

## Efek Pengaruh Penambahan Senyawa Hidrogen Peroksida Pada Elektrokoagulasi Untuk Menurunkan Parameter TSS Dan Timbal Dalam Air Ballast

### The Effect of Adding Hydrogen Peroxide Compounds in Electrocoagulation to Reduce TSS and Lead Parameters in Ballast Water

Muhammad Rafel Emirruso Mauluddin<sup>1</sup>, Restu Hikmah Ayu Murti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur

\*Korespondensi : [restu.hikmah.tl@upnjatim.ac.id](mailto:restu.hikmah.tl@upnjatim.ac.id)

#### Abstrak

Air ballast yang digunakan kapal untuk menjaga stabilitas seringkali menjadi sumber pencemar serius bagi lingkungan perairan karena mengandung berbagai kontaminan, terutama Total Suspended Solid (TSS) dan logam berat Timbal (Pb). Kedua parameter ini berbahaya karena TSS meningkatkan kekeruhan dan menurunkan penetrasi cahaya bagi organisme akuatik, sedangkan Pb bersifat toksik dan dapat terakumulasi dalam rantai makanan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas proses elektrokoagulasi dengan penambahan senyawa Hidrogen Peroksida ( $H_2O_2$ ) dalam menurunkan konsentrasi TSS dan Pb pada air ballast. Metode penelitian dilakukan pada skala laboratorium menggunakan reaktor elektrokoagulasi berbahan elektroda aluminium dengan variasi dosis  $H_2O_2$  (0, 9, 18, dan 27 gram), jarak antar elektroda (3 cm, 4 cm, 5 cm), serta waktu reaksi (30, 60, dan 90 menit). Parameter TSS dianalisis menggunakan metode gravimetri, sedangkan konsentrasi Pb diuji menggunakan Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan  $H_2O_2$  memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan TSS. Efisiensi penyisihan meningkat dari 84,6% pada kondisi tanpa penambahan  $H_2O_2$  hingga mencapai 98,9% pada dosis 27 gram. Untuk parameter Pb, penyisihan sudah sangat tinggi bahkan tanpa  $H_2O_2$ , dengan efisiensi mencapai 99,8%. Variasi jarak elektroda optimal diperoleh pada 5 cm, sedangkan waktu reaksi paling efektif adalah 90 menit. Secara keseluruhan, kombinasi elektrokoagulasi dan oksidasi  $H_2O_2$  terbukti meningkatkan kinerja penurunan TSS secara signifikan, sedangkan untuk logam Pb, metode elektrokoagulasi saja sudah cukup efektif memenuhi baku mutu lingkungan. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi alternatif teknologi pengolahan air ballast yang sederhana, efisien, dan ramah lingkungan untuk diaplikasikan pada industri perkapalan di Indonesia.

Kata kunci: Air ballast, elektrokoagulasi, hidrogen peroksida, TSS, Timbal (Pb)

#### Abstract

Ballast water used by ships to maintain stability often becomes a serious source of pollution in aquatic environments because it contains various contaminants, particularly Total Suspended Solids (TSS) and heavy metal Lead (Pb). These parameters are harmful since TSS increases turbidity and reduces light penetration for aquatic organisms, while Pb is toxic and may accumulate in the food chain. This study aims to evaluate the effectiveness of the electrocoagulation process with the addition of Hydrogen Peroxide ( $H_2O_2$ ) in reducing TSS and Pb concentrations in ballast water. The research was conducted at a laboratory scale using an electrocoagulation reactor with aluminum electrodes. The independent variables included  $H_2O_2$  dosage (0, 9, 18, and 27 grams), electrode spacing (3 cm, 4 cm, and 5 cm), and reaction time (30, 60, and 90 minutes). TSS was measured by the gravimetric method, while Pb concentration was analyzed using Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). The results showed that  $H_2O_2$  dosage significantly influenced TSS removal. The efficiency increased from 84.6% without  $H_2O_2$  to 98.9% at 27 grams. In contrast, Pb removal was already highly effective even without  $H_2O_2$ , reaching up to 99.8%. The

optimal electrode spacing was found at 5 cm, while the most effective reaction time was 90 minutes. Overall, the combination of electrocoagulation and  $H_2O_2$  oxidation significantly improved TSS removal, whereas for Pb, electrocoagulation alone was sufficient to meet environmental quality standards. This research suggests that the integration of electrocoagulation with  $H_2O_2$  can serve as a simple, efficient, and environmentally friendly ballast water treatment technology for the shipping industry in Indonesia.

**Keywords:** Ballast water, electrocoagulation, hydrogen peroxide, TSS, Lead (Pb).

## PENDAHULUAN

Air ballast merupakan air yang digunakan untuk menjaga stabilitas kapal selama pelayaran, namun pembuangannya ke perairan pelabuhan dapat membawa kontaminan seperti organisme laut, Total Suspended Solids (TSS), dan logam berat Timbal (Pb) yang berpotensi mencemari lingkungan perairan (Abdillah & Basuki, 2020). Dampak pelepasan air ballast tidak hanya terbatas pada peningkatan kekeruhan air, tetapi juga dapat mengganggu keseimbangan ekosistem laut dan pesisir. Peningkatan TSS mengurangi penetrasi cahaya matahari sehingga menghambat fotosintesis fitoplankton dan lamun, sementara akumulasi logam berat seperti Pb dapat merusak jaringan organisme laut, menurunkan produktivitas perairan, serta mengancam kelangsungan terumbu karang (Sudarmawan et al., 2020).

Di Indonesia, beberapa wilayah pesisir telah mengalami tekanan akibat pencemaran logam berat yang berkaitan dengan aktivitas pelabuhan dan perkapalan. Misalnya, penelitian di Teluk Lamong menunjukkan konsentrasi Pb melebihi ambang batas lingkungan akibat aktivitas bongkar muat dan pembuangan limbah kapal (Sari et al., 2021). Kondisi serupa juga ditemukan di Teluk Benoa dan Selat Makassar, di mana tingginya kandungan logam berat berdampak negatif terhadap biota dasar laut dan ekosistem pesisir (Hartati et al., 2022). Hal ini menunjukkan bahwa pengelolaan air ballast menjadi salah satu aspek penting dalam mitigasi pencemaran laut di kawasan pelabuhan Indonesia.

Secara global, International Maritime Organization (IMO) telah menetapkan Ballast Water Management Convention (BWMC) untuk mengendalikan dampak negatif perpindahan organisme dan polutan melalui air ballast kapal. Indonesia mengadopsi ketentuan ini melalui regulasi nasional seperti Keputusan Menteri Lingkungan Hidup (KepMen LH) No. 51 Tahun 2004 yang menetapkan baku mutu bagi parameter Pb sebesar 0,05 mg/L dan TSS sebesar 80 mg/L untuk wilayah pelabuhan (Asuhadi et al., 2022; Ministry of Environment, 2004). Namun, teknologi pengolahan air ballast yang telah diterapkan di banyak kapal masih berfokus pada sistem filtrasi, sinar UV, dan elektroklorinasi, yang belum optimal dalam menurunkan polutan kimia seperti logam berat dan padatan tersuspensi (Pereira & Pinto, 2025).

Elektrokoagulasi menjadi salah satu metode alternatif yang menjanjikan karena memanfaatkan arus listrik untuk menghasilkan koagulan  $Al(OH)_3$  dari elektroda aluminium, sehingga mampu mengikat partikel pencemar dan logam berat secara efektif (Masrullita et al., 2021; Wardhani et al., 2012). Metode ini dinilai efisien, ramah lingkungan, dan tidak memerlukan banyak bahan kimia tambahan. Namun demikian, peningkatan efisiensi masih diperlukan terutama untuk air dengan kandungan polutan tinggi seperti air ballast kapal.

Salah satu inovasi yang dapat diterapkan adalah penambahan Hidrogen Peroksida ( $H_2O_2$ ) sebagai oksidator.  $H_2O_2$  mampu menghasilkan radikal hidroksil ( $\bullet OH$ ) yang sangat reaktif, mempercepat oksidasi polutan, serta meningkatkan destabilisasi koloid yang mendukung pembentukan flok (Widjajanto et al., 2024). Ion  $Pb^{2+}$  juga dapat teroksidasi menjadi  $PbO_2$  yang bersifat tidak larut dan mudah terendapkan (Hasibuan Abduh Muhamad et al., 2018). Dengan demikian, kombinasi elektrokoagulasi dan oksidasi  $H_2O_2$  diharapkan dapat meningkatkan efisiensi penyisihan TSS dan Pb secara signifikan sehingga kualitas air ballast yang dibuang dapat memenuhi baku mutu lingkungan dan mencegah perpindahan polutan antar perairan (Wibowo & Cerlyawati, 2021).

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas penambahan  $H_2O_2$  dalam proses elektrokoagulasi pada pengolahan air ballast dengan variasi dosis  $H_2O_2$ , jarak antar elektroda, dan

waktu reaksi sehingga dapat diketahui kondisi optimum untuk mencapai penyisihan TSS dan Pb yang paling efektif. Penelitian ini tidak hanya penting untuk meningkatkan kualitas air ballast, tetapi juga untuk mencegah pelepasan logam berat dan padatan tersuspensi ke perairan laut yang dapat mengancam keseimbangan ekosistem pesisir.

## METODE

### Bahan dan Peralatan

Penelitian dilakukan pada skala laboratorium menggunakan reaktor elektrokoagulasi berkapasitas 7 liter. Elektroda yang digunakan adalah aluminium (Al) dengan ketebalan 2 mm dan ukuran 28 cm × 10 cm, dihubungkan dengan power supply arus searah (DC) sebesar 1 ampere pada tegangan operasi ±8–12 V. Sampel air ballast diperoleh dari PT. PAL Indonesia (Persero) – Surabaya, yang merupakan perusahaan galangan kapal di kawasan pesisir, sehingga sampel merepresentasikan karakteristik air laut pelabuhan dengan tingkat salinitas rata-rata 28–32 ppt dan konduktivitas sekitar 45–50 mS/cm. Nilai ini menunjukkan bahwa air ballast memiliki kandungan garam tinggi yang dapat memengaruhi konduktivitas listrik selama proses elektrokoagulasi berlangsung.

Bahan kimia yang digunakan berupa Hidrogen Peroksida ( $H_2O_2$ ) konsentrasi 30% sebagai agen oksidator tambahan dalam proses pengolahan. Parameter yang diuji meliputi Total Suspended Solids (TSS) dan logam berat Timbal (Pb), masing-masing dianalisis menggunakan metode gravimetri (SNI 06-6989.3-2004) dan AAS (SNI 6989.8:2009). Hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan baku mutu air laut untuk perairan pelabuhan sesuai Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 51 Tahun 2004, yaitu TSS maksimum 80 mg/L dan Pb maksimum 0,05 mg/L.

### Variabel Penelitian

Variabel bebas dalam penelitian ini terdiri atas tiga faktor yang divariasikan untuk mengamati pengaruhnya terhadap proses elektrokoagulasi, yaitu:

- Dosis penambahan  $H_2O_2$  sebesar 0 g, 9 g, 18 g, dan 27 g,
- Jarak antar elektroda sebesar 3 cm, 4 cm, dan 5 cm,
- Waktu reaksi elektrokoagulasi selama 30 menit, 60 menit, dan 90 menit.

Sementara itu, variabel tetap dijaga konstan agar tidak memengaruhi hasil penelitian, meliputi jenis sampel (air ballast dari kawasan pelabuhan), material elektroda (Aluminium), kuat arus listrik (1 ampere), volume sampel (7 liter), serta pH awal sampel sekitar 7,8–8,2 yang merepresentasikan kondisi air laut netral hingga sedikit basa. Variabel terikat berupa efisiensi penyisihan Total Suspended Solids (TSS) dan logam berat Timbal (Pb) sebagai indikator kinerja proses elektrokoagulasi dalam menurunkan kadar pencemar pada air ballast.

### Prosedur Penelitian

Proses pengolahan air ballast diawali dengan tahap oksidasi awal menggunakan  $H_2O_2$  di dalam bak ekualisasi. Air ballast dimasukkan ke dalam bak kemudian ditambahkan  $H_2O_2$  sesuai variasi dosis yang telah ditentukan, diaduk selama ±15 menit untuk mencapai homogenisasi yang baik. Tahap ini bertujuan memicu oksidasi ion  $Pb^{2+}$  menjadi  $PbO_2$  yang bersifat tidak larut sehingga lebih mudah terendapkan pada tahap berikutnya. Selanjutnya, sampel dialirkan ke dalam reaktor elektrokoagulasi yang dilengkapi elektroda aluminium dengan jarak antar elektroda sesuai variasi penelitian. Reaksi dijalankan menggunakan arus listrik searah sebesar 1 ampere selama waktu operasi 30–90 menit. Proses elektrolisis menghasilkan gas hidrogen ( $H_2$ ) di katoda dan membentuk koagulan aluminium hidroksida  $[Al(OH)_3]$  di anoda. Gas  $H_2$  membantu pengangkatan partikel halus (flotation), sedangkan  $Al(OH)_3$  berperan sebagai koagulan yang mengikat partikel TSS dan ion Pb membentuk flok yang mudah mengendap. Penelitian ini dilakukan pada air ballast bersalinitas tinggi guna mensimulasikan kondisi nyata di lingkungan laut pelabuhan, di mana kandungan ion  $Na^+$ ,  $Cl^-$ , dan  $Mg^{2+}$  berperan dalam meningkatkan konduktivitas listrik serta mempercepat reaksi koagulasi.

### Pengambilan Sampel dan Pengujian Laboratorium

Pengambilan dan analisis sampel dilakukan secara bertahap untuk mengevaluasi efektivitas elektrokoagulasi dalam menurunkan kadar pencemar. Sampel awal (influent) diambil sebelum perlakuan, sedangkan sampel akhir (effluent) diambil dari outlet reaktor setelah proses selesai dan flok mengendap sempurna. Parameter Total Suspended Solids (TSS) dianalisis dengan metode gravimetri (SNI 06-6989.3-2004) menggunakan penyaringan, pengeringan, dan penimbangan residu hingga mencapai massa konstan. Parameter Timbal (Pb) dianalisis menggunakan metode Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) berdasarkan SNI 6989.8:2009. Hasil pengujian dibandingkan dengan baku mutu perairan laut kategori pelabuhan (KepMen LH No. 51 Tahun 2004) sebagai acuan kualitas lingkungan. Efisiensi penyisihan dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Removal (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\%$$

dengan:

$C_0$  = konsentrasi awal (mg/L),

$C_t$  = konsentrasi setelah perlakuan (mg/L).

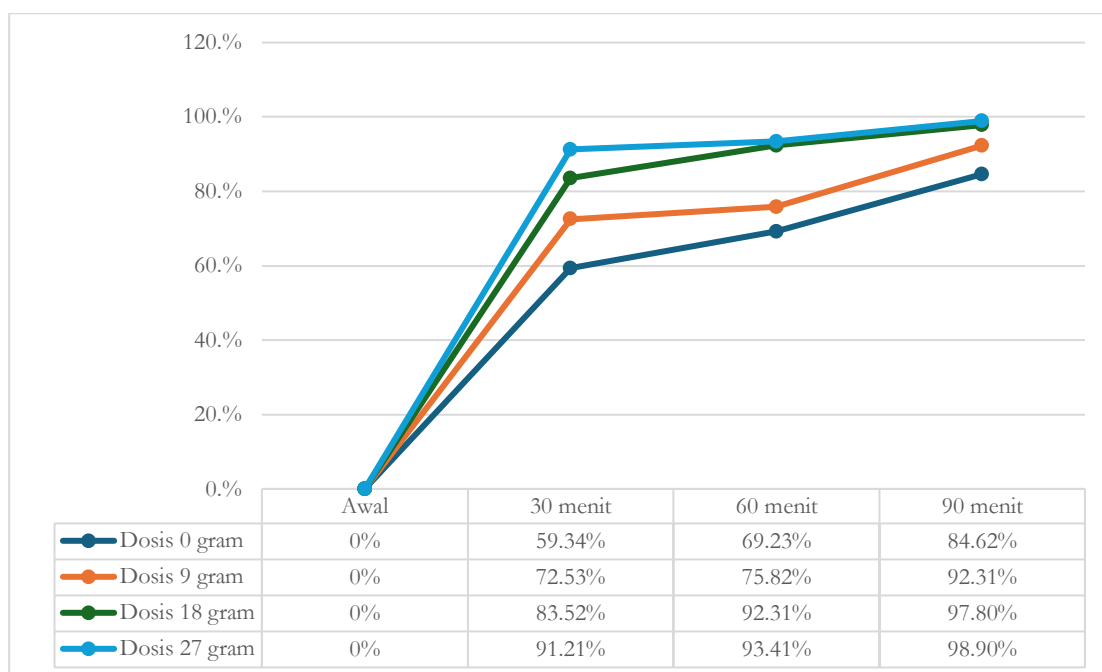
### Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan metode statistik untuk mengetahui pengaruh dan hubungan antarvariabel. Analisis dilakukan dengan ANOVA One-Way guna menguji signifikansi pengaruh dosis  $H_2O_2$ , jarak antar elektroda, dan waktu reaksi terhadap efisiensi penyisihan TSS dan Pb. Selain itu, uji korelasi Pearson digunakan untuk mengetahui tingkat hubungan antara variabel bebas dan hasil penyisihan. Seluruh perhitungan dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Microsoft Excel dan Minitab, yang digunakan untuk pengolahan statistik dan penyajian data dalam bentuk tabel serta grafik perbandingan. Hasil yang diperoleh kemudian dievaluasi berdasarkan kesesuaiannya dengan baku mutu lingkungan laut (KepMen LH No. 51 Tahun 2004), sehingga dapat diketahui efektivitas kombinasi proses elektrokoagulasi- $H_2O_2$  dalam menurunkan kadar pencemar air ballast sesuai standar kelautan.

### PEMBAHASAN

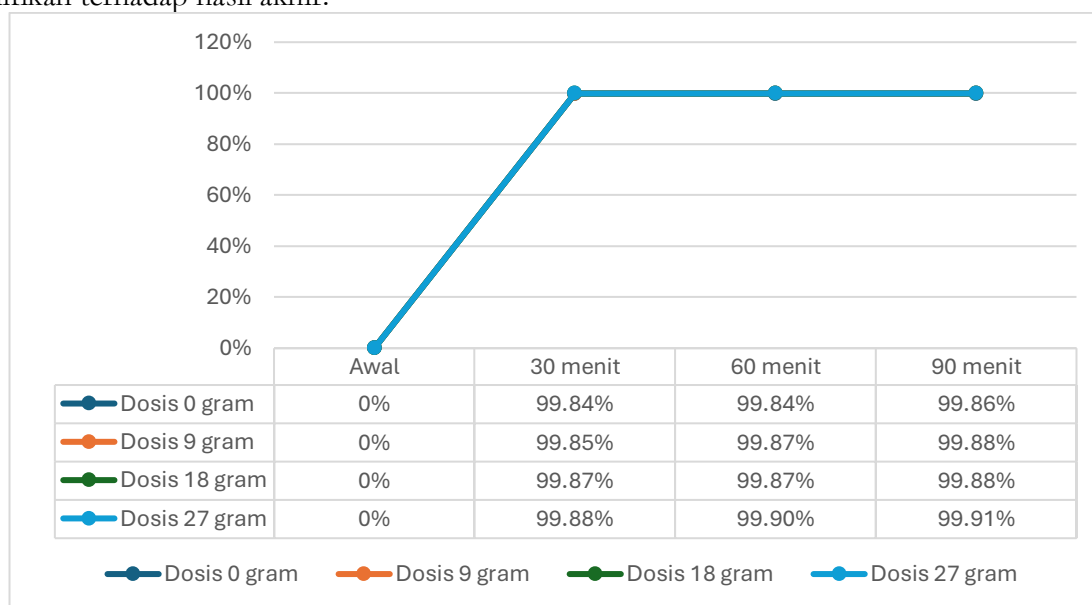
Sampel air ballast yang digunakan dalam penelitian ini menunjukkan kualitas yang melebihi baku mutu lingkungan berdasarkan Kepmen LH No. 51 Tahun 2004, dengan nilai Total Suspended Solids (TSS) awal sebesar 334 mg/L dan kadar Timbal (Pb) sebesar 8,3 mg/L. Kedua parameter tersebut jauh melampaui batas baku mutu, yaitu TSS sebesar 80 mg/L dan Pb sebesar 0,05 mg/L. Kondisi ini menegaskan bahwa air ballast memerlukan proses pengolahan terlebih dahulu sebelum dibuang ke lingkungan agar tidak menimbulkan dampak pencemaran yang lebih luas terhadap ekosistem perairan.

Proses elektrokoagulasi yang diterapkan dalam penelitian ini terbukti mampu menurunkan kadar TSS secara signifikan. Tanpa penambahan Hidrogen Peroksida ( $H_2O_2$ ), proses elektrokoagulasi berhasil menurunkan TSS hingga 84,6%, dari 334 mg/L menjadi 56 mg/L pada kondisi jarak antar elektroda 5 cm dan waktu reaksi 90 menit. Ketika  $H_2O_2$  ditambahkan ke dalam sistem, efisiensi penyisihan meningkat secara nyata. Pada dosis 9 gram, efisiensi mencapai 92,3%; dosis 18 gram menghasilkan 97,8%; dan dosis 27 gram memberikan efisiensi maksimum sebesar 98,9% dengan kondisi operasi yang sama. Peningkatan efisiensi ini terjadi karena adanya pembentukan radikal hidroksil ( $\bullet OH$ ) dari dekomposisi  $H_2O_2$  yang mempercepat proses destabilisasi partikel koloid serta memperkuat pembentukan flok. Medan listrik pada jarak elektroda 5 cm juga memberikan distribusi ion yang stabil, sehingga pelepasan koagulan  $Al(OH)_3$  menjadi optimal. Namun demikian, peningkatan dosis dari 18 gram menjadi 27 gram tidak memberikan peningkatan signifikan terhadap efisiensi, yang menunjukkan bahwa dosis 18 gram sudah mendekati kondisi optimum reaksi.



**Gambar 1.** Grafik Persen Removal Pengaruh Penambahan Hidrogen Peroksida Terhadap Parameter TSS

Berbeda dengan TSS, penambahan  $H_2O_2$  tidak memberikan pengaruh berarti terhadap penyisihan logam berat Pb. Tanpa  $H_2O_2$ , proses elektrokoagulasi telah mampu menurunkan kadar Pb dari 8,6 mg/L menjadi sekitar 0,012 mg/L dengan efisiensi 99,86%. Setelah penambahan  $H_2O_2$ , efisiensi penyisihan Pb tetap sangat tinggi di kisaran 99,85–99,91%, sehingga dapat disimpulkan bahwa pengaruh oksidator terhadap parameter Pb relatif kecil. Mekanisme penyisihan Pb didominasi oleh proses adsorpsi dan kopresipitasi pada flok  $Al(OH)_3$  yang terbentuk di anoda, serta sebagian kecil  $Pb^{2+}$  yang teroksidasi menjadi  $PbO_2$  yang bersifat tidak larut dan mudah mengendap. Hasil ini menunjukkan adanya fenomena ceiling effect, yaitu kondisi di mana efisiensi proses sudah sangat tinggi sehingga penambahan oksidator tidak lagi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap hasil akhir.



**Gambar 2.** Grafik Persen Removal Pengaruh Penambahan Hidrogen Peroksida Terhadap Parameter Timbal

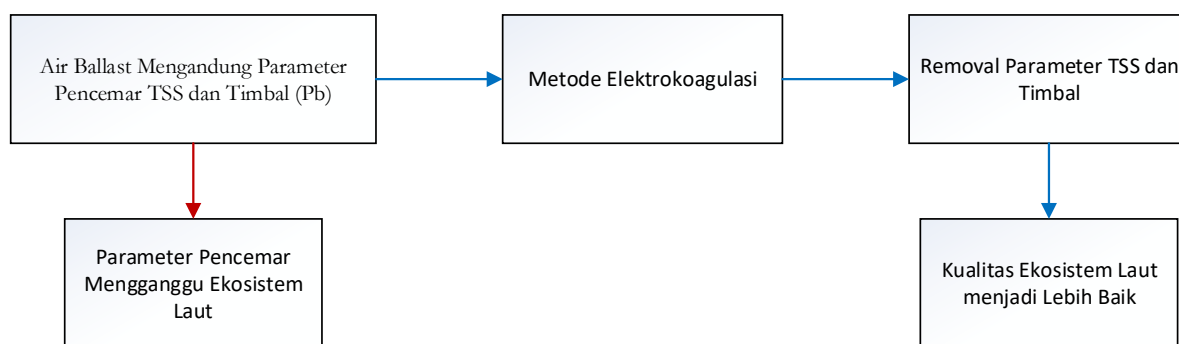
Selain variasi dosis  $H_2O_2$ , waktu reaksi juga berpengaruh terhadap peningkatan efisiensi penyisihan. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa semakin lama waktu proses elektrokoagulasi, efisiensi penyisihan TSS dan Pb semakin meningkat. Hal ini disebabkan oleh semakin banyaknya koagulan  $Al(OH)_3$  yang terbentuk seiring dengan lamanya arus listrik dialirkan, sehingga partikel tersuspensi memiliki waktu lebih panjang untuk saling beragregasi dan membentuk flok yang stabil. Namun pada waktu reaksi di atas 90 menit, peningkatan efisiensi cenderung melambat karena sistem telah mendekati kondisi optimum, di mana sebagian besar partikel telah terkoagulasi dan terendapkan.

Faktor jarak antar elektroda juga memberikan pengaruh penting terhadap hasil elektrokoagulasi. Secara teori, semakin kecil jarak antar elektroda, maka efisiensi proses diharapkan meningkat karena medan listrik menjadi lebih kuat dan arus listrik mengalir lebih lancar. Hasil ini sesuai dengan temuan Mustikaayu & Noor (2022) yang menyatakan bahwa semakin besar jarak antar plat, maka hambatan elektrolit meningkat dan mengurangi produksi koagulan  $Al(OH)_3$ . Namun hasil penelitian ini menunjukkan fenomena yang sedikit berbeda, di mana jarak 5 cm justru memberikan hasil paling optimal dibandingkan jarak yang lebih kecil. Hal ini diduga disebabkan oleh produksi gelembung gas yang berlebih pada jarak elektroda yang terlalu dekat. Reaksi elektrolisis yang intensif pada jarak sempit menghasilkan banyak gelembung gas, dan ketika dikombinasikan dengan penambahan  $H_2O_2$ , jumlah gelembung semakin meningkat. Produksi gelembung yang berlebihan dapat mendorong flok hasil koagulasi naik ke permukaan terlalu cepat dan menyebabkan flok pecah sebelum sempat mengendap. Kondisi ini mengurangi efisiensi pengendapan dan penurunan kadar TSS.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Landels et al. (2019) yang menjelaskan bahwa jumlah gelembung gas yang terlalu banyak atau ukuran gelembung tertentu dapat menyebabkan flok terangkat kembali ke permukaan secara berlebihan atau bahkan pecah, sehingga mengurangi efisiensi proses sedimentasi. Oleh karena itu, jarak elektroda yang terlalu sempit tidak selalu menghasilkan efisiensi terbaik. Dalam penelitian ini, kondisi jarak elektroda 5 cm terbukti menghasilkan keseimbangan optimal antara pembentukan koagulan, stabilitas medan listrik, dan efisiensi sedimentasi flok, sehingga menghasilkan proses penyisihan TSS dan Pb yang paling efektif.

Selain meningkatkan efisiensi penyisihan TSS dan Pb, hasil penelitian ini juga memiliki implikasi penting terhadap kualitas ekosistem laut. Penurunan TSS secara signifikan dari 334 mg/L menjadi di bawah 80 mg/L memungkinkan peningkatan penetrasi cahaya ke dalam kolom air, sehingga proses fotosintesis oleh fitoplankton dan lamun dapat berlangsung lebih optimal. Kondisi ini mendukung kestabilan rantai makanan laut serta memperbaiki kualitas habitat organisme bentik dan terumbu karang yang sensitif terhadap peningkatan kekeruhan. Sementara itu, berkurangnya kandungan Pb hingga di bawah baku mutu (0,05 mg/L) berkontribusi dalam menurunkan risiko bioakumulasi logam berat pada biota laut, seperti ikan dan moluska, yang pada akhirnya mengurangi potensi biomagnifikasi logam toksik dalam rantai makanan laut.

Secara praktis, penerapan kombinasi proses elektrokoagulasi dan oksidasi  $H_2O_2$  menunjukkan potensi besar untuk diaplikasikan di pelabuhan-pelabuhan laut Indonesia. Teknologi ini relatif sederhana, hemat energi, dan tidak menghasilkan residu kimia berbahaya, sehingga dapat diintegrasikan dalam sistem pengolahan air ballast di fasilitas galangan kapal atau langsung di atas kapal (on-board treatment system). Implementasi teknologi ini akan membantu mendukung pelaksanaan Ballast Water Management Convention (IMO, 2004) serta kebijakan nasional pengendalian pencemaran laut sesuai Kepmen LH No. 51 Tahun 2004, dengan tujuan utama mencegah perpindahan polutan dan organisme invasif lintas perairan. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada peningkatan kualitas air ballast, tetapi juga memiliki peran strategis dalam mitigasi pencemaran laut dan perlindungan ekosistem pesisir Indonesia.



**Gambar 3.** Diagram Hubungan Elektrokoagulasi dengan Ekosistem Laut

## KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini membuktikan bahwa kombinasi proses elektrokoagulasi dan oksidasi  $H_2O_2$  efektif menurunkan kadar Total Suspended Solids (TSS) dan Timbal (Pb) pada air ballast kapal, dengan kondisi optimum pada dosis  $H_2O_2$  27 gram, jarak antar elektroda 5 cm, dan waktu reaksi 90 menit yang menghasilkan efisiensi penyisihan sebesar 98,9% untuk TSS dan 99,8% untuk Pb. Penambahan  $H_2O_2$  berpengaruh signifikan terhadap peningkatan efisiensi penyisihan TSS melalui pembentukan radikal hidroksil ( $\bullet OH$ ) yang mempercepat destabilisasi partikel dan pembentukan flok, namun tidak memberikan peningkatan signifikan terhadap penyisihan Pb yang lebih dominan terjadi melalui mekanisme adsorpsi dan kopresipitasi oleh  $Al(OH)_3$  hasil reaksi anoda. Proses terbaik untuk TSS diperoleh pada kombinasi EC +  $H_2O_2$  27 g, sedangkan penyisihan Pb terbaik dicapai pada elektrokoagulasi tanpa  $H_2O_2$ . Secara keseluruhan, teknologi elektrokoagulasi berbasis elektroda aluminium ini mampu menurunkan konsentrasi pencemar hingga memenuhi baku mutu lingkungan sesuai Kepmen LH No. 51 Tahun 2004 serta berpotensi diterapkan sebagai alternatif teknologi pengolahan air ballast yang efisien, sederhana, dan ramah lingkungan guna mendukung pengendalian pencemaran di wilayah pelabuhan dan pesisir serta implementasi pengelolaan ballast water berkelanjutan di Indonesia.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah, I., & Basuki, M. (2020). Model Pengolahan Air Ballast Kapal Akibat Deballasting Di Pelabuhan Teluk Lamong Berbasis Risiko. *Prosiding Seminar Teknologi Kebumihan*, 287–291. <https://ejurnal.itats.ac.id/semitan/article/view/991>
- Ashadi, S., Arafah, N., Ferlin, A., & Souwakil, K. (2022). Dinamika dan Perbandingan Sensitivitas Baku Mutu Air Laut di Indonesia. *Bahari Papadak*, 2022, 1–23.
- Hasibuan Abduh Muhamad, Widodo Setiyo Didik, & Lusiana Ariadi Retno. (2018). Decolorization of Remazol Black B Solution by PbO<sub>2</sub> Modified Fenton Method in a Scaled Up Reactor. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 100(2), 59–63.
- Masrullita, M., Hakim, L., Nurlaila, R., & Azila, N. (2021). Pengaruh Waktu Dan Kuat Arus Pada Pengolahan Air Payau Menjadi Air Bersih Dengan Proses Elektrokoagulasi. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 10(1), 111–122. <https://doi.org/10.29103/jtku.v10i1.4184>
- Ministry of Environment. (2004). No. 51 of 2004, concerning Sea Water Quality Standards. *Sea Water Quality Standards*, 51, 1–8. <http://ojs.uho.ac.id/index.php/JSIPi>
- Pereira, G., & Pinto, M. (2025). Penerapan Regulasi IMO (International Maritime Organization) Terkait Pengolahan Air Ballast dan Pengaruhnya Terhadap Permesinan Kapal. 1(1), 22–29.
- Sudarmawan, A. R., Suteja, Y., & Widiastuti, W. (2020). Logam Berat Timbal (Pb) pada Air dan Plankton di Teluk Benoa, Badung, Bali. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 6(1), 133. <https://doi.org/10.24843/jmas.2020.v06.i01.p16>
- Wardhani, E., Dirgawati, M., & Valyana, K. P. (2012). Penerapan Metode Elektrokoagulasi Dalam Pengolahan Air Limbah Industri Penyamakan Kulit. *Seminar Ilmiah Nasional, Masalah Lingkungan Di Indonesia 8, Kampus Universitas Gadjah Mada*, 12, 1–16.
- Wibowo, A. B., & Cerlyawati, H. (2021). Analisa Kandungan Logam Cd, Pb, Zn Dan Cu pada Tangki Ballast Kapal Niaga di Pelabuhan Kendal dan Tanjung Mas Semarang. *Jurnal Maritim*

*Polimarin*, 7(1), 32–40.

Widjanto, D., Elektro, T., & Jakarta, P. N. (2024). *Pengaruh Penambahan Hidrogen Peroksida (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) terhadap Perubahan Kandungan Minyak dan Lemak pada Proses Elektrokoagulasi Air Limbah*. 3(1), 16–22.