

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi telah meningkatkan jumlah limbah elektronik (e-waste), yang sebagian besar dikelola secara informal di Asia Tenggara dengan metode tidak ramah lingkungan, seperti pembakaran. Hal ini menyebabkan polusi berbahaya, termasuk logam berat dan bahan kimia, yang mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan manusia (Chakraborty et al., 2025; Priyashantha et al., 2022). Limbah elektronik (e-waste) mencakup perangkat yang tidak terpakai lagi, seperti komputer dan ponsel, dan telah menjadi sampah dengan pertumbuhan tercepat, mencapai 20-25 juta ton per tahun (Robinson, 2009). E-waste mengandung logam berharga, namun juga kontaminan berbahaya, seperti timbal dan merkuri, yang mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan (Castro & Bassin, 2022). Pengelolaan e-waste yang tidak efektif dapat mencemari tanah, air, dan udara, meningkatkan risiko bagi kesehatan dan ekosistem (Ghulam & Abushammala, 2023). Pengelolaan yang berkelanjutan membutuhkan teknologi daur ulang efisien, kebijakan tegas, dan pergeseran menuju ekonomi sirkular (Castro & Bassin, 2022).

E-waste di Indonesia menghadapi berbagai tantangan signifikan, terutama di daerah perkotaan seperti Jakarta. Meskipun telah terdapat mekanisme pengumpulan formal, efektivitas pengelolaan e-waste di negara ini masih memerlukan peningkatan yang substansial (Soesanto et al., 2022). Generasi e-waste di Indonesia cukup besar, dengan perkiraan mencapai 1,62 juta ton pada tahun 2019 (Kabul et al., 2024). Untuk mengatasi masalah ini, Indonesia memerlukan teknologi daur ulang yang lebih canggih, serta peningkatan dalam hal pengelolaan limbah yang lebih terstruktur dan efektif, disertai dengan kebijakan yang lebih terarah dan komprehensif (Wilyani et al., 2018).

E-waste, terutama yang berasal dari printed circuit boards (PCB), menjadi masalah serius di Indonesia dan global. Jumlah e-waste di Indonesia diperkirakan akan mencapai 487.416 ton pada 2028, dengan peningkatan tahunan 14,91%

(Santoso et al., 2019). Meskipun mengandung logam berharga, e-waste sering dikelola buruk, terutama di negara berkembang. Sektor daur ulang informal berisiko menimbulkan polusi dan bahaya kesehatan (Wilyani et al., 2018). PCB mengandung 30-40% logam, seperti tembaga, emas, perak, dan paladium, yang menjadi fokus utama dalam upaya daur ulang (Szalatkiewicz, 2014; Erust et al., 2020). Proses daur ulang PCB bertujuan untuk memulihkan logam berharga seperti tembaga, emas, dan perak meskipun dalam jumlah kecil (Adrian et al., 2020).

PCB merupakan dasar untuk rangkaian elektronik yang umumnya berbentuk pelat tipis terbuat dari bahan seperti fiberglass, kertas, atau logam. (Kinar, 2020). PCB berfungsi untuk memberikan dukungan mekanis serta menghubungkan komponen-komponen elektronik secara listrik melalui jalur konduktif yang dipahat dari lembaran tembaga (Kaushik et al., 2012). PCB banyak ditemukan pada berbagai perangkat elektronik, mulai dari kalkulator hingga mesin cuci, dan diperkirakan menyumbang sekitar 3% dari total WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) (Paola, 2011). Daur ulang PCB untuk memulihkan logam berharga umumnya dilakukan melalui metode metalurgi, dengan pirometalurgi sebagai teknik utama yang mencakup 70% dari total proses. Namun, metode ini menghadapi tantangan seperti biaya tinggi, konsumsi energi besar, dan dampak lingkungan negatif (Kaya, 2019). Pirometalurgi menggunakan suhu tinggi untuk mengekstraksi logam dari limbah, dengan pemanasan bahan untuk menghasilkan logam cair yang dipisahkan dari pengotor (Harvey et al., 2022).

Sebagai alternatif, metode solvometalurgi menawarkan solusi dengan biaya lebih rendah, selektivitas lebih tinggi, dan dampak lingkungan yang minimal (Anderson & Cui, 2024). Metode ini digunakan untuk mengekstraksi logam dari bijih dan limbah dengan larutan berbasis pelarut organik, melalui tiga tahap: pelindian, konsentrasi/pemurnian, dan pemulihan logam. Proses ini terbukti efektif dalam pemulihan logam berharga dari e-waste dengan emisi lebih rendah dibandingkan pirometalurgi (Gunarathne et al., 2022).

Deep Eutectic Solvent (DES) diperkenalkan pada 2004 sebagai alternatif cairan ionik konvensional (Abbott et al., 2004). DES terbentuk dari kombinasi akseptor dan donor ikatan hidrogen, menghasilkan sifat fisik khas seperti densitas

tinggi dan kemampuan pelarut yang baik (Mannu et al., 2021). Keunikan ini memungkinkan penerapan DES dalam ekstraksi logam, pengendalian polusi, dan katalisis (Marcus, 2019a). DES dapat melarutkan oksida logam dan mirip dengan cairan ionik pada suhu lingkungan, dengan konduktivitas dan viskositas yang dapat dikendalikan (Abbott et al., 2004). Sebagai "green solvent", DES memberikan keuntungan ekologis signifikan dibandingkan pelarut konvensional (Marcus, 2019a; Smith et al., 2014).

Penelitian terbaru mengeksplorasi penerapan DES yang berbasis kolin klorida untuk ekstraksi logam dari e-waste. Dalam sebuah studi, Domańska et al. (2024) membandingkan efisiensi DES dan cairan ionik dalam mengekstraksi berbagai logam dari PCB, dan hasilnya menunjukkan bahwa penambahan zat aditif dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi proses ekstraksi. Sementara itu, Abbott et al. (2012) menyelidiki penggunaan DES yang terdiri dari kolin klorida dan etilen glikol untuk elektrodposisi perak, di mana mereka berhasil menghasilkan lapisan perak yang tahan aus dengan cara memasukkan partikel ke dalam proses tersebut. Studi lain yang dilakukan oleh Fatimah et al. (2021) mengembangkan DES Etalin yang terdiri dari HBA kolin klorida dan HBD etilen glikol sebagai pelarut. DES Etalin ini digunakan untuk ekstraksi logam perak dan emas dari limbah PCB, dan berhasil mengekstrak logam dengan tingkat kemurnian perak mencapai 99%, sementara emas diperoleh dengan tingkat kemurnian antara 30% hingga 70%. Studi lainnya oleh Fatimah et al. (2022) mengeksplorasi penggunaan DES oksalin yang terbuat dari kolin klorida dan asam oksalat untuk proses pelindian perak dari limbah baterai koin perak oksida. Mereka berhasil menunjukkan efisiensi pelindian perak yang optimal sebesar 94,23%. Penelitian-penelitian ini menyoroti potensi besar DES berbasis kolin klorida sebagai pelarut ramah lingkungan yang efektif untuk ekstraksi dan pemulihan logam dari berbagai sumber, termasuk limbah elektronik, yang semakin banyak dipertimbangkan dalam konteks keberlanjutan dan efisiensi proses industri.

Optimasi metode dalam sintesis DES penting untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja pelarut dalam berbagai aplikasi industri, termasuk ekstraksi logam, pemrosesan material, dan katalisis. Dalam proses sintesis DES, parameter seperti

rasio molar, suhu, dan waktu memegang peranan penting dalam menentukan karakteristik fisik dan kimia dari pelarut yang dihasilkan. Pengaturan parameter-parameter ini secara optimal dapat meningkatkan selektivitas, kemampuan pelarut, dan stabilitas DES dalam melarutkan bahan target, seperti logam mulia atau senyawa (Mannu et al., 2021). Optimasi yang tepat juga dapat mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan efisiensi proses, yang sangat penting dalam konteks pengolahan material dan daur ulang e-waste (Smith et al., 2014).

Penggunaan DES berbasis sistem terner, yang melibatkan penambahan komponen ketiga, menawarkan kelebihan dibandingkan sistem biner, seperti peningkatan kontrol viskositas, kepadatan, dan kemampuan pelarut. Penambahan komponen ketiga dapat meningkatkan selektivitas pelarut terhadap logam atau senyawa yang sulit diekstraksi dalam sistem biner (Taysun et al., 2022). Penelitian Domańska et al. (2023) menunjukkan bahwa DES terner dengan kolin klorida dan etilen glikol meningkatkan efisiensi ekstraksi logam dari PCB. Ghadamgahi et al. (2025) menemukan bahwa DES terner dapat mengoptimalkan ekstraksi tembaga dengan pemulihan lebih dari 76%

Berdasarkan keberhasilan penelitian sebelumnya, Alhaqqa (2024) mulai mengembangkan DES terner berbasis kolin klorida dengan penambahan etilen glikol dan asam sitrat. Kombinasi ini dipilih karena potensi DES terner dalam meningkatkan efisiensi ekstraksi logam dan oksida logam. Penambahan asam sitrat diharapkan dapat meningkatkan kemampuan pelarut untuk mengekstraksi logam dengan lebih efektif. Namun, penelitian tersebut masih menggunakan metode pelindian berdasarkan penelitian sebelumnya oleh Aziz (2023) sehingga metode pelindian yang digunakan belum dioptimasi. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan optimasi terhadap metode pelindian PCB menggunakan DES terner berbasis kolin klorida dengan penambahan etilen glikol dan asam sitrat, dimana variabel yang akan dioptimasi diantaranya suhu dan waktu yang digunakan ketika proses sintesis DES terner tersebut, juga perbandingan rasio solid-to-liquid yang optimal untuk pelindian.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah pada penelitian dengan judul “Sintesis dan Karakterisasi DES Terner Kolin Klorida-Etilen Glikol-Asam Sitrat Untuk Pelindian Logam Perak dari Limbah *Printed Circuit Board*” di antaranya sebagai berikut:

1. Bagaimana proses sintesis TDES berbasis kolin klorida (ChCl) dengan etilen glikol (EG) dan asam asetat (CA) dapat berhasil dilakukan?
2. Bagaimana karakteristik dari TDES yang telah disintesis?
3. Apa kondisi pengaplikasian TDES yang paling optimum untuk ekstraksi logam perak dari PCB?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, tujuan dari penelitian ini di antaranya sebagai berikut:

1. Mengetahui keberhasilan sintesis TDES berbasis kolin klorida (ChCl) dengan etilen glikol (EG) dan asam asetat (CA).
2. Menganalisis karakteristik TDES yang telah disintesis.
3. Menentukan kondisi pengaplikasian TDES yang paling optimum dalam ekstraksi logam perak dari PCB.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pengetahuan mengenai potensi Deep Eutectic Solvent (DES) sebagai alternatif untuk proses ekstraksi logam dari limbah lingkungan. Hasil penelitian ini juga diharapkan menjadi sumber acuan bagi penelitian selanjutnya dalam pengembangan ekstraksi senyawa logam dari limbah lingkungan. Selain itu, optimasi metode sintesis DES terner berbasis kolin klorida, etilen glikol, dan asam sitrat yang dilakukan dalam penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan untuk sintesis DES tersebut dalam penelitian-penelitian di masa depan. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat menjadi sumber rujukan yang berguna untuk penelitian optimasi DES terner lainnya.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Dalam penelitian ini, fokus utama adalah sintesis dan karakterisasi *Terniary Deep Eutectic Solvent* (TDES) berbasis kolin klorida (ChCl), etilen glikol (EG), dan asam asetat (CA) dan digunakan untuk ekstraksi logam perak dari limbah *Printed Circuit Board* (PCB). Proses sintesis TDES dilakukan dengan mencampurkan bahan-bahan tersebut dalam rasio molar tertentu pada suhu yang dikontrol, disertai dengan pengadukan konstan. Karakterisasi TDES dilakukan menggunakan teknik FTIR dan DSC untuk mengidentifikasi interaksi antar komponen penyusun serta untuk mempelajari sifat-sifat fisiknya. Selain itu, penelitian ini juga menguji kondisi optimal untuk pengaplikasian TDES dalam ekstraksi logam perak, dengan mempertimbangkan variabel suhu, waktu, dan rasio solid-to-liquid (S/L) yang berpengaruh terhadap efisiensi ekstraksi.