

## **Kinerja Media Kombinasi Biochar, Silika, dan Zeolit dalam Pengolahan Limbah Elektroplating**

**Arif Bimo Wicaksono<sup>1\*</sup>, Aussie Amalia<sup>2</sup>, Praditya S. Ardisty. S<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>*Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya 60924, Jawa Timur, Indonesia*

*\*Email: bimowcksn96@gmail.com*

### **Abstrak**

*Limbah cair elektroplating mengandung logam berat seperti Pb dan Ni serta padatan tersuspensi (TSS) yang berpotensi mencemari lingkungan perairan dan membahayakan kesehatan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kombinasi media adsorben (zeolit, zeolit+biochar, dan zeolit+silika), kecepatan aliran, serta waktu kontak terhadap efisiensi penyisihan logam berat Pb, Ni, dan TSS menggunakan Fluidized Bed Reactor (FBR). Reaktor berbahan akrilik dioperasikan secara batch dengan kapasitas media 200 g dan menggunakan sampel limbah dari industri elektroplating di Gresik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan waktu kontak berbanding lurus dengan efisiensi penyisihan, dengan kondisi optimum tercapai pada menit ke-90 untuk Pb dan Ni, serta menit ke-60 untuk TSS. Media zeolit tunggal menunjukkan kinerja terbaik dalam menyerap Ni dengan efisiensi sebesar 90,5%, sedangkan kombinasi zeolit+silika menghasilkan penyisihan Pb tertinggi sebesar 99%. Sementara itu, kombinasi zeolit+biochar lebih efektif dalam menurunkan TSS, terutama pada kecepatan aliran rendah. Kecepatan aliran 0,0008 m<sup>3</sup>/s terbukti meningkatkan distribusi fluida dan memperbesar peluang kontak antara adsorben dan kontaminan, sehingga meningkatkan efisiensi proses adsorpsi. Secara keseluruhan, kombinasi media adsorben dalam sistem FBR menunjukkan kinerja yang efektif dalam mengurangi beban pencemar limbah elektroplating. Sistem ini juga memiliki potensi sebagai teknologi pengolahan limbah yang ramah lingkungan, efisien, dan aplikatif untuk skala industri di Indonesia.*

**Kata kunci:** *Adsorpsi logam berat, nikel (Ni), timbal (Pb), Total Suspended Solids (TSS)*

### **PENDAHULUAN**

Permasalahan limbah cair industri merupakan salah satu isu lingkungan yang semakin kompleks dan mendesak untuk ditangani, terutama di negara berkembang dengan pertumbuhan sektor industri yang pesat. Limbah cair industri umumnya mengandung berbagai senyawa berbahaya, termasuk logam berat, senyawa organik persisten, serta partikel tersuspensi yang sulit terurai secara

alami. Keberadaan kontaminan tersebut dapat menyebabkan pencemaran badan air, menurunkan kualitas lingkungan, serta berdampak serius terhadap kesehatan manusia melalui rantai makanan dan akumulasi biologis (Masita, dkk., 2015). Oleh karena itu, pengelolaan limbah cair yang efektif dan berkelanjutan menjadi kebutuhan mendesak dalam upaya menjaga kualitas lingkungan dan kesehatan masyarakat. Salah satu jenis limbah industri yang memerlukan perhatian khusus adalah limbah elektroplating. Proses elektroplating yang melibatkan pelapisan logam pada permukaan material menghasilkan limbah cair yang mengandung ion logam berat seperti timbal (Pb) dan nikel (Ni), serta *Total Suspended Solids* (TSS) yang tinggi. Logam berat tersebut bersifat toksik, tidak dapat terdegradasi secara biologis, dan memiliki kecenderungan untuk terakumulasi dalam jaringan organisme hidup. Paparan logam Pb dapat menyebabkan gangguan sistem saraf, anemia, serta kerusakan ginjal, sedangkan Ni dapat memicu reaksi alergi, gangguan pernapasan, hingga efek karsinogenik dalam jangka panjang (Raditya & Hendiyanto, 2016). Selain itu, tingginya nilai TSS dalam limbah elektroplating dapat mengganggu penetrasi cahaya dalam perairan, menghambat proses fotosintesis organisme akuatik, serta meningkatkan kekeruhan air.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengolah limbah elektroplating, seperti presipitasi kimia, filtrasi membran, koagulasi-flokulasi, dan adsorpsi. Di antara metode tersebut, adsorpsi menjadi salah satu teknik yang paling banyak dikaji karena memiliki keunggulan berupa efisiensi tinggi, kemudahan operasi, serta kemampuan untuk menghilangkan kontaminan pada konsentrasi rendah. Proses adsorpsi melibatkan interaksi antara adsorben dan adsorbat melalui mekanisme fisik maupun kimia, seperti pertukaran ion, kompleksasi, dan gaya van der Waals. Efektivitas proses ini sangat dipengaruhi oleh sifat permukaan adsorben, luas permukaan spesifik, serta kondisi operasional seperti pH, waktu kontak, dan kecepatan aliran. Dalam beberapa tahun terakhir, pengembangan sistem reaktor berbasis adsorpsi juga mengalami kemajuan, salah satunya melalui penggunaan *Fluidized Bed Reactor* (FBR). Sistem FBR menawarkan keunggulan dibandingkan reaktor konvensional karena mampu menciptakan kondisi fluidisasi yang meningkatkan pencampuran antara fluida dan partikel adsorben, sehingga memperbesar luas permukaan kontak dan meningkatkan efisiensi transfer massa. Kondisi ini memungkinkan proses adsorpsi berlangsung lebih cepat dan merata dibandingkan dengan sistem unggun tetap (*fixed bed*). Selain itu, FBR juga memiliki keunggulan dalam mengurangi terjadinya penyumbatan (*clogging*) serta meningkatkan efisiensi penggunaan media adsorben (Norra & Radjenovic, 2021).

Keberhasilan proses adsorpsi dalam FBR sangat ditentukan oleh jenis dan karakteristik media adsorben yang digunakan. Zeolit merupakan salah satu adsorben alami yang banyak digunakan karena memiliki struktur berpori dan kapasitas pertukaran kation yang tinggi, sehingga efektif dalam menyerap ion logam berat. Biochar, yang dihasilkan dari pirolisis biomassa, memiliki luas permukaan yang besar serta mengandung berbagai gugus fungsi aktif seperti hidroksil dan karboksil yang berperan dalam proses adsorpsi. Sementara itu, silika dikenal memiliki stabilitas struktural yang baik serta kemampuan sebagai penyangga (*support material*) yang dapat meningkatkan kestabilan sistem adsorpsi. Penggunaan kombinasi media adsorben menjadi pendekatan yang semakin berkembang karena berpotensi menghasilkan efek sinergis dalam meningkatkan efisiensi penyisihan kontaminan. Kombinasi zeolit dengan biochar, misalnya, dapat menggabungkan mekanisme pertukaran ion dan adsorpsi permukaan, sedangkan kombinasi zeolit dengan silika dapat meningkatkan stabilitas struktur media dalam sistem reaktor. Meskipun demikian, kajian mengenai pengaruh kombinasi media adsorben dalam sistem FBR, khususnya terhadap penyisihan logam berat Pb, Ni, dan TSS pada limbah elektroplating, masih relatif terbatas. Selain jenis media, parameter operasional seperti kecepatan aliran dan waktu kontak juga memainkan peran penting dalam menentukan kinerja sistem FBR. Kecepatan aliran yang terlalu tinggi dapat menyebabkan berkurangnya waktu kontak antara adsorben dan kontaminan, sedangkan kecepatan yang terlalu rendah dapat mengurangi efisiensi pencampuran. Oleh karena itu, optimasi parameter operasional menjadi aspek penting dalam meningkatkan kinerja

sistem pengolahan limbah. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis pengaruh kombinasi media adsorben (zeolit, zeolit+biochar, dan zeolit+silika), kecepatan aliran, serta waktu kontak terhadap efisiensi penyisihan logam berat Pb dan Ni serta *Total Suspended Solids* (TSS) pada limbah elektroplating menggunakan sistem *Fluidized Bed Reactor*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi pengolahan limbah cair yang lebih efektif dan berkelanjutan, serta menjadi dasar bagi penerapan sistem FBR pada industri elektroplating di Indonesia.

## **METODE PENELITIAN**

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis efektivitas kombinasi media adsorben berupa zeolit, biochar, dan silika dalam pengolahan limbah elektroplating menggunakan sistem *Fluidized Bed Reactor* (FBR). Penelitian dilaksanakan secara eksperimen laboratorium dengan rancangan *batch process*. Parameter yang diamati meliputi konsentrasi logam berat timbal (Pb), nikel (Ni), serta Total Suspended Solids (TSS). Variasi perlakuan terdiri atas tiga jenis media adsorben, yaitu zeolit, kombinasi zeolit+biochar, dan zeolit+silika; dua tingkat kecepatan aliran, yaitu 0.0005 m<sup>3</sup>/s dan 0.0008 m<sup>3</sup>/s; serta tiga waktu kontak, yaitu 30, 60, dan 90 menit. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kombinasi media dan kondisi operasi optimum dalam meningkatkan efisiensi penyisihan kontaminan pada limbah elektroplating.

### **Lokasi Pengambilan Sampel**

Sampel limbah elektroplating diambil dari salah satu industri elektroplating yang berlokasi di Gresik, Jawa Timur, Indonesia. Lokasi ini dipilih karena memiliki aktivitas pelapisan logam yang intensif sehingga menghasilkan limbah cair dengan kandungan logam berat yang relatif tinggi. Pengambilan sampel dilakukan secara *grab sampling* pada saluran pembuangan limbah sebelum proses pengolahan, sehingga karakteristik limbah yang diperoleh mencerminkan kondisi aktual. Sampel kemudian disimpan dalam wadah tertutup dan segera dianalisis untuk menjaga kestabilan parameter kimia dan fisik. Lokasi pengambilan sampel ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Lokasi Pengambilan Sampel Limbah Elektroplating.

### Alat dan Bahan

Peralatan utama yang digunakan berupa reaktor berbahan akrilik dengan diameter 8 cm dan tinggi 50 cm yang dirancang sebagai sistem *Fluidized Bed Reactor* (FBR). Reaktor dilengkapi dengan sistem resirkulasi fluida menggunakan pompa dan pipa penghubung antara bak penampung dan kolom reaktor, serta aerator pada bagian dasar untuk menjaga kondisi fluidisasi media selama proses berlangsung. Setiap percobaan menggunakan total massa media adsorben sebesar 200 g. Sampel limbah elektroplating yang digunakan berasal dari industri di Gresik, Jawa Timur, dan digunakan sebagai bahan uji setelah melalui penyaringan awal untuk menghilangkan partikel berukuran besar. Media adsorben yang digunakan meliputi zeolit, biochar, dan silika. Sebelum digunakan, media mengalami proses aktivasi untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi. Zeolit diaktivasi menggunakan larutan KOH 1 M selama 24 jam, kemudian dicuci hingga pH netral dan dikeringkan. Biochar yang berasal dari sekam padi diayak hingga ukuran partikel 1–2 mm dan dikeringkan pada suhu 105°C. Silika yang digunakan berbentuk amorf dan dicampurkan sesuai dengan variasi rasio massa yang telah ditentukan.

### Proses *Fluidized Bed Reactor* (FBR)

Proses pengolahan limbah dilakukan menggunakan sistem *Fluidized Bed Reactor* (FBR) dengan prinsip aliran fluida ke arah atas (*upflow*) melalui lapisan media adsorben hingga tercapai kondisi fluidisasi. Pada kondisi ini, partikel media berada dalam keadaan tersuspensi dan bergerak dinamis, sehingga meningkatkan luas kontak antara adsorben dan kontaminan dalam limbah. Reaktor dioperasikan secara *batch* dengan sistem sirkulasi tertutup. Fluida limbah dialirkan dari bagian bawah reaktor menggunakan pompa dengan kecepatan aliran yang divariasikan, yaitu 0.0005 m<sup>3</sup>/s dan 0.0008 m<sup>3</sup>/s. Selama proses berlangsung, interaksi antara media adsorben dengan ion logam berat Pb<sup>2+</sup> dan Ni<sup>2+</sup> terjadi melalui mekanisme adsorpsi dan pertukaran ion. Selain itu, partikel *Total Suspended Solids* (TSS) tersisihkan melalui mekanisme penyaringan fisik (*filtration*) serta pengendapan akibat turbulensi terkontrol di dalam reaktor. Variasi waktu kontak (30, 60, dan 90 menit) digunakan untuk mengevaluasi pengaruh kinetika proses terhadap efisiensi penyisihan kontaminan. Setelah waktu kontak tercapai, sampel diambil untuk dianalisis lebih lanjut.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

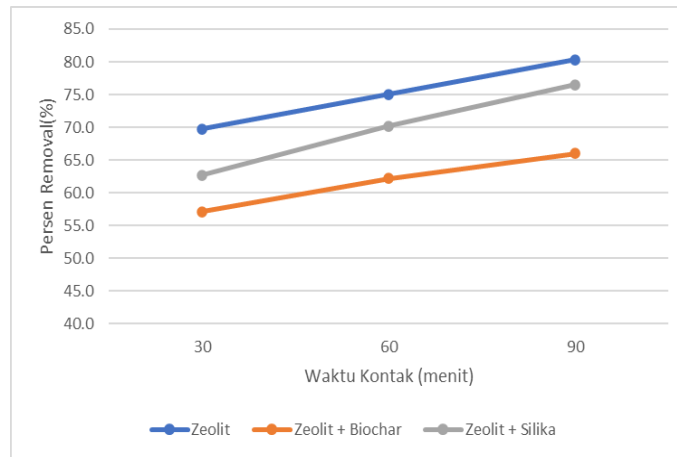
Untuk mengetahui kadar beban pencemar, dilakukan uji awal untuk mengetahui kondisi dari sampel limbah elektroplating dengan mengamati parameter nikel (Ni), timbal (Pb), dan *Total Suspended Solid* (TSS). Hasil dari pengamatan parameter tersebut akan menjadi dasar untuk menentukan jenis adsorben yang tepat, waktu kontak yang dibutuhkan, dan kecepatan aliran pompa yang optimum sebagai pengadukan atau proses transfer massa media.

Tabel 1. Uji Awal Limbah Elektroplating

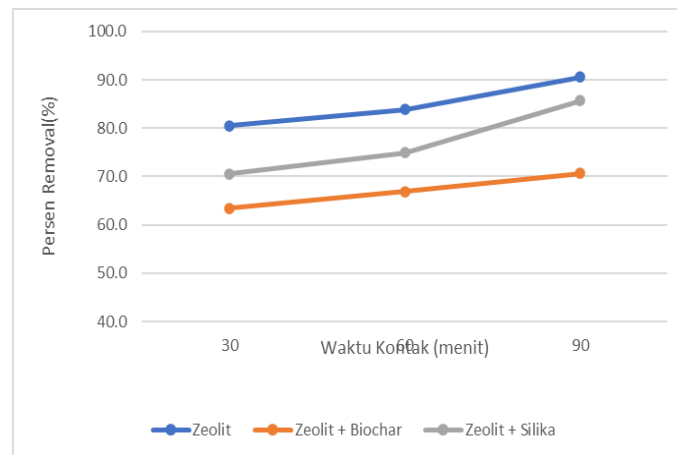
Parameter	Satuan	Nilai	Baku Mutu
Pb	mg/L	10,6	0.1
Ni	mg/L	3,27	1
TSS	mg/L	36	20

Setelah melakukan uji analisis awal, tahap selanjutnya adalah melakukan pengolahan adsorpsi dengan metode *fluidized bed reactor* menggunakan variasi jenis media (zeolit, zeolit+biochar dan zeolit+silika) dengan waktu kontak (30, 60 dan 90 menit) dan kecepatan aliran pompa pengadukan (0.0005 m<sup>3</sup>/s dan 0.0008 m<sup>3</sup>/s). Hasil yang didapat dari perlakuan tersebut digunakan untuk mengetahui pengaruh yang paling baik dalam menyisihkan beban pencemar yang

ada dalam limbah electroplating. Berikut merupakan grafik hubungan berbagai adsorben pada persentase penyisihan kadar timbal dengan variasi waktu kontak dengan menggunakan variasi kecepatan aliran pompa.

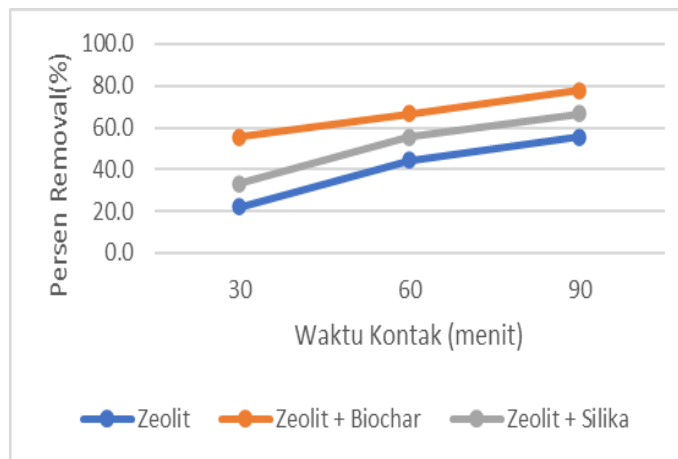


**Gambar 3.** Hubungan Jenis Adsorben dan Waktu Kontak terhadap Penyisihan Nikel (0.0005 m<sup>3</sup>/s).

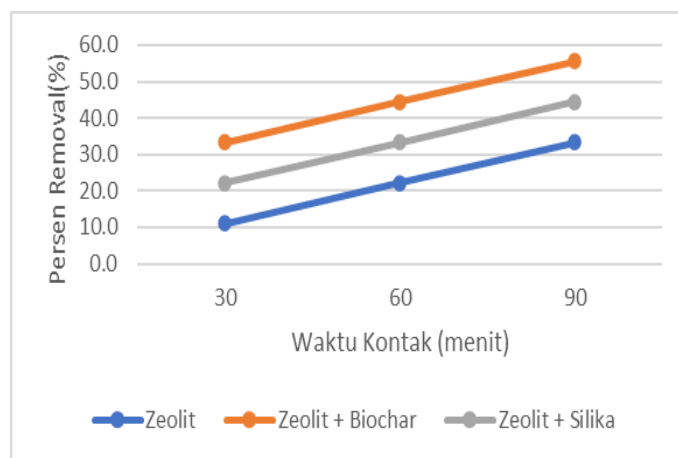


**Gambar 4.** Hubungan Jenis Adsorben dan Waktu Kontak terhadap Penyisihan Nikel (0.0008 m<sup>3</sup>/s).

Berdasarkan grafik di atas, terlihat bahwa efisiensi penyisihan nikel (Ni) meningkat seiring dengan bertambahnya waktu kontak pada kedua variasi kecepatan aliran. Pada kecepatan aliran 0.0005 m<sup>3</sup>/s, persentase removal tertinggi dicapai oleh media zeolit tunggal sebesar 80.3% pada waktu kontak 90 menit, diikuti kombinasi zeolit+silika sebesar 76.5% dan zeolit+biochar sebesar 66%. Pola serupa juga terlihat pada kecepatan aliran 0.0008 m<sup>3</sup>/s dengan efisiensi yang lebih tinggi, di mana zeolit mencapai 90.5%, zeolit+silika 85.7%, dan zeolit+biochar 70.6% pada waktu kontak yang sama. Berikut merupakan grafik hubungan berbagai adsorben pada persentase penyisihan kadar TSS dengan variasi waktu kontak dengan menggunakan variasi kecepatan aliran pompa.



**Gambar 5.** Hubungan Jenis Adsorben dan Waktu Kontak Terhadap Penyisihan TSS (0.0005 m³/s).



**Gambar 6.** Hubungan Jenis Adsorben dan Waktu Kontak terhadap Penyisihan TSS (0,0008 m³/s).

Berdasarkan grafik pada Gambar 5 dan 6, terlihat bahwa efisiensi penyisihan *Total Suspended Solid* (TSS) meningkat seiring bertambahnya waktu kontak pada kedua variasi kecepatan aliran. Pada kecepatan aliran 0.0005 m³/s, kombinasi zeolit+*biochar* menunjukkan kinerja terbaik dengan efisiensi penyisihan mencapai sekitar 77.8% pada menit ke-90, diikuti zeolit+silika sekitar 66.7%, dan zeolit tunggal sekitar 55.6%. Pola yang sama terlihat pada kecepatan aliran 0.0008 m³/s, meskipun dengan nilai efisiensi yang lebih rendah akibat peningkatan laju aliran, di mana zeolit+*biochar* tetap menjadi media paling efektif dengan penyisihan hingga ±55% pada waktu kontak 90 menit.

Variasi jenis media adsorben memberikan pengaruh yang signifikan terhadap penyisihan logam berat dan TSS pada sistem *Fluidized Bed Reactor* (FBR). Media zeolit tunggal menunjukkan kemampuan paling efektif dalam menurunkan kadar logam berat, dengan efisiensi penyisihan Pb mencapai 99.2% dan Ni sebesar 90.5% pada waktu kontak 90 menit dan laju aliran 0.0008 m³/s. Hal ini disebabkan oleh struktur kristal zeolit yang tersusun dari silikat dan aluminat bermuatan negatif yang mampu melakukan pertukaran ion dengan kation logam seperti Pb<sup>2+</sup> dan Ni<sup>2+</sup> (Neolaka & Kalla, 2024). Sementara itu, kombinasi zeolit+*biochar* menunjukkan kinerja paling baik terhadap parameter TSS dengan efisiensi 77.8% karena porositas *biochar* yang tinggi memungkinkan penjerapan partikel tersuspensi lebih maksimal (Mustaqiman, dkk., 2021). Sedangkan kombinasi zeolit+silika memiliki kinerja yang stabil dalam semua parameter karena silika meningkatkan kestabilan mekanik media dan memperbaiki distribusi aliran fluida (Safitri, dkk., 2020).

Kecepatan aliran berpengaruh langsung terhadap proses fluidisasi dan distribusi media adsorben dalam reaktor. Pada kecepatan aliran  $0.0005 \text{ m}^3/\text{s}$ , efisiensi penyisihan TSS lebih tinggi karena partikel tersuspensi memiliki waktu tinggal lebih lama dalam media, sehingga lebih mudah mengendap atau terperangkap di pori-pori adsorben (Nabila & Kurniawati, 2023). Sebaliknya, pada kecepatan aliran  $0.0008 \text{ m}^3/\text{s}$ , efisiensi penyisihan logam berat meningkat secara signifikan akibat peningkatan gaya geser dan kontak antarfasa yang mempercepat perpindahan massa (Cahyadi *et al.*, 2017). Peningkatan kecepatan fluida dapat mempercepat fluidisasi media, meningkatkan difusi ion logam menuju permukaan adsorben, serta mempercepat kesetimbangan adsorpsi (Fitriani & Rosariawari, 2020).

Peningkatan waktu kontak berbanding lurus dengan efisiensi penyisihan pada semua variasi media dan kecepatan aliran. Parameter Pb dan Ni mencapai efisiensi optimum pada menit ke-90, menunjukkan bahwa waktu interaksi yang lebih panjang memungkinkan proses difusi ion logam ke dalam pori-pori media lebih maksimal hingga mencapai kondisi kesetimbangan adsorpsi (Setiawan, dkk., 2024). Sedangkan untuk TSS, hasil optimum dicapai pada menit ke-60, karena setelah itu terjadi kecenderungan penurunan akibat pelepasan partikel halus dari media dan terbatasnya kapasitas adsorben untuk menahan padatan tersuspensi. Waktu kontak yang terlalu lama dapat menyebabkan redispersi partikel pada sistem berbasis aliran fluida (Kulakowska *et al.*, 2023).

Interaksi antara jenis media, kecepatan aliran, dan waktu kontak berperan penting dalam menentukan efektivitas FBR. Pada kombinasi zeolit+silika, kecepatan aliran tinggi memberikan hasil penyisihan Pb dan Ni yang relatif stabil karena silika meningkatkan kekuatan mekanik media sehingga tidak mudah mengalami degradasi selama proses fluidisasi. Sebaliknya, kombinasi zeolit+biochar lebih optimal pada laju aliran rendah karena sifat biochar yang ringan dan berpori besar menjadikannya lebih mudah tersuspensi dan efektif dalam menangkap TSS (Safitri, dkk., 2020). Hasil ini menegaskan bahwa karakteristik fisik dan kimia media sangat menentukan kinerja adsorpsi dalam sistem FBR (Norra & Radjenovic, 2021). Secara keseluruhan, penggunaan kombinasi media adsorben dalam *Fluidized Bed Reactor* terbukti efektif dan ramah lingkungan untuk pengolahan limbah elektroplating. Zeolit unggul dalam mekanisme pertukaran ion logam berat, biochar efektif menangkap partikel tersuspensi, sedangkan silika memperkuat stabilitas dan memperluas kontak permukaan. Kombinasi parameter operasi terbaik diperoleh pada kecepatan aliran  $0,0008 \text{ m}^3/\text{s}$  dan waktu kontak 90 menit, dengan efisiensi penyisihan rata-rata mencapai 99% untuk Pb, 90% untuk Ni, dan 77% untuk TSS. Sistem FBR multi-adsorben memiliki potensi besar untuk diterapkan dalam skala industri sebagai teknologi alternatif pengolahan limbah elektroplating yang efisien dan berkelanjutan di Indonesia.

## **KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil penelitian, variasi media adsorben, waktu kontak, dan kecepatan aliran berpengaruh terhadap efisiensi penyisihan kontaminan pada limbah elektroplating. Zeolit tunggal menunjukkan kinerja terbaik dalam menurunkan kadar nikel hingga  $\pm 90\%$  dan timbal hingga  $\pm 99\%$ . Kombinasi zeolit dan biochar paling efektif dalam menurunkan TSS hingga  $\pm 77\%$ , sedangkan kombinasi zeolit dan silika menunjukkan kinerja yang relatif stabil terhadap seluruh parameter uji. Peningkatan waktu kontak meningkatkan efisiensi penyisihan, dengan kondisi optimum pada menit ke-90 untuk logam berat Pb dan Ni. Kecepatan aliran  $0,0008 \text{ m}^3/\text{s}$  lebih efektif dalam meningkatkan penyisihan logam berat, sedangkan kecepatan  $0.0005 \text{ m}^3/\text{s}$  lebih optimal untuk penyisihan TSS. Secara keseluruhan, sistem *Fluidized Bed Reactor* dengan kombinasi media adsorben berpotensi sebagai metode pengolahan limbah elektroplating yang efektif dan aplikatif.

## DAFTAR PUSTAKA

- Cahyadi, A., Anantharaman, A., Yang, S., Karri, S. B. R., Findlay, J. G., Cocco, R. A., and Chew, J. W., 2017. *Review of Cluster Characteristics in Circulating Fluidized Bed (CFB) Risers*. Chemical Engineering Science. 158: 70–95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.10.002>.
- Fitriani, G., dan Rosariawari, F., 2020. *Pengolahan Air Sumur dengan Fluidized Bed Reactor Menggunakan Media Karbon Aktif, Zeolit, dan Kaolin*. EnviroScientee. 16(1): 28-36. DOI: <https://doi.org/10.20527/es.v16i1.8997>.
- Kulakowska, A., Zylka, A., Krzywanski, J., Skrobek, D., Grabowska, K., Sosnowski, M., and Nowak, W., 2023. *Influence of the Adsorption Bed Composition on the Low-Pressure Fluidization*. Processes. 11(7): 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11071912>.
- Masita, D., Samudro, G., dan Handayani, D. S., 2015. *Studi Penurunan Konsentrasi Khromium dan Tembaga dalam Pengolahan Limbah Cair Elektroplating Artificial dengan Metode Elektrokoagulasi*. Jurnal Teknik Lingkungan. 2(3): 1–6.
- Mustaqiman, A. N., Wirosedarmo, R., dan Suharto, B., 2021. *Pengaruh Biochar Sekam Padi Dan Tongkol Jagung Terhadap Penurunan Logam Fe*. Jurnal Envirotek. 13(2): 1–9. DOI: <https://doi.org/10.33005/envirotek.v13i2.100>.
- Nabila, F. S., and Kurniawati, D., 2023. *Effect of Flow Rate on Adsorption Cadmium Ion (II) Using Activated Carbon of Langsung Shell (Lansium domesticum Corr)*. Indonesian Journal of Chemical Science and Technology (IJCST). 6(1): 13-17. DOI: <https://doi.org/10.24114/ijcst.v6i1.43175>.
- Neolaka, Y. A. B., dan Kalla, E. B. S., 2024. *Analisis Bibliometric Adsorpsi Pb (II) Menggunakan Adsorben Berbasis Zeolite Alam*. Jurnal Beta Kimia. 4(1): 68–76. DOI: <https://doi.org/10.35508/jbk.v4i1.15461>.
- Norra, G. F., and Radjenovic, J., 2021. *Removal of Persistent Organic Contaminants from Wastewater Using A Hybrid Electrochemical-Granular Activated Carbon (GAC) System*. Journal of Hazardous Materials. 415. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125557>.
- Raditya, B., dan Hendiyanto, O., 2016. *Pemanfaatan Kulit Durian sebagai Adsorben Logam Berat Pb Pada Limbah Cair Elektroplating*. Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan. 8(1): 10–18.
- Safitri, O., Alrasyid, H., dan Udyani, K., 2020. *Pembuatan Silika Termodifikasi dari Sekam Padi sebagai Adsorben Logam Berat pada Limbah Cair*. Jurnal Envirotek. 12(2): 19–24. DOI: <https://doi.org/10.33005/envirotek.v12i2.53>.
- Setiawan, A., Rahmawati, D. A., Novitrie, N. A., dan Dermawan, D., 2024. *Efektivitas Biosorpsi Logam Berat Ni (II) Menggunakan Saccharomyces cerevisiae Terimobilisasi Pada Natrium Alginat*. Metana. 20(2): 69–78. DOI: <https://doi.org/10.14710/metana.v20i2.59250>.