

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Kajian Teori

1. Limbah Elektronik

Peralatan listrik maupun elektronik yang sudah tidak dimanfaatkan karena mengalami kerusakan, usang, atau telah mencapai akhir masa pakainya. Jenis limbah ini mencakup berbagai perangkat elektronik yang tidak lagi digunakan dan memerlukan pengolahan secara khusus. Limbah ini meliputi berbagai perangkat komputer, laptop, telepon seluler, televisi, printer, kabel, papan sirkuit cetak (*Printed Circuit Board/PCB*), serta berbagai komponen elektronik lainnya (Radityani et al., 2020). Pesatnya perkembangan teknologi serta meningkatnya penggunaan perangkat elektronik di berbagai sektor menyebabkan volume limbah elektronik terus mengalami peningkatan setiap tahun. Laporan tahunan *Global E-Waste Monitor* tahun 2022 menunjukkan bahwa total limbah elektronik diseluruh dunia mencapai 62 juta ton, dengan Indonesia sebagai penghasil limbah elektronik terbesar di Asia Tenggara dengan 1,9 juta ton. Limbah elektronik memiliki nilai ekonomi karena mengandung berbagai logam yang dapat didaur ulang, seperti emas (Au), perak (Ag), aluminium (Al), besi (Fe), dan tembaga (Cu) (Lestari, 2014).

Dalam proses pengolahan dan daur ulang limbah elektronik, salah satu tahapan yang umum dilakukan adalah pencucian komponen elektronik untuk menghilangkan debu, minyak, residu fluks, maupun sisa logam yang menempel pada permukaan komponen. Proses pencucian ini menghasilkan

limbah cair yang dikenal sebagai limbah cair pencucian elektronik. Limbah cair pencucian elektronik umumnya mengandung logam berat seperti tembaga (Cu), timbah (Pb), nikel (Ni), seng (Zn), kromium (Cr) dan timah (Sn) serta dapat mengaandung padatan tersuspensi atau TSS bahan organik, dan residu bahan kimia yang digunakan dalam proses produksi maupun pembersihan (Fadilah et al, 2022). Secara umum, tingkat pencemaran tersebut disebabkan oleh berbagai jenis komponen elektronik yang terlibat dalam proses pengerjaan fisik pada lembaran PCB serta proses kimiawi seperti pencucian alkali, pembilasan, pengeringan, dan pengikisan lapisan tembaga yang terkandung didalamnya (Sutisna, 2023). Dalam proses etching papan PCB atau komponene elektronik lainnya direndam dalam larutan etching selama waktu tertentu (Athalla et al., 2022). Menurut dari (Cahyono & Yulastuti, 2019) Secara visual, larutan limbah cair ini berwarna hijau pekat hingga kehitaman, dan setelah diencerkan beberapa kali, larutan menjadi berwarna biru kehijauan. Sifat limbah dominan adalah korosif, merusak, dan berbau tajam. Oleh karena itu, pengolahan limbah elektronik tidak hanya berfokus pada pemanfaatan kembali material yang bernilai, tetapi juga pada pengolahan limbah yang dihasilkan selama proses daur ulang maupun pembersihan komponen elektronik.

2. Logam Tembaga (Cu)

Tembaga (Cu) banyak digunakan dalam bidang elektronika atau pelistrikan karena merupakan penghantar listrik terbaik. Senyawa tembaga juga digunakan dalam bidang lain, seperti antifoling, fungisida dan insektisida (Rahmadhan, 2016). Tembaga pada air limbah yang dihasilkan

umumnya terdapat dalam bentuk ion Cu^{2+} . Ditunjukkan dalam tabel periodik tembaga dengan nomor atom 29, massa atom 63,549, titik lebur 1083°C , titik didih 2310°C , jari-jari atom $1,173^\circ \text{C}$, dan jari-jari ion Cu^{2+} $0,96^\circ \text{C}$. Tembaga adalah logam transisi (golongan IB) yang berwarna kemerahan, mudah regang dan mudah ditempa. Logam Cu mematikan makhluk hidup, meskipun organisme membutuhkan tembaga dalam jumlah kecil konsentrasi tinggi dapat berbahaya (Prihartono & Irhamsyah, 2022).

Logam berat Cu termasuk dalam kategori logam berat essential karena sangat penting bagi tubuh (Putri et al. 2023). Jika seseorang terkena keracunan Cu akut gejala seperti mual, muntah, sakit perut, hemolisis, nefrosis, kejang, dan akhirnya kematian akan muncul (Utami et al. 2022). Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014, baku mutu air limbah untuk usaha dan/atau kegiatan industri elektronika dengan konsentrasi Cu sebesar $0,6 \text{ mg/L}$. Sehubungan dengan SK Dirjen tentang batas maksimum cemaran logam dalam makanan, Badan Standarisasi Nasional merekomendasikan batas maksimum $20,0 \text{ mg/Kg}$ untuk logam Cu produk siap konsumsi. Keberadaan tembaga dalam air limbah harus dikurangi melalui proses pengolahan yang efektif.

3. Arang Tempurung Kelapa

Arang adalah bahan padat berpori yang dihasilkan dari pirolisis bahan-bahan yang mengandung karbon (Cahyani et al., 2016). Pirolisis juga dikenal sebagai karbonisasi, adalah proses pembakaran tidak sempurna suatu bahan yang mengandung senyawa kompleks yang tidak teroksidasi menjadi karbon, energi panas memicu oksidasi sehingga

sebagian besar senyawa karbon terurai menjadi karbon atau arang (Khotimah et al., 2024). Industri arang di Indonesia mulai berkembang dengan berbagai bahan baku salah satu utamanya adalah tempurung kelapa. Keberadaan tempurung kelapa yang melimpah sering digunakan sebagai pembuatan kerajinan tangan, arang, briket, dan juga karbon aktif. Struktur tempurung kelapa yang keras, padat akan menghasilkan residu karbon yang tinggi setelah proses karbonasi. Arang tempurung kelapa dihasilkan melalui metode pirolisis, proses aktivasi ini untuk menghilangkan kadar air agar terkarbonisasi dengan sempurna (Bakti et al., 2023). Pada tahapan proses pengarangan tempurung kelapa aktivasi dilakukan secara fisika. Untuk proses aktivasi fisik, gas nitrogen, gas oksigen, gas karbon dan air digunakan. Panas menghilangkan zat pengotor yang mudah menguap dan menghilangkan hidrokarbon pengotor dari arang, sementara gas-gas tersebut membantu membentuk struktur rongga pada arang, meningkat luas permukaannya (Aprilianti et al., 2023).

4. Elektrokoagulasi dan Adsorpsi

a. Elektrokoagulasi

Pengolahan limbah diperlukan sebagai upaya pencegahan pencemaran lingkungan sekaligus penggunaan kembali logam yang dihasilkan untuk dijadikan suatu produk. Elektrokoagulasi adalah metode pengolahan limbah. Ketika larutan diuraikan menjadi ion-ion positif (kation) dan negatif (anion) disebut elektrolisis, ini terjadi ketika elektron dilepas dari larutan elektrolit melalui arus listrik, dan anion mengalami oksidasi (Veronika et al. 2018). Metode ini bekerja

berdasarkan prinsip elektrolisis yaitu penggunaan energi listrik arus searah (DC) untuk memicu reaksi elektrodik (Rohmatulloh & Mawadah, 2025). Setiap sel elektrokoagulasi memiliki dua elektroda. Di dalam sel, anoda berfungsi sebagai koagulan dan katoda melakukan reaksi katodik, menghasilkan gelembung gas hidrogen menaikkan flok tersuspensi yang dapat mengendap. (Hanum et al. 2015). Elektroda logam (M) dioksidasi menjadi logam kation (M^+) selama proses elektrokoagulasi, dan air menghasilkan gas hidrogen (H_2) dan ion hidroksida (OH^-). Persamaan reaksi menurut Joning et al. (2022). Adalah sebagai berikut:



Di dalam air, ion menghidrolisis dan membentuk hidroksi dengan spesies dominan tergantung pada kondisi larutan pH. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Alphanoda (2016) nilai laju korosi meningkat dengan jarak anoda-katoda yang lebih jauh, ini karena jarak yang lebih jauh menyebabkan pergerakan ion menjadi lebih lambat dari dan jumlah ion-ion krom yang bergerak menjadi lebih sedikit ketika logam dilapisi dengan krom.

b. Adsorpsi

Suatu fluida, seperti cairan atau gas, terikat pada suatu padatan dan membentuk lapisan tipis atau film di atasnya, proses ini disebut

adsorpsi (Syauqiah et al., 2011). Berbeda dengan adsorben, adsorbat adalah zat yang menyerap. Proses adsorpsi terjadi akibat adanya gaya tarik antara permukaan adsorben dengan zat yang terserap sehingga kontaminan dapat terakumulasi pada permukaan adsorben dan terpisah dari media cair (Prisilla et al., 2022). Adsorpsi banyak digunakan dalam pengolahan limbah cair karena dapat menghilangkan banyak polutan, seperti zat warna, senyawa organik, logam berat, dan bahan pencemar lainnya (Syarifudin, 2022). Secara umum, faktor-faktor yang mempengaruhi adsorpsi menurut Syauqiah et al. (2011) adalah sebagai berikut :

1. Luas Permukaan

Jumlah adsorben dan ukuran partikel menentukan luas permukaan adsorben. Luas permukaan adsorben berkorelasi dengan jumlah zat yang terserap.

2. Jenis Adsorbat

Polarisabilitas adsorbat ditingkatkan, molekul yang memiliki polarisabilitas lebih tinggi (polar) akan mampu adsorpsi. Molekul yang memiliki polarisabilitas yang tinggi juga memiliki daya tarik besar daripada molekul tidak dapat membentuk dipol (non polar).

3. Struktur Molekul Adsorbat

Hidroksil dan amonia memiliki kemampuan penyisihan yang lebih rendah, sedangkan nitrogen memiliki kemampuan penyisihan yang lebih tinggi.

4. Konsentrasi Adsorbat

Semakin adsorbat dalam larutan, semakin banyak substansi yang terkumpul pada permukaan adsorbat.

5. Temperatur

Pemasanan adsorben atau pengaktifan akan meningkatkan daya serapan adsorben terhadap adsorbat, pemanasan yang terlalu tinggi akan menyebabkan pori-pori adsorben terbuka, yang mengurangi kemampuan penyerap adsorben.

6. pH

Kelarutan ion logam mempengaruhi pH larutan, aktivitas gugus fungsi pada biosorben dan kompetisi ion logam selama proses adsorpsi.

7. Kecepatan Pengadukan

Menentukan seberapa cepat kontak antara adsorben dan adsorbat terjadi. Pengadukan terlalu lambat menghambat proses adsorpsi, tetapi pengadukan terlalu cepat dapat merusak struktur adsorben, menghambat proses adsorpsi.

8. Waktu Kontak

Waktu kesetimbangan adalah waktu yang memiliki kapasitas adsorpsi tertinggi.

c. Elektrokoagulasi-Adsorpsi

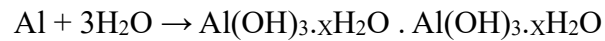
Pengolahan limbah cair yang mengandung logam berat harus memenuhi standar lingkungan. Salah satu teknologi yang banyak dikembangkan adalah kombinasi proses elektrokoagulasi dan

adsorpsi. Kombinasi kedua metode tersebut bertujuan untuk meningkatkan efisiensi penyisihan logam berat melalui mekanisme yang saling melengkapi. Proses elektrokoagulasi adalah jenis elektrokimia di mana elektroda menggunakan arus searah untuk mengoksidasi anoda (Masjid & sugito, 2022). Dalam sel elektrokoagulasi elektroda anoda (+) mengalami oksidasi dan elektroda katoda (-) terjadi reduksi, pada akhirnya flokulan terbentuk mengikat partikel dan kontaminan dari air baku (Wulandari et al., 2026). Elektrokoagulasi adalah teknologi yang ramah lingkungan karena tidak membutuhkan bahan kimia tambahan dan menghasilkan lebih sedikit lumpur.

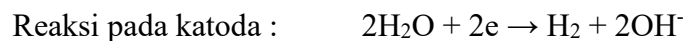
Aluminium banyak digunakan dalam proses elektrokoagulasi. Suatu unsur akan lebih mudah tereduksi semakin ke kiri dari sistem deret potensial dan kan mudah teroksidasi semakin ke kanan. (Masrillita et al. 2021). Pada proses elektrokoagulasi, aluminium mengalami reaksi oksidasi di anoda sehingga menghasilkan ion Al^{3+} . Dalam teknik ini, aluminium yang berfungsi sebagai elektroda akan larut dan membentuk koagulan aktif, selanjutnya Al^{3+} bereaksi dengan koagulan untuk membentuk polimer (Ningsih et al. 2022). Proses mengaplikasikan aliran arus listrik pada elektroda aluminium yang akan menyebabkan pelepasan ion aluminium ke dalam air (Harahap et al. 2024). Berdasarkan teori yang merujuk pada Hanum et al. (2015). Sel reaksi yang terjadi pada sel elektroda dengan anoda dan katoda yang digunakan aluminium adalah:



Logam aluminium terlarut menjadi ion Al^{3+} selama proses anodik, ion ini kemudian mengalami hidrolisis dalam larutan menghasilkan padatan $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ yang tidak dapat larut lagi dalam air. Reaksinya.



Setelah proses elektrokoagulasi, kontaminan dalam air buangan dapat terpresipitasi sendiri. Selama proses koagulasi-flokulasi, larutan yang terbentuk dapat berfungsi sebagai koagulan.

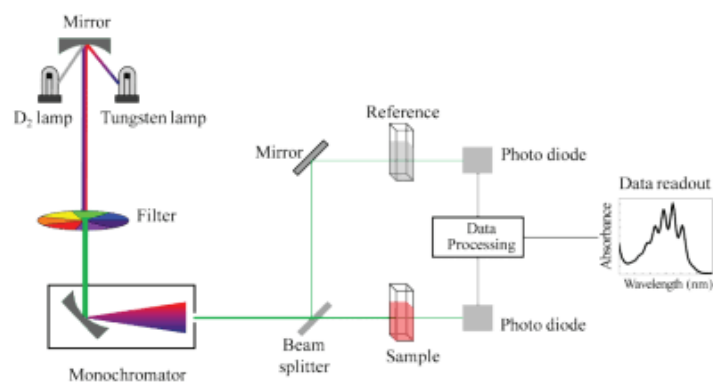


Setelah proses elektrokoagulasi, limbah cair selanjutnya diolah menggunakan proses adsorpsi untuk menghilangkan sisa ion logam berat yang masih terlarut. Adsorpsi merupakan proses pemisahan ketika zat terpisah dari fase cair dan menempel pada padatan (adsorben) melalui interaksi fisik dan kimia (Purwanti & koestiari, 2014). Metode ini efektif sebagai tahap lanjutan (post-treatment) karena mampu menyisihkan kontaminan yang belum terendapkan pada proses elektrokoagulasi. Keberhasilan proses adsorpsi dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain jenis dan karakteristik adsorben, luas permukaan, ukuran pori, pH larutan, waktu kontak, konsentrasi awal adsorbat, serta massa adsorben (Ferly et al., 2022). Semakin besar luas permukaan dan jumlah situs aktif adsorben, maka semakin tinggi kemampuan adsorpsi terhadap ion logam berat (Rahayu & Hadi, 2017). Oleh karena itu diharapkan bahwa

kombinasi elektrokoagulasi dan adsorpsi akan meningkatkan efisiensi penyisihan logam berat, sehingga kualitas air hasil pengolahan memenuhi standar.

B. Spektrofotometer UV-Vis

Metode analisis yang digunakan untuk mengukur jumlah cahaya yang diserap oleh suatu larutan pada panjang gelombang tertentu adalah *Spektrofotometer Ultraviolet-Visible* (UV-Vis). Prinsip kerja spektrometer UV-Vis didasarkan pada interaksi antara radiasi elektromagnetik dengan molekul atau ion dalam sampel yang dianalisis (Anugrah & Sugiarto, 2023). Metode Spektrofotometer UV-Vis dapat mendeteksi kompleks logam dengan senyawa-senyawa warna gugus atau gugus kromofor dalam sampel (Kustiawan & Pratiwi, 2016). Senyawa tidak berwarna diukur pada jangka 200 sampai 400 nanometer (nm), senyawa berwarna pada jangka 200 sampai 700 nm.



Gambar 2.1 Skema Spektrofotometri UV-Vis. Sumber : T. Suhartati, Dasar-dasar Spektrofotometri UV-Vis dan Spektrometri Massa Untuk Penentuan Struktur Senyawa Organik. (AURA: 2017), hal 4.

Spektrofotometer UV-Vis mengukur serapan cahaya oleh suatu senyawa di daerah ultraviolet (200-400 nm) dan sinar tampak (400-800 nm) (Abriyani et al., 2022). Spektrofotometer UV-Vis menggunakan interaksi, menurut Angraini & Yanti. (2021) secara sederhana terdiri dari:

- a. Sumber cahaya, berupa cahaya polikromatis dari lampu tungsten atau wolfram pada daerah tampak (400-800 nm).
- b. Monokromator untuk memilih panjang gelombang.
- c. Kuvet atau sel sampel digunakan sebagai tempat sampel. Berbentuk persegi panjang dan lebar 1 cm, memiliki bentuk yang sederhana namun solid, permukaan lurus dan sejajar secara optis, transparan, dan tidak rapuh.
- d. Dekator untuk mengumpulkan sinar yang melewati sampel.
- e. *Read out* atau Sistem baca keluar, yang merupakan sistem menangkap isyarat listrik sistem dari dekator dan mengeluarkannya dalam bentuk angka transmisi yang ditampilkan pada *display* alat.

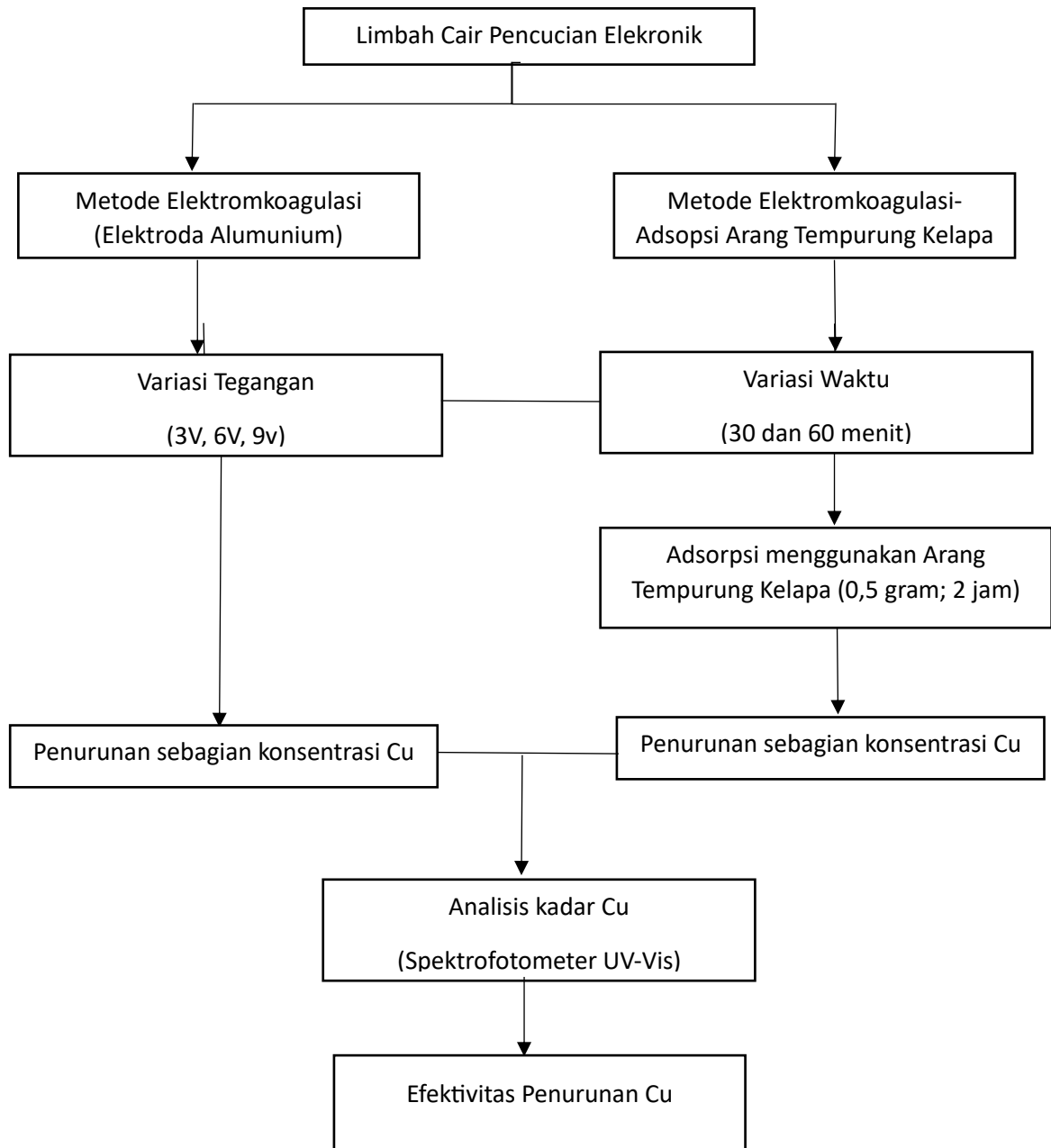
C. Kerangka Berfikir

Limbah pencucian elektronik mengandung logam berat, terutama tembaga (Cu) dengan konsentrasi tinggi sehingga berpotensi mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan apabila dibuang tanpa pengolahan. Oleh karena itu, diperlukan metode pengolahan yang efektif untuk menurunkan kadar logam Cu hingga memenuhi baku mutu.

Metode elektrokoagulasi dipilih sebagai tahap awal pengolahan karena mampu menghasilkan koagulan $\text{Al}(\text{OH})_3$ dari elektroda alumunium yang dapat mengikat dan mengendapkan ion logam Cu. Efektivitas proses

elektrokoagulasi dipengaruhi oleh beberapa faktor, terutama tegangan listrik dan waktu proses. Semakin sesuai tegangan dan semakin lama waktu kontak, maka jumlah koagulan yang terbentuk semakin banyak sehingga kemampuan penyisihan logam Cu meningkat. Namun, proses elektrokoagulasi belum mampu menghilangkan seluruh ion Cu yang masih terlarut. Proses lanjutan dengan adsorpsi menggunakan tempurung kelapa. Arang tempurung kelapa dapat mengadsorpsi sisa ion logam Cu karena luas permukaan dan pori yang tinggi.

Kombinasi metode elektrokoagulasi dan adsorpsi diharapkan mampu meningkatkan efisiensi penyisihan logam Cu dibandingkan penggunaan elektrokoagulasi saja. Selanjutnya, kadar Cu sebelum dan sesudah perlakuan dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis sehingga diperoleh efektivitas penurunan konsentrasi logam Cu pada setiap variasi tegangan dan waktu proses.



Gamabar 2.2 Diagram Alir Kerangka Berfikir