbeza (seperti kaedah pirometalurgi) lebih cenderung untuk mendapatkan logam plumbum daripada bateri automatif [17, 74] manakala kaedah hidrometalurgi lebih tertumpu pada logam litium dan kobalt [19, 26, 46].

6.0 KESIMPULAN

Daripada kajian mendapati ketiga-tiga kaedah mempunyai pencirian yang tersendiri dalam melaksanakan kitar semula sisa bateri. Setiap kaedah tersebut mempunyai kecekapan yang berbeza terhadap pelbagai jenis sisa bateri. Walau bagaimanapun, hasil kajian mendapati kaedah hidrometalurgi lebih cenderung untuk mengitar semula sisa bateri ion-Li manakala kaedah pirometalurgi pula cenderung kepada penyingkiran logam plumbum dalam sisa bateri automatif. Kajian daripada penyelidik lain juga dilihat bateri ion-Li paling kerap dikitar semula. Ini kerana bateri ion-Li merupakan bateri yang mempunyai permintaan tinggi dalam pasaran kerana kegunaan bateri tersebut penting dalam kehidupan harian. Tambahan pula bateri tersebut mempunyai jangka

hayat yang rendah menyebabkan pengguna sentiasa menukar ganti bateri tersebut kepada bateri yang baru sehingga menjadi lambakan sisa bateri. Selain itu, kaedah bio-hidrometalurgi juga sudah kerap dijalankan kerana kaedah tersebut lebih mesra dalam sekitar berbanding kaedah lain. Walau bagaimanapun, kaedah bio-hidrometalurgi masih berada dalam skala pengujian makmal. Setiap kaedah mempunyai kecekapan yang tersendiri, walau bagaimanapun ulasan ini mendapati bahawa penyelidik kerap menggunakan kaedah hidrometalurgi berbanding yang lain kerana tempoh masa proses yang lebih singkat dan penggunaan kos yang lebih rendah. Justeru, proses kitar semula sisa bateri perlu dilakukan dalam tempoh yang singkat agar lambakan sisa bateri yang dihasilkan di dunia dapat diminimumkan sebaik mungkin.

Penghargaan

Pengarang merakamkan setinggi-tinggi penghargaan kepada Kementerian Pendidikan Malaysia melalui Fundamental Research Grant Scheme (kod penyelidikan: FRGS/1/2014/SSI12/UKM/02/1) dan Universiti Kebangsaan Malaysia melalui Projek Arus Perdana (kod penyelidikan: AP-2014-009) di atas sumbangan dana yang diberikan.

Rujukan

- [1] Purvins, A. Papaioannou, I., T. & Debarberis, L. 2013. Application of Battery-Based Storage System in House-Hold Demand Smoothing in Electricity-Distribution Grids. *Journal of Energy Conversion and Management*. 65: 272-284.
- [2] Hannan, M., A. Azidin, F., A. & Mohamed, A. 2014. Hybrid Electric Vehicles and Their Challenges: A Review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 29: 135-150.
- [3] McManus, M., C. 2013. Environmental Consequences of The Use of Batteries in Low Carbon System: The Impact of Battery Production. *Journal of Applied Energy*. 93: 288-295.
- [4] Sullivan, J., L. & Gaines, L. 2012. Status of Life Cycle Inventories for Batteries. *Journal of Energy Conversion and Management*. 58: 134-148.

- [5] Huang, K. Li, J. & Xu, Z. 2010. Characterization and Recycling of Cadmium from Waste Nickel-Cadmium Batteries. *Journal of Waste Management*. 30: 2292-2298.
- [6] Li, L. Ge, J. Chen, R. Wu, F. Chen, S. & Zhang, X. 2010. Environmental Friendly Leaching Reagent for Cobalt and Lithium Recovery from Spent Lithium-Ion Batteries. *Journal of Waste Management*. 30: 2615-2621.
- [7] EU. 2003. European Union: Directive On The Restriction Of The Use Of Certain Hazardous Substances In Electrical And Electronic Equipment. 2002/95/EC, February 2003. [Online]. From <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32002L0095:EN:HTML> [Accessed 15 January 2015].
- [8] EPBA. 2014. Study on behalf of the European Portable Battery Association (EPBA): The Collection Of Waste Portable Batteries In Europe In View Of The Achievability Of The Collection Targets Set By Batteries Directive 2006/66/EC. SagisEPR.com. [Online]. From <http://www.epbaeurope.net/documents/Reportontheportablebatterycollectionrates-UpdateDec-14-fullversion.pdf> [Accessed 15 January 2015].
- [9] Shapek, R., A. 1995. Local Government Household Battery Recycling Collection Programs : Cost and Benefits. *Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 15: 1-19.
- [10] Jadhav, U., U. & Hocheng, H. 2012. A Review of Recovery Metals from Industrial Waste. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 54(2): 159-167.
- [11] DG Environment. 2008. Final Report – Battery Capacity Determination and Labelling. European Commission DG Environment. Bio Intelligence Service S.A.S.
- [12] Adediran, Y., A. Shorinwa, J., A. & Uhunmwangho, R. 2010. Spent Lead-Acid Battery Management: Nigeria as A Case Study. *International Journal of Pure and Applied Science*. 3(1): 102-107.
- [13] Babatunde, O., A. Eguma, C., A. Oyeledun, B., T. Igwilo, O., C. Awosanya, O., G. & Adegbenro, O. 2014. Mobile Phone Usage and Battery Disposal in Lagos, Nigeria. *International Journal of Applied Psychology*. 4(4): 147-154.
- [14] Asari, M. & Sakai, S., I. 2013. Li-Ion Battery Recycling and Cobalt Flow Analysis in Japan. *Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 81: 52-59.
- [15] Ferella, F. Michelis, I., D. Pagnanelli, F. Beolchini, F. Furlani, G. Navarra, M. Veglio, F. & Toro, L. 2006. Recovery of Zinc and Manganese from Spent Batteries by Different Leaching Systems. *Journal of Acta Metallurgica Slovaca*. 12: 95-104.
- [16] Nagarajan, R. Thirumalaisamy, S. & Lakshumanan, E. 2012. Impact of Leachate on Groundwater Pollution Due to Non-Engineered Municipal Solid Waste Landfill Sites of Erode City, Tamil Nadu, India. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*. 9: 1-12.
- [17] Kreuzsch, M., A. Ponte, M., J., J., S. Ponte, H., A. Kaminari, N., M., S. Marino, C., E., B. & Mymrin, V. 2007. Technological Improvements in Automotive Battery Recycling. *Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 52: 368-380.
- [18] Rydh, C., J. & Svard, B. 2003. Impact on Global Metal Flows Arising from The Use of Portable Rechargeable Batteries. *The Science of the Total Environment*. 302: 167-184.
- [19] Xu, J. Thomas, H., R. Francis, R., W. Lum, K., R. Wang, J. & Liang, B. 2008. A Review of Process and Technologies for The Recycling of Lithium-Ion Secondary Batteries. *Journal of Power Sources*. 177: 512-527.
- [20] Noguiera, C., A. & Margarido, F. 2012. *Battery Recycling By Hydrometallurgy : Evaluation Of Simultaneous Treatment Of Several Cell Systems*. The Minerals, Metals and Material Society. John Wiley & Sons Inc, Hoboken, New Jersey. 227-234. ISBN 978-1-11829-138-2.
- [21] Espinosa, D., C., R. Bernardes, A., M. Tenorio, J., A., S. 2004. An Overview on The Current Processes for The Recycling of Batteries. *Journal of Power Source*. 135: 311-319.
- [22] Wang, J. Chen, M. Chen, M. Luo, T. & Xu, Z. 2012. Leaching Study of Spent Li-Ion Batteries. *Journal of Procedia Environmental Sciences*. 16: 443-450.
- [23] Gong, C. & Lei, L. 2013. Battery Recycling Technologies : Recycling Waste Lithium Ion Batteries with The Impact on The Environment In-View. *Journal of Environment and Ecology*. 4(1): 14-28.
- [24] Zaini, S. Katiman, R. & Abd Rahim, M., N. 2008. Kepentingan Pertumbuhan Premis Kitar Semula dalam Pengurusan Sisa di Malaysia. *Journal e-Bangi*. 3(1): 1-10.
- [25] Lupi, C. Pasquali, M. & Era, A., D. 2005. Nickel and Cobalt Recycling from Lithium-Ion Batteries by Electrochemical Process. *Journal of Waste Management*. 25: 215-220.
- [26] Shuva, M., A., L. & Kurny, A., S., W. 2013. Hydrometallurgical Recovery of Value Metals from Spent Lithium Ion Batteries. *American Journal of Materials Engineering and Technology*. 1(1): 8-12.
- [27] Zhang, P. Yokoyama, T. Itabashi, O. Wakui, Y. Suzuki, T., M. & Inoue, K. 1999. Recovery of Metal Values from Spent Nickel-Metal Hydride Rechargeable Batteries. *Journal of Power Sources*. 77: 116-122.
- [28] Mantuano, D., P. Dorella, G. Elias, R., C., A. & Mansur, M., B. 2006. Analysis of Hydrometallurgical Route to Recover Base Metals from Spent Rechargeable Batteries by Liquid-Liquid Extraction with Cyanex 272. *Journal of Power Sources*. 159: 1510-1518.
- [29] Georgi-Maschler, T. Friedrich, B. Weyhe, R. Heegn, H. & Rutz, M. 2012. Development of Recycling Process for Li-Ion Batteries. *Journal of Power Sources*. 207: 173-182.
- [30] Rabah, M., A. Farhaly, F., E. & Abd-El Motaleb, M., A. 2008. Recovery of Nickel, Cobalt and Some Salts from Spent Ni-MH Batteries. *Journal of Waste Management*. 28(7): 1159-1167.
- [31] EU. 2013. European Union: Directive 2013/56/EU of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013 amending Directive 2006/66/EC of the European Parliament And Of The Council On Batteries And Accumulators And Waste Batteries And Accumulators As Regards The Placing On The Market Of Portable Batteries And Accumulators Containing Cadmium Intended For Use In Cordless Power Tools And Of Button Cells With Low Mercury Content, And Repealing Commission Decision 2009/603/EC.
- [32] DOE UK. 2009. Environmental Protection: The Waste Batteries And Accumulators Regulations 2009. United Kingdom.
- [33] Australian Government. 2011. Product Stewardship Act 2011. ComLaw Authoritative Act 2011.
- [34] METI. 2003. Handbook on Resource Recycling Legislation and Trends in 3R. Recycling Promotion Division.
- [35] JAS. 2016. Peraturan Kualiti Alam Sekeliling (Buangan Terjadual) 2005. Akta Kualiti Alam Sekeliling 1974. Jabatan Alam Sekitar.
- [36] Oliveira, C., R., d. Bernardes, A., M. & Gerbase, A., E. 2012. Collection and Recycling of Electronic Scrap: A Worldwide Overview and Comparison with The Brazilian Situation. *Journal of Waste Management*. 32: 1592-1610.
- [37] Tasaki, T. 2014. The Recycling Scheme for Compact Rechargeable Batteries in Japan under The Act on The Promotion of Effective Utilization of Resources. National Institute Environmental Studies, Japan.
- [38] Belardi, G. Lavecchia, R. Medici, F. & Piga, L. 2012. Thermal Treatment for Recovery of Manganese and Zinc from Zinc-Carbon and Alkaline Spent Batteries. *Journal of Waste Management*. 32: 1945-1951.
- [39] Soo, V., K. & Doolan, M. 2014. Recycling Mobile Phone Impact on Life Cycle Assessment. *Procedia CIRP*. 15: 263-271.
- [40] ABRI. 2010. Battery Use, Disposal & Recycling in Australia. Planet Ark. Research Report. [Online]. From <http://recyclingweek.planetark.org/documents/doc-513-battery-research-report-final.pdf> [Accessed on 11 November 2014].

- [41] Department of Environment, Climate Change and Water NSW. 2010. Strategic Directions and Implementation Plan 2011-2015: NSW Waste Avoidance and Resource Recovery Strategy. NSW Government.
- [42] Buzatu, T. Popescu, G. Birloaga, I. & Saceanu, S. 2013. Study Concerning The Recovery of Zinc and Manganese from Spent Batteries by Hydrometallurgical Processes. *Journal of Waste Management*. 33: 699-705.
- [43] Bernardes, A., M. Espinosa, D., C., R. & Tenorio, J., A., S. 2004. Recycling of Batteries: A Review of Current Processes and Technologies. *Journal of Power Source*. 139: 291-298.
- [44] de Souza, C., C., B., M. & Tenorio, J., A., S. 2004. Simultaneous Recovery of Zinc and Manganese Dioxide from Household Alkaline Batteries Through by Hydrometallurgical Processing. *Journal of Power Source*. 136: 191-196.
- [45] Bhat, V. Rao, P. & Patil, Y. 2012. Development of an Integrated Model to Recover Precious Metals from Electronic Scrap – A Novel Strategy for E-Waste Management. *Journal of Procedia Social and Behavioral Sciences*. 37: 397-406.
- [46] Sun, L. & Qiu, K. 2011. Vacuum Pyrolysis and Hydrometallurgical Process for The Recovery of Valuable Metals from Spent Lithium-Ion Batteries. *Journal of Hazardous Materials*. 194: 378-384.
- [47] Lee, J., C. Song, H., T. Yoo, J., M. 2007. Present Status of The Recycling of Waste Electrical and Electronic Equipment in Korea. *Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 50: 380-397.
- [48] Rabah, M., A. & Barakat, M., A. 2001. Energy Saving and Pollution Control for Short Rotary Furnace in Secondary Lead Smelters. *Journal of Renewable Energy*. 23: 561-577.
- [49] Quass, U. Fermann, M. & Broker, G. 2000. The European Dioxin Emission Inventory Stage II. European Commission, Directorate General of Environment.
- [50] g-pbatt. 2014. The complete waste battery service. [Online]. From <http://www.g-pbatt.co.uk/recycle.html> [Accessed on 11 Desember 2014].
- [51] Gaines., L. 2014. The Future of Automotive Lithium-Ion Battery Recycling: Charting a Sustainable Course. *Journal of Sustainable Materials and Technologies*. 1-2: 2-7.
- [52] Coman, V. Robotin, B. & Ilea, P. 2013. Nickel Recovery/Removal from Industrial Waste: A Review. *Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 73: 229-238.
- [53] Ferreira, D., A. Prados, L., M., Z. Majuste, D. Mansur, M., B. 2009. Hydrometallurgical Separation of Aluminium, Cobalt, Copper and Lithium Ion from Spent Li-Ion Batteries. *Journal of Power Source*. 187: 238-246.
- [54] Muller, T. & Friedrich, B. 2006. Development of Recycling Process for Nickel-Metal-Hydride Batteries. *Journal of Power Sources*. 168: 1498-1509.
- [55] Freitas, M., B., J., G. Penha, T., R. & Sirtoli, S. 2007. Chemical and Electrochemical Recycling of The Negative Electrodes from Spent Ni-Cd Batteries. *Journal of Power Source*. 163: 1114-1119.
- [56] Reddy, B., R. & Priya, D., N. 2006. Chloride Leaching and Solvent Extraction of Cadmium, Cobalt and Nickel From Spent Nickel-Cadmium Batteries Using Cyanex 923 And 272. *Journal of Power Source*. 161: 1428-1434.
- [57] Santos, V., E., O. Celante, V., G. Lelis, M., F., F. & Freitas, M., B., J., G. 2012. Chemical and Electrochemical Recycling of The Nickel, Cobalt, Zinc and Manganese from The Positives Electrodes of Spent Ni-MH Batteries from Mobile Phones. *Journal of Power Source*. 218: 435-444.
- [58] Gahan, C., S. Srichandan, H. Kim, D., J. & Akcil, A. 2012. Biohydrometallurgy and Biomineral Processing Technology: A Review on Its Past, Present and Future. *Research Journal of Recent Science*. 1(10): 85-99.
- [59] Willner, J. Kadukova, J. Fornalczyk., & Saternus, M. 2015. Biohydrometallurgical Methods for Metal Recovery from Waste Materials. *Journal of Metalurgija*. 54(1): 255-258.
- [60] Pant, D. Joshi, D. Upreti, M., K. & Kotnala, R., K. 2012. Chemical and Biological Extraction of Metals Present in E-Waste: A Hybrid Technology. *Journal of Waste Management*. 32: 979-990.
- [61] Xin, B. Jiang, W. Li, X. Zhang, K. Liu, C. Wang, R. & Wang, Y. 2012. Analysis of Reason for Decline of Bioleaching Efficiency of Spent Zn-Mn Batteris at High Pulp Densities and Exploration Measure for Improving Performance. *Journal of Bioresource Technology*. 112: 186-192.
- [62] Mishra, D. Kim, D., J. Ralph, D., E. Ahn, J., G. & Rhee, Y., H. 2008. Bioleaching of Metals from Spent Lithium Ion Secondary Batteries Using *Acidithiobacillus Ferrooxidans*. *Journal of Waste Management*. 28: 333-338.
- [63] Zhao, L. Yang, D. & Zhu, N., W. 2008. Bioleaching of Spent Ni-Cd Batteries by Continuous Flow System: Effect of Hydraulic Retention Time and Process Load. *Journal of Hazardous Materials*. 160: 648-654.
- [64] Jefri Jaafar & Wan Azlina Ahmad. 2004. Batteries Recycling Process Using Local Isolated Thermopile Culture. The 4th Annual Seminar of National Science Fellowship. University Technology Malaysia.
- [65] Cerruti, C. Curutchet, G. & Donati, E. 1998. Bio-Dissolution of Spent Nickel-Cadmium Batteries Using *Thiobacillus Ferrooxidans*. *Journal of Biotechnology*. 62: 209-219.
- [66] Zabaniotou, A. Kouskoumvekaki, A. & Sanopoulos, D. 1999. Recycling of Spent Lead/Acid Batteries: The Case of Greece. *Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 25: 301-317.
- [67] Bartolozzi, M. Bracinni, G. Bonvini, S. & Marconi, P., F. 1995. Hydrometallurgical Recovery Process for Nickel-Cadmium Spent Batteries. *Journal of Power Sources*. 55: 247-250.
- [68] Pareuil, P. Hamdoun, H. Bordas, F. Joussein, E. & Bollinger, J., C. 2011. The Influence of Reducing Conditions on The Dissolution of a Mn-Rich Slag from Pyrometallurgical Recycling of Alkaline Batteries. *Journal of Environmental Management*. 92: 102-111.
- [69] Zhang, P. Yokoyaman, T. Itabashi, O. Wakui, Y. Suzuki, T., M. & Inoue, K. 1998. Hydrometallurgical Process for Recovery of Metal Values from Spent Nickel-Metal Hydride Secondary Batteries. *Journal of Hydrometallurgy*. 50: 61-75.
- [70] Gupta, C., K. & Mukhreje, T., K. 1990. *Hydrometallurgical In Extraction Processes: Volume 1*. CRC Press, Inc.
- [71] Fathi Habashi. 2013. Extraction Metallurgy and National Policy. *International Journal of Nonferrous Metallurgy*. 2: 31-34.
- [72] Sayilgan, E. Kukrer, T. Civelekoglu, G. Ferella, F. Akcil, A. Veglio, F. & Kitis, M. 2009. A Review of Technologies for The Recovery of Metals from Spent Alkaline and Zinc-Carbon Batteries. *Journal of Hydrometallurgy*. 97(3-4): 158-166.
- [73] Turek, A., S. Szczepaniak, W. & Malicka, M., Z. 2014. Electrochemical Evaluation Of Manganese Reducers – Recovery of Mn from Zn-Mn and Zn-C Battery Waste. *Journal of Power Sources*. 270: 668-674.
- [74] Pan, J. Sun, Y. Li, W. Knight, W. & Manthiram, A. 2013. A Green Lead Hydrometallurgical Process Based on A Hydrogen-Lead Oxide Fuel Cell. *Nature Communications*. McMillan Publisher.