

Analisis Pengaruh Variasi NaCl terhadap Kinerja Elektrokoagulasi dalam Penyisihan Logam Berat Zn^{2+} dan Pb pada *Ballast Water* Untuk Mencegah Pencemaran di Perairan Laut

Analysis of the Effect of NaCl Variations on Electrocoagulation Performance in the Removal of Heavy Metals Zn^{2+} and Pb in Ballast Water to Prevent Pollution in Marine Waters

Naufal Syarif Ardyanto¹, Praditya Sigit Ardisty Sitogasa¹

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

Korespondensi : Praditya.s.tl@upnjatim.ac.id

Abstrak

Ballast water kapal berpotensi mencemari lingkungan laut karena mengandung logam berat seperti timbal (Pb^{2+2+2+}) dan seng (Zn^{2+}). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas metode elektrokoagulasi dengan variasi dosis NaCl dan waktu kontak dalam menurunkan konsentrasi Pb^{2+2+2+} dan Zn^{2+} pada *ballast water*. Proses elektrokoagulasi dilakukan menggunakan elektroda aluminium dengan arus searah (DC) 5 A pada volume sampel 10 L. Variasi dosis NaCl yang digunakan adalah 0, 1,5, 2, dan 2,5 mg/L, sedangkan waktu kontak adalah 30, 60, 90, dan 120 menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi awal Pb^{2+} sebesar 2,99 mg/L dapat ditekan hingga 0,005 mg/L pada dosis NaCl 2,5 mg/L setelah 120 menit, dengan efisiensi penyisihan 99,83%. Sementara itu, konsentrasi awal Zn^{2+} sebesar 12,9 mg/L sudah berhasil dihilangkan hingga lebih dari 99% yaitu sejak menit ke-30 pada dosis 2–2,5 mg/L NaCl. Penambahan NaCl terbukti meningkatkan konduktivitas larutan sehingga mempercepat pembentukan flok $Al(OH)_3$ yang berfungsi mengadsorpsi ion logam berat. Dengan demikian, elektrokoagulasi dengan penambahan NaCl dinilai efektif, efisien, dan ramah lingkungan untuk mengurangi kandungan logam Pb^{2+2+2+} dan Zn^{2+} pada *ballast water* sebelum dibuang ke laut.

Kata Kunci: *Ballast water, Elektrokoagulasi, NaCl, Timbal (Pb^{2+}), Seng (Zn^{2+}).*

Abstract

Ballast water from ships has the potential to contaminate marine environments due to the presence of heavy metals such as lead (Pb^{2+}) and zinc (Zn^{2+}). This study aims to evaluate the effectiveness of the electrocoagulation method with varying NaCl dosages and contact times in reducing Pb^{2+} and Zn^{2+} concentrations in ballast water. The electrocoagulation process was conducted using aluminum electrodes with a direct current (DC) of 5 A and a sample volume of 10 L. The NaCl dosages used were 0, 1,5, 2,0, and 2,5 mg/L, while the contact times were 30, 60, 90, and 120 minutes. The results showed that the initial Pb^{2+} concentration of 2,99 mg/L decreased to 0.005 mg/L at a NaCl dosage of 2,5 mg/L after 120 minutes, achieving a removal efficiency of 99.83%. Meanwhile, the initial Zn^{2+} concentration of 12,9 mg/L was reduced by more than 99% within the first 30 minutes at NaCl dosages of 2,0–2,5 mg/L. The addition of NaCl was found to enhance the conductivity of the solution, thereby accelerating the formation of $Al(OH)_3$ flocs, which effectively adsorbed heavy metal ions. Therefore, electrocoagulation with NaCl addition is considered an effective, efficient, and environmentally friendly method for reducing Pb^{2+} and Zn^{2+} levels in ballast water prior to discharge into the marine environment.

Keywords : *Ballast water, electrocoagulation, NaCl, lead (Pb^{2+}), zinc (Zn^{2+}).*

PENDAHULUAN

Indonesia dikenal sebagai negara maritim terbesar di dunia, dengan sekitar 70% wilayahnya berupa perairan dan garis pantai mencapai lebih dari 108.000 km, sehingga termasuk salah satu negara dengan garis pantai terpanjang di dunia (Arto et al., 2021). Tingginya aktivitas pelayaran di berbagai pelabuhan utama, seperti Tanjung Priok, Tanjung Perak, dan Belawan, erat kaitannya dengan penggunaan *ballast water* (balas water) oleh kapal-kapal niaga. *Ballast water* merupakan air yang dimasukkan ke dalam tangki kapal untuk menjaga stabilitas dan keseimbangan selama pelayaran (Ade Setiawan et al., 2022). Namun demikian, *ballast water* sering kali mengandung logam berat berbahaya, terutama timbal (Pb^{2+}) dan seng (Zn^{2+}). Studi di Pelabuhan Tanjung Priok menunjukkan bahwa konsentrasi Pb^{2+} dan Zn^{2+} dalam perairan telah melampaui ambang batas baku mutu yang ditetapkan pemerintah. Logam-logam ini dapat berasal dari korosi tangki dan perpipaan kapal, residu bahan bakar, maupun dari akumulasi air laut yang sudah tercemar. Keberadaan Pb^{2+} dan Zn^{2+} dalam air laut berpotensi mengendap, menurunkan kadar oksigen terlarut, serta mengganggu keberlangsungan ekosistem akuatik (Apriyanto et al., 2021).

Masalah pencemaran *ballast water* telah menjadi perhatian global, yang ditandai dengan diberlakukannya *International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments* oleh IMO, dan telah diratifikasi Indonesia melalui Peraturan Presiden No. 132 Tahun 2015 (Peraturan Presiden, Republik Indonesia, 2021). Untuk mengurangi dampak pencemaran, berbagai teknologi pengolahan *ballast water* telah dikembangkan, salah satunya adalah elektrokoagulasi. Teknologi ini memanfaatkan arus listrik untuk melarutkan elektroda logam (umumnya aluminium atau besi), sehingga terbentuk koagulan in-situ yang mampu mengadsorpsi dan mengendapkan polutan termasuk logam berat (Firdaus, 2018). Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa efektivitas elektrokoagulasi sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional, terutama jenis dan konsentrasi elektrolit yang digunakan. Pada kondisi laboratorium atau sistem simulasi, penambahan elektrolit tambahan seperti NaCl diperlukan untuk meningkatkan konduktivitas larutan dan memperlancar reaksi elektrokimia. Dengan karakteristik tersebut, elektrokoagulasi dinilai sebagai metode yang potensial, efisien, dan ramah lingkungan untuk mengurangi kandungan logam berat pada *ballast water* sebelum dibuang ke laut (Joao Guterres et al., 2018).

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh penambahan elektrolit NaCl terhadap kinerja proses elektrokoagulasi dalam menghilangkan logam berat pada *ballast water* kapal. Penambahan NaCl berperan penting dalam meningkatkan konduktivitas larutan, yang secara langsung memengaruhi kestabilan arus listrik selama proses elektrokoagulasi. Arus listrik yang stabil mempercepat pelarutan elektroda aluminium sehingga memperbanyak pembentukan flok $Al(OH)_3$, yaitu koagulan in-situ yang berfungsi mengadsorpsi ion logam berat seperti Pb^{2+} dan Zn^{2+} .

METODE

Penambahan NaCl sebagai Elektrolit Support

Dalam penelitian ini, NaCl digunakan sebagai elektrolit pendukung untuk meningkatkan konduktivitas larutan. Penambahan NaCl penting dilakukan karena konduktivitas berperan langsung terhadap stabilitas arus listrik dalam proses elektrokoagulasi (Telekomunikasi et al., 2021). Variasi dosis NaCl yang digunakan adalah 0 mg/L, 1,5 mg/L, 2 mg/L, dan 2,5 mg/L dengan menggunakan waktu kontak 30 menit, 60 menit, 90 menit, 120 menit. Dosis tersebut dipilih untuk melihat pengaruh peningkatan konsentrasi elektrolit terhadap efektivitas penyisihan logam berat Pb^{2+} dan Zn^{2+} dalam *ballast water* (Yusbarina, 2015). Penambahan NaCl dilakukan dengan melarutkan garam dalam aquadest, kemudian dicampurkan ke dalam bak penampung yang telah

dipasang pengaduk guna menghomogenkan sampel *ballast water* dengan NaCl sesuai dengan perhitungan pelarutan.



Gambar 1 Penambahan NaCl Ke Bak Penampung

Metode Analisis

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan untuk mengetahui efektivitas proses elektrokoagulasi dalam menurunkan konsentrasi logam berat Pb^{2+} dan Zn^{2+} pada *ballast water*. Sampel yang telah melalui proses elektrokoagulasi dianalisis menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)* untuk menentukan konsentrasi akhir logam (Erawati et al, 2020). Hasil pengukuran dibandingkan dengan konsentrasi awal untuk menghitung persentase efisiensi penyisihan. Selain itu, data hasil percobaan dianalisis secara statistik menggunakan perangkat lunak

Minitab. Uji *ANOVA two-way (Analysis of Variance)* dilakukan untuk mengetahui pengaruh signifikan dari variabel bebas, yaitu dosis NaCl dan waktu kontak, terhadap variabel terikat berupa konsentrasi logam Pb^{2+} dan Zn^{2+} . Uji korelasi juga digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara waktu kontak, dosis NaCl, dan efisiensi penyisihan logam.

Proses Pengolahan *Ballast Water* dengan Menggunakan Elektrokoagulasi

Proses pengolahan dilakukan dengan sistem batch menggunakan reaktor elektrokoagulasi berkapasitas 10 L. Elektroda aluminium digunakan sebagai anoda dan katoda dengan jarak antar elektroda 1,5 cm. Sumber listrik searah (DC) dialirkan dengan arus konstan sebesar 5 A dan tegangan 12 V (Ismail et al., 2024). Variabel penelitian meliputi variasi dosis NaCl sebagaimana disebutkan pada sub-bab sebelumnya, serta variasi waktu kontak 30, 60, 90, dan 120 menit.

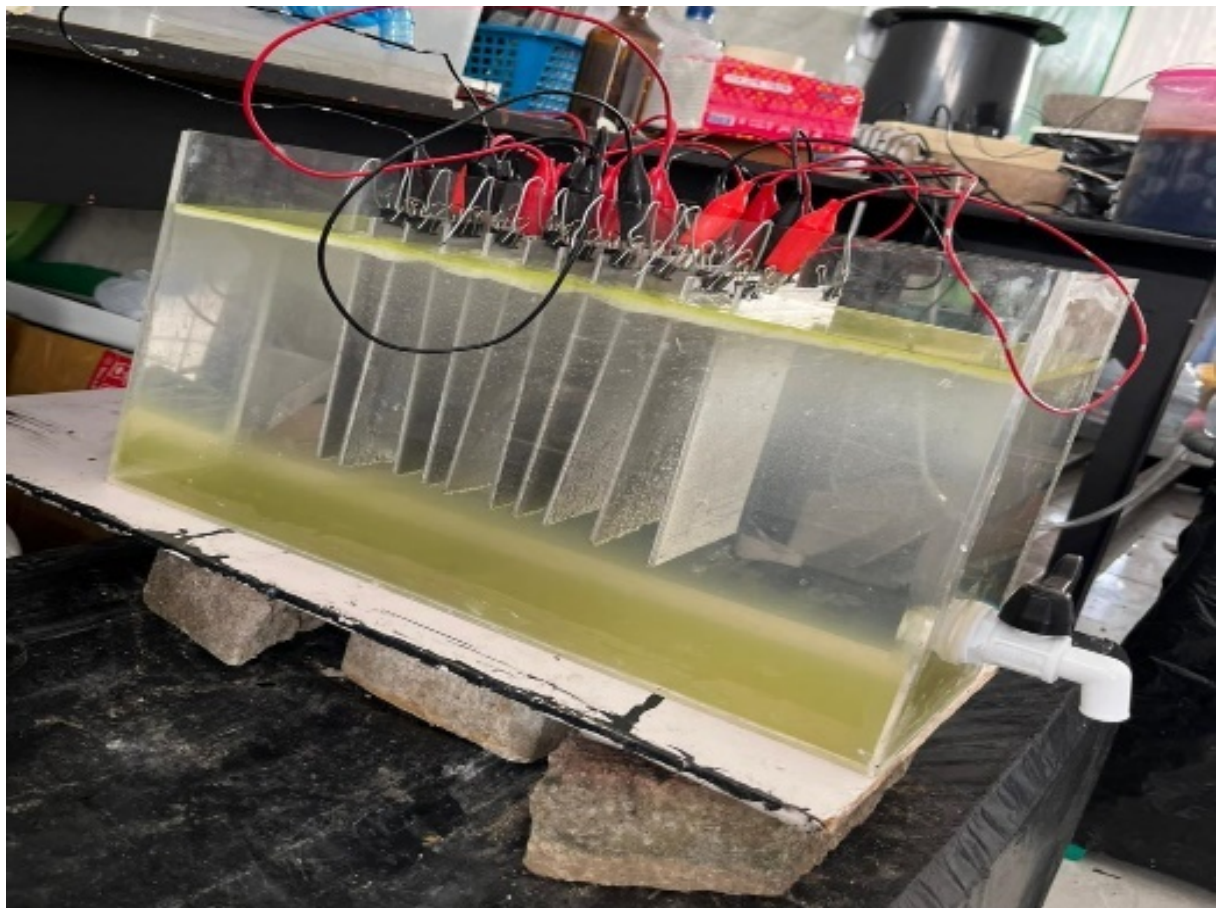
Sampel *ballast water* yang telah diberi NaCl dimasukkan ke dalam reaktor, kemudian dilakukan proses elektrokoagulasi sesuai waktu kontak yang ditentukan. Ion Al^{3+} yang dihasilkan dari pelarutan elektroda akan bereaksi dengan air membentuk flok $Al(OH)_3$, yang selanjutnya berfungsi mengadsorpsi dan mengendapkan ion logam berat Pb^{2+} dan Zn^{2+} . Setelah proses selesai, sampel diambil dan disaring, kemudian dianalisis menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) untuk menentukan konsentrasi akhir Pb^{2+} dan Zn^{2+} . Efisiensi penyisihan logam berat dihitung dengan rumus:

$$\% \text{ removal} = \frac{(a1-a2)}{a1} \times 100\%$$

Dengan :

A1 = hasil inlet

A2 = hasil outlet



Gambar 2 Proses Elektrokoagulasi

PEMBAHASAN

Karakteristik *Ballast water*

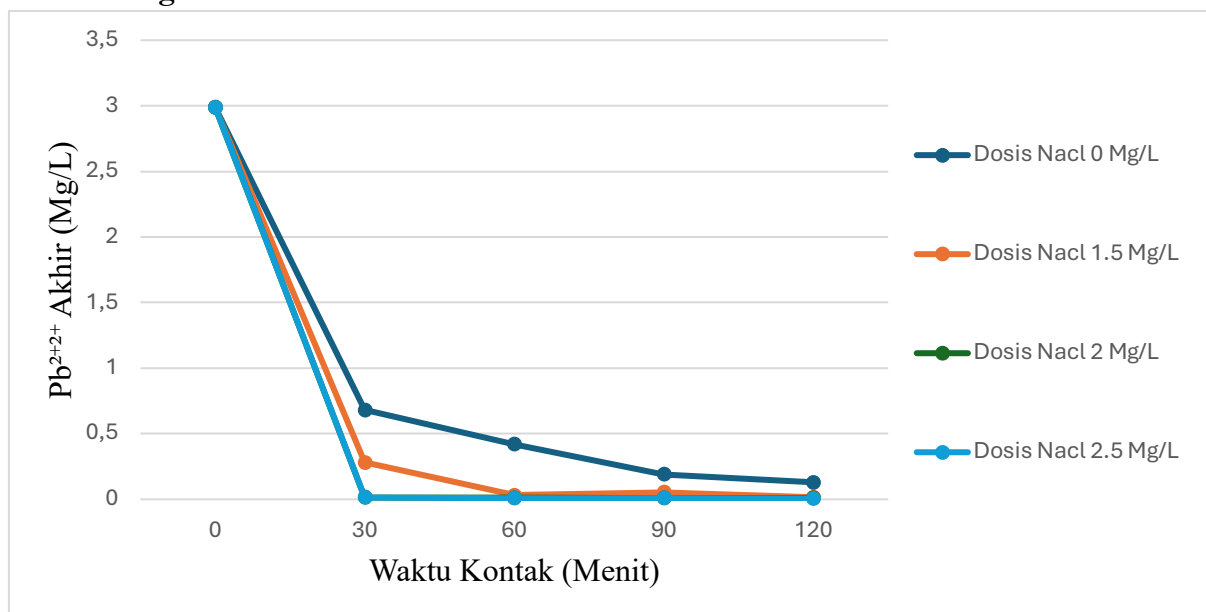
Ballast water yang digunakan dalam penelitian ini dianalisis terlebih dahulu untuk mengetahui karakteristik awal sebelum dilakukan proses pengolahan menggunakan metode elektrokoagulasi. Analisis ini meliputi parameter Pb^{2+} (Timbal), Zn^{2+} (Seng), dan pH. Pengambilan sampel *ballast water* dalam penelitian ini dilakukan pada *balas tank*, yaitu tangki khusus yang digunakan untuk menampung air laut sebagai pemberat guna menjaga keseimbangan dan stabilitas kapal saat berlayar. Sampel diambil pada kondisi *ballast water* yang sudah tersimpan di dalam tangki dalam jangka waktu tertentu.

Tabel 1 Hasil uji awal karakteristik *ballast water*

Hasil Uji Kadar Pb^{2+} (Timbal)	Hasil Uji Kadar Zn^{2+} (Seng)	pH
Mg/L	Mg/L	
2,99	12,9	7,2

Secara visual, *ballast water* yang diambil dari kapal menunjukkan warna hijau keruh dengan sedikit endapan halus di bagian dasar. Kondisi ini menandakan adanya partikel tersuspensi yang dapat memengaruhi kualitas air. Analisis kandungan logam berat menunjukkan bahwa konsentrasi Pb^{2+} (timbal) dan Zn^{2+} (seng) berada di atas baku mutu yang ditetapkan dalam Peraturan pemerintah No.22 tahun 2021 lampiran 8 maupun pedoman *International Maritime Organization (IMO)* mengenai pembuangan *ballast water*. Kadar Pb^{2+} mencapai 3 mg/L, sedangkan kadar Zn^{2+} mencapai 12,9 mg/L. Tingginya kandungan logam berat ini menunjukkan potensi pencemaran apabila *ballast water* dibuang langsung ke laut tanpa pengolahan.

Hasil Penyisihan Parameter Pb^{2+} (Timbal) dan Zn^{2+} (Seng) dengan Menggunakan Elektrokoagulasi

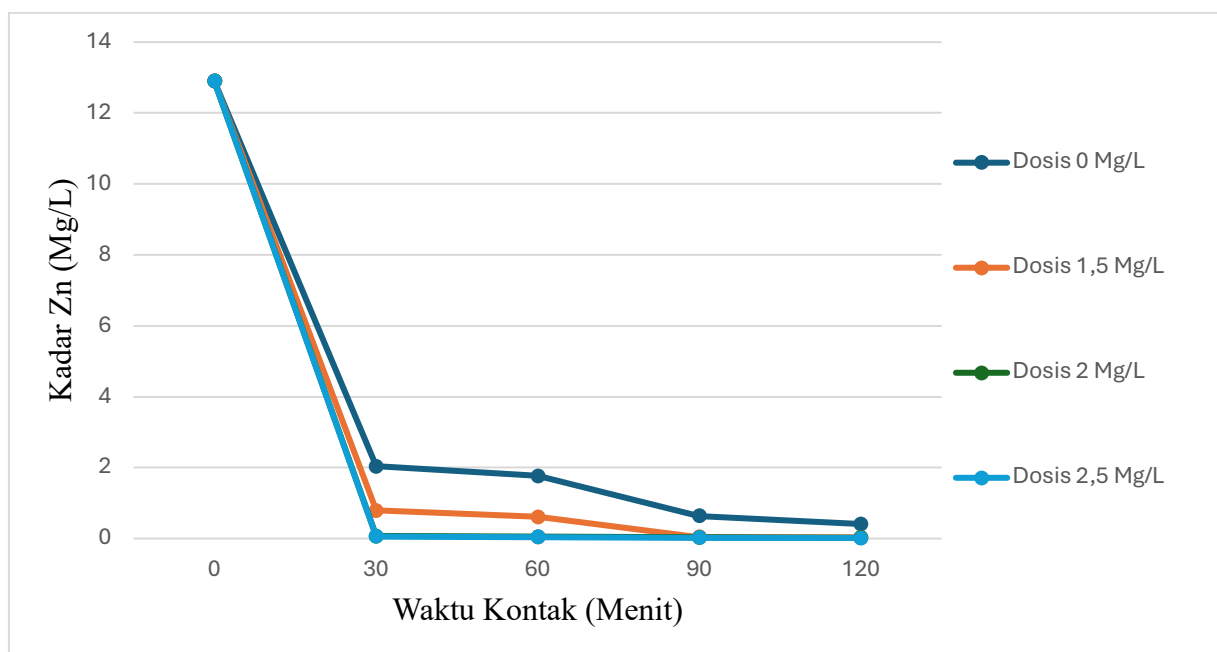


Gambar 3 Hubungan Waktu Kontak Dan Dosis NaCl Terhadap Penurunan Parameter Pb^{2+} (Timbal)

Berdasarkan Gambar 3 menunjukkan hasil uji penurunan kadar Pb^{2+} (Timbal) pada *ballast water* menggunakan metode elektrokoagulasi dengan variasi dosis NaCl dan waktu kontak. Konsentrasi awal Pb^{2+} pada seluruh sampel adalah 2,99 mg/L. Pada perlakuan tanpa penambahan NaCl (0 mg/L), terjadi penurunan kadar Pb^{2+} seiring dengan bertambahnya waktu kontak. Setelah

30 menit kadar Pb^{2+} turun menjadi 0,68 mg/L, kemudian terus menurun hingga 0,13 mg/L pada menit ke-120. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun tanpa penambahan elektrolit, proses elektrokoagulasi tetap mampu mereduksi logam Pb^{2+} secara signifikan.

Pada penambahan NaCl 1,5 mg/L, efektivitas penyisihan Pb^{2+} meningkat drastis. Dalam 30 menit, kadar Pb^{2+} turun menjadi 0,28 mg/L, dan mencapai 0,016 mg/L pada menit ke-120. Hasil ini menggambarkan bahwa keberadaan NaCl berperan penting dalam meningkatkan konduktivitas larutan sehingga mempercepat proses pembentukan flok $Al(OH)_3$ yang mengadsorpsi ion Pb^{2+} . Selanjutnya, pada dosis NaCl 2 mg/L, hasil yang diperoleh lebih optimal dibanding dosis sebelumnya. Setelah 30 menit, kadar Pb^{2+} berkurang menjadi 0,022 mg/L dan mencapai 0,009 mg/L pada menit ke-120. Pada dosis NaCl 2,5 mg/L, diperoleh hasil terbaik. Setelah 30 menit, kadar Pb^{2+} menurun hingga 0,015 mg/L, dan terus menurun hingga mencapai 0,005 mg/L pada menit ke-120. Hasil ini menunjukkan bahwa dosis optimum NaCl dalam penelitian adalah 2,5 mg/L dengan waktu kontak 120 menit, karena menghasilkan kadar Pb^{2+} paling rendah mendekati ambang batas yang dipersyaratkan.



Gambar 4 Hubungan Waktu Kontak Dan Dosis Nacl Terhadap Penurunan Parameter Zn^{2+} (Seng)

Gambar 4 menunjukkan hubungan antara waktu kontak dan variasi dosis NaCl terhadap konsentrasi akhir Zn^{2+} pada proses elektrokoagulasi. Secara umum, hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa semakin lama waktu kontak dan semakin tinggi dosis NaCl yang digunakan, maka penurunan kadar Zn^{2+} menjadi lebih signifikan. Pada perlakuan tanpa penambahan NaCl (0 mg/L), penurunan Zn^{2+} berlangsung lebih lambat. Pada menit ke-30, kadar Zn^{2+} masih berada di atas 2,0 mg/L dan baru menurun secara bertahap hingga mencapai sekitar 0,4 mg/L pada menit ke-120. Hal ini menunjukkan bahwa walaupun elektrokoagulasi tetap mampu menurunkan Zn^{2+} tanpa elektrolit tambahan, prosesnya kurang optimal.

Sebaliknya, pada dosis 1,5 mg/L NaCl, terjadi peningkatan efektivitas penyisihan Zn^{2+} . Kadar Zn^{2+} menurun dari sekitar 0,8 mg/L pada menit ke-30, kemudian terus berkurang hingga mencapai 0 mg/L pada menit ke-90 dan tetap stabil hingga menit ke-120. Hasil yang lebih baik diperoleh pada dosis 2 mg/L NaCl dan 2,5 mg/L NaCl, di mana penurunan Zn^{2+} terjadi sangat cepat. Pada menit ke-30, kadar Zn^{2+} sudah mendekati 0 mg/L, dan tetap konsisten tidak terdeteksi

hingga akhir pengamatan. Hal ini mengindikasikan bahwa dosis NaCl yang lebih tinggi mampu meningkatkan konduktivitas larutan, sehingga mempercepat terbentuknya flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang efektif mengadsorpsi ion Zn^{2+} .

General Linear Model: Pb Akhir versus Waktu Kontak; Dosis NaCl

Factor	Type	Levels	Values
Waktu Kontak	fixed	5	0; 30; 60; 90; 120
Dosis NaCl	fixed	4	0,0; 1,5; 2,0; 2,5

Analysis of Variance for Pb Akhir, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Waktu Kontak	4	0,11507	0,20280	0,05070	3,46	0,056
Dosis NaCl	3	0,31894	0,31894	0,10631	7,25	0,009
Error	9	0,13195	0,13195	0,01466		
Total	16	0,56596				

S = 0,121084 R-Sq = 76,69% R-Sq(adj) = 58,55%

Gambar 5 Hasil Statistilk Anova Two-way Pengaruh Proses Elektrokoagulasi Terhadap Penurunan Pb

Hasil analisis General Linear Model (GLM) pada Tabel di atas menunjukkan pengaruh waktu kontak dan dosis NaCl terhadap konsentrasi akhir Pb (Pb Akhir) pada proses elektrokoagulasi. Faktor waktu kontak memiliki nilai F sebesar 3,46 dengan signifikansi (p-value) 0,056. Nilai ini sedikit lebih besar dari 0,05, sehingga secara statistik pengaruh waktu kontak terhadap penurunan Pb tidak signifikan pada taraf kepercayaan 95%, tetapi cenderung berpengaruh (*marginally significant*). Hal ini berarti bahwa semakin lama waktu kontak memberikan tren penurunan Pb, namun pengaruhnya tidak sekuat faktor dosis NaCl.

Sementara itu, faktor dosis NaCl memberikan nilai F sebesar 7,25 dengan signifikansi (p-value) 0,009. Nilai ini lebih kecil dari 0,05, sehingga dapat disimpulkan bahwa penambahan dosis NaCl berpengaruh nyata terhadap penurunan konsentrasi Pb. Dengan kata lain, variasi dosis NaCl merupakan faktor utama yang menentukan efektivitas penyisihan Pb pada penelitian ini. Nilai R-Sq sebesar 76,69% menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan sekitar 76,69% variasi data penurunan Pb, sedangkan sisanya 23,31% dipengaruhi oleh faktor lain di luar model. Nilai R-Sq (adj) sebesar 58,55% juga menegaskan bahwa model masih cukup baik dalam menjelaskan hubungan antara variabel independen (waktu kontak dan dosis NaCl) dengan variabel dependen (Pb akhir).

Correlations: Waktu Kontak; Pb Akhir

Pearson correlation of Waktu Kontak and Pb Akhir = -0,280
P-Value = 0,277

Correlations: Dosis NaCl; Pb Akhir

Pearson correlation of Dosis NaCl and Pb Akhir = -0,629
P-Value = 0,007

Gambar 6. Hasil Statistilk Uji Korelasi Pengaruh Proses Elektrokoagulasi Terhadap Penurunan Pb

Korelasi Waktu Kontak – Pb Akhir

Nilai $r = -0,280$ → menunjukkan hubungan negatif lemah. Artinya, semakin lama waktu kontak, konsentrasi Pb akhir cenderung turun, tetapi hubungannya tidak terlalu kuat.
 $p\text{-value} = 0,277$ → lebih besar dari 0,05. Artinya, secara statistik tidak signifikan. Jadi, tidak ada bukti yang cukup untuk menyatakan bahwa waktu kontak berpengaruh nyata terhadap Pb akhir.

Korelasi Dosis NaCl – Pb Akhir

Nilai $r = -0,629$ → menunjukkan hubungan negatif kuat. Semakin besar dosis NaCl, semakin rendah kadar Pb akhir. Hubungannya jauh lebih kuat dibandingkan dengan waktu kontak.
 $p\text{-value} = 0,007$ → lebih kecil dari 0,05. Artinya, hubungan ini signifikan secara statistik. Jadi, ada bukti yang kuat bahwa dosis NaCl berpengaruh nyata terhadap penurunan Pb akhir.

KESIMPULAN DAN SARAN

Pengaruh Penambahan elektrolit NaCl berfungsi meningkatkan konduktivitas larutan, sehingga mempercepat proses pembentukan flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang berperan sebagai koagulan dalam mengikat ion logam berat. Peningkatan dosis NaCl hingga 2,5 mg/L memberikan efisiensi penyisihan logam yang lebih tinggi. Dosis optimum ditemukan pada konsentrasi 2–2,5 mg/L, di mana proses koagulasi berlangsung lebih cepat dan stabil.

Metode elektrokoagulasi dengan elektroda aluminium terbukti efektif menurunkan kadar logam berat hingga memenuhi baku mutu PP No. 22 Tahun 2021. Konsentrasi Pb^{2+} awal sebesar 2,99 mg/L menurun hingga 0,005 mg/L, sedangkan Zn^{2+} sebesar 12,9 mg/L berhasil dihilangkan lebih dari 99% hanya dalam 30 menit pada dosis NaCl 2–2,5 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa elektrokoagulasi mampu mengolah *ballast water* secara efisien dan ramah lingkungan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh penambahan elektrolit NaCl terhadap efektivitas proses elektrokoagulasi dalam mengurangi kandungan logam berat pada air balas kapal. NaCl berfungsi meningkatkan konduktivitas larutan, yang berperan langsung dalam menjaga kestabilan arus listrik selama proses berlangsung. Arus listrik yang stabil mempercepat pelarutan elektroda aluminium, sehingga memperbanyak pembentukan flok $\text{Al}(\text{OH})_3$ sebagai koagulan in-situ yang mampu mengikat dan mengadsorpsi ion logam berat seperti Pb^{2+} dan Zn^{2+} .

Optimasi Operasional – Penelitian lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi variasi arus listrik, jarak antar elektroda, dan pH awal guna memperoleh efisiensi maksimum dengan biaya energi yang lebih rendah. Skala Lapangan – Uji coba perlu dilakukan pada skala yang lebih besar atau langsung di kapal untuk melihat kelayakan penerapan elektrokoagulasi dalam kondisi nyata.

operasional pelayaran. Variasi Elektrolit – Selain NaCl, dapat diteliti penggunaan jenis elektrolit lain (misalnya KCl atau Na₂SO₄) agar diketahui perbandingan efektivitas dan dampak lingkungan yang ditimbulkan. Pemantauan Jangka Panjang – Disarankan untuk menganalisis efek residu elektrolit (ion Cl⁻) pada air hasil olahan serta mempelajari kemungkinan pembentukan lumpur koagulan dalam jangka panjang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih disampaikan kepada keluarga Teknik Lingkungan 28 dengan bantuan teknis yang diberikan selama proses penelitian. Penulis juga berterima kasih kepada dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, dan saran yang sangat berharga dalam penyusunan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ade Setiawan, Hari Rudjianto, Y. (2022). Penambahan Garam Menurunkan Kadar Fe Dan Warna Pada Air Kesehatan lingkungan adalah upaya pencegahan penyakit dan gangguan kesehatan dari faktor resiko lingkungan untuk mewujudkan kualitas lingkungan yang sehat baik dari aspek fisik , kimia , biologi , ma. *Poltekkes Semarang*, 41(1), 32–37.
- Apriyanto Budhi Wibow, H. C. (2021). Analisa Kandungan Logam Cd, Pb²⁺, Zn²⁺ Dan Cu pada Tangki Ballast Kapal Niaga di Pelabuhan Kendal dan Tanjung Mas Semarang. *Jurnal Maritim Polimarin*, Vol. 7.
- Arto, R. S., Pramono, B., Prakoso, L. Y., Suhirwan, & Sianturi, D. (2021). Indonesia Sea Defense Strategy in Overcoming Maritime Threats. *International Journal of Education and Social Science Research*, 04(03), 205–223. <https://doi.org/10.37500/ijessr.2021.4312>
- Erawati, E., & Nazhifah, D. N. (2020). Kinetika Reaksi pada Pengolahan Limbah Fe Sintesis dengan Metode Elektrokoagulasi. *Prosiding University Research Colloquium*, 354–360. <http://repository.urecol.org/index.php/proceeding/article/view/1049>
- Firdaus, R. dan M. (2018). Kemampuan Elektrokoagulasi Dalam Menurunkan Kadar Besi (Fe) Pada Air Sumur Bor. *Politeknik Kesehatan Kemenkes Makassar*, 44(3), 179–183.
- Ismail, M. D. E., Oiza, J. H., Pelumi, K. D., & Agnes, T. I. (2024). Purification of Heavy Metals Contaminated Groundwater by Electro-Coagulation Process Using Graphite Electrodes. *Pollution*, 10(1), 32–44. <https://doi.org/10.22059/POLL.2023.360784.1949>
- Joao Guterres, Minto Basuki, & Erivife Pranatal. (2018). Analisis Penerapan Ballast Water Management Sesuai Regulasi IMO pada Kapal yang Beroperasi di Perairan Timor-Leste. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Terapan*, 183–192.
- Peraturan Presiden, Republik Indonesia, 2021. (2021). Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. *Sekretariat Negara Republik Indonesia*, 8(22), 483. <http://www.jdih.setjen.kemendagri.go.id/>
- Telekomunikasi, S., Elektro, J. T., & Jakarta, P. N. (2021). Pengaruh Penambahan Air Laut Terhadap Perubahan Arus Listrik Dan Ph Pada Pengolahan. 19(3), 5–8.
- Yusbarina. (2015). Optimasi Ph Awal Dan Penambahan Elektrolit Garam Dalam Pengolahan Limbah Surfaktan Secara Elektrokoagulasi. 5(2), 37–42.