

PUNGUT ULANG LOGAM PERAK DARI LIMBAH *PRINTED CIRCUIT BOARD* MENGGUNAKAN PELARUT EUTEKTIK BINER DAN TERNER

SKRIPSI

diajukan untuk memenuhi sebagian syarat memperoleh gelar Sarjana Sains pada
Program Studi Kimia



Oleh

Arrizal Abdul Aziz

NIM 1906235

**PROGRAM STUDI KIMIA
FAKULTAS PENDIDIKAN MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS PENDIDIKAN INDONESIA**

2023

PUNGUT ULANG LOGAM PERAK DARI LIMBAH *PRINTED CIRCUIT BOARD* MENGGUNAKAN PELARUT EUTEKTIK BINER DAN TERNER

Oleh:

Arrizal Abdul Aziz

1906235

Sebuah skripsi yang diajukan untuk memenuhi sebagian syarat memperoleh gelar
Sarjana Sains Program Studi Kimia

Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

© Arrizal Abdul Aziz 2023

Universitas Pendidikan Indonesia

Agustus 2023

Hak Cipta dilindungi undang-undang

Skripsi ini tidak boleh diperbanyak seluruhnya atau sebagian, dengan dicetak ulang, difotokopi, atau cara lainnya tanpa izin penulis.

ARRIZAL ABDUL AZIZ

PUNGUT ULANG LOGAM PERAK DARI LIMBAH *PRINTED CIRCUIT BOARD* MENGGUNAKAN PELARUT EUTEKTIK BINER DAN TERNER

disetujui dan disahkan oleh pembimbing:

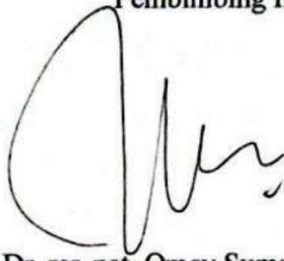
Pembimbing I



Dr. Soja Siti Fatimah, M.Si.

NIP 196802161994022001

Pembimbing II

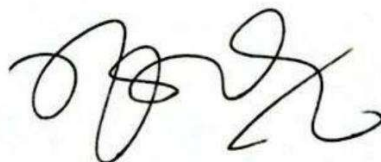


Dr. rer. nat. Omay Sumarna, M.Si.

NIP 196404101989031025

Mengetahui,

Ketua Program Studi Kimia FPMIPA UPI



Fitri Khoerunnisa, M.Si., Ph.D.

NIP 197806282001122001

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul "Pungut Ulang Logam Perak dari Limbah *Printed Circuit Board* Menggunakan Pelarut Eutektik Biner dan Terner" ini beserta seluruh isinya adalah benar-benar karya saya sendiri. Saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika ilmu yang berlaku dalam masyarakat keilmuan. Atas pernyataan ini, saya siap menanggung risiko/sanksi apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran etika keilmuan atau ada klaim dari pihak lain terhadap keaslian karya saya ini.

Bandung, Agustus 2023

Yang membuat pernyataan,



Arrizal Abdul Aziz

NIM 1906235

KATA PENGANTAR

Bismillaahirrahmanirrahim,

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan berkat, rahmat, dan karunia-Nya. Shalawat dan salam penulis haturkan kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarga, sahabat, dan pengikutnya.

Akhirnya, penulis berhasil menyelesaikan skripsi berjudul "Pungut Ulang Logam Perak dari Limbah *Printed Circuit Board* Menggunakan Pelarut Eutektik Biner dan Terner". Skripsi ini disusun dan diajukan sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains Program Studi Kimia, Departemen Pendidikan Kimia, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia.

Penulis berharap tesis ini dapat memberikan wawasan dan bermanfaat bagi para pembaca dan semua pihak khususnya dalam bidang kimia. Penulis menyadari bahwa dalam skripsi ini masih banyak kekurangan dan keterbatasan. Oleh karena itu, penulis masih membutuhkan kritik dan saran dari semua pihak yang sifatnya membangun untuk perbaikan dan penyempurnaannya.

Bandung, Agustus 2023

Penulis,



Arrizal Abdul Aziz

UCAPAN TERIMA KASIH

Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak yang telah membantu penulis selama proses penyusunan skripsi ini. Oleh karena itu, pada kesempatan penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang senantiasa memberikan rahmat dan hidayahnya sehingga penulis diberikan kelancaran dalam penyusunan skripsi.
2. Kedua orang tua yang selalu mendoakan dan memberi berbagai dukungan baik dalam bentuk moril maupun materil;
3. Ibu Dr. Soja Siti Fatimah, M.Si. selaku Dosen Pembimbing 1 yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan masukan yang berarti dalam berjalannya penelitian skripsi ini;
4. Bapak Dr. rer. nat. Omay Sumarna, M.Si. selaku Dosen Pembimbing 2 yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan masukan yang berarti dalam penyusunan skripsi ini;
5. Bapak Abraham Mora, M.Si. yang turut serta memberikan bimbingan, arahan, dan masukan dalam berjalannya penelitian skripsi ini;
6. Bapak Dr. Iqbal Mustapha, S. Pd.,M. Si., selaku Dosen Pembimbing akademik yang telah membimbing penulis selama menjalani perkuliahan di Program Studi Kimia, Departemen Pendidikan Kimia, FPMIPA UPI;
7. Ibu Fitri Khoerunnisa, M.Si., Ph.D. selaku Ketua Program Studi Kimia Universitas Pendidikan Indonesia;
8. Bapak Dr. Budiman Anwar, M.Si. selaku Ketua Kelompok Bidang Kajian Kimia Material Program Studi Kimia Universitas Pendidikan Indonesia;
9. Laboran dan operator Teh Zakiah, Bu Agnia, Mas Fathur, Kak Ayu dan Kak Tika atas kesempatan dan bantuan yang telah diberikan selama proses penelitian skripsi ini.;
10. Teman seperjuangan angkatan zirconium, kelas kimia-C 2019, dan kelompok bidang kajian kimia material;
11. Yohanes, Daffa, Melvin, Rangga, Fauzan, Galih, Rivai, Nabil selaku teman-teman terdekat;

12. Rekan tim penelitian DES sekaligus tim kelompok PKM-RE Azfa, Sheren, dan Ira;
13. Dan kepada semua pihak yang telah turut serta memberikan dukungan dan kontribusi dalam penyusunan skripsi ini.

Penulis berharap semoga Allah SWT membalas segala kebaikan dan bantuan yang telah diberikan oleh semua pihak selama proses penyusunan skripsi ini, serta memberikan balasan yang melimpah atas segala upaya dan kontribusi yang telah diberikan. Aamiin yaa Rabbal 'Alamin.

Bandung, Agustus 2023

Penulis,



Arrizal Abdul Aziz

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimasi ekstraksi logam perak dari limbah *Printed Circuit Board* (PCB) menggunakan *Deep Eutectic Solvent* (DES) berbasis kolin klorida dan gliserol (DES gliselin) dan membandingkannya dengan DES berbasis kolin klorida, gliserol, dan asam sitrat (DES terner). Metode penelitian ini mengadopsi pendekatan solvometalurgi dengan proses pelindian sebagai fokus utama untuk memperoleh ekstrak logam perak yang maksimal. Alat instrumen yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk mengkaji interaksi ikatan yang terbentuk dalam DES dan *X-Ray Fluorescence spectrometry* (XRF) untuk mengetahui persentase logam sebelum dan setelah pelindian. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa kandungan logam perak dalam PCB adalah 2,32%, dan terdapat pelebaran serta pergeseran puncak spektrum pada DES yang mengindikasikan terbentuknya interaksi antarmolekul yang baru, yaitu ikatan hidrogen. Proses pelindian logam perak dari PCB menggunakan DES gliselin dioptimasi dengan mempertimbangkan pengaruh waktu pelindian dan rasio padatan-cair (S/L) pelindian. Hasil optimasi menunjukkan bahwa waktu pelindian optimal selama 16 jam dengan ekstrak logam perak sebesar 56,80%. Rasio S/L optimal adalah 1/20 dengan ekstrak perak mencapai 86,77%. Penggunaan DES terner menghasilkan ekstrak perak sebesar 93,65%, melebihi DES gliselin. DES terner yang lebih asam meningkatkan aktivitas proton dan mempercepat kinetika reaksi kimia, sehingga lebih efektif dalam pelindian logam perak dari limbah PCB. Penggunaan DES terner menunjukkan potensi sebagai metode efektif dalam pelindian logam perak dari sampel limbah PCB, sehingga dapat menjadi solusi berkelanjutan dalam pengolahan limbah elektronik.

Kata kunci: limbah elektronik, PCB, logam perak, DES, pelindian, optimasi

ABSTRACT

This research aims to optimize the extraction of silver metal from Printed Circuit Board (PCB) waste using Deep Eutectic Solvent (DES) based on choline chloride and glycerol (glycerin DES), and compare it with DES based on choline chloride, glycerol, and citric acid (ternary DES). This research method adopts a solvometallurgical approach with leaching process as the main focus to obtain maximum silver metal extracts. Instruments used in this research include Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) to analyze the bond interactions formed in DES and X-Ray Fluorescence spectrometry (XRF) to determine the percentage of metals before and after leaching. The characterization results reveal that the silver metal content in PCB is 2.32%, and there is broadening and shifting of the peak spectrum in DES indicating the formation of new intermolecular interactions, namely hydrogen bonds. The leaching process of silver metal from PCB using glycerin DES is optimized by considering the effects of leaching time and solid-liquid (S/L) ratio. The optimization results indicate the optimal leaching time is 16 hours with a silver metal extract of 56.80%. The optimal S/L ratio is 1/20 resulting in a silver extract of 86.77%. The use of DES ternary yields a silver extract of 93.65%, surpassing glycerin DES. The more acidic DES ternary enhances proton activity and accelerates chemical reaction kinetics, making it more effective in leaching silver metal from PCB waste. The use of DES ternary demonstrates potential as an effective method for leaching silver metal from PCB waste samples, offering a sustainable solution for electronic waste processing.

Keywords: *electronic waste, PCB, silver metal, DES, leaching, optimization*

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	v
UCAPAN TERIMA KASIH	vi
ABSTRAK.....	viii
<i>ABSTRACT</i>	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	5
1.5 Struktur Organisasi Skripsi	5
BAB II KAJIAN PUSTAKA	6
2.1 Limbah Elektronik.....	6
2.2 <i>Printed Circuit Board</i> (PCB).....	7
2.3 Metode Pungut Ulang Logam	9
2.4 Pelindian Logam	10
2.5 <i>Deep Eutectic Solvents</i> (DES).....	13
2.6 DES Biner	16
2.7 DES Terner	20
2.8 Alat Instrumen untuk Karakterisasi.....	23
2.8.1 <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR)	23
2.8.2 <i>X-Ray Fluorescence spectrometry</i> (XRF)	26
BAB III METODE PENELITIAN.....	28
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	28
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	28
3.2.1 Alat.....	28
3.2.2 Bahan.....	28

3.3 Tahapan Penelitian	28
3.3.1 Preparasi Limbah PCB	29
3.3.2 Sintesis DES Gliselin	30
3.3.3 Optimasi Pelindian Perak Menggunakan DES Gliselin	30
3.3.4 Sintesis DES Turner	31
3.3.5 Karakterisasi DES Turner	31
3.3.6 Pelindian Logam Perak Menggunakan DES Turner	31
BAB IV TEMUAN DAN PEMBAHASAN	32
4.1 Sampel Limbah PCB	32
4.2 Sintesis DES Gliselin	33
4.3 Optimasi Pelindian Perak Menggunakan DES Gliselin	33
4.3.1 Pengaruh Waktu Pelindian Limbah PCB	34
4.3.2 Pengaruh Rasio S/L Pelindian Limbah PCB	36
4.4 Sintesis DES Turner	39
4.5 Karakterisasi DES Turner	40
4.6 Pelindian Logam Perak Menggunakan DES Turner	45
BAB V SIMPULAN, IMPLIKASI, DAN REKOMENDASI	48
5.1 Simpulan	48
5.2 Implikasi dan Rekomendasi	49
DAFTAR PUSTAKA	50
LAMPIRAN	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Limbah PCB komputer (Yang <i>et al.</i> , 2017)	7
Gambar 2.2 Perbandingan sintesis IL dan DES (Płotka-Wasyłka <i>et al.</i> , 2020)...	12
Gambar 2.3 Sistem eutektik pada diagram fasa padat-cair campuran biner HBA dan HBD yang menggambarkan campuran eutektik dengan interaksi A dalam B (atau sebaliknya). Dampak dari interaksi ini adalah penurunan titik leleh pada campuran yang dapat diamati secara nyata (Hansen <i>et al.</i> , 2020).	13
Gambar 2.4 Struktur molekul HBA yang dapat digabungkan untuk membentuk DES (Liu <i>et al.</i> , 2022).....	14
Gambar 2.5 Struktur molekul HBD yang dapat digabungkan untuk membentuk DES (Liu <i>et al.</i> , 2022).....	15
Gambar 2.6 Interaksi OH pada HBD dengan kolin klorida sebagai HBA (Francisco <i>et al.</i> , 2020).....	16
Gambar 2.7 Spektrum FTIR DES gliselin dan bahan penyusunnya (Aldhafi, 2022)	18
Gambar 2.8 Grafik persentase ekstraksi perak (Aldhafi, 2022)	19
Gambar 2.9 Interaksi Ag-DES yang diusulkan Aldhafi (2022) pada proses pelindian logam perak	20
Gambar 2.10 Struktur dari bahan DES terner penelitian Kumar <i>et al.</i> (2019)....	21
Gambar 2.11 Interaksi pada DES terner (a) malin dengan n-butanol (b) malin dengan iso-butanol (c) malin dengan butandiol (Kumar <i>et al.</i> , 2019)	22
Gambar 2.12 Penentuan titik eutektik dari berbagai macam rasio molar DES berbasis kolin klorida-gliserol-asam sitrat (Taysun <i>et al.</i> , 2022).....	23
Gambar 2.13 (a) diagram blok spektrofotometer FTIR dan (b) diagram interferometer Michelson (Skoog <i>et al.</i> , 2013)	25
Gambar 2.14 Komponen utama dan spektrum dispersif dari (a) WDS dan (b) EDS (Leng, 2009)	27
Gambar 3.1 Bagan alir tahapan penelitian.....	29
Gambar 4.1 Persentase residu hasil optimasi waktu pelindian.....	34
Gambar 4.2 Grafik pengaruh waktu pelindian terhadap persen ekstrak logam pada sampel PCB	35

Gambar 4.3 Persentase residu hasil optimasi rasio S/L pelindian	37
Gambar 4.4 Grafik pengaruh rasio S/L terhadap persen ekstrak logam pada sampel PCB.....	38
Gambar 4.5 Interaksi yang dimungkinkan terjadi pada DES terner berbasis kolin klorida, gliserol, dan asam sitrat	41
Gambar 4.6 Spektrum FTIR DES terner dan komponen penyusunnya	42
Gambar 4.7 Interaksi antarmolekul berupa ikatan hidrogen terbentuk selama proses sintesis DES.	44
Gambar 4.8 Persentase ekstrak logam hasil pelindian menggunakan DES terner	46
Gambar 4.9 Persentase ekstrak logam perak hasil pelindian menggunakan DES gliselin dan DES terner	47

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Persentase logam yang terdapat pada PCB (Vats & Singh, 2015).....	8
Tabel 2.2 Harga logam-logam yang terkandung dalam PCB (Arshadi <i>et al.</i> , 2018)	9
Tabel 2.3 Klasifikasi DES (Smith <i>et al.</i> , 2014)	16
Tabel 2.4 Pergeseran bilangan gelombang DES gliselin dari bahan penyusunnya dan indikasinya (Aldhafi, 2022).....	18
Tabel 4.1 Persentase logam yang terdapat pada sampel PCB penelitian ini	32
Tabel 4.2 Sifat fisik DES terner dan komponen penyusunnya	40
Tabel 4.3 Identifikasi gugus fungsi DES terner dan bahan penyusunnya terhadap serapan bilangan gelombang IR	43

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran I Karakterisasi DES dengan FTIR	59
Lampiran II Karakterisasi Sampel PCB dengan XRF	61
Lampiran III Karakterisasi Residu Hasil Optimasi Waktu Pelindian	62
Lampiran IV Karakterisasi Residu Hasil Optimasi Rasio S/L Pelindian.....	65
Lampiran V Karakterisasi Residu Hasil pelindian DES terner	67
Lampiran VI Data Perhitungan pada Optimasi Waktu Pelindian.....	67
Lampiran VII Data Perhitungan pada Optimasi Rasio S/L Pelindian.....	68
Lampiran VIII Data Perhitungan pada Pelindian DES Terner	70
Lampiran IX Dokumentasi Penelitian.....	71

DAFTAR PUSTAKA

- Abbott, A. P., Barron, J. C., Ryder, K. S., & Wilson, D. (2007). Eutectic-based ionic liquids with metal-containing anions and cations. *Chemistry—A European Journal*, *13*(22), 6495-6501.
- Abbott, A. P., Boothby, D., Capper, G., Davies, D. L., & Rasheed, R. K. (2004). Deep eutectic solvents formed between choline chloride and carboxylic acids: versatile alternatives to ionic liquids. *Journal of the American Chemical Society*, *126*(29), 9142-9147.
- Abbott, A. P., Capper, G., Davies, D. L., Munro, H. L., Rasheed, R. K., & Tambyrajah, V. (2001). Preparation of novel, moisture-stable, Lewis-acidic ionic liquids containing quaternary ammonium salts with functional side chains. Electronic supplementary information (ESI) available: plot of conductivity vs. temperature for the ionic liquid formed from zinc chloride and choline chloride (2: 1). See <http://www.rsc.org/suppdata/cc/b1/b106357j>. *Chemical communications*, (19), 2010-2011.
- Abbott, A. P., Capper, G., Davies, D. L., Rasheed, R. K., & Tambyrajah, V. (2003). Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures. *Chemical communications*, (1), 70-71.
- Abbott, A. P., Frisch, G., Hartley, J., Karim, W. O., & Ryder, K. S. (2015). Anodic dissolution of metals in ionic liquids. *Progress in natural science: Materials international*, *25*(6), 595-602.
- Abbott, A. P., Harris, R. C., & Ryder, K. S. (2007). Application of hole theory to define ionic liquids by their transport properties. *The Journal of Physical Chemistry B*, *111*(18), 4910-4913.
- Aldhafi, A. (2022). *Ekstraksi Logam Perak dari Limbah Printed Circuit Board Menggunakan Pelarut Eutektik Gliselin* (Doctoral dissertation, Universitas Pendidikan Indonesia).
- AlOmar, M. K., Hayyan, M., Alsaadi, M. A., Akib, S., Hayyan, A., & Hashim, M. A. (2016). Glycerol-based deep eutectic solvents: Physical properties. *Journal of Molecular Liquids*, *215*, 98-103.

- Amphlett, J., & Choi, S. (2019). Metal Oxide Solubility in Deep Eutectic Solvents-Applications in Decontamination in Decommissioning. *한국방사성폐기물학회 학술대회*, 287-288.
- Arroyo Diaz, E. (2019). Highly Miniaturized VHF Helical Filters with Fully Reconfigurable Capabilities.
- Arshadi, M., Yaghmaei, S., & Mousavi, S. M. (2018). Content evaluation of different waste PCBs to enhance basic metals recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 139, 298-306.
- Bagh, F. S. G., Hadj-Kali, M. K. O., Mjalli, F. S., Hashim, M. A., & AlNashef, I. M. (2014). Solubility of sodium chloride in phosphonium-based deep eutectic solvents. *Journal of Molecular Liquids*, 199, 344-351.
- Baldé, K., D'Angelo, E., Luda, V., Deubzer, O., & Kühn, R. (2022). *Global transboundary e-waste flows monitor 2022*. United Nations Institute for Training and Research (UNITAR).
- Binnemans, K., & Jones, P. T. (2017). Solvometallurgy: an emerging branch of extractive metallurgy. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3, 570-600.
- Chakraborty, S. C., Zaman, M. W. U., Hoque, M., Qamruzzaman, M., Zaman, J. U., Hossain, D., ... & Ahmed, M. B. (2022). Metals extraction processes from electronic waste: constraints and opportunities. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(22), 32651-32669.
- Craveiro, R., Neves, L. A., Duarte, A. R. C., & Paiva, A. (2021). Supported liquid membranes based on deep eutectic solvents for gas separation processes. *Separation and Purification Technology*, 254, 117593.
- El Achkar, T., Greige-Gerges, H., & Fourmentin, S. (2021). Understanding the basics and properties of deep eutectic solvents. *Deep Eutectic Solvents for Medicine, Gas Solubilization and Extraction of Natural Substances*, 1-40.
- Erust, C., Akcil, A., Tuncuk, A., & Panda, S. (2020). Intensified acidophilic bioleaching of multi-metals from waste printed circuit boards (WPCBs) of spent mobile phones. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 95(8), 2272-2285.

- Fatimah, S. S., & Firdaus, M. Y. (2021). Pelarut Deep Eutectic Etalin Sebagai Agen Pelindian Logam Perak dari Limbah Printed Circuit Boards (PCB). *Chemica Isola*, 1(2), 37-41.
- Ferreira, A. S., Craveiro, R., Duarte, A. R., Barreiros, S., Cabrita, E. J., & Paiva, A. (2021). Effect of water on the structure and dynamics of choline chloride/glycerol eutectic systems. *Journal of Molecular Liquids*, 342, 117463.
- Florindo, C., Oliveira, F. S., Rebelo, L. P. N., Fernandes, A. M., & Marrucho, I. M. (2014). Insights into the synthesis and properties of deep eutectic solvents based on cholinium chloride and carboxylic acids. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2(10), 2416-2425.
- Francisco, M., van den Bruinhorst, A., & Kroon, M. C. (2013). Low-transition-temperature mixtures (LTTMs): A new generation of designer solvents. *Angewandte Chemie international edition*, 52(11), 3074-3085.
- Freudenmann, D., Wolf, S., Wolff, M., & Feldmann, C. (2011). Ionic liquids: new perspectives for inorganic synthesis?. *Angewandte Chemie International Edition*, 50(47), 11050-11060.
- Germani, R., Orlandini, M., Tiecco, M., & Del Giacco, T. (2017). Novel low viscous, green and amphiphilic N-oxides/phenylacetic acid based Deep Eutectic Solvents. *Journal of Molecular Liquids*, 240, 233-239.
- Ghaedi, H., Ayoub, M., Sufian, S., Lal, B., & Uemura, Y. (2017). Thermal stability and FT-IR analysis of Phosphonium-based deep eutectic solvents with different hydrogen bond donors. *Journal of Molecular Liquids*, 242, 395-403.
- Goodship, V., Stevels, A., & Huisman, J. (Eds.). (2019). *Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook*. Woodhead Publishing.
- Gorain, B. K., Kondos, P. D., & Lakshmanan, V. I. (2016). Innovations in gold and silver processing. *Innovative Process Development in Metallurgical Industry: Concept to Commission*, 393-428.

- Hammond, O. S., Bowron, D. T., & Edler, K. J. (2017). The effect of water upon deep eutectic solvent nanostructure: an unusual transition from ionic mixture to aqueous solution. *Angewandte Chemie*, *129*(33), 9914-9917.
- Hansen, B. B., Spittle, S., Chen, B., Poe, D., Zhang, Y., Klein, J. M., ... & Sangoro, J. R. (2020). Deep eutectic solvents: A review of fundamentals and applications. *Chemical reviews*, *121*(3), 1232-1285.
- Harvey, D. (2000). *Modern analytical chemistry*. New York: McGraw-Hill.
- Huang, F., Li, T., Yan, X., Xiong, Y., Zhang, X., Lu, S., An, N., Huang, W., Guo, Q. dan Ge, X. (2022). Ternary deep eutectic solvent (DES) with a regulated rate-determining step for efficient recycling of lithium cobalt oxide. *Acs Omega*, *7*(13), 11452-11459.
- Ibrahim, R. K., Hayyan, M., AlSaadi, M. A., Ibrahim, S., Hayyan, A., & Hashim, M. A. (2019). Physical properties of ethylene glycol-based deep eutectic solvents. *Journal of Molecular Liquids*, *276*, 794-800.
- Jiang, P., Ji, Z., Zhang, X., Liu, Z., & Wang, X. (2018). Recent advances in direct ink writing of electronic components and functional devices. *Progress in Additive Manufacturing*, *3*, 65-86.
- Kaksonen, A. H., Boxall, N. J., Gumulya, Y., Khaleque, H. N., Morris, C., Bohu, T., ... & Lakaniemi, A. M. (2018). Recent progress in biohydrometallurgy and microbial characterisation. *Hydrometallurgy*, *180*, 7-25.
- Kaya, M. (2016). Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. *Waste management*, *57*, 64-90.
- Kelley, S. P., Narita, A., Holbrey, J. D., Green, K. D., Reichert, W. M., & Rogers, R. D. (2013). Understanding the effects of ionicity in salts, solvates, co-crystals, ionic co-crystals, and ionic liquids, rather than nomenclature, is critical to understanding their behavior. *Crystal growth & design*, *13*(3), 965-975.
- Khaliq, A., Rhamdhani, M. A., Brooks, G., & Masood, S. (2014). Metal extraction processes for electronic waste and existing industrial routes: a review and Australian perspective. *Resources*, *3*(1), 152-179.
- Kumar Jangir, A., Patel, D., More, R., Parmar, A., & Kuperkar, K. (2019). New insight into experimental and computational studies of Choline chloride-

- based 'green' ternary deep eutectic solvent (TDES). *Journal of Molecular Structure*, 1181, 295-299.
- Kumar, A., & Holuszko, M. (2016). Electronic waste and existing processing routes: A Canadian perspective. *Resources*, 5(4), 35.
- Leng, Y. (2009). *Materials characterization: introduction to microscopic and spectroscopic methods, 2nd Edition*. John Wiley & Sons.
- Li, H., Eksteen, J., & Oraby, E. (2018). Hydrometallurgical recovery of metals from waste printed circuit boards (WPCBs): Current status and perspectives—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 139, 122-139.
- Li, X., Choi, J., Ahn, W. S., & Row, K. H. (2018). Preparation and application of porous materials based on deep eutectic solvents. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 48(1), 73-85.
- Liu, C., Lin, J., Cao, H., Zhang, Y., & Sun, Z. (2019). Recycling of spent lithium-ion batteries in view of lithium recovery: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 228, 801-813.
- Liu, J., Li, X., & Row, K. H. (2022). Development of deep eutectic solvents for sustainable chemistry. *Journal of Molecular Liquids*, 119654.
- Loow, Y. L., Wu, T. Y., Yang, G. H., Ang, L. Y., New, E. K., Siow, L. F., Md. Jahim, J., Mohammad, A. W., dan Teoh, W. H. (2018). Deep eutectic solvent and inorganic salt pretreatment of lignocellulosic biomass for improving xylose recovery. *Bioresource technology*, 249, 818-825.
- Manurung, R., Simanjuntak, G. C., Perez, R. N., Syahputra, A., Alhamdi, M. A., Siregar, H. D., & Syahputri Zuhri, R. R. (2019, May). Production of choline chloride-based deep eutectic solvent with hydrogen bond donor D-glucose and ethylene glycol. In *IOP conference series: Materials Science and Engineering* (Vol. 505, No. 1, p. 012134). IOP Publishing.
- Meshram, P., Pandey, B. D., & Mankhand, T. R. (2016). Process optimization and kinetics for leaching of rare earth metals from the spent Ni-metal hydride batteries. *Waste Management*, 51, 196-203.

- Migliorati, V., Sessa, F., & D'Angelo, P. (2019). Deep eutectic solvents: A structural point of view on the role of the cation. *Chemical Physics Letters*, 737, 100001.
- Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., and Ragadhita, R. (2019). How to read and interpret ftr spectroscopy of organic material. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(1), 97–118.
- Nian, B., Cao, C., & Liu, Y. (2019). Activation and stabilization of *Candida antarctica* lipase B in choline chloride-glycerol-water binary system via tailoring the hydrogen-bonding interaction. *International journal of biological macromolecules*, 136, 1086-1095.
- Ning, C., Lin, C. S. K., Hui, D. C. W., & McKay, G. (2018). Waste printed circuit board (PCB) recycling techniques. *Chemistry and Chemical Technologies in Waste Valorization*, 21-56.
- Nugraha, A. S. (2022). Pungut Ulang Perak Dari Limbah Elektronik Baterai Koin Perak Oksida Menggunakan Pelarut *Deep Eutectic* Oksalin (Doctoral dissertation, Universitas Pendidikan Indonesia).
- Pal, S., Roy, R., & Paul, S. (2020). Potential of a natural deep eutectic solvent, glyceline, in the thermal stability of the Trp-cage mini-protein. *The Journal of Physical Chemistry B*, 124(35), 7598-7610.
- Panda, R., Jadhao, P. R., Pant, K. K., Naik, S. N., & Bhaskar, T. (2020). Eco-friendly recovery of metals from waste mobile printed circuit boards using low temperature roasting. *Journal of hazardous materials*, 395, 122642.
- Pateli, I. M., Abbott, A. P., Binnemans, K., & Rodriguez, N. R. (2020). Recovery of yttrium and europium from spent fluorescent lamps using pure levulinic acid and the deep eutectic solvent levulinic acid–choline chloride. *Rsc Advances*, 10(48), 28879-28890.
- Peeters, N., Binnemans, K., & Riaño, S. (2020). Solvometallurgical recovery of cobalt from lithium-ion battery cathode materials using deep-eutectic solvents. *Green Chemistry*, 22(13), 4210-4221.
- Pena-Pereira, F., dan de la Calle, I. (2018). Solvents/Eutectic Solvents. In *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*. Elsevier.

- Plotka-Wasyłka, J., De la Guardia, M., Andruch, V., & Vilková, M. (2020). Deep eutectic solvents vs ionic liquids: Similarities and differences. *Microchemical journal*, *159*, 105539.
- Rai, V., Liu, D., Xia, D., Jayaraman, Y., & Gabriel, J. C. P. (2021). Electrochemical approaches for the recovery of metals from electronic waste: A critical review. *Recycling*, *6*(3), 53.
- Rao, M. D., Singh, K. K., Morrison, C. A., & Love, J. B. (2020). Challenges and opportunities in the recovery of gold from electronic waste. *RSC advances*, *10*(8), 4300-4309.
- Ribeiro, B. D., Florindo, C., Iff, L. C., Coelho, M. A., & Marrucho, I. M. (2015). Menthol-based eutectic mixtures: hydrophobic low viscosity solvents. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *3*(10), 2469-2477.
- Riveiro, E., González, B., & Domínguez, Á. (2020). Extraction of adipic, levulinic and succinic acids from water using TOPO-based deep eutectic solvents. *Separation and Purification Technology*, *241*, 116692.
- Sakti, A. S., Saputri, F. C., & Mun'im, A. (2019). Optimization of choline chloride-glycerol based natural deep eutectic solvent for extraction bioactive substances from *Cinnamomum burmannii* barks and *Caesalpinia sappan* heartwoods. *Heliyon*, *5*(12).
- Schiffmacher, A., Wilde, J., Litzenberger, L., Huesgen, T., & Polezhaev, V. (2019, May). Silver sintering on organic substrates for the embedding of power semiconductor devices. In *2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)* (pp. 1443-1450). IEEE.
- Sethurajan, M., Lens, P. N., Horn, H. A., Figueiredo, L. H., & van Hullebusch, E. D. (2017). Leaching and recovery of metals. *Sustainable Heavy Metal Remediation: Volume 2: Case studies*, 161-206.
- Shafie, M. H., Yusof, R., & Gan, C. Y. (2019). Synthesis of citric acid monohydrate-choline chloride based deep eutectic solvents (DES) and characterization of their physicochemical properties. *Journal of Molecular Liquids*, *288*, 111081.

- Singh, A., Kaur, N., & Kumar Chopra, H. (2019). Chiral recognition methods in analytical chemistry: Role of the chiral ionic liquids. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 49(6), 553-569.
- Singh, A., Walvekar, R., Khalid, M., Wong, W. Y., & Gupta, T. C. S. M. (2018). Thermophysical properties of glycerol and polyethylene glycol (PEG 600) based DES. *Journal of Molecular Liquids*, 252, 439-444.
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of instrumental analysis, 7th Edition*. Cengage learning.
- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2013). *Fundamentals of analytical chemistry, 9th Edition*. Cengage learning.
- Smith, E. L., Abbott, A. P., & Ryder, K. S. (2014). Deep eutectic solvents (DESs) and their applications. *Chemical reviews*, 114(21), 11060-11082.
- Statista. (2022). Electronic waste generated worldwide from 2010 to 2019 (in million metric tons). Diakses pada 08 Januari 2023, dari <https://www.statista.com/statistics/499891/projection-ewaste-generation-worldwide/>
- Stefanovic, R., Ludwig, M., Webber, G. B., Atkin, R., & Page, A. J. (2017). Nanostructure, hydrogen bonding and rheology in choline chloride deep eutectic solvents as a function of the hydrogen bond donor. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19(4), 3297-3306.
- Taysun, M. B., Sert, E., & Atalay, F. S. (2022). Synthesis, characterization and acid-catalyzed application of ternary deep eutectic solvent: effect of glycerol addition. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 1-9.
- Tunali, M., Tunali, M. M., & Yenigun, O. (2021). Characterization of different types of electronic waste: heavy metal, precious metal and rare earth element content by comparing different digestion methods. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23, 149-157.
- VanGuilder, C. (2018). *Hazardous waste management: an introduction*. Mercury Learning and Information.
- Vats, M. C., & Singh, S. K. (2015). Assessment of gold and silver in assorted mobile phone printed circuit boards (PCBs). *Waste Management*, 45, 280-288.

- Wang, H., Zhang, S., Li, B., Pan, D. A., Wu, Y., & Zuo, T. (2017). Recovery of waste printed circuit boards through pyrometallurgical processing: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, *126*, 209-218.
- Yadav, A., Trivedi, S., Rai, R., & Pandey, S. (2014). Densities and dynamic viscosities of (choline chloride+ glycerol) deep eutectic solvent and its aqueous mixtures in the temperature range (283.15–363.15) K. *Fluid Phase Equilibria*, *367*, 135-142.
- Yang, C., Li, J., Tan, Q., Liu, L., & Dong, Q. (2017). Green process of metal recycling: coprocessing waste printed circuit boards and spent tin stripping solution. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *5*(4), 3524-3534.
- Yao, Y., Zhu, M., Zhao, Z., Tong, B., Fan, Y., & Hua, Z. (2018). Hydrometallurgical processes for recycling spent lithium-ion batteries: a critical review. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *6*(11), 13611-13627.
- Zhang, H., Lang, J., Lan, P., Yang, H., Lu, J., & Wang, Z. (2020). Study on the dissolution mechanism of cellulose by ChCl-based deep eutectic solvents. *Materials* *13*: 278.
- Zhu, Y., Qi, B., Liang, X., Luo, J., & Wan, Y. (2021). Comparison of corn stover pretreatments with Lewis acid catalyzed choline chloride, glycerol and choline chloride-glycerol deep eutectic solvent. *Polymers*, *13*(7), 1170.