

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pencemaran mikroplastik telah menjadi isu lingkungan global yang sangat krusial dalam beberapa dekade terakhir karena sifatnya yang persisten, sulit terdegradasi, dan mampu menyebar luas di berbagai kompartemen lingkungan, mulai dari air permukaan, tanah, udara, hingga rantai makanan. Mikroplastik adalah partikel plastik yang berukuran kurang dari 5 mm yang berasal dari degradasi plastik berukuran besar (sekunder) maupun secara langsung diproduksi dalam ukuran mikroskopis (primer) (Pradiptaadi & Fallahian, 2022). Mikroplastik tidak hanya mencemari ekosistem laut, tetapi juga dapat ditemukan di sungai, air minum, udara, bahkan tubuh manusia melalui rantai makanan. Sifatnya yang sangat kecil, ringan, dan tahan lama menjadikan mikroplastik sangat sulit untuk diuraikan di lingkungan dan berpotensi menimbulkan dampak toksikologi terhadap ekosistem dan kesehatan manusia (Thomson, 2020).

Keberadaan mikroplastik di lingkungan perairan menimbulkan berbagai dampak buruk bagi ekosistem maupun kesehatan manusia. Mikroplastik mampu bertindak sebagai *vector* bagi berbagai senyawa berbahaya seperti logam berat, pestisida, dan senyawa organik persisten (POPs), yang dapat teradsorpsi pada permukaannya dan kemudian berpindah ke organisme akuatik. Ketika organisme tersebut dikonsumsi oleh manusia, maka akumulasi bahan beracun ini berpotensi meningkatkan risiko gangguan kesehatan seperti stres oksidatif, inflamasi, gangguan hormonal, serta gangguan fungsi organ. Selain itu, bentuk mikroplastik seperti fiber dan fragmen dapat menyebabkan kerusakan mekanis pada saluran pencernaan organisme akuatik, mengganggu reproduksi, menurunkan tingkat kelangsungan hidup, dan mengubah struktur rantai makanan (Smith et al., 2020).

Salah satu sumber utama yang seringkali terhindar dari perhatian publik adalah limbah cair rumah tangga, khususnya limbah dari kegiatan *laundry*. Berdasarkan data yang dihimpun oleh Asosiasi *Laundry* Indonesia pertumbuhan usaha *laundry* di Indonesia mencapai 20% per tahun. Adanya peningkatan jumlah jasa *laundry* akan berbanding lurus dengan banyaknya limbah cair yang dihasilkan pada akhir kegiatannya. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Nisa pada tahun 2019, volume tipikal limbah cair yang dihasilkan oleh industri *laundry* adalah 13 liter per kilogram pencucian, sehingga volume harian air limbah yang dihasilkan oleh sektor *laundry* rumahan adalah 2.160 liter. Limbah yang dihasilkan tersebut akan dibuang langsung ke lingkungan. Bahkan industri *laundry* merupakan industri penghasil limbah cair terbesar yang menyebabkan pencemaran lingkungan limbah cair (Apriyani, 2023).

Proses pencucian pakaian berbahan sintetis seperti poliester, akrilik, dan nilon dapat melepaskan jutaan serat mikroplastik ke dalam air. Menurut Belzagui (2021), dalam satu siklus pencucian dapat melepaskan hingga satu juta serat mikroplastik tergantung pada jenis kain, suhu, deterjen, dan durasi pencucian. Air limbah dari mesin cuci ini kemudian dibuang ke sistem drainase atau Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL), yang sering kali tidak dirancang secara khusus untuk menyaring partikel berukuran mikro.

Meskipun sistem pengolahan air limbah konvensional seperti sedimentasi, filtrasi, dan flokulasi telah digunakan secara luas, namun teknik-teknik tersebut masih memiliki keterbatasan dalam menyisihkan mikroplastik, terutama yang berukuran sangat kecil dan ringan. Beberapa partikel bahkan lolos hingga ke badan air, mengontaminasi sungai dan laut secara terus menerus. Oleh karena itu, diperlukan metode pengolahan limbah yang lebih inovatif dan efisien untuk mengatasi permasalahan ini.

Dissolved Air Flotation (DAF) adalah salah satu teknik flotasi yang paling umum digunakan dalam pengolahan air limbah karena kemampuannya yang tinggi dalam memisahkan partikel tersuspensi, minyak, dan zat organik dari air melalui mekanisme pengapungan. Pada proses ini, udara dilarutkan ke dalam air bertekanan tinggi, sehingga molekul udara menjadi bagian dari cairan. Ketika tekanan dikurangi secara mendadak ke tekanan atmosfer di dalam tangki flotasi, udara yang tadinya terlarut keluar sebagai gelembung mikro (20–100 μm) (Septiani dkk., 2021). Gelembung-gelembung mikro ini kemudian menempel pada partikel tersuspensi, menurunkan densitas gabungan, dan menyebabkan partikel tersebut mengapung ke permukaan untuk kemudian dihilangkan melalui proses skimming. Meskipun efektif, sistem DAF konvensional umumnya memerlukan peralatan mekanik yang kompleks, seperti kompresor, pompa, dan sistem tekanan, serta sering kali membutuhkan tambahan bahan kimia seperti koagulan dan flokulan untuk meningkatkan efisiensi pemisahan (Mursito & Hadi, 2022).

Dalam perkembangan terbaru, teknologi elektroflotasi muncul sebagai alternatif dari DAF konvensional, dengan prinsip kerja yang serupa namun menggunakan gelembung gas hasil elektrolisis sebagai pengganti udara terlarut. Dalam sistem ini, arus listrik dialirkan melalui elektroda (umumnya aluminium atau besi), memicu reaksi elektrokimia yang menghasilkan gelembung oksigen di anoda dan hidrogen di katoda (Sunaryo & Fitria, 2023). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Wang (2021) gelembung ini memiliki ukuran yang lebih kecil dan seragam dibandingkan gelembung dari DAF konvensional yaitu sekitar 10–50 mikron, bahkan bisa mencapai ukuran nano dalam kondisi tertentu, sehingga memiliki area permukaan yang lebih besar dan lebih efektif dalam menempel pada partikel kecil seperti mikroplastik dan dapat mempercepat proses pengapungan partikel ke permukaan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka perlu diadakan pengukuran jumlah mikroplastik pada air limbah laundry untuk mengetahui efisiensi penyisihan mikroplastik menggunakan metode elektroflotasi. Adapun judul penelitian yang akan dilakukan yaitu **“ANALISIS PENYISIHAN MIKROPLASTIK PADA AIR LIMBAH LAUNDRY MENGGUNAKAN METODE ELEKTROFLOTASI”**.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang dan judul yang diambil, maka rumusan masalah dalam penelitian tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik mikroplastik yang terdapat dalam air limbah *laundry*?
2. Bagaimana efektivitas metode elektroflotasi dalam menyisihkan mikroplastik pada air limbah *laundry*?
3. Bagaimana pengaruh variasi tegangan dan jarak elektroda terhadap efisiensi penyisihan mikroplastik menggunakan metode elektroflotasi?

1.3 Tujuan Penelitian

Dari rumusan masalah yang ada, maka penelitian tugas akhir ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi jenis dan karakteristik mikroplastik yang terdapat dalam air limbah *laundry*.
2. Menganalisis efektivitas metode elektroflotasi dalam menyisihkan mikroplastik pada air limbah *laundry*.
3. Menganalisis pengaruh variasi tegangan dan jarak elektroda terhadap kinerja penyisihan mikroplastik menggunakan metode elektroflotasi.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1.4.1 Bagi Peneliti

Memberikan pengalaman riset yang aplikatif dan relevan dengan kebutuhan dunia kerja, terutama di bidang lingkungan, pengolahan air limbah, pengembangan teknologi ramah lingkungan yang melibatkan ilmu pengetahuan yang telah didapatkan selama di bangku perkuliahan.

1.4.2 Bagi Akademis

Menambah referensi ilmu pengetahuan khususnya pada bidang riset kualitas air, terutama terkait pengolahan air limbah industri *laundry* dengan elektroflotasi. Diharapkan nantinya penelitian ini dapat menjadi acuan sehingga dapat dikembangkan oleh peneliti selanjutnya.

1.4.3 Bagi Pelaku Usaha

Sebagai masukan agar pihak pemerintah dapat mempertimbangkan hasil penelitian ini sebagai salah satu alternatif pengolahan air limbah industri *laundry* dalam usaha pengelolaan lingkungan. Dengan adanya penelitian ini, para pelaku usaha dapat menerapkan metode pengolahan air limbah industri *laundry* yang tepat.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup atau batasan masalah yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian yang dilakukan adalah penelitian eksperimental di laboratorium dengan menggunakan model sederhana pengolahan air limbah *laundry* dengan metode elektroflotasi menggunakan sistem *batch*.
2. Variasi yang akan digunakan adalah tegangan dan jarak elektroda.

3. Mikroplastik yang dianalisis dalam penelitian ini terbatas pada mikroplastik berbentuk serat (*fiber*) dan *fragmen* yang berasal dari pakaian sintetis, tanpa membahas jenis mikroplastik lainnya *film*.

1.6 Teori

1.6.1 Air Limbah

Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 68 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik, air limbah adalah air sisa dari suatu hasil usaha dan/atau kegiatan. Air limbah domestik adalah air limbah yang berasal dari aktivitas hidup sehari-hari manusia yang berhubungan dengan pemakaian air.

Air limbah merupakan air sisa dari kegiatan atau suatu usaha yang terbagi menjadi dua yaitu air limbah domestik dan air limbah non domestik. Air limbah domestik adalah air limbah yang berasal dari usaha dan/atau kegiatan pemukiman, rumah makan, perkantoran, perniagaan, apartemen, dan asrama. Air limbah domestik terbagi menjadi dua yaitu kakus yang berasal dari *septic tank* dan non kakus yang berasal dari kegiatan rumah tangga (Bakkara & Purnomo, 2020).

Sumber air limbah bervariasi, tergantung pada jenis aktivitas manusia yang menghasilkan limbah tersebut. Sumber utama air limbah domestik adalah dari kegiatan sehari-hari di rumah tangga, seperti mencuci, mandi, dan menggunakan toilet. Limbah dari sektor ini biasanya mengandung senyawa organik dan padatan terlarut yang berasal dari detergen, minyak, lemak, dan tinja. Sumber lain dari air limbah berasal dari industri, yang dapat menghasilkan limbah dengan kandungan zat yang berbahaya seperti bahan kimia, logam berat, dan bahan organik beracun. Selain itu, limbah yang berasal dari kegiatan komersial seperti restoran, hotel, dan pasar juga menjadi salah satu sumber air limbah. Limbah dari sektor ini seringkali mengandung minyak, lemak, dan sisa-sisa makanan yang dapat mempengaruhi kualitas air jika tidak diolah dengan baik. Perbedaan karakteristik dan komposisi air limbah dari berbagai sumber ini memerlukan metode pengolahan yang berbeda-beda agar dapat ditangani secara efektif (*Ministry of Public Works Indonesia*, 2021).

Pengolahan air limbah sangat penting untuk menjaga kualitas lingkungan hidup dan kesehatan masyarakat. Jika tidak melakukan pengolahan dengan baik, air limbah dapat mencemari air permukaan, air tanah, dan laut. Dampak dari tidak adanya pengolahan air limbah yaitu dapat merusak ekosistem air dan meningkatkan resiko penyebaran penyakit yang dapat ditularkan melalui air. Oleh karena itu, pengolahan air limbah perlu dilakukan dengan menggunakan teknologi yang tepat agar air limbah yang akan dibuang ke lingkungan tidak mencemari sumber daya air yang ada (*World Health Organization*, 2020).

1.6.2 Karakteristik Air Limbah Laundry

Air limbah *laundry* adalah limbah cair yang dihasilkan dari aktivitas pencucian pakaian pada usaha *laundry*, yang mengandung berbagai senyawa kimia dan partikel yang berpotensi mencemari lingkungan jika tidak diolah dengan baik. Limbah ini umumnya

mengandung surfaktan dari deterjen, fosfat, minyak, lemak, serta logam berat seperti besi, nitrit, nitrat, sulfat, dan sianida. Kandungan-kandungan ini dapat menyebabkan pencemaran air dan berdampak negatif pada ekosistem perairan serta kesehatan manusia

Air limbah yang dihasilkan dari aktivitas kegiatan laundry yang menggunakan deterjen sebagai bahan pembersih utama memiliki potensi untuk mencemari lingkungan. Deterjen umumnya mengandung surfaktan, *builder*, *bleaching agents*, dan *additives*, memiliki keunggulan dibandingkan sabun biasa karena dapat bekerja secara efektif dalam air dan larutan asam. *Natrium tripolifosfat* adalah komponen utama yang terdapat pada deterjen yang berfungsi sebagai surfaktan dan *builder*. Selain deterjen, usaha *laundry* juga menggunakan bahan-bahan lain seperti pemutih, pelembut, dan pewangi (Hamdan dkk., 2023)

1.6.3 Mikroplastik

Mikroplastik secara umum didefinisikan sebagai partikel plastik dengan ukuran kurang dari 5 mm, dan dalam beberapa studi ilmiah, ukuran tersebut terbagi ke dalam subkategori, seperti mesoplastik (1 - 5 mm), mikroplastik (1 μm – 1 mm), dan nanoplastik (<1 μm) (Yudiati dkk., 2021). Ukuran yang kecil tersebut memungkinkan mikroplastik tersebar luas di berbagai media lingkungan seperti air, tanah, sedimen, bahkan udara, serta berpotensi masuk ke dalam tubuh organisme hidup melalui jalur pencernaan maupun respirasi.

Mikroplastik diklasifikasikan menjadi dua jenis utama berdasarkan asal usulnya, yaitu mikroplastik primer dan mikroplastik sekunder. Mikroplastik primer adalah partikel plastik berukuran mikro yang sengaja diproduksi dalam bentuk kecil, umumnya digunakan dalam produk kosmetik, *scrub* wajah, pasta gigi, serta bahan pembersih industri. Partikel ini langsung masuk ke lingkungan perairan melalui saluran pembuangan karena ukurannya kecil sulit ditangkap oleh sistem pengolahan air limbah konvensional (Yudiati dkk., 2021). Sementara itu, mikroplastik sekunder berasal dari proses degradasi plastik berukuran besar akibat paparan sinar UV, gesekan, atau reaksi kimia dan mikrobiologis di lingkungan. Contohnya termasuk serpihan plastik dari kantong plastik, botol minuman, serat tekstil sintetis dari pakaian yang terlepas saat pencucian (Sulistiani dkk., 2022). Jenis-jenis mikroplastik ini dapat berbentuk *fragmen* (pecahan), *fiber* (serat), pelet, dan *film* (lembaran tipis), yang masing-masing memiliki karakteristik berbeda dalam hal bentuk, warna, dan komposisi polimernya. Berdasarkan studi yang dilakukan oleh Sari dkk. (2020) menunjukkan bahwa mikroplastik berbentuk *fiber* dan *fragmen* merupakan bentuk yang paling umum ditemukan dalam perairan dan sedimen sungai di wilayah perkotaan Indonesia, terutama yang dipengaruhi oleh aktivitas domestik dan industri tekstil.

Dalam penelitian oleh Fadilah dkk. (2021), sebagian besar mikroplastik yang ditemukan di perairan pesisir Indonesia berada pada kisaran ukuran 100-500 μm , dengan bentuk dominan berupa *fragmen* dan *fiber*. Ukuran yang sangat kecil ini menyebabkan mikroplastik tidak mudah terlihat secara kasat mata dan sulit terdeteksi tanpa analisis mikroskopis, sehingga keberadaannya sering kali terabaikan dalam pemantauan lingkungan. Selain itu, partikel mikroplastik yang berukuran kecil cenderung memiliki luas

permukaan yang lebih besar dibandingkan volume, yang membuatnya lebih reaktif dalam menyerap polutan lain seperti logam berat atau senyawa organik berbahaya (Dewi dkk., 2020). Akibatnya, mikroplastik tidak hanya menjadi polutan fisik, tetapi juga berperan sebagai vektor kontaminan kimia, meningkatkan resiko toksisitas terhadap organisme air dan manusia. Ukuran mikroplastik juga mempengaruhi proses bioakumulasi di dalam rantai makanan akuatik, karena partikel kecil lebih mudah dikonsumsi oleh plankton, ikan kecil, hingga biota laut lainnya yang menjadi konsumsi manusia.

Air limbah merupakan salah satu jalur utama masuknya mikroplastik ke lingkungan perairan, khususnya berasal dari aktivitas domestik dan industri yang memproduksi atau menggunakan bahan berbasis plastik. Salah satu sumber utama mikroplastik dalam air limbah domestik adalah aktivitas mencuci pakaian berbahan sintetis seperti *polyester*, *nylon*, dan *acrylic*, yang melepaskan serat mikroplastik selama proses pencucian. Mikroplastik ini kemudian terbawa oleh air limbah rumah tangga dan masuk ke sistem saluran pembuangan (Yudiati dkk., 2021). Air limbah dari fasilitas *laundry* juga berkontribusi signifikan karena tingginya frekuensi pencucian dan penggunaan mesin cuci berkapasitas besar yang mempercepat pelepasan serat mikroplastik (Pratiwi & Azizah, 2022). Selain itu, industri tekstil, kosmetik, dan manufaktur plastik juga diketahui menghasilkan mikroplastik melalui limbah cair proses produksi yang tidak seluruhnya dapat disaring oleh instalasi pengolahan air limbah (IPAL), terutama yang tidak dilengkapi teknologi filtrasi tingkat lanjut (Wibowo dkk., 2023). Dalam penelitian yang dilakukan oleh Dewi dkk. (2020) menunjukkan bahwa air limbah dari kawasan padat penduduk yang masuk ke sungai brantas membawa kandungan mikroplastik dalam jumlah signifikan, yang sebagian besar berupa *fiber* dan *fragmen* dari aktivitas rumah tangga. Sementara itu, air limbah industri kosmetik dapat mengandung mikroplastik primer berupa *microbeads* yang berasal dari produk *scrub* atau pembersih.

Dalam konteks lingkungan akuatik, mikroplastik menjadi salah satu polutan yang mengkhawatirkan karena kemampuannya untuk terakumulasi di berbagai media, seperti air, sedimen, dan organisme hidup, serta sulit terurai secara alami. Mikroplastik juga berpotensi menyerap polutan lain seperti logam berat dan senyawa organik berbahaya, sehingga meningkatkan resiko toksisitas terhadap ekosistem perairan (Nurhadi dkk., 2022). Mikroplastik kini ditemukan di hampir seluruh badan air, mulai dari sungai hingga laut, menunjukkan bahwa polusi plastik telah mencapai skala yang sangat luas di Indonesia. Bahkan, mikroplastik telah terdeteksi dalam tubuh biota air seperti ikan dan kerang yang dikonsumsi masyarakat, menandakan potensi ancaman terhadap kesehatan manusia (Dewi dkk., 2020).

Penyebaran mikroplastik perairan telah menjadi isu lingkungan yang semakin mengkhawatirkan karena skalanya yang luas dan dampaknya yang kompleks terhadap ekosistem akuatik. Mikroplastik dapat menyebar secara horizontal maupun vertikal di lingkungan perairan melalui berbagai jalur seperti aliran sungai, arus laut, hujan, dan aktivitas manusia seperti pembuangan limbah domestik dan industri yang tidak terolah sempurna (Yudiati dkk., 2021). Sungai berfungsi sebagai penghubung utama antara daratan dan lautan, menjadikannya sebagai media utama transportasi mikroplastik dari kawasan permukiman dan industri menuju laut. Penyebaran mikroplastik di perairan juga sangat dipengaruhi oleh karakteristik fisik air seperti arus laut, gelombang, suhu, dan salinitas, yang dapat mengakibatkan akumulasi lama, sementara partikel yang lebih

berat cenderung mengendap dan terakumulasi di dasar perairan. Dalam ekosistem laut, mikroplastik bahkan ditemukan terbawa hingga ke perairan dalam, menunjukkan bahwa partikel-partikel ini mampu menyusup ke berbagai tingkat kedalaman dan ekosistem (Sulistiani dkk., 2022). Tidak hanya tersebar secara geografis, mikroplastik juga menyebar secara biologis melalui rantai makanan. Organisme kecil seperti plankton, yang berada di dasar rantai trofik, dapat mengonsumsi mikroplastik, sehingga partikel ini kemudian berpindah ke organisme tingkat trofik yang lebih tinggi, termasuk ikan, kerang, dan pada akhirnya manusia. Dengan demikian penyebaran mikroplastik pada perairan bukan hanya menjadi persoalan ekologis, tetapi juga isu kesehatan masyarakat yang mendesak.

1.6.4 Flotasi

Flotasi merupakan proses pemisahan mineral berharga dari pengotornya berdasarkan sifat permukaan mineral yaitu sifat tidak terbasahi (*hidrofobik*) dan sifat terbasahi (*hidrofilik*) dengan cara mengapungkan mineral konsentrat ke permukaan melalui pengikatan dengan buih menggunakan bahan kimia tertentu dan udara. Prinsip pemisahannya memanfaatkan prinsip perbedaan sifat kimia-fisika permukaan mineral yang akan dipisah. Sifat permukaan ini didasarkan pada respon permukaan mineral ketika berada dalam air, sifat permukaan ini disebut *hydrophobicity*. *Hydrophobicity* menunjukkan kecenderungan permukaan mineral untuk dibasahi air. Menurut sifat permukaannya, mineral dapat dibedakan menjadi dua golongan, yaitu :

1. Hidrofilik merupakan mineral yang permukaannya mempunyai lapisan polar, sehingga sukar dibasahi air, tetapi mudah melekat pada gelembung udara.
2. Hidrofobik merupakan mineral yang permukaannya mempunyai lapisan non-polar, sehingga mudah untuk dibasahi air, tetapi sukar untuk melekat pada gelembung udara.

Flotasi juga dapat didefinisikan sebagai proses separasi mineral berdasarkan perbedaan kemampuan *adhesi* terhadap gelembung udara. Proses ini kompleks karena menyertakan interaksi antara partikel mineral, gelembung udara, *reagen*, air, dan media flotasi agar terjadi proses pengapungan partikel mineral. Dalam proses flotasi, gelembung udara dilewatkan dalam *slurry* sebagai media yang akan mengangkut mineral berharga ke permukaan meninggalkan pengotor tenggelam sebagai *tailing*. Hal ini dapat terjadi jika mineral berharga tersebut bersifat *hidrofobik* atau menolak air. Berbagai *reagen* kimia ditambahkan untuk membantu proses pemisahan dan pengumpulan mineral berharga sebagai konsentrat. Reagen tersebut adalah sebagai berikut:

1. Kolektor
Kolektor berfungsi untuk membentuk lapisan *film* pada permukaan partikel mineral berharga. Kolektor terdiri dari dua bagian yaitu *reactive head group* yang bersifat polar dan berkaitan dengan permukaan mineral, sedangkan ujung yang lain yaitu rantai hidrokarbon bersifat non-polar dan menghadap keluar membentuk permukaan baru yang dapat berikatan dengan gelembung udara.
2. *Frother*
Frother termasuk senyawa heteropolar yang terdiri dari gugus alkohol dan rantai hidrokarbon dan memiliki sifat aktivitas permukaan yang menyebabkan *reagen* ini

dapat terserap dalam interfasa udara-air dan mereduksi tegangan permukaan. *Frother* yang baik dapat mengumpulkan kekuatan, dan menghasilkan buih yang cukup stabil untuk memfasilitasi perpindahan flotasi material dari permukaan sel ke *collecting launder*.

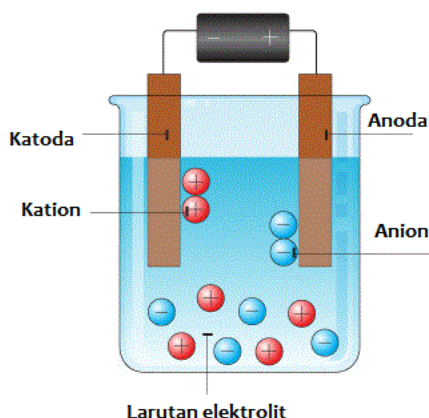
3. *Modifer*

Modifer diklasifikasikan dalam *activator* dan *depressant*. *Activator* berfungsi untuk meningkatkan kemampuan kimiawi alami permukaan mineral sehingga mineral tersebut dapat bersifat hidrofobik. *Depressant* berfungsi untuk meningkatkan selektifitas flotasi dengan menahan mineral hidrofilik untuk tidak ikut terapung. Selektivitas dalam kompleks separasi sangat bergantung pada keseimbangan antara konsentrasi reagen dan pH. Flotasi mungkin dapat dilakukan dalam medium alkali.

1.6.5 Elektrolisis

Elektrolisis air adalah salah satu metode produksi gas hidrogen yang ramah lingkungan dan memiliki kemurnian tinggi. Elektrolisis air merupakan proses untuk menghasilkan gas H_2 dan O_2 murni dengan pemanfaatan energi listrik pada sistem yang diubah menjadi energi kimia, memungkinkan penguraian senyawa menjadi unsur-unsur penyusunnya. Elektrolisis air pada dasarnya dilakukan dengan mengalirkan arus listrik ke air melalui dua buah elektroda yaitu katoda dan anoda yang merupakan komponen utama dari elektrolisis. Namun jika arus yang diberikan terlalu besar maka hasil dari proses akan berupa uap air. Arus listrik dialirkan melalui listrik searah (DC) lalu akan terbentuk gas oksigen di anoda sementara gas hidrogen terbentuk di katoda. Pada anoda (kutub positif) terjadi reaksi oksidasi, sementara pada katoda (kutub negatif) berlangsung reaksi reduksi.

Prinsip kerja elektrolisis didasarkan pada proses reaksi redoks yang dipicu oleh aliran arus listrik searah melalui suatu larutan atau lelehan elektrolit. Dalam sistem ini, dua elektroda yaitu anoda (positif) dan katoda (negatif) dicelupkan kedalam elektrolit dan dihubungkan ke sumber listrik eksternal. Ketika arus listrik mengalir, ion-ion dalam elektrolit mulai bergerak dimana kation (ion bermuatan positif) tertarik ke katoda untuk menerima elektron (direduksi), sedangkan anion (ion bermuatan negatif) bergerak ke anoda untuk melepaskan elektron (dioksidasi). Proses ini memungkinkan pemecahan senyawa kimia menjadi unsur atau senyawa baru. Misalnya dalam elektrolisis air, molekul H_2O terurai menjadi gas hidrogen di katoda dan gas oksigen di anoda.



Gambar 1. Sistem Elektrolisis

Efisiensi proses sangat bergantung pada jenis elektrolit, material elektroda, tegangan yang diberikan, dan suhu sistem. Selain itu, tidak semua ion dalam larutan selalu mengalami reaksi, karena urutan kecenderungan elektroda (deret elektrokimia) menentukan ion mana yang lebih mudah teroksidasi atau tereduksi. Dalam praktik industri, pemahaman prinsip ini sangat penting karena elektrolisis digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi, seperti penyepuhan logam (elektroplating), pemurnian logam seperti tembaga, dan produksi gas industri seperti hidrogen dan klorin.

Salah satu penerapan yang paling signifikan adalah dalam produksi hidrogen hijau melalui elektrolisis air. Teknologi ini memainkan peran penting dalam transisi energi global karena mampu menghasilkan hidrogen tanpa emisi karbon jika dipasok dari sumber listrik terbarukan. Menurut Zhang et al. (2021) dalam *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, elektrolisis air berbasis *proton exchange membrane* (PEM) menunjukkan efisiensi tinggi dan potensi besar untuk skala industri, terutama jika dikombinasikan dengan energi surya atau angin. Selain itu, studi oleh Moussa et al. (2021) dalam *Journal of Environmental Chemical Engineering* menunjukkan bahwa elektrolisis juga dapat dimanfaatkan dalam pengolahan air limbah, terutama untuk degradasi senyawa organik kompleks yang sulit diuraikan secara biologis. Dengan berbagai penerapan tersebut, elektrolisis telah menjadi teknologi kunci dalam mendukung industri berkelanjutan dan sistem energi bersih di masa depan.

1.6.6 Elektroflotasi

Elektroflotasi merupakan proses pemisahan polutan pada cairan dengan cara mengapungkan zat atau partikel polutan terdispersi di dalam air ke permukaan oleh gaya angkat gelembung gas oksigen dan hidrogen dari hasil reaksi elektrolisis air. Gelembung gas dapat diproduksi melalui banyak metode, misalnya flotasi udara terlarut, penyemprotan elektrostatis udara, dan elektrolisis, yang merupakan prinsip dari elektroflotasi. Ketika larutan elektrolit diberi dua elektroda, dan arus searah (DC) melewati kutub positif (anoda) ke kutub negatif (katoda), maka reaksi yang terjadi elektrolisis yang menghasilkan gas hidrogen di katoda dan gas oksigen di anoda sesuai dengan reaksi (1) dan (2). Reaksi redoks di elektroda dapat dinyatakan sebagai berikut: Pada anoda :



Pada Katoda :



Elektroflotasi merupakan metode pemisahan partikel tersuspensi dalam air limbah yang memanfaatkan gelembung gas yang dihasilkan secara elektrolitik. Dalam proses ini, elektroda yang dicelupkan ke dalam air limbah dialiri arus listrik, menghasilkan gelembung oksigen dan hidrogen yang sangat kecil (berdiameter 10-30 μm). Gelembung-gelembung ini memiliki luas permukaan yang besar, memungkinkan mereka untuk menempel pada partikel-partikel halus dan membawanya ke permukaan, sehingga memudahkan pemisahan dan penghilangan kontaminan dari air limbah.

Proses elektroflotasi dipengaruhi oleh berbagai faktor operasional dan kimia yang saling berkaitan dan masing-masing faktor tersebut dapat secara signifikan mempengaruhi efisiensi penyisihan kontaminan seperti mikroplastik. Salah satu faktor paling krusial adalah jenis elektroda yang digunakan, dimana material elektroda seperti aluminium dan *stainless steel* dapat menentukan laju reaksi elektrokimia dan jenis produk yang dihasilkan. Aluminium misalnya, menghasilkan ion Al^{3+} yang bertindak sebagai koagulan, sedangkan *stainless steel* lebih tahan terhadap korosi tetapi tidak berkontribusi terhadap koagulasi kimia. Selain itu tegangan dan arus listrik juga menjadi penentu utama dalam efisiensi proses. Peningkatan arus dapat meningkatkan produksi gelembung gas, namun konsumsi energi dan laju degradasi elektroda juga meningkat secara signifikan. Menurut studi oleh Kim (2021), efisiensi penyisihan mikroplastik mencapai lebih dari 90% pada arus 0,3 A, namun efisiensi menurun pada arus yang lebih tinggi akibat pembentukan gelembung yang terlalu besar atau destabilisasi flok.

Waktu kontak atau durasi proses elektroflotasi juga memainkan peran penting. Waktu yang terlalu singkat tidak memberi cukup waktu untuk flokulasi dan flotasi, sementara waktu yang terlalu lama dapat mengakibatkan disintegrasi flok yang telah terbentuk. pH larutan merupakan faktor penting lainnya yang mempengaruhi bentuk spesies koagulan yang terbentuk dalam larutan. Dalam penelitian yang telah dilakukan oleh Ilyas (2020), menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan optimum terjadi pada pH 6-8 karena pada rentang ini terbentuk $\text{Al}(\text{OH})_3$ dalam bentuk *amorf* yang reaktif dan efektif mengadsorpsi partikel mikroplastik. Konsentrasi elektrolit seperti NaCl atau CaCl_2 , juga dapat meningkatkan konduktivitas larutan dan mempercepat reaksi elektrokimia, tetapi jika terlalu tinggi dapat menyebabkan pembentukan kerak elektroda atau kompetisi ionik yang menurunkan efisiensi flotasi.

Faktor fisik lainnya adalah jarak antar elektroda, di mana jarak optimal dapat mengurangi resistansi listrik dan meningkatkan efisiensi gelembung gas, sedangkan jarak yang terlalu lebar dapat memperbesar hambatan listrik dan mengurangi intensitas medan. Selain itu, ukuran dan distribusi gelembung gas menjadi sangat penting karena mikroplastik memiliki densitas yang mirip dengan air, sehingga hanya gelembung mikro yang mampu mengangkatnya ke permukaan. Menurut Zhang (2022), penggunaan arus rendah dan elektroda aluminium menghasilkan gelembung berdiameter $<100\mu\text{m}$ yang ideal untuk mengikat mikroplastik secara efisien. Dengan demikian, keberhasilan sistem elektroflotasi sangat tergantung pada pengaturan holistik dari berbagai parameter tersebut agar saling bersinergi, terutama dalam pengolahan air limbah yang kompleks seperti air limbah *laundry*.

Metode elektroflotasi juga memiliki beberapa kelebihan. Salah satu kelebihan utama dari metode elektroflotasi adalah kemampuannya menghasilkan gelembung gas berukuran mikro (sekitar 1-30 μm) yang lebih kecil dibandingkan dengan metode flotasi konvensional, ukuran gelembung yang lebih kecil ini meningkatkan probabilitas tumbukan antara gelembung dengan partikel polutan, sehingga efisiensi penyisihan partikel tersuspensi menjadi lebih tinggi. Elektroflotasi tidak memerlukan penambahan bahan kimia koagulan eksternal, karena ion logam yang dihasilkan dari elektroda dapat berfungsi sebagai koagulan *in situ*, sehingga mengurangi kebutuhan bahan kimia tambahan dan menghasilkan lumpur lebih sedikit. Selain itu, dalam proses elektroflotasi ini menghasilkan lumpur yang lebih sedikit dan memiliki waktu retensi yang lebih singkat, menjadikannya pilihan yang menarik untuk pengolahan air limbah industri dan domestik.

Elektroflotasi juga memiliki beberapa kekurangan yang perlu diperhatikan. Salah satunya adalah konsumsi energi listrik yang relatif tinggi, terutama jika tidak dioptimalkan dengan baik, yang dapat meningkatkan biaya operasional. Selain itu, elektroda yang digunakan seperti aluminium dapat mengalami korosi selama proses berlangsung, sehingga memerlukan penggantian secara berkala dan meningkatkan biaya perawatan. Proses elektroflotasi juga dapat menghasilkan endapan atau kerak pada permukaan elektroda, yang dapat memerlukan pembersihan rutin. Selain itu efisiensi proses elektroflotasi dapat dipengaruhi oleh berbagai parameter operasi seperti pH, jarak antar elektroda, dan waktu kontak, yang memerlukan pengendalian dan pemantauan yang cermat untuk mencapai hasil yang optimal.

Mekanisme penghilangan mikroplastik menggunakan metode elektroflotasi bekerja melalui proses elektrokimia yang menghasilkan gelembung gas sangat halus (*microbubbles*) dari permukaan elektroda ketika arus listrik dialirkan ke dalam larutan. Pada elektroflotasi, elektroda anoda biasanya menghasilkan gas oksigen melalui reaksi oksidasi air, sedangkan katoda menghasilkan gas hidrogen melalui reaksi reduksi. Gelembung-gelembung mikro berukuran sangat kecil ini memiliki luas permukaan tinggi dan mampu berinteraksi dengan partikel mikroplastik yang umumnya bersifat hidrofobik. Sifat hidrofobik ini memungkinkan mikroplastik menempel pada permukaan gelembung, membentuk agregat yang lebih ringan dibandingkan air sehingga mudah terangkat ke permukaan (Gao et al., 2020).

Selain itu, proses elektroflotasi juga dapat memodifikasi muatan permukaan mikroplastik melalui reaksi elektrokimia yang terjadi di sekitar elektroda, sehingga partikel yang sebelumnya stabil dalam suspensi mengalami destabilisasi dan cenderung membentuk koagulan atau flok yang lebih mudah terikat oleh gelembung. Ketika flok dan gelembung gas naik ke permukaan, terbentuk lapisan buih (*froth layer*) yang mengandung mikroplastik terperangkap. Lapisan buih ini kemudian dapat diambil dan dipisahkan secara mekanis. Proses ini cenderung lebih efektif dibandingkan flotasi konvensional karena ukuran gelembung yang lebih kecil meningkatkan efisiensi kontak antara gelembung dan mikroplastik, sementara keberadaan medan listrik memberikan keuntungan tambahan berupa peningkatan destabilisasi partikel (Rubio et al., 2020). Dengan demikian, elektroflotasi menjadi metode yang efisien dan ramah lingkungan untuk menghilangkan mikroplastik dari air limbah tanpa penambahan bahan kimia koagulan tambahan.

1.6.7 Elektroda *Stainless Steel* dan *Graphite*

Penggunaan elektroda merupakan salah satu aspek kunci dalam menentukan efisiensi dan efektivitas proses elektroflotasi, terutama dalam aplikasi penyisihan mikroplastik dari air limbah. Dua jenis elektroda yang biasa digunakan dalam penelitian elektroflotasi adalah aluminium dan *stainless steel*. Elektroda grafit pada proses elektroflotasi (EF) untuk penyisihan mikroplastik bekerja terutama sebagai elektroda inert yang mengekstraksi partikel hidrofobik melalui penempelan pada gelembung gas hasil elektrolisis air (O_2) di anoda dan (H_2) di katoda tanpa melepaskan koagulan logam seperti Al^{3+} atau Fe^{3+} , karena itu, mekanismenya menitikberatkan pada pembentukan gelembung sangat halus, gaya hidrodinamik yang meningkatkan peluang tumbukan/penempelan, serta sifat permukaan mikroplastik (Rosariawari & Rahmayanti (2021). Elektroda karbon/grafit mampu menghasilkan gelembung yang sangat kecil dengan ukuran minimum 17 μm untuk gelembung O_2 ketika anoda grafit digunakan yang menguntungkan bagi penjeratan partikel mikroplastik berukuran puluhan hingga ratusan mikrometer karena rasio gaya apung terhadap gaya seret meningkat dan peluang kontak partikel-gelembung membesar (Khoirunnisa dkk., 2021).

Elektroda berbahan *stainless steel* juga memiliki karakteristik yang berbeda. *Stainless steel* relatif lebih stabil dan tidak mudah teroksidasi selama proses elektrolisis, menjadikannya lebih tahan lama dan ekonomis untuk operasi jangka panjang. Namun, karena pelepasan ion logam dari elektroda *stainless steel* sangat terbatas, fungsinya lebih dominan sebagai penghasil gelembung gas (H_2/O_2) dibandingkan dengan kontribusi koagulasi. Penelitian yang dilakukan oleh Geo (2020) menunjukkan bahwa elektroda *stainless steel* tetap mampu mencapai efisiensi penyisihan mikroplastik hingga 85% dalam kondisi operasi tertentu, meskipun tidak sebaik aluminium dalam hal pengumpulan partikel. Namun, keunggulan *stainless steel* terletak pada dayan tahan korosi, terutama dalam lingkungan yang mengandung deterjen dan surfaktan, seperti dalam air limbah *laundry*. Dalam konteks ini, pemilihan antara aluminium dan *stainless steel* tidak hanya mempertimbangkan efisiensi penyisihan mikroplastik, tetapi juga aspek keberlanjutan, biaya perawatan, dan ketahanan elektroda terhadap lingkungan pengolahan limbah. Kombinasi keduanya juga pernah diuji dalam sistem elektroflotasi hibrid, di mana elektroda aluminium digunakan sebagai anoda dan *stainless steel* sebagai katoda. Hasilnya menunjukkan peningkatan stabilitas sistem sekaligus mempertahankan efisiensi penyisihan yang tinggi.

Berikut adalah mekanisme elektrokimia yang terjadi pada elektroda aluminium dan elektroda *stainless steel* pada proses elektroflotasi.

1. Mekanisme Pada Elektroda *Graphite*

Grafit memiliki struktur berlapis dengan ikatan sp^2 yang membuatnya konduktif, tetapi relatif inert terhadap reaksi oksidasi/korosi dibanding elektroda logam. Hal ini berarti selama proses elektroflotasi, grafit tidak banyak larut ke dalam larutan, sehingga mencegah terbentuknya ion logam tambahan yang bisa menjadi kontaminan sekunder (Hanif, 2022). Pada katoda grafit, terjadi reduksi air menghasilkan gelembung hidrogen (H_2), sedangkan pada anoda grafit terjadi oksidasi air menghasilkan gelembung oksigen (O_2):

Reaksi Katoda: $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 (gas) + 2OH^-$(3)

Reaksi Anoda: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 (\text{gas}) + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$(4)

Katoda (reduksi): $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow + 2\text{OH}^-$(5)

Gelembung gas yang terbentuk umumnya berukuran mikro (20–100 μm) sehingga memiliki luas permukaan tinggi, meningkatkan peluang kolisi dengan partikel mikroplastik yang bersifat hidrofobik. Berdasarkan studi yang dilakukan oleh Setiawan dkk. (2021) menjelaskan bahwa Mikroplastik yang hidrofobik cenderung mudah melekat pada permukaan gelembung gas. Gelembung yang terbentuk pada permukaan grafit kemudian mengangkat partikel mikroplastik ke permukaan cairan, membentuk lapisan buih/flot yang bisa dihilangkan. Permukaan grafit relatif halus dan inert sehingga tidak mudah terfouling oleh ion terlarut atau kotoran. Hal ini membuat distribusi gelembung lebih seragam dan mencegah pelepasan ion berlebih (seperti pada Al/Fe). Dengan demikian, grafit lebih berperan sebagai *bubble generator* murni daripada sekaligus menghasilkan koagulan kimia.

2. Mekanisme Pada Elektroda *Stainless Steel*

Elektroda stainless steel umumnya digunakan sebagai penghasil gas secara eksternal tanpa kontribusi koagulasi. Komposisi utama (Fe, Cr, Ni) bersifat pasif dan membentuk lapisan oksida pelindung yang mencegah pelepasan ion logam secara signifikan. Reaksi elektrokimia utama yang terjadi adalah :

- Anoda (oksidasi air)

$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 \uparrow + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$(6)

- Katoda (reduksi air)

$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow + 2\text{OH}^-$(7)

Gelembung H_2 dan O_2 yang terbentuk membawa mikroplastik ke permukaan, namun karena tidak ada tambahan koagulasi, efisiensi penyisihan mikroplastik tergantung pada ukuran gelembung, intensitas arus, dan waktu reaksi.

Berdasarkan studi yang dilakukan oleh Geo (2020) yang menemukan bahwa penggunaan elektroda *stainless steel* cocok untuk air limbah yang mengandung bahan kimia agresif seperti deterjen karena ketahanannya terhadap korosi dan perubahan pH. Namun, untuk meningkatkan efisiensi pada sistem ini, diperlukan integrasi dengan proses tambahan seperti elektrokoagulasi atau filtrasi lanjutan.

1.6.8 Studi Penelitian Terdahulu

No	Nama Penulis	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1	Nurul Setiadewi, Cynthia Henny, Denalis Rohaningsih, Agus Waluyo, Prayatni Soewondo, 2024	Kelimpahan Mikroplastik Pada Air Limbah Domestik Dan Penyisihannya Di IPAL Bojongsoang, Kota Bandung	Metode pengambilan sampel, ekstraksi, kuantifikasi, dan karakterisasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mikroplastik terdeteksi di influen IPAL Bojongsoang dengan konsentrasi sebesar 15,45 partikel/liter dan berkurang menjadi sebesar rata-rata 1,49 partikel/liter di efluen. Berdasarkan bentuknya, fiber ditemukan paling dominan berada baik di influen maupun efluen, dengan kisaran 60,51-79,01%. Bentuk lainnya yang mendominasi adalah fragmen dengan rentang persentase 19,41-36,89%. Sementara, bentuk mikroplastik film, <i>foam</i> , dan <i>microbead</i> tidak banyak terdeteksi pada air limbah, dengan persentase rata-rata di bawah 5%. Mikroplastik berukuran 1000-5000 μm paling banyak ditemukan di inlet dengan persentase sebesar 31,71%. Di titik outlet, mikroplastik banyak ditemukan yang berukuran di bawah 500 μm , dengan kisaran 7,27 - 24,95%. Warna mikroplastik di influen dan efluen yang ditemukan paling banyak adalah putih atau transparan (34,87 - 40,13%) dan hitam (14,54 - 23,14%).
2	Haryono, E.Evy Ernawati, Atiek Rostika Noviyanti, 2021	Kinerja Metode Elektroflotasi Pada Pengolahan Air limbah Pewarna Tekstil Dispersi	Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimum elektroflotasi dicapai pada penggunaan beda potensial listrik sebesar 12 V dan waktu elektroflotasi selama 60 menit. Pada kondisi tersebut, nilai COD dan tingkat warna dari air limbah tekstil dapat diturunkan dengan efisiensi pemisahan berturut-turut sebesar 88,9% dan 93,3%, dengan kebutuhan energi listrik spesifik sebesar 200 kWh/m ³ . Sedangkan nilai penurunan konsentrasi zat warna per kWh energi listrik berdasarkan COD dan tingkat warna masing-masing adalah 16293,3 ppm/kWh dan 23333,3 Pt-Co/kWh.

3	Junardi, Yuyun Gisna Yudasti, Gabrella Prananda Claudia, Aldin, Waode Sitti Warsita Mahapati, Ahmad Fakral Irwan, 2022	Simulasi Penyisihan Mikroplastik Pada Limbah Laundry Menggunakan Proses Filtrasi Bertingkat	Jenis filter yang digunakan dalam proses filtrasi bertingkat ini yaitu <i>stainless steel</i> filter, serabut <i>stainless</i> dan <i>cloth</i> filter 74 mikron. Hasil total mikroplastik yang ditemukan pada sampel limbah <i>laundry</i> yaitu rata-rata 5145 MPs dalam 7,4 kg berat kering pakaian. Timbulan mikroplastik dari limbah pakaian setelah menggunakan filter yaitu 75.5%. Hal ini membuktikan bahwa melakukan proses filtrasi dapat menurunkan jumlah penyebaran mikroplastik ke lingkungan.
4	Dionysius Nathanael, Keenan Michael Agape, Adriana Anteng Anggorowati, Andrew Joewono, 2021	Pengolahan Limbah Cair Industri Dari PT. Sier Menggunakan Metode Elektroflotasi (EF)	Pada penelitian ini metode EF yang digunakan memerlukan <i>stainless steel</i> sebagai anoda dan aluminium sebagai katoda. Kur nilai <i>Chemical Oxygen Demand</i> (COD), <i>Total Suspended Solid</i> (TSS) dan jumlah koloni bakterinya. Berdasarkan perhitungan, diperoleh hasil bahwa dengan tegangan listrik sebesar 32,5 volt dan waktu kontak selama 60 menit menunjukkan hasil penurunan nilai COD dan TSS yang paling besar. COD mengalami penurunan dari 236,66 mg/L menjadi 24,56 mg/L atau sebesar 90%, TSS mengalami penurunan nilai dari 187 mg/L menjadi 34,33 mg/L atau sebesar 81,64%. Sedangkan penurunan koloni bakteri dari 4,7x10 ⁴ koloni bakteri/ml sampel menjadi 4,03x10 ³ koloni bakteri/ml sampel sebesar 91,42% pada tegangan listrik sebesar 19 volt dan waktu kontak selama 20 menit.
5	Hossein Naser Ehsani, Mehrdadi, Gholamreza Asadollahfardi, Nabi Bidhendi, dan Ghasem Azarian, 2020	A New Combined Electrocoagulation-Electroflotation Process for Pretreatment of Synthetic and Real Moquette Manufacturing Industry Wastewater: Optimization of Operating Conditions	Industri manufaktur <i>moquette</i> menghasilkan air limbah berkonsentrasi tinggi <i>polyvinyl acetate</i> (PVAc), yang beracun dan dapat menghambat mikroorganisme di instalasi pengolahan air limbah biologis. Studi ini menggunakan proses gabungan elektrokagulasi-elektroflotasi untuk mengolah air limbah tersebut. Efisiensi pengolahan diukur berdasarkan pengurangan COD, TSS, PVAc, TDS, dan konduktivitas listrik (EC) dari air limbah sintetis dan nyata. Hasil menunjukkan bahwa efisiensi

				meningkat dengan peningkatan kerapatan arus dan waktu retensi serta dengan pengurangan jarak elektroda. Dalam kondisi optimal, efisiensi pengurangan untuk air limbah nyata mencapai 93,9% (COD), 92,9% (TSS), 95,9% (PVAc), 90,5% (TDS), dan 85% (EC). Elektroda besi lebih efisien dan ekonomis dibandingkan aluminium. Proses ini juga memfasilitasi flotasi dan pemadatan flok di permukaan reaktor, menghilangkan kebutuhan unit sedimentasi/flotasi tambahan.
6	Puji Lestari, Choirul Amri, Sigid Sudaryanto, 2020	Efektifitas Elektroda Proses Terhadap Penurunan Kadar Fosfat Limbah Cair Laundry	Jumlah Pasangan Aluminium Pada Elektrokoagulasi	Jenis penelitian yang dilakukan adalah <i>true experiment</i> yang bertujuan mengetahui penurunan kadar fosfat limbah cair <i>laundry</i> dari usaha "Rumah Laundry" di Pajimatan, Imogiri, Bantul setelah mendapatkan perlakuan menggunakan 3 pasang, 4 pasang dan 5 pasang elektroda aluminium. Dengan menggunakan 3, 4, dan 5 pasang elektroda aluminium, secara berturut-turut, kadar fosfat turun sebanyak 31,4 %, 33,7 % dan 27,3 %. Penurunan kadar fosfat yang efektif adalah pada variasi 4 pasang elektroda aluminium, dengan tegangan 12 volt dan kuat arus 500 mA. Namun demikian, hasil uji <i>one way Anava</i> menunjukkan bahwa penurunan kadar fosfat di antara penggunaan 3 variasi pasangan elektroda aluminium tersebut tidak berbeda secara signifikan (p-value > 0,05).
7	Aryanti Dharma & Mufti Sudibyo, 2024	Analisis Mikroplastik Pada Sedimen Di Tapak Kuda Lama Dan Pantai Pulau Gantan Kabupaten Langkat		Hasil penelitian menunjukan bahwa bentuk mikroplastik yang terdapat pada Sedimen di Tapak Kuda Lama dan Pantai Pulau Gantan adalah <i>fiber</i> , <i>fragmen</i> dan <i>film</i> . Dengan kelimpahan pada setiap kedalaman di Tapak Kuda lama yaitu <i>fiber</i> 320 partikel/kg, <i>film</i> 160 partikel/kg dan <i>fragmen</i> 90 partikel/kg. Kelimpahan di Pantai Pulau Gantan pada setiap kedalaman yaitu fiber 350 partikel/kg, fragmen 200 partikel/kg dan film 120 partikel/kg. Hasil analisis statistik <i>Anova One Way</i> dan Uji -T nilai sig. > 0.05 yang

			berarti menunjukkan tidak ada perbedaan kelimpahan mikroplastik antar lokasi dan kedalaman di Tapak Kuda Lama dan Pantai Pulau Gantan Kabupaten Langkat.
8	Alexander Tunggul Sutan Haji, Bambang Rahadi, Nazarina Tiftah Firdausi, 2021	Analisis Kelimpahan Mikroplastik Pada Air Permukaan Di Sungai Metro, Malang	Tahapan penelitian yaitu penyiangan sampel, pengeringan sampel, pemurnian dengan <i>Wet Peroxide Oxidation</i> (WPO) yaitu dengan 20 mL larutan Fe (II) 0.05 M, larutan H ₂ O ₂ 20 mL dan NaCl 6 gram per 20 mL sampel, pemisahan partikel dengan <i>density separator</i> dan pengamatan dengan mikroskop <i>Olympus SZX 16</i> . Jenis mikroplastik yang ditemukan yaitu <i>fiber</i> , <i>film</i> dan <i>fragmen</i> dengan jumlah yang paling banyak yaitu pada titik 3 (hilir). Warna mikroplastik yang didapatkan yaitu bening, biru, merah, dll. Ukuran mikroplastik paling banyak yaitu pada saringan 177 µm. Kelimpahan dan beban pencemar mikroplastik didapatkan paling tinggi yaitu jenis <i>fiber</i> pada titik 3 (hilir).
9	Melati Feranita Fachrul, Astri Rinanti, Tazkiaturrizki, Afferdo Agustria, Dini Amalia Naswadi, 2021	Degradasi Mikroplastik Pada Ekosistem Perairan Oleh Bakteri Kultur Campuran <i>Clostridium sp.</i> Dan <i>Thiobacillus sp.</i>	Pendekatan untuk mengendalikan pencemaran mikroplastik dapat dilakukan dengan pendekatan teknologi bioremediasi, dengan memanfaatkan potensi mikroba atau bakteri <i>indigenous</i> yang ditumbuhkan dalam lingkungan media yang terpapar mikroplastik. Faktor abiotik (radiasi UV, suhu, tekanan atmosfer) terjadi dalam waktu lama, dan tidak dapat sepenuhnya terurai. Faktor biotik dipengaruhi oleh mikroorganisme pengurai yang ada di lingkungan yang dapat mempercepat penguraian.
10	Aribah Zulfa Hidayah, Elisa Putri, Siti Jumrah, Rudy Syah Putra, 2018	Kombinasi Elektroflotasi Dan Koagulan Kacang Arab Pada Pengolahan Air Lindi	Koagulan alami yang digunakan yaitu Kacang arab (K.A) dengan variasi dosis sebesar 0,025; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2 dan 0,25 g/500 mL. Proses elektroflotasi dilakukan dengan elektroda <i>stainless steel</i> sebagai katoda dan Titanium sebagai anoda pada tegangan konstan 40 V DC selama 30 menit. Hasil terbaik yang diperoleh dari proses Elektro-Bio dengan koagulan Kacang arab memiliki nilai parameter yang sama berturut-turut sebesar 599 ppm; 0,84 ms/cm, 0,06 NTU dan 3,6 dengan dosis 0,025 g/500 mL.

11	Budiany Rachmawati, Yayok Surya P, Mohammad Mirwan, 2014	Proses Elektrokoagulasi Pengolahan Limbah Laundry	Penelitian dilakukan pada skala laboratorium secara batch dengan menggunakan plat tembaga sebagai elektroda dengan variasi waktu 60, 80, 100, 120, 140 menit dan variasi tegangan 9, 12, 15, 18, 21 volt. Parameter yang diukur ialah TSS dan surfaktan. Dari hasil penelitian didapatkan hasil optimal untuk efisiensi penyisihan TSS yaitu 85% dari 400 mg/l menjadi 60 mg/l dengan tegangan 21 volt dengan waktu sampling 140 menit diikuti dengan efisiensi penyisihan kandungan surfaktan sebesar 60,36% dari 15,21 mg/l menjadi 6 mg/l.
12	Rizqa Khairunnisa, Kiki Prio Utomo, Aini Sulastri, 2024	Identifikasi Mikroplastik Pada Limbah Laundry Di Kota Pontianak	Analisis laboratorium diawali dengan penyaringan sampel, degradasi organik, pemisahan densitas, penyaringan akhir, pengamatan mikroskop dan uji FTIR. Mikroplastik yang ditemukan di seluruh sampel hanya berbentuk <i>fiber</i> , dengan <i>polimer acrylonitrile butadiene styrene</i> pada pencucian pertama dan polietilen pada pencucian kedua dan ketiga. Diantara semua proses, pencucian merupakan proses yang melepaskan mikroplastik paling banyak dengan rata-rata kelimpahan 2.239 partikel/L dan massa 129 gr. Penelitian ini menemukan bahwa detergent, umur pakaian, sistem putaran dan keberadaan air pada proses meningkatkan pelepasan serat mikroplastik selama pencucian.
13	Hudori & P. Soewondo, 2009	Pengolahan Menggunakan Elektrokoagulasi Elektroda Aluminium Deterjen Teknologi dengan	Reaktor elektrokoagulasi dioperasikan secara batch dengan menggunakan limbah dari jasa <i>laundry</i> . Elektroda yang digunakan adalah aluminium dengan kemurnian 99.7%. Variasi kerapatan arus yang digunakan adalah 50, 75 dan 100 A/m ² . Parameter yang diukur adalah surfaktan, COD, kekeruhan, konduktivitas, pH dan suhu. Hasil percobaan menunjukkan bahwa untuk konfigurasi monopolar dan bipolar dengan waktu detensi 30 menit

				tingkat penyisihan surfaktan mencapai 70%, sedangkan COD mencapai 80%.
14	Putri Nur Rizkia & Novirina Hendrasarie, 2023	Penurunan Kadar Mikroplastik Tipe Serat Pada Limbah Laundry Dengan Metode Elektrokoagulasi		Digunakan dalam menurunkan kelimpahan mikroplastik dengan proses elektrokoagulasi. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui efektivitas penurunan kadar mikroplastik tipe serat dengan pengolahan elektrokoagulasi dan elektroda aluminium, serta proses koagulasi flokulasi dengan koagulan PAC sebagai variabel kontrol. Proses elektrokoagulasi dilakukan dengan variasi kuat arus 6 <i>ampere</i> ; 7 <i>ampere</i> ; 8 <i>ampere</i> ; dan 9 <i>ampere</i> . Dari penelitian didapatkan variasi kuat arus yang paling optimal yaitu 6 <i>ampere</i> dengan persentase removal sebesar 90% dengan nilai zeta potensial +0,421 mV. Adapun penelitian dengan proses koagulasi-flokulasi dengan koagulan PAC dengan dosis 46,4 mg/l dengan kecepatan pengadukan saat proses koagulasi 400 rpm selama 0,5 menit, flokulasi 40 rpm selama 20 menit, dan pengendapan 30 menit, persentase penurunan kadar mikroplastik 71% dengan nilai zeta potensial -7,5 mV.
15	Achmad Chusnun Ni'am, Jenny Caroline, M. Afandi, 2017	Variasi Jumlah Elektroda Dan Besar Tegangan Dalam Menurunkan Kandungan Cod Dan Tss Limbah Cair Tekstil Dengan Metode Elektrokoagulasi		Sampel penelitian diambil dari air limbah sisa pewarnaan tekstil (sarung) dengan kebutuhan limbah cair sebanyak 36 liter. Data untuk analisis adalah data parameter awal dan akhir yaitu COD dan TSS. Elektroda yang digunakan adalah aluminium (Al) sebagai anoda dan besi (Fe) sebagai katoda. Variasi penelitian yang digunakan adalah jumlah elektroda dan besar tegangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan pada jumlah 4 elektroda dengan tegangan 12 volt, mampu menurunkan konsentrasi COD hingga 76% dan TSS hingga 85% dalam limbah cair industri tekstil skala rumah tangga.

Sumber: Kajian Pustaka, 2025

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini berlangsung selama satu bulan, terhitung sejak bulan Agustus - September 2025 yang mencakup beberapa tahapan, dimulai dari pemilihan lokasi penelitian, persiapan alat dan bahan, perakitan serta pengujian reaktor, hingga analisis kualitas air limbah *laundry*. Pengambilan sampel air limbah laundry dilakukan di salah satu usaha *laundry* skala kecil yang berlokasi di Kecamatan Bontomarannu, Kabupaten Gowa. Pengolahan sampel air limbah *laundry* dilakukan di Laboratorium Kualitas Air, Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, sedangkan pengujian kadar mikroplastik air limbah *laundry* dilakukan di Laboratorium Ekotoksikologi Laut, Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan, Universitas Hasanuddin.

2.2 Variabel Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental dengan pendekatan kuantitatif, yang berfokus pada riset terapan untuk mengevaluasi efektivitas metode elektroflotasi dalam menyisihkan mikroplastik dari air limbah laundry. Penelitian ini dirancang untuk menilai seberapa efektif proses elektroflotasi dalam mengurangi kandungan mikroplastik, terutama serat sintetis yang berasal dari proses pencucian pakaian berbahan polyester, nylon, dan bahan sintetis lainnya. Elektroflotasi merupakan proses pemisahan yang memanfaatkan pembentukan gelembung gas (hidrogen dan oksigen) yang dihasilkan pada permukaan elektroda saat proses elektrolisis berlangsung. Gelembung ini akan menempel pada partikel-partikel mikroplastik, membantu untuk mengangkatnya ke permukaan air dalam bentuk buih, sehingga lebih mudah untuk dipisahkan dari air limbah. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi parameter operasi yang optimal dan menganalisis efektivitas penyisihan mikroplastik secara kuantitatif, sebagai kontribusi terhadap pengembangan teknologi pengolahan air limbah yang lebih efisien, hemat energi, dan ramah lingkungan, khususnya bagi usaha laundry skala kecil hingga menengah yang belum memiliki sistem pengolahan limbah yang memadai.

Dalam pelaksanaan penelitian ini, terdapat tiga variabel utama yang perlu diperhatikan. Variabel tersebut terdiri dari variabel bebas yaitu variabel yang mempengaruhi proses elektroflotasi, variabel terikat yang menunjukkan hasil dari proses, serta variabel kontrol yaitu variabel atau kondisi yang dijaga untuk tetap konstan selama eksperimen berlangsung. Dengan mengatur dan mengevaluasi variabel-variabel tersebut secara sistematis, penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan data kuantitatif yang valid dan menentukan parameter optimal untuk proses elektroflotasi, sehingga dapat menjadi referensi dalam penerapan nyata pengolahan air limbah laundry yang lebih berkelanjutan.

2.2.1 Variabel Bebas

Dalam penelitian eksperimental, variabel bebas merupakan faktor yang sengaja dimanipulasi atau diubah untuk mengetahui pengaruhnya terhadap variabel terikat.

Variabel bebas yang digunakan adalah tegangan listrik dan jarak elektroda dalam proses elektroflotasi. Kedua variabel ini dipilih karena memiliki peran yang sangat penting dalam menentukan efektivitas proses elektroflotasi dalam menyisihkan mikroplastik dari air limbah *laundry*.

Tegangan listrik berfungsi sebagai sumber energi yang menggerakkan proses elektrolisis pada elektroda. Semakin tinggi tegangan yang diberikan, semakin besar pula arus listrik yang mengalir, yang pada akhirnya memengaruhi laju pembentukan gelembung gas (seperti H_2 dan O_2) di sekitar elektroda. Gelembung-gelembung ini berperan penting dalam proses flotasi, karena akan menangkap partikel-partikel mikroplastik dan mengangkatnya ke permukaan air untuk kemudian dipisahkan. Namun demikian, tegangan yang terlalu tinggi juga dapat menimbulkan efek negatif, seperti degradasi elektroda, peningkatan konsumsi energi, atau pembentukan gelembung yang terlalu besar dan tidak efisien (Purwati dkk., 2021). Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan variasi tegangan dalam rentang tertentu untuk mengetahui titik optimal penyisihan mikroplastik.

Sementara itu, jarak antar elektroda merupakan faktor penting dalam elektroflotasi karena berpengaruh langsung pada distribusi medan listrik, jumlah gelembung yang terbentuk, serta efisiensi energi proses. Jarak yang terlalu dekat (<1 cm) dapat memicu korsleting dan pembentukan gelembung besar yang kurang efektif menangkap mikroplastik, sedangkan jarak terlalu jauh (>5 cm) meningkatkan kebutuhan tegangan dan menurunkan efisiensi flotasi. Beberapa penelitian di Indonesia menunjukkan bahwa jarak optimal berada pada kisaran 2–3 cm, karena pada rentang ini terbentuk gelembung mikro yang cukup rapat untuk berinteraksi dengan partikel mikroplastik tanpa konsumsi energi berlebih. Oleh karena itu, variasi jarak elektroda juga menjadi penting untuk menentukan efisiensi penyisihan mikroplastik secara maksimal (Muqabil, 2023).

Tabel 1. Matriks Penelitian

Tegangan	Jarak Elektroda		
	S1	S2	S3
V1	V1S1	V1S2	V1S3
V2	V2S1	V2S2	V2S3
V3	V3S1	V3S2	V3S3

Sumber: Perencanaan Penelitian, 2025

Keterangan:

V1 = Tegangan 10 Volt / 5 Ampere

V2 = Tegangan 15 Volt / 5 Ampere

V3 = Tegangan 20 Volt / 5 Ampere

S1 = Jarak Elektroda Grafit-Stainless Steel 3 cm

S2 = Jarak Elektroda Grafit-Stainless Steel 5 cm

S3 = Jarak Elektroda Grafit-Stainless Steel 7 cm

Berdasarkan matriks penelitian pada Tabel 1, variasi tegangan yang digunakan dalam proses elektroflotasi adalah 10 Volt / 5 Ampere, 15 Volt / 5 Ampere, dan 20 Volt / 5 Ampere. Pemilihan variasi tegangan tersebut merujuk pada beberapa penelitian sebelumnya yang berfokus pada efektivitas proses elektrokimia dalam penyisihan mikroplastik. Penelitian oleh Sari dkk. (2021) yang mengkaji proses elektrokoagulasi–

elektroflotasi dalam menghilangkan mikroplastik tipe fiber pada air limbah domestik menunjukkan bahwa penggunaan tegangan 10 Volt / 5 ampere kinerja pembentukan gelembung gas dan flok cukup efektif, dengan efisiensi penyisihan mikroplastik mencapai sekitar 60%. Variasi tegangan 15 volt / 5 ampere dipilih sebagai rentang tengah yang belum banyak dievaluasi pada penelitian terkait mikroplastik. Penelitian oleh Nurani dan Prasetyo (2023) menyebutkan bahwa tegangan menengah sering menghasilkan efisiensi yang stabil tanpa konsumsi energi yang berlebihan, sehingga relevan untuk diuji pada konteks penyisihan mikroplastik. Selain itu, penelitian oleh Herlambang dan Yusuf (2022) mengenai pengaruh variasi tegangan terhadap kinerja elektrokoagulasi dalam penghilangan mikroplastik polietilena pada air limbah laundry menunjukkan peningkatan efisiensi signifikan pada tegangan 20 volt, dengan efisiensi penyisihan mencapai lebih dari 75% yang menunjukkan bahwa tegangan yang lebih tinggi mampu meningkatkan laju pembentukan gelembung dan mempercepat mekanisme flotation, sehingga menjadi dasar pemilihan tegangan 20 volt / 5 ampere sebagai kondisi pembanding dalam penelitian ini.

Pada Tabel 1. Matriks penelitian digunakan pula variable bebas berupa jarak elektroda sebesar 3 cm, 5 cm dan 7 cm. Penelitian oleh Rahmawati dan Gunawan (2022) menunjukkan bahwa jarak elektroda yang lebih pendek, seperti 3 cm, mampu meningkatkan kepadatan arus dan mempercepat pelepasan ion dari elektroda, sehingga memperbanyak pembentukan gelembung gas yang berperan penting dalam pengangkatan mikroplastik ke permukaan. Sementara itu, penelitian oleh Lukman dkk. (2021) menyatakan bahwa jarak elektroda 5 cm sering dianggap sebagai jarak optimum karena memberikan keseimbangan antara densitas arus, pembentukan flok, dan stabilitas sistem dimana pada jarak ini, proses elektroflotasi mampu menghasilkan gelembung gas berukuran seragam dan meningkatkan proses flokulasi mikroplastik tanpa meningkatkan konsumsi energi secara berlebihan. Pemilihan jarak elektroda 7 cm bertujuan untuk mengevaluasi bagaimana peningkatan jarak yang lebih jauh memengaruhi performa penyisihan mikroplastik. Berdasarkan studi oleh Aditya dan Muhammad (2023), jarak elektroda yang semakin lebar dapat menyebabkan penurunan laju transfer massa dan distribusi arus, sehingga proses pembentukan gelembung menjadi kurang intensif. Meskipun demikian, pengujian jarak 7 cm tetap diperlukan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai batas operasional sistem elektroflotasi serta menjadi pembanding terhadap kinerja jarak yang lebih pendek.

Dengan memvariasikan tegangan dan jarak elektroda secara sistematis, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi parameter operasi optimal yang menghasilkan penyisihan mikroplastik paling efisien. Hasil dari variasi kedua variabel bebas ini akan dibandingkan terhadap jumlah mikroplastik yang tersisa dalam air limbah setelah perlakuan. Dengan demikian, pemahaman yang diperoleh dari pengaruh tegangan dan jarak elektroda terhadap hasil proses elektroflotasi akan menjadi dasar penting bagi pengembangan metode pengolahan air limbah yang lebih efektif, efisien, dan aplikatif di lapangan, khususnya dalam pengelolaan limbah *laundry*.

2.2.2 Variabel Terikat

Dalam sebuah penelitian eksperimental, variabel terikat merupakan komponen yang menjadi fokus pengamatan dan pengukuran sebagai hasil atau efek dari perlakuan terhadap variabel bebas. Variabel terikat yang dianalisis adalah mikroplastik, yakni partikel plastik berukuran kurang dari 5 mm yang berasal dari serat sintetis pakaian yang

terlepas selama proses pencucian di laundry. Mikroplastik ini merupakan salah satu jenis polutan emerging yang semakin mendapat perhatian luas karena sifatnya yang sulit terurai, mudah tersebar di lingkungan perairan, serta berpotensi masuk ke dalam rantai makanan melalui biota air.

Pemilihan mikroplastik sebagai variabel terikat dalam penelitian ini didasarkan pada tingkat urgensinya sebagai kontaminan baru dalam air limbah domestik dan industri, termasuk laundry. Mikroplastik dalam air limbah laundry umumnya berbentuk serat mikro dari bahan tekstil seperti *polyester*, *nylon*, *spandex*, dan akrilik. Penelitian ini berfokus pada sejauh mana metode elektroflotasi mampu menurunkan konsentrasi mikroplastik dari air limbah tersebut. Oleh karena itu, mikroplastik menjadi indikator utama dalam menilai keberhasilan proses elektroflotasi. Jumlah mikroplastik yang tersisa setelah perlakuan elektroflotasi akan dibandingkan dengan jumlah awal sebelum perlakuan, sehingga diperoleh persentase efisiensi penyisihan.

Untuk mendapatkan data yang akurat, mikroplastik sebagai variabel terikat akan dianalisis menggunakan metode penyaringan dan karakterisasi visual mikroskopis, yang dilengkapi dengan pewarnaan atau teknik identifikasi lanjutan jika diperlukan. Aspek-aspek yang diamati meliputi jumlah, ukuran, bentuk (serat, fragmen, film), dan jenis mikroplastik. Keberadaan mikroplastik sebagai variabel terikat tidak hanya mencerminkan efektivitas proses pengolahan limbah, tetapi juga menjadi representasi nyata dari tantangan lingkungan modern yang menuntut solusi inovatif dan berkelanjutan. Dengan fokus pada variabel ini, penelitian diharapkan mampu menghasilkan informasi yang relevan secara ilmiah dan aplikatif dalam mendukung sistem pengelolaan air limbah yang lebih baik, khususnya pada sektor rumah tangga dan jasa laundry.

2.2.3 Variabel Kontrol

Variabel kontrol adalah aspek-aspek yang sengaja dijaga konstan selama eksperimen, sehingga setiap perubahan yang terjadi pada hasil penelitian dapat benar-benar dikaitkan dengan pengaruh variabel bebas. Dalam penelitian ini, terdapat empat variabel kontrol utama, yaitu :

1. Volume Air Limbah yang Diolah
Volume air limbah yang diolah harus dijaga tetap sama pada setiap siklus perlakuan. Perbedaan volume dapat menyebabkan perbedaan ketinggian cairan, permukaan elektroda yang terendam, serta waktu kontak antar gelembung dan partikel mikroplastik.
2. Konsentrasi Air Limbah yang Diolah
Konsentrasi ini mencerminkan seberapa pekat air limbah tersebut mengandung mikroplastik. Jika konsentrasi berbeda-beda pada setiap perlakuan, maka hasil penyisihan tidak akan dapat dibandingkan secara objektif.
3. Suhu
Suhu dapat mempengaruhi kecepatan reaksi elektrolisis dan pembentukan gelembung gas, serta viskositas air yang pada akhirnya mempengaruhi pergerakan dan pengangkatan mikroplastik.
4. pH
Nilai pH yang terlalu asam atau terlalu basa dapat menghambat proses pengikatan partikel oleh gelembung gas.

2.3 Alat dan Bahan

Penelitian ini melibatkan beberapa alat dan bahan yang digunakan pada setiap tahap pelaksanaan, mulai dari tahap perencanaan hingga proses analisis terhadap sampel air limbah. Perincian mengenai alat dan bahan yang digunakan disajikan sebagai berikut.

Tabel 2. Alat dan bahan penelitian

No	Alat dan Bahan	Spesifikasi	Fungsi
1	Air Limbah Laundry	13 liter	Sampel yang akan diteliti
2	Power Suplly	-	Sebagai sumber arus pada proses elektroflotasi
3	Bak kaca	Ukuran 20 x 10 x 10 cm	Sebagai Reaktor
4	Plat Stainless Steel	Ukuran 10 x 5 cm	Sebagai plat elektroda pada proses elektroflotasi
5	Plat Graphite	Ukuran 10 x 5 cm	Sebagai plat elektroda pada proses elektroflotasi
6	Kabel Penghubung	-	Digunakan Untuk Menghubungkan Antara Plat Elektroda Dengan Power Supply
7	Penjepit Buaya	-	Sebagai Penghubung Antara Plat Elektroda Dan Kabel Penghubung

2.4 Populasi dan Sampel

Penelitian ini difokuskan pada pengolahan air limbah dari usaha laundry, yang saat ini menjadi perhatian serius mengingat meningkatnya jumlah usaha laundry serta tingginya volume air limbah yang dihasilkan setiap hari. Air limbah laundry mengandung berbagai bahan kimia seperti deterjen, surfaktan, pelembut pakaian, senyawa organik, minyak, serta mikroplastik yang berasal dari serat sintetis pakaian selama proses pencucian. Mikroplastik ini sangat sulit diuraikan secara alami, bersifat persisten di lingkungan, dan dapat masuk ke rantai makanan organisme air, sehingga menimbulkan potensi bahaya bagi ekosistem dan kesehatan manusia. Oleh karena itu, diperlukan teknologi pengolahan limbah yang mampu menyisihkan kontaminan ini secara efektif, salah satunya adalah metode elektroflotasi.

Untuk keperluan penelitian ini, air limbah diambil secara langsung dari usaha laundry, sehingga kondisi sampel benar-benar merepresentasikan limbah nyata yang umum dihasilkan dalam kegiatan pencucian pakaian. Pemilihan sampel nyata ini bertujuan agar hasil penelitian memiliki relevansi tinggi secara praktis, karena langsung mencerminkan tantangan pengolahan limbah di lapangan. Air limbah yang diperoleh kemudian digunakan tanpa penambahan atau modifikasi bahan kimia, agar karakteristik asli seperti kadar mikroplastik, pH, warna, dan tingkat kekeruhan tetap terjaga. Hal ini penting untuk memastikan bahwa efektivitas metode elektroflotasi yang diuji memang mampu menangani kondisi limbah sebagaimana yang ditemui secara langsung di lingkungan.

Dalam konteks penelitian ini, populasi yang ditargetkan adalah seluruh jenis air limbah laundry dari berbagai skala usaha, baik rumahan maupun industri. Namun,

sampel yang digunakan difokuskan pada limbah dari usaha laundry rumahan atau skala kecil-menengah, yang umumnya tidak memiliki sistem pengolahan limbah tersendiri.

2.5 Persiapan Penelitian

2.5.1 Perencanaan Desain Reaktor Elektroflotasi

Perencanaan desain reaktor elektroflotasi dalam penelitian ini disusun dengan mempertimbangkan kemampuan metode elektroflotasi dalam menghilangkan polutan, khususnya mikroplastik dan senyawa pencemar organik, dari air limbah laundry. Reaktor yang digunakan memiliki sistem batch sederhana yang terdiri atas beaker glass berkapasitas 1.000 mL, yang dirancang sedemikian rupa untuk menampung konfigurasi elektroda dan memungkinkan pengaturan arus listrik secara efisien. Sistem kelistrikan terintegrasi secara langsung ke sumber DC (*Direct Current Power Supply*), di mana koneksi dilakukan dengan menggunakan penjepit buaya untuk fleksibilitas dalam pengaturan arus dan tegangan.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Prihatin, S (2021) dalam kajian potensi limbah laundry sebagai sumber pencemar perairan, usaha laundry skala kecil hingga menengah dapat menghasilkan limbah cair dengan volume rata-rata 20–50 liter per kilogram cucian tergantung jenis mesin, deterjen, dan pola operasional yang digunakan. Dengan kapasitas cucian sekitar 50–200 kg per hari, maka potensi air limbah yang dihasilkan dapat mencapai 1–4 m³ per hari. Sementara itu, usaha laundry komersial atau institusional (seperti hotel dan rumah sakit) memiliki kapasitas jauh lebih besar, yaitu 500–1.500 kg cucian per hari, sehingga dapat menghasilkan limbah cair lebih dari 10–20 m³ per hari (Rahayu & Lestari, 2020).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Zhang et al. (2020), penggunaan reaktor elektroflotasi dengan volume 500 ml efektif untuk menguji penyisihan mikroplastik karena memberikan keseimbangan antara turbulensi aliran dan stabilitas flock. Studi lain oleh Gómez-López et al. (2021) menggunakan volume 1000 ml untuk pengolahan limbah deterjen skala laboratorium, dengan alasan volume tersebut cukup representatif untuk meniru kondisi nyata namun tetap efisien dari sisi kebutuhan energi listrik. Apabila range normal yang sering digunakan adalah 500 – 1000 mL, maka dilakukan penyesuaian terhadap volume sampel yang digunakan dengan perhitungan sebagai berikut:

Diketahui:

Volume Sampel Batas Bawah = 500 mL

Volume Sampel Batas Atas = 1000 mL

Jumlah data (n) = 2

$$\begin{aligned} \text{Rata - rata volume sampel} &= \frac{\text{volume sampel b. bawah} + \text{volume sampel b. atas}}{2} \\ &= \frac{500 \text{ ml} + 1000 \text{ ml}}{2} \\ &= 750 \text{ ml} = 700 \text{ ml} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan diatas, maka diperoleh kesimpulan bahwa volume air limbah yang akan digunakan dalam proses penelitian adalah sebesar 700 ml. Berikutnya, dilakukan perhitungan volume reaktor dengan mempertimbangkan volume air limbah yang digunakan. Untuk memperoleh volume reaktor, digunakan rumus perhitungan sebagai berikut:

Diketahui:

Volume air = 700 ml = 700 cm³

Ruang bebas = 10%

Maka,

Total Volume Bak = Volume Air + Ruang Bebas

= 700 + 10%

= 770 cm³

Pada umumnya reaktor elektroflotasi memiliki ruang penampungan air limbah yang berbentuk kubus, sehingga digunakan rumus kubus untuk memperoleh panjang, lebar dan tinggi reaktor. Adapun perhitungan dimensi kubus sebagai berikut:

$$V = s^3$$

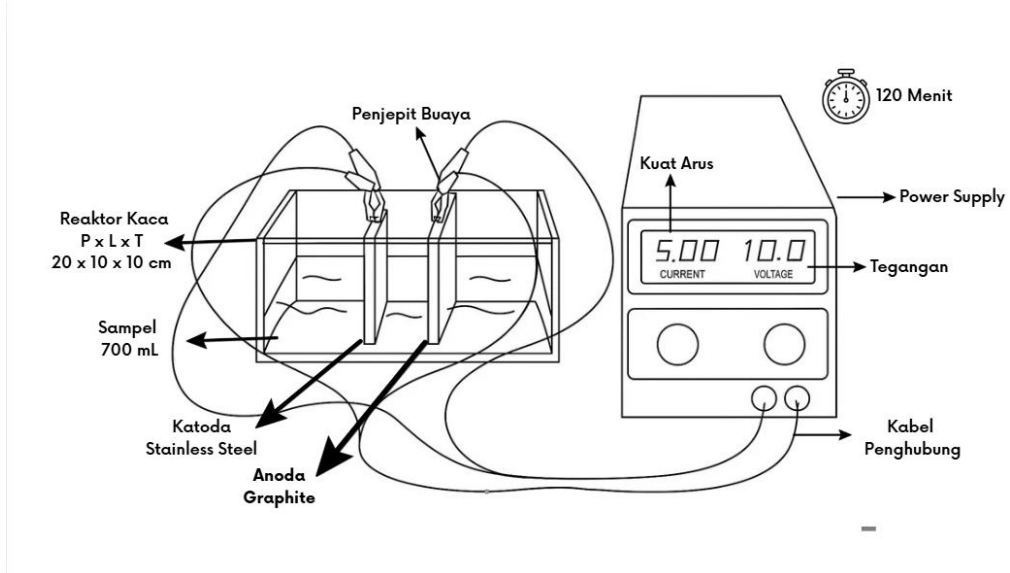
$$s = \sqrt[3]{V}$$

$$s = \sqrt[3]{770} = 9.16 \text{ cm atau } 10 \text{ cm}$$

Dimana:

V = Total Volume Bak

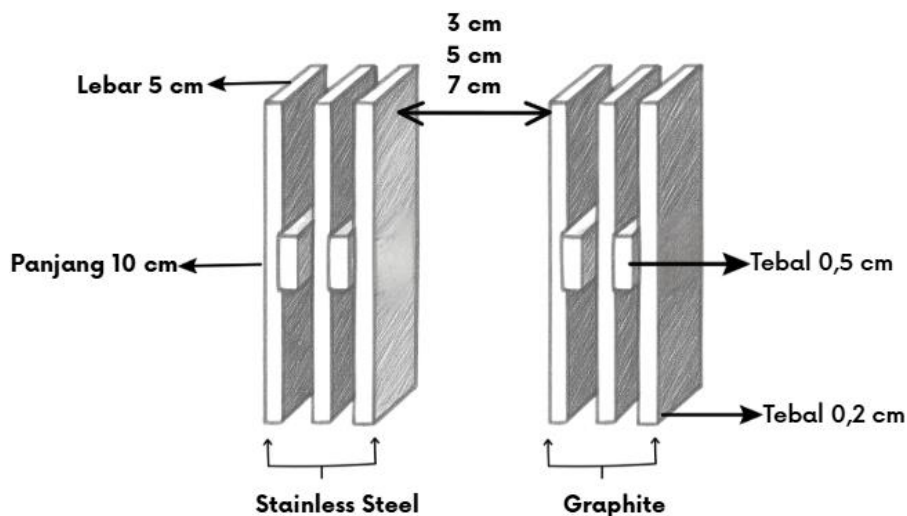
S = Sisi Kubus



Gambar 2. Desain Reaktor Elektroflotasi

Berdasarkan hasil perancangan, reaktor yang digunakan terdiri dari satu kompartemen dengan dimensi P x L x T = 20 x 10 x 10 cm yang mampu menampung air limbah domestik rumah tangga sebanyak 700 mL. Penambahan 10 cm pada panjang reaktor dilakukan sebagai antisipasi terhadap variasi jarak elektroda 3, 5, dan 7 cm sehingga tersedia ruang cukup di kedua sisi reaktor dan elektroda dapat diposisikan tanpa bersentuhan langsung dengan dinding reaktor. Volume reaktor pada penelitian ini sebesar 2000 cm³ atau 2 L. Volume ini dipilih agar proses pembentukan gelembung oleh elektroda dapat berlangsung secara merata di seluruh ruang reaktor serta

memungkinkan kontak optimal antara gelembung gas dan partikel mikroplastik. Selain itu, volume 2 L termasuk ukuran yang umum digunakan pada skala laboratorium untuk memastikan stabilitas arus listrik, distribusi gelembung yang seragam, serta efisiensi penghilangan yang dapat direproduksi sebagaimana dilaporkan oleh studi elektroflotasi skala laboratorium pada rentang 1–5 L (Chen et al., 2020; Abouleish & Hashem, 2022).



Gambar 3. Desain Plat Elektroda *Stainless Steel* dan *Graphite*

Elektroda yang digunakan berupa tiga buah plat grafit sebagai katoda dan tiga buah plat stainless steel sebagai anoda dengan ukuran masing-masing 5 x 10 cm dan ketebalan 0,2 cm, yang telah disesuaikan dengan kapasitas reaktor serta mempertimbangkan efisiensi proses elektroflotasi. Masing-masing elektroda dirangkai secara paralel dan disusun vertikal di dalam wadah akuarium. Susunan vertikal dipilih karena lebih efisien dalam hal distribusi arus dan penggunaan ruang, serta mampu mengoptimalkan proses pembentukan gelembung gas hidrogen dan oksigen sebagai media pengapungan polutan (Akarsu dkk., 2021).

Susunan elektroda secara paralel memungkinkan setiap elektroda menerima tegangan yang sama, sedangkan arus dibagi di antara seluruh elektroda. Hal ini penting untuk menjaga kestabilan proses, terutama dalam elektroflotasi yang sangat dipengaruhi oleh densitas arus dan waktu tinggal. Dengan pengaturan ini, reaktor mampu menjaga kestabilan reaksi elektrolisis dalam rentang arus optimal (0,1–1 A), sesuai dengan hasil studi terdahulu yang menyatakan bahwa efisiensi penghilangan mikroplastik dan warna tertinggi dicapai pada arus rendah hingga sedang untuk menghindari degradasi elektroda berlebihan (Shen dkk., 2022).

Selain itu, konfigurasi vertikal memberikan keuntungan dalam efisiensi energi. Jarak antar elektroda yang sempit (~1 cm) mengurangi resistensi listrik, sehingga tegangan kerja lebih rendah dan konsumsi energi menjadi lebih hemat. Gaya gravitasi juga mendukung proses pencampuran dan transfer massa tanpa memerlukan sistem aerasi mekanis tambahan, menjadikan sistem ini lebih sederhana dan rendah biaya operasional. Meski sedikit lebih rendah efisiensinya dalam pencampuran dibanding susunan horizontal, konfigurasi vertikal ini memberikan stabilitas proses yang lebih baik

dengan laju penghilangan polutan yang tetap kompetitif, khususnya dalam pengolahan air limbah rumah tangga dan laundry skala kecil hingga menengah.

Luas permukaan elektroda memainkan peran yang sangat menentukan dalam kinerja proses elektroflotasi karena proses ini bergantung pada kemampuan elektroda menghasilkan gelembung gas halus yang berfungsi mengangkat partikel tersuspensi, termasuk mikroplastik, minyak, atau padatan koloid. Jika elektroda berbentuk pelat datar, maka luas permukaannya dihitung dengan rumus dasar luas persegi panjang, dimana:

$$A = P \times L$$

Dimana:

A = Luas Permukaan

P = Panjang (cm)

L = Lebar (cm)

Maka, berdasarkan rumus tersebut, besar luas permukaan elektroda adalah:

$$A = P \times L$$

$$= 10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$$

$$= 50 \text{ cm}^2$$

Karena kedua sisi elektroda terendam dan aktif, maka luas permukaan total menjadi:

$$A_{Total} = 2 \times A$$

$$= 2 \times 50 \text{ cm}^2$$

$$= 100 \text{ cm}^2 \text{ untuk tiap satu plat elektroda}$$

Luas permukaan elektroda memiliki peran yang sangat penting dalam menentukan besarnya arus yang mengalir serta efisiensi removal mikroplastik pada proses elektroflotasi. Semakin besar luas permukaan elektroda, semakin banyak area kontak yang tersedia untuk terjadinya reaksi elektrokimia, sehingga jumlah gelembung gas hidrogen dan oksigen yang dihasilkan pada permukaan elektroda meningkat. Peningkatan jumlah gelembung ini sangat berpengaruh karena gelembung berfungsi sebagai media pengangkut mikroplastik menuju permukaan air untuk kemudian dihilangkan melalui flotasi. Selain itu, luas permukaan yang lebih besar menurunkan nilai densitas arus (*current density*) pada tegangan yang sama, sehingga proses elektrolisis dapat berlangsung lebih stabil, mengurangi kemungkinan polarisasi berlebih, dan menjaga kestabilan pembentukan gelembung dengan ukuran yang lebih seragam (Wang et al., 2020).

Gelembung berukuran kecil dan stabil memiliki daya angkat yang lebih tinggi terhadap mikroplastik berukuran mikro atau nano, yang cenderung memiliki densitas mendekati air sehingga sulit terpisah tanpa bantuan gaya flotasi yang efisien. Akhirnya, peningkatan luas permukaan elektroda umumnya meningkatkan efisiensi removal mikroplastik karena menghasilkan jumlah gelembung lebih banyak, meningkatkan frekuensi tumbukan antara gelembung dan partikel mikroplastik, serta memperbesar peluang partikel terperangkap dan terflotasi ke permukaan. Namun, peningkatan luas permukaan harus tetap mempertimbangkan keseimbangan dengan kebutuhan energi, karena arus yang meningkat seiring luas permukaan dapat meningkatkan konsumsi daya (Guo et al., 2022). Dengan demikian, pemilihan luas permukaan elektroda yang optimal menjadi kunci dalam mencapai efisiensi removal mikroplastik yang tinggi tanpa meningkatkan energi secara berlebihan dalam proses elektroflotasi.

2.6 Pelaksanaan Penelitian dan Pengumpulan Data

Pelaksanaan penelitian ini didasarkan pada pendekatan kuantitatif yang menekankan pada perolehan data hasil pengukuran secara terukur dan objektif. Sampel air limbah laundry dikumpulkan secara langsung dari sumber pembuangan dan selanjutnya dianalisis melalui serangkaian uji laboratorium. Fokus utama pengujian ini adalah kandungan mikroplastik. Pengujian dilakukan baik sebelum maupun setelah proses pengolahan menggunakan sistem elektroflotasi, dengan tujuan mengevaluasi efektivitas metode tersebut dalam menurunkan kadar pencemar, khususnya mikroplastik. Seluruh prosedur analisis laboratorium mengacu pada standar yang berlaku, termasuk pedoman SNI dan regulasi baku mutu lingkungan, sehingga hasil penelitian dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah sekaligus relevan untuk diaplikasikan pada pengelolaan limbah laundry di skala nyata.

2.6.1 Pengambilan Sampel Air Limbah

Pengambilan sampel merupakan langkah awal yang krusial dalam penelitian kualitas air limbah, karena berperan besar dalam menentukan keandalan serta ketepatan hasil analisis. Pada penelitian ini, sampel yang digunakan berasal dari air limbah domestik salah satu fasilitas *laundry* yang berlokasi di Kecamatan Bontomarannu, Kabupaten Gowa. Berdasarkan SNI 6989.59:2008 tentang Metode Pengambilan Contoh Air Limbah, pengambilan sampel harus dilakukan dengan memperhatikan representativitas, homogenitas, serta kondisi fisik, kimia, dan biologis dari air limbah. Limbah *laundry* yang umumnya mengandung deterjen, surfaktan, fosfat, minyak, dan bahkan mikroplastik, harus diambil sampelnya pada titik keluar (outlet) atau saluran pembuangan sebelum bercampur dengan aliran lain, agar karakteristik asli tidak berubah. SNI juga menyebutkan bahwa wadah pengambilan sampel sebaiknya terbuat dari kaca atau polietilen yang bersih dan bebas kontaminan, dengan volume minimal 1 liter untuk setiap parameter kimia, serta minimal 500 mL untuk parameter mikrobiologi.

Proses pengambilan sampel pada penelitian ini menggunakan metode *grab sampling* atau pengambilan sesaat. Metode *grab sampling* merupakan salah satu teknik pengambilan sampel air limbah yang dilakukan dengan cara mengambil contoh air pada satu titik dan satu waktu tertentu sehingga sampel yang diperoleh hanya mewakili kondisi pada saat pengambilan tersebut. Teknik ini digunakan untuk menggambarkan kondisi kualitas air secara sesaat sesuai dengan keadaan pada saat pengambilan sampel dilakukan. Dalam penelitian ini, metode grab sample dipilih karena dianggap praktis, sederhana, dan mampu merepresentasikan karakteristik limbah domestik secara langsung pada titik pembuangan. Selain itu, metode ini sesuai dengan tujuan penelitian yang berfokus pada analisis kualitas air limbah pada kondisi aktual di lapangan.

Dalam penelitian ini, pengambilan dan penyimpanan sampel dilakukan dengan memperhatikan prinsip jaminan mutu serta pengendalian kualitas secara menyeluruh. Setiap tahapan diawali dengan persiapan wadah dan peralatan yang steril serta telah terkalibrasi untuk mencegah adanya kontaminasi dari luar. Sampel yang diambil kemudian ditangani sesuai standar operasional, antara lain dengan menjaga kondisi penyimpanan pada suhu yang stabil dan mendokumentasikan seluruh informasi penting seperti waktu, lokasi, serta karakteristik awal limbah. Melalui penerapan prosedur tersebut, kualitas data yang diperoleh dari analisis laboratorium dapat

dipertanggungjawabkan dan benar-benar menggambarkan kondisi aktual air limbah laundry.

2.6.2 Pengolahan Sampel Air Limbah

Pengolahan air limbah laundry dalam penelitian ini dilakukan menggunakan sistem *batch* dengan volume sampel sebesar 700 mL. Pemilihan sistem batch dipertimbangkan karena memberikan kendali yang lebih baik terhadap parameter operasional, seperti besar tegangan listrik dan jarak antar elektroda, yang keduanya berpengaruh langsung terhadap kinerja proses elektroflotasi. Pada penelitian ini digunakan tiga buah elektroda berbahan stainless steel sebagai anoda dan tiga buah grafit sebagai katoda dimana masing-masing elektroda dirangkai paralel kemudian dipasang sejajar. Konfigurasi ini dipilih karena mampu memperluas bidang reaksi, sehingga pembentukan gelembung gas lebih merata dan proses penyisihan mikroplastik serta padatan tersuspensi dapat berlangsung lebih efektif.

a. Tegangan dan Jarak Elektroda

Reaktor yang digunakan terbuat dari kaca transparan berbentuk persegi dengan ukuran $20 \times 10 \times 10$ cm dengan kapasitas tampung 700 mL. Desain reaktor yang transparan ini memudahkan pengamatan secara visual terhadap dinamika proses elektroflotasi, termasuk munculnya gelembung-gelembung halus, interaksi partikel mikroplastik, hingga perubahan kejernihan air selama perlakuan berlangsung. Elektroda yang terhubung dengan *power supply* kemudian dicelupkan ke dalam reaktor, dengan variasi tegangan operasi yang digunakan yaitu 10 V, 15 V, dan 20 V pada arus tetap 5 A. Variasi tegangan ini dipilih untuk mengevaluasi pengaruh intensitas listrik terhadap kinerja proses tanpa menimbulkan risiko overpotential yang berpotensi mempercepat kerusakan elektroda. Dengan rancangan ini, diharapkan sistem elektroflotasi dapat menunjukkan performa optimal dalam menurunkan beban pencemar pada air limbah laundry, khususnya mikroplastik dan parameter pendukung lainnya.

Proses elektroflotasi dalam penelitian ini dilakukan dengan memberikan variasi jarak antar elektroda sebesar 3, 5, dan 7 cm. Variasi jarak tersebut dirancang untuk mengevaluasi kondisi optimum yang mampu menghasilkan kinerja paling efektif dalam menurunkan kandungan mikroplastik dan parameter pencemar lainnya, tanpa menimbulkan risiko terjadinya *short circuit* antar elektroda. Untuk meningkatkan akurasi hasil, setiap kombinasi jarak dan variasi tegangan yang diuji dilakukan secara duplo, sehingga data yang diperoleh dapat diuji konsistensinya serta mengurangi pengaruh kesalahan acak. Efluen dari setiap perlakuan kemudian dikumpulkan dan dianalisis di laboratorium untuk mengetahui tingkat efektivitas sistem elektroflotasi terhadap parameter yang diuji, khususnya konsentrasi mikroplastik.

Melalui pendekatan ini, diharapkan diperoleh gambaran yang jelas mengenai kombinasi optimal antara tegangan dan jarak elektroda yang paling efisien dalam memperbaiki kualitas air limbah laundry. Hasil penelitian ini selanjutnya dapat menjadi dasar dalam pengembangan teknologi pengolahan air limbah laundry yang sederhana, terjangkau, namun tetap efektif dalam mengurangi beban pencemar sebelum dibuang ke lingkungan.

b. Waktu Kontak dan Suhu

Pengaturan waktu kontak merupakan parameter penting yang menentukan efektivitas proses elektroflotasi dalam menghilangkan mikroplastik dari air limbah. Dalam penelitian ini waktu kontak yang dipilih adalah 120 menit. Waktu kontak 120 menit dipilih karena memberikan durasi yang memadai bagi berlangsungnya proses elektrokimia secara optimal, termasuk pembentukan gelembung hidrogen dan oksigen, proses adsorpsi mikroplastik pada permukaan gelembung, serta pengangkatan partikel ke permukaan. Pada rentang waktu ini, kondisi operasi elektroda telah mencapai stabilitas sehingga laju produksi gelembung berada pada tingkat yang mendukung efisiensi flotasi maksimal (Zarei, 2021).

Dalam metode elektroflotasi, suhu merupakan salah satu parameter penting yang memengaruhi kinerja proses elektroflotasi dalam penghilangan mikroplastik dari air limbah. Adapun data hasil pengukuran suhu pada air limbah laundry disajikan sebagai berikut.

Tabel 3. Hasil Pengukuran Suhu

Tegangan	Jarak	Suhu (°C)
10 Volt	3 cm	30
	5 cm	30
	7 cm	30
15 Volt	3 cm	30
	5 cm	29
	7 cm	29
20 Volt	3 cm	30
	5 cm	29
	7 cm	30

Sumber: Hasil Penelitian, 2025

Pada Tabel 3. diatas suhu yang dihasilkan berada pada rentang 29 - 30°C. Liu et al (2022) menyatakan bahwa elektroflotasi bekerja optimal pada rentang suhu 25–35°C, yang merupakan kondisi mendekati suhu ruang dimana pada rentang ini, viskositas air berada pada level yang cukup rendah sehingga memudahkan pergerakan gelembung dan partikel mikroplastik, namun tetap menjaga kestabilan flok dan tidak mempercepat degradasi elektroda secara berlebihan.

2.6.3 Pengujian Sampel Air Limbah

Pengujian sampel air limbah dilakukan pada dua tahap, yakni sebelum pengolahan dan setelah pengolahan elektroflotasi untuk mengevaluasi perubahan konsentrasi zat pencemar. Setiap sampel dianalisis secara duplo sesuai dengan prinsip quality assurance guna meningkatkan akurasi serta meminimalisasi potensi kesalahan analisi. Sampel awal diambil secara langsung dari titik sumber air limbah sebagai representasi kondisi aktual sebelum pengolahan. Sedangkan sampel akhir diambil pada reaktor elektroflotasi setelah pengolahan selesai. Pengujian mikroplastik dari sampel air limbah akan dilakukan di lokasi pengujian yang telah ditentukan.

Pengujian Mikroplastik. Sampel air limbah yang akan diketahui zat mikroplastiknya akan melalui tahap awal yaitu proses filtrasi. Proses filtrasi air limbah

menggunakan pompa vakum Buchi (Rocker 410) dan disaring menggunakan kertas Whatman 47 mm dengan ukuran 0,45 μm . Setelah itu, kertas saring disimpan didalam cawan petri dan ditutup untuk menghindari adanya kontaminasi dari luar. Sampel air limbah yang telah difiltrasi menggunakan kertas saring dan diamati dibawah mikroskop stereo (Euromex SB 1902). Setelah diamati, mikroplastik yang ditemukan akan dilakukan pengamatan karakteristik secara visual berupa ukuran, bentuk, dan warna. Ukuran maksimum untuk dimasukkan kedalam kategori mikroplastik yaitu $<5\text{ mm}$ (Sawalman, 2021).

Sampel yang telah diamati menggunakan mikroskop selanjutnya akan dianalisa menggunakan metode spektroskopi *Fourier Transformation Infrared* (FTIR). Prinsip dasar FTIR adalah interaksi radiasi inframerah dengan molekul, di mana radiasi dengan panjang gelombang tertentu diserap oleh ikatan kimia sehingga menghasilkan pola spektrum serapan khas. Setiap jenis polimer memiliki gugus fungsi yang berbeda, seperti gugus C–H pada polietilena (PE), C=O pada poliester (PES), atau C–Cl pada polivinil klorida (PVC), sehingga dapat dikenali melalui puncak serapan pada bilangan gelombang tertentu (Hapsari & Yulianto, 2020). FTIR digunakan setelah proses perlakuan sampel, misalnya filtrasi, pemisahan, dan pemurnian partikel mikroplastik. Sampel mikroplastik kemudian diletakkan pada perangkat ATR (*Attenuated Total Reflectance*) FTIR atau dipres menjadi pelet tipis sebelum dianalisis. Instrumen ini kemudian menghasilkan spektrum dalam rentang $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$, yang dibandingkan dengan pustaka spektrum referensi polimer. Hasil perbandingan ini dapat memastikan jenis plastik secara akurat (Nurhayati dkk., 2021).

Hasil dari pengujian parameter mikroplastik akan dikumpulkan untuk dilakukan analisis kelimpahan mikroplastik. Analisis kelimpahan mikroplastik merupakan tahap awal untuk mengetahui jumlah partikel plastik berukuran mikro yang terdapat dalam suatu sampel air. Data kelimpahan ini memberikan gambaran awal mengenai tingkat pencemaran serta potensi dampaknya terhadap lingkungan perairan. Umumnya, kelimpahan dinyatakan dalam satuan jumlah partikel per volume air, sehingga hasil perhitungan dapat dibandingkan antar lokasi atau antar perlakuan pengolahan. Adapun persamaan yang digunakan sebagai berikut.

$$K = \frac{n}{m}$$

Keterangan:

K = Kelimpahan mikroplastik

n = Jumlah partikel

m = Berat sampel

2.7 Teknik Analisa Data

Analisa data dilakukan dengan mengumpulkan hasil pengujian mikroplastik untuk mengetahui sejauh mana pengolahan elektroflotasi mampu menurunkan jumlah partikel mikroplastik dalam air limbah laundry. efektivitas penyisihan mikroplastik umumnya dihitung berdasarkan perbandingan jumlah mikroplastik sebelum dan sesudah proses pengolahan. Adapun persamaan yang digunakan sebagai berikut.

$$\text{Efektivitas (\%)} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\%$$

Keterangan:

C_0 = Konsentrasi awal

C_1 = Konsentrasi akhir

Dalam penelitian ini, digunakan metode analisis statistik dan visualisasi data untuk mengetahui efektivitas dari penerapan teknologi elektroflotasi dalam penelitian ini. Menurut (Sari dkk., 2022) dan (Wijayanti & Putra, 2023), penerapan analisis statistik sangat penting untuk mengetahui signifikansi pengaruh parameter operasi seperti tegangan dan jarak elektroda terhadap kinerja penyisihan polutan. Analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Two-Way Analysis of Variance* (ANOVA), yang memungkinkan peneliti menguji apakah terdapat perbedaan yang bermakna dari masing-masing variasi perlakuan. Penggunaan perangkat lunak seperti SPSS atau aplikasi sejenis mempermudah proses perhitungan dan uji hipotesis yang lebih akurat.

Selain itu, analisis visualisasi data digunakan untuk menampilkan tren dan pola hasil percobaan. Visualisasi berupa grafik scatter plot dan regresi linear sering dipakai dalam penelitian elektrokoagulasi maupun elektroflotasi karena dapat memperlihatkan hubungan antar variabel bebas dengan variabel terikat secara lebih jelas (Setiawan et al., 2021). Regresi linear berganda juga diterapkan untuk mengukur sejauh mana kombinasi variabel tegangan dan jarak elektroda memengaruhi efektivitas penyisihan mikroplastik. Metode ini dipilih karena mampu menggambarkan hubungan kuantitatif antara dua atau lebih variabel bebas terhadap variabel respon, sekaligus menampilkan kecenderungan data secara linear. Dengan demikian, pendekatan analisis statistik dan visualisasi ini tidak hanya memberikan gambaran deskriptif mengenai hasil penelitian, tetapi juga memastikan bahwa variasi parameter operasi yang digunakan memang memberikan pengaruh signifikan terhadap efektivitas proses elektroflotasi dalam penyisihan mikroplastik dari air limbah laundry.

2.8 Diagram Alir Penelitian

