



## ARTIKEL REVIEW

## Pelarut *Deep Eutectic Etalin* Sebagai Agen Pelindian Logam Perak dari Limbah *Printed Circuit Boards* (PCB)

Soja Siti Fatimah<sup>1\*</sup>, Muhammad Yunus Firdaus<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Kimia FPMIPA Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia

Koresponden: E-mail: [soja\\_sf@upi.edu](mailto:soja_sf@upi.edu)

### ABSTRAK

*Deep eutectic solvent* (DES) merupakan pelarut yang akhir-akhir ini menjadi perhatian dalam pelindian logam dari berbagai limbah industri. Penelitian ini berbasis *review* jurnal mengkaji penggunaan pelarut *deep eutectic Etalin* sebagai agen pelindian logam perak dari limbah *printed circuit boards* (PCB) yang berbasis kolin klorida/ChCl sebagai akseptor ikatan hidrogen dan etilen glikol donor ikatan hidrogen. Model penelitian yang digunakan adalah *traditional narrative review*. Tahapan penelitian yang dilakukan dengan mengidentifikasi masalah terkait sintesis dan karakterisasi, juga aplikasi dalam penggunaan pelarut *deep eutectic Etalin* dalam pelindian logam perak. Hasil *review* jurnal menunjukkan bahwa sintesis DES Etalin dapat dilakukan dengan rasio molar ChCl dan etilen glikol (1:2) pada temperatur 50-100 °C dengan pengadukan hingga terbentuk suatu campuran yang homogen. Hasil karakterisasi DES Etalin dengan FTIR mengindikasikan adanya pergeseran bilangan gelombang gugus fungsi -OH. Hasil analisis dengan TGA, DES mengalami dekomposisi pada temperatur 354-582 K. Hasil analisis menunjukkan bahwa DES Etalin dapat diaplikasikan pada pelindian logam perak dengan persen kemurnian tinggi. Karakterisasi perak hasil pelindian menunjukkan warna abu-abu muda dengan bentuk kristal mikro dendritik.

Diterima 12 Jul 2021  
Diperbaiki 11 Sept 2021  
Diterbitkan 15 Nov 2021

**Kata Kunci** DES Etalin; Limbah PCB; Pelindian Logam Perak.

### ABSTRACT

Deep eutectic solvent (DES) is a solvent that has recently become a concern in the leaching of metals from various industrial wastes. This research is based on a review of journals examining the use of the deep eutectic solvent Ethaline as a leaching agent for silver metal from printed circuit boards PCB waste based on choline chloride/ChCl as hydrogen bond acceptor and ethylene glycol hydrogen bond donor. The research model used is a traditional narrative review. The research steps were carried out by identifying problems related to synthesis and characterization, as well as the application of the deep eutectic solvent Ethaline in leaching silver metal. The results of the journal review showed that the synthesis of DES Ethaline could be carried out with a molar ratio of ChCl and ethylene glycol (1:2) at a temperature of 50-100 °C with stirring until a homogeneous mixture was formed. The results of the DES Ethaline characterization with FTIR indicated a shift in the wave number of the -OH functional group. The results of the analysis with TGA, DES decomposes at a temperature of 354-582 K. This result indicated that DES Ethaline can be applied to the leaching of silver metal with high purity percentage. The characterization of the leached silver showed a light grey colour with dendritic microcrystals.

**Kata Kunci:** DES Etaline; PCB Waste; Silver Leaching.

### 1. PENDAHULUAN

Perak merupakan logam mulia karena memiliki sifat tahan korosi dan oksidasi, selain itu juga cukup berharga dan langka, meskipun tidak seberharga emas. Perak memiliki sifat konduktor termal dan listrik terbaik dari semua logam, dan sangat ideal untuk aplikasi kelistrikan [1]. Menurut Global Data, produksi perak selama empat tahun mengalami penurunan, namun secara global diperkirakan

akan meningkat sebesar 8,1% pada tahun 2021 menjadi 918,3 juta ons dan akan melebihi satu miliar ons pada tahun 2024 dengan tingkat pertumbuhan tahunan gabungan (CAGR) 3,2%. Untuk menjaga bijih tambang perak yang semakin langka, limbah industri dapat dikelola sebagai sumber perak melalui teknik pelindian.

Beberapa limbah industri yang memiliki kandungan logam perak diantaranya berasal dari: PCB [2], dan baterai

bekas [3]. Pembuangan baterai litium bekas dan PCB dapat menimbulkan permasalahan lingkungan karena adanya pelepasan logam dan elektrolit padat dari limbah elektronik yang dapat membahayakan lingkungan [2,4]. Kandungan kimia PCB (% massa) diantaranya adalah Ag = 39,7; Au = 18,9; Sn = 22,5; Cu = 13,98; Pb = 3,5; Fe = 0,12; Ni = 0,92; Sb = 0,33; Kr = 0,05 [2]. Kandungan Ag dan Au yang relatif banyak, membutuhkan suatu metode untuk mendapatkan kandungan logam perak atau emas yang terdapat dalam PCB.

Metode pelindian logam menjadi hal yang penting dalam proses mendapatkan logam murni dari suatu limbah elektronik. Pelindian logam merupakan proses pelarutan logam dari suatu padatan atau limbah yang mengandung unsur logam dalam media cair atau pelarutnya [5]. Pada Tahun 2006, Abbot, dkk. [6] menerbitkan beberapa jurnal yang berkaitan dengan pelarut, yaitu DES (*Deep Eutectic Solvents*). Mereka mempelajari karakteristik sistem pelarut ini dan menunjukkan kemungkinan penggunaannya sebagai pelarut dengan sifat-sifat yang menarik. DES mengandung ion besar dan non-simetris yang memiliki energi kisi rendah sehingga titik lelehnya rendah. DES merupakan gabungan antara garam amonium kuaterner (akseptor ikatan hidrogen/HBA) dengan garam logam atau donor ikatan hidrogen (HBD). Secara umum, DES digambarkan sebagai campuran asam-basa Brønsted-Lowry dan Lewis [7-8]. DES memiliki keunggulan yang cukup banyak dalam penggunaannya untuk berbagai aplikasi, diantaranya pada sintesis senyawa organik, elektrokimia, serta pelarutan dan ekstraksi logam. Keunggulan lainnya DES memiliki biodegradabilitas yang baik, toksisitas yang rendah, biaya yang DES Etalin terdiri dari campuran ChCl (HBA) sebagai akseptor ikatan hidrogen dengan etilen glikol (HBD) sebagai donor ikatan hidrogen yang memiliki sifat unik dan mencakup kelarutan yang tinggi pada berbagai spesi netral maupun bermuatan [7,11]. DES Etalin mampu melarutkan oksida logam [6] dan memiliki viskositas yang rendah (33-22 cP) [12]. Popescu, dkk., 2020 [2] melakukan pelindian logam perak dengan metode pelindian elektro (*anodic dissolution*) yang menggunakan DES Etalin dari limbah PCB. Review jurnal ini dibatasi pada studi karakteristik DES Etalin dalam melakukan pelindian logam perak dari limbah PCB.

## 2. METODE

Penelitian ini dilakukan berbasis review jurnal dan model yang digunakan adalah *traditional narrative review*, yaitu identifikasi masalah, menentukan jurnal yang akan diseleksi, dibandingkan, dan dirangkum berdasarkan pemikiran penulis. Hasil penelitian ini didasarkan pada aspek kualitatif, yang mana sumber data yang digunakan merupakan data sekunder. Data tersebut didapat dari jurnal mengenai hal-hal yang terkait dengan sintesis dan karakterisasi, DES Etalin, pelindian logam perak, limbah PCB.

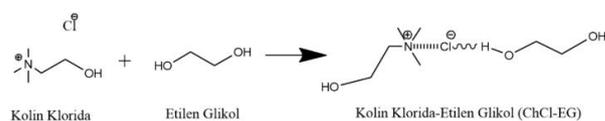
## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Sintesis DES Etalin

DES Etalin merupakan pelarut eutektik dalam yang terdiri dari akseptor ikatan hidrogen (HBA) yang berasal dari kolin klorida (ChCl) yang merupakan amonium kuaterner dan etilen glikol (EG) sebagai donor ikatan hidrogen (HBD). Secara umum, DES Etalin dibuat dengan mencampurkan kolin klorida (ChCl) dan etilena glikol (EG) pada rasio molar 1:2 [11]. Tahapan pencampuran komponen HBA dan HBD terutama DES Etalin dapat dilakukan dengan metode pemanasan yang merupakan metode yang paling umum digunakan. Pembuatan DES Etalin dilakukan dengan cara mencampurkan HBA dan HBD, kemudian dipanaskan pada suhu 50-100 °C dengan pengadukan konstan selama beberapa waktu hingga berubah menjadi cairan tak berwarna yang homogen [9].

### 3.2 Sintesis Kopolimer Superabsorben Menggunakan Microwave

DES dapat terbentuk dengan adanya ikatan ionik dan ikatan hidrogen. Kation N yang terikat dengan anion Cl menghasilkan ikatan ionik, karena N harus melepaskan satu elektronnya untuk mencapai keadaan oktet dan Cl harus menerima satu elektron yang didonorkan N. Ikatan hidrogen terbentuk antara gugus H pada hidroksil HBD dengan anion klorida. Atom O pada gugus hidroksil HBD yang sangat elektronegatif ini memiliki kemampuan donor hidrogen dan klorida sebagai akseptornya menciptakan daya tarik dipol-dipol antara atom hidrogen yang terikat pada donor dan pasangan elektron bebas dari akseptor, sehingga akan membentuk ikatan hidrogen (Gambar 1).



Gambar 1. Reaksi yang terlibat dalam persiapan DES Etalin [13].

### 3.2. Interaksi Kolin dan Etilen Glikol

DFT merupakan rekayasa sistem molekul dengan adanya interaksi ikatan antar partikel. DFT memungkinkan kita untuk mengetahui interaksi yang terjadi dalam suatu senyawa dengan perhitungan matematika (Cho, dkk., 2014). Penggunaan DFT telah diterapkan pada sintesis DES Etalin yang menunjukkan interaksi antar atom. Data DFT yang digunakan adalah pada penelitian Stefanovic, dkk., 2017 [14] untuk menunjukkan jarak antar atom dengan fungsi distribusi radial parsial dan dapat menunjukkan struktur DES Etalin. Berdasarkan Zhong, dkk., 2020 menunjukkan  $N^+-Cl^-$  memiliki puncak pada jarak 3,9 Å. Stefanovic, dkk. [14], menjelaskan adanya interaksi yang kuat antar kation amonium dan anion klorida yang dapat mempengaruhi ikatan hidrogen yang terbentuk antara ChCl dengan anion klorida. Sehingga HBD Etilen glikol mampu memberikan interaksi yang kuat untuk mengimbangi

adanya ikatan elektrostatik yang kuat. Hasil DFT menunjukkan puncak tertinggi HgOH-Cl<sup>-</sup> pada jarak 2,1 Å yang mengindikasikan interaksi HBD dengan anion klorida yang kuat dengan adanya beberapa molekul HBD yang mengikat anion klorida.

### 3.3. Rasio Molar HBA dan HBD

Konsentrasi HBA dan HBD yang digunakan dalam sintesis DES Etalin menjadi faktor penting yang perlu diperhatikan, karena akan berpengaruh terhadap pembentukan DES. Rasio molar HBA: HBD adalah 1:2 [11, 16-17]. Manurung, dkk., [12] melakukan sintesis DES Etalin dengan suhu 353,15 K selama 2 jam dengan kecepatan 400 rpm, dengan memvariasikan perbandingan molar HBA dan HBD yang berbeda-beda untuk menguji sifat viskositas dan densitasnya. Hasil pengujian sifat densitas DES Etalin berkisar antara 1,1 – 1,3 g/mL, sedangkan hasil pengujian viskositas berkisar antara 22 – 33 cP.

### 3.4. Karakterisasi DES Etalin

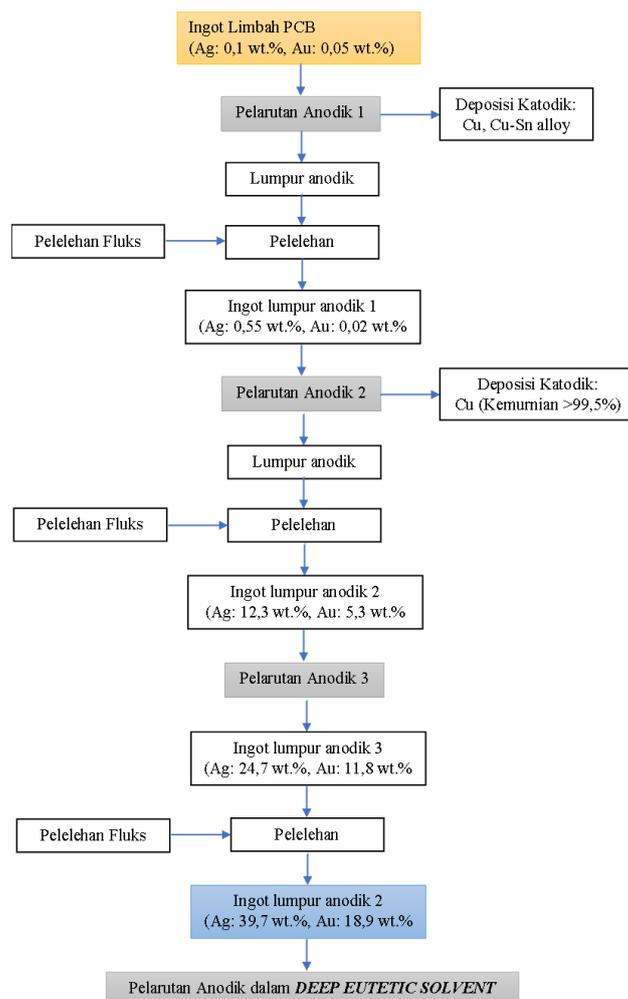
Karakterisasi DES Etilen hasil sintesis dapat dilakukan menggunakan alat instrumentasi FTIR dan TGA. Analisis FTIR menunjukkan adanya vibrasi ulur OH dalam etilen glikol (EG) pada puncak sekitar 3296,84 cm<sup>-1</sup>. Namun, setelah menjadi Etalin vibrasi OH berada pada bilangan gelombang 3307,67 cm<sup>-1</sup> dengan intensitas yang kuat. Hal ini mengakibatkan pergeseran bilangan frekuensi puncak OH pada DES yang disebabkan oleh pemanfaatan energi untuk pembentukan ikatan baru C-OH pada HBD dan juga ikatan hidrogen yang terbentuk antara H-Cl seperti yang digambarkan sebelumnya.

Etilen glikol memiliki puncak ganda yang terlihat pada 2929,92 cm<sup>-1</sup> dan 2875,00 cm<sup>-1</sup>. Etalin memiliki puncak ganda yang terlihat pada 2927,88 cm<sup>-1</sup> dan 2873,72 cm<sup>-1</sup> yang menandakan getaran C-H sp<sup>3</sup>. Puncak signifikan lainnya yang dapat digunakan untuk perbandingan adalah vibrasi ulur C-OH dan C-O-C, yang terjadi pada setiap spektrum DES, termasuk puncak positif tunggal atau ganda di sekitar bilangan gelombang 1033,33–1108,95 cm<sup>-1</sup>. Pada bilangan gelombang tersebut adanya indikasi dari getaran C-N yang dimiliki oleh HBA dari kolin [18].

Untuk mengkonfirmasi potensi penggunaan DES sebagai pelarut alternatif, salah satu sifat yang paling relevan untuk ditentukan adalah stabilitas termalnya. Stabilitas termal ini dapat dicari dengan TGA untuk mengetahui suhu dekomposisi awal zat [19]. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Delgado-Mellado, dkk. [19], stabilitas etalin lebih tinggi daripada etilen glikol murni dan telah sepenuhnya menguap pada 390 K. Langkah pertama, DES mengalami kehilangan massa dari (354 ke 516) K disebabkan adanya penguapan etilen glikol di bawah titik didihnya. Langkah kedua, DES mengalami kehilangan massa dari (516 hingga 555) K yang dikaitkan dengan penguapan etilen glikol setelah titik didihnya tercapai dan terlampaui. Langkah ketiga DES mengalami kehilangan massa dari (555 menjadi 582) K disebabkan oleh dekomposisi ChCl [19].

### 3.5. Aplikasi DES Etalin pada Pelindian Logam Perak

Pelindian merupakan proses pelarutan logam dari suatu padatan atau limbah yang mengandung unsur logam dalam media cair atau sebagai pelarutnya [5]. Pelindian logam perak dari limbah PCB dengan DES Etalin dilakukan dengan metode electroleaching atau pelarutan anodik. Popescu, dkk., [2] melakukan pelarutan anodik dengan melarutkan sampel S1 dari limbah PCB yang telah digiling, dilelehkan dan dicetak, lalu direndam dalam elektrolit yang mengandung 150 g/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 120 g/L CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O dan 1 g/L bone glue dalam 3 tahap proses pelarutan anodik (Gambar 2).



Gambar 2. Bagan alir tiga pelarutan anodik untuk mendapatkan sampel S1 [2].

Pelarutan terjadi pada potensial yang diterapkan pada 0,4-0,5 V. Dua foil stainless steel (80x100x0,5 mm) digunakan sebagai katoda yang ditempatkan secara simetris ke anoda pusat (ingot limbah PCB). Setelah proses disolusi anodik pertama, deposit katodik mengandung paduan Cu dan Cu-Sn. Lendir anodik yang diperoleh dari pelarutan pertama dikumpulkan dari bagian bawah sel, lalu dicuci dengan air suling dan dikeringkan dalam oven pada suhu 353 K. Lendir anodik kering dicampur dengan pelelehan fluks (80% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dan 20% Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>), dilebur dalam tungku

listrik dan dicetak ke dalam ingot logam. Ingot yang diperoleh, selanjutnya masuk dalam proses pelarutan anodik baru (proses ke-2). Setelah pelarutan kedua ini pada katoda diperoleh logam Cu dengan kemurnian >99,5%. Setelah itu, proses diulang untuk pelarutan ketiga (proses ke-3).

Setelah tahap ke-3, sampel S1 yang terbentuk dilarutkan dalam DES Etalin sebagai media pelarut yang ramah lingkungan, dan memiliki selektivitas yang tinggi terhadap pungut ulang logam perak [2]. Selama proses elektrowining dalam media DES Etalin, substrat tembaga digunakan untuk memperoleh perak yang akan menempel pada permukaan katoda tembaga. Hasil elektrowining menunjukkan representasi yang sangat tinggi hingga mencapai 99% logam perak yang dapat di pungut ulang dari limbah PCB dengan menggunakan DES Etalin sebagai media pelindian dan electrowinning.

### 3.6. Karakterisasi Hasil Pelindian Logam Perak dari PCB dengan DES Etalin

Hasil analisis menggunakan deposisi galvanostik, XRD, dan SEM. menunjukkan, deposisi cukup selektif untuk menghasilkan Ag dari sampel S1 dalam elektrolit DES Etalin yang ditambahkan  $I_2$  dengan menggunakan substrat tembaga. Hasil yang didapatkan menunjukkan pembentukan lapisan perak abu-abu muda yang menempel pada permukaan substrat tembaga. Pembentukan lapisan perak dengan mudah pada penyangga Cu dengan adanya penambahan  $I_2$  karena sebagai agen pengoksidasi elektrolit yang mampu meningkatkan pelarutan dan pungut ulang logam.

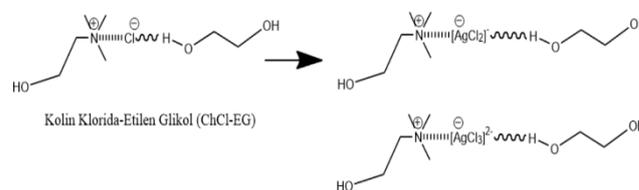
Berdasarkan hasil XRD, Cu yang terdeteksi merupakan substrat tembaga dan endapan terbentuk dari perak murni. Namun, karena ketebalannya yang kecil juga dibuktikan dengan puncak karakteristik pada sudut ( $2\theta$ ) yang sesuai dengan substrat Cu. Sinar-X radiasi Cu  $K\alpha$  lapisan tipis Ag pada substrat tembaga di  $20^\circ \leq 2\theta \leq 100^\circ$  rentang sudut mengandung refleksi coper dan Ag (111), (200), (220), (311), (222) dari struktur kubik grup ruang FCC dengan parameter sel satuan  $a \approx 0,4099$  nm. Hal ini sesuai dengan basis data JCPDS File No. 04-0783 yang menunjukkan logam perak yang terbentuk. Berdasarkan hasil SEM, perak tumbuh sebagai kristal besar dalam bentuk mikro dendritik.

### 3.7. Orde dan mekanisme reaksi pelindian logam perak dengan pelarut Etalin

Berdasarkan penelitian Peeters, dkk., [4] yang menggunakan ChCl-asam sitrat untuk pelindian kobalt dari limbah baterai litium, kobalt akan berikatan dengan ion klorida pada ChCl yang membentuk ikatan kompleks. Hal ini sejalan dengan penelitian Li & Binnemans [20], DES memiliki komponen yang dapat bertindak sebagai ligan dan membentuk kompleks dari ligan tersebut. Kompleks ligan yang terbentuk akan mudah larut dalam DES yang mengikat pada kation kolin ( $N^+$ ). Kation kolin memiliki peran dalam pembentukan ion kompleks. Kation kolin digunakan sebagai

counter ion untuk meningkatkan konsentrasi anion klorida. Konsentrasi klorida yang relatif tinggi dalam DES menyebabkan pembentukan dominan kompleks anionik tetraklorokobaltat(II) [4] [21].

Pembentukan kompleks ion klorida dengan logam perak dapat dibuat dengan rasio molar ChCl dengan etilen glikol 1:2. Frisch, dkk., [22] menjelaskan logam seperti emas, perak dan tembaga dapat membentuk kompleks yang stabil dengan klorida Hal ini sejalan dengan penelitian Hartley, dkk. [23] mengenai spesiasi logam dengan pelarut ionik dan DES berbasis diol 1:2 yang menjelaskan perak membentuk campuran  $[AgCl_2]^-$  dan  $[AgCl_3]^{2-}$  dalam DES ChCl dengan etilen glikol 1:2. Sehingga, pelindian logam perak dengan DES Etalin pada limbah industri dapat dilakukan dengan rasio molar ChCl dengan etilen glikol 1:2. Penggunaan DES tersebut sudah diterapkan oleh Popescu, dkk. [2] yang melakukan pelindian logam perak dan emas dengan DES Etalin dari limbah PCB dengan perolehan kemurnian logam perak 99% dan emas 30-70%. Gambar 3 menjelaskan reaksi yang diusulkan untuk DES Etalin.



Gambar 3. Reaksi yang diusulkan pada pelindian dengan DES Etalin.

## 4. KESIMPULAN

Sintesis DES Etalin dapat dilakukan dengan rasio molar ChCl dan etilen glikol (1:2) pada temperatur 50-100 °C dengan pengadukan hingga terbentuk suatu campuran yang homogen. Hasil karakterisasi DES Etalin dengan FTIR mengindikasikan adanya pergeseran bilangan gelombang OH. Hasil analisis dengan TGA DES mengalami dekomposisi pada temperatur 354- 82K.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] E.C. Ferré, The Many Uses of Silver. <https://geology.com/articles/uses-of-silver/> 2017 [Diakses 29 Mei 2021].
- [2] A.M. Popescu, V. Soare, O. Demidenko, J.M.C. Moreno, E.I. Neacsu, D. Donath, M. Burada, I. Constantin, V. Constantin, "Recovery of silver and gold from electronic waste by electrodeposition in ethaline ionic liquid," *Revista de Chimie*, vol. 71 no. 1, pp. 122-132, 2020.
- [3] N. Sathaiyan, V. Nandakumar, P. Ramachandran, "Hydrometallurgical recovery of silver from waste silver oxide button cells," *Journal of Power Sources*, vol. 161, no. 2, pp. 1463-1468, 2006.
- [4] N. Peeters, K. Binnemans, S. Riaño, "Solvometallurgical recovery of cobalt from lithium-ion battery cathode

- materials using deep-eutectic solvents," *Green Chemistry*, vol. 22, pp. 4210-4221, 2020.
- [5] M. Sethurajan, P.N.L. Lens, H.A. Horn, L.H.A. Figueiredo, E.D. van Hullebusch, "Leaching and Recovery of Metals," in *Sustainable Heavy Metal Remediation*, E.R. Rene, E. Sahinkaya, A. Lewis, P.N.L. Lens, Eds. Cham: Springer, 2017, pp. 161-206.
- [6] A.P. Abbott, G. Capper, L.D. Davies, K.J. McKenzie, S.U. Obi, (2006). "Solubility of Metal Oxides in Deep Eutectic Solvents Based on Choline Chloride," *Journal of Chemical Engineering*, vol. 51, no. 4, pp. 1280-1282, 2006.
- [7] A.P. Abbott, G. Capper, L.D. Davies, H.L. Munro, R.K. Rasheed, V. Tambyrajah, "Preparation of novel, moisture-stable, Lewis-acidic ionic liquids containing quaternary ammonium salts with functional side chains," *Chemical Communications*, vol. 19, pp. 2010-2011, 2001.
- [8] L.E. Smith, A.P. Abbott, K.S. Ryder, "Deep Eutectic Solvents (DESs) and Their Applications," *Chemical Reviews*, vol. 114, no. 21, pp. 11060-11082, 2014.
- [9] J. Płotka-Wasyłka, M. de la Guardia, V. Andruch, M. Vílková, "Deep eutectic solvents vs ionic liquids: Similarities and differences," *Microchemical Journal*, vol. 159, pp. 1-7, 2020.
- [10] A. Rusen, M. Ali Topcu, "Investigation of Various Metal Recoveries from Zinc Plant Leach Residue by Choline-Chloride Agent," *Current Physical Chemistry*, vol. 7, no. 4, pp. 273-280, 2017.
- [11] J.R. Brusas, E.M.D.B. Pena, "Hygroscopicity of 1:2 Choline Chloride:Ethylene Glycol Deep Eutectic Solvent: A Hindrance to its Electroplating Industry Adoption," *Journal of Electrochemical Science and Technology*, pp. 1-7, 2021.
- [12] R. Manurung, G.C. Simanjuntak, R.N. Perez, A. Syahputra, M.A. Alhamdi, H. Siregar, R.R. Syahputri Zuhri, "Production of Choline Chloride-Based Deep Eutectic Solvent with Hydrogen Bond Donor D-Glucose and Ethylene Glycol," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 505, pp. 012134, 2019.
- [13] C.Y. Lim, M.F. Majid, S. Rajasuriyan, H.F. Mohd Zaid, K. Jumbri, F.K. Chong, "Desulfurization Performance of Choline Chloride-Based Deep Eutectic Solvents in the Presence of Graphene Oxide," *Environments*, vol. 7, no. 11, pp. 1-17, 2020.
- [14] R. Stefanovic, M. Ludwig, G.B. Webber, R. Atkin, A.J. Page, "Nanostructure, hydrogen bonding and rheology in choline chloride deep eutectic solvents as a function of the hydrogen bond donor," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 19, no. 4, pp. 3297-3306, 2017.
- [15] M. Zhong, Q.F. Tang, Y.W. Zhu, X.Y. Chen, Z.J. Zhang, "An alternative electrolyte of deep eutectic solvent by choline chloride and ethylene glycol for wide temperature range supercapacitors," *Journal of Power Sources*, vol. 452, 227847, 2020.
- [16] A. Yadav, J.R. Kar, M. Verma, S. Naqvi, S. Pandey, "Densities of aqueous mixtures of (choline chloride+ethylene glycol) and (choline chloride+malonic acid) deep eutectic solvents in temperature range 283.15-363.15K," *Thermochimica Acta*, vol. 600, pp. 95-101, 2015.
- [17] R. Haghbakhsh, S. Raeissi, "A study of non-ideal mixtures of ethanol and the (1 choline chloride + 2 ethylene glycol) deep eutectic solvent for their volumetric behaviour," *The Journal of Chemical Thermodynamics*, vol. 150, 106219, 2020.
- [18] S. Sivrikaya, "A novel vortex-assisted liquid phase microextraction method for parabens in cosmetic oil products using deep eutectic solvent," *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, vol. 99, pp. 1575-1585.
- [19] N. Delgado-Mellado, M. Larriba, P. Navarro, V. Rigual, M. Ayuso, J. García, F. Rodríguez, "Thermal stability of choline chloride deep eutectic solvents by TGA/FTIR-ATR analysis," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 260, pp. 37-43, 2018.
- [20] X. Li, K. Binnemas, "Oxidative Dissolution of Metals in Organic Solvents," *Chemical Reviews*, vol. 121, no. 8, pp. 4506-4530, 2021.
- [21] N. Rodriguez, L. Machiels, B. Onghena, J. Spooen, K. Binnemas, "Selective recovery of zinc from goethite residue in the zinc industri using deep-eutectic solvents," *RSC Advances*, vol. 10, no. 12, pp. 7328-7335, 2020.
- [22] G. Frisch, J. Hartley, A.P. Abbott, W.O. Karim, K.S. Ryder, "Anodic dissolution of metals in ionic liquids," *Progress in Natural Science: Materials International*, vol 25, no. 6, pp. 595-602, 2015.
- [23] J.M. Hartley, C.M. Ip, G.C.H. Forrest, K. Singh, S.J. Gurman, K.S. Ryder, G. Frisch, "EXAFS Study into the Speciation of Metal Salts Dissolved in Ionic Liquids and Deep Eutectic Solvents," *Inorganic Chemistry*, vol. 53, no. 12, pp. 6280-6288, 2015.