

# Strategi Degradasi Logam Berat dengan Bioreaktor Berbasis Nanoteknologi Guna Mewujudkan Ketersediaan Air Bersih di Indonesia pada Tahun 2030

Muhammad Fadillah<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universitas Negeri Jakarta

## ABSTRACT

Indonesia ranks 82<sup>nd</sup> out of 163 countries in overall performance in achieving the Sustainable Development Goals (SDGs) with a score of 69.2. The data also shows that the SDGs in Indonesia have not been met, especially the sixth target regarding the availability of clean water and sanitation. In general, this issue is caused by human activities such as industrial activities that produce hazardous waste, one of which is liquid waste containing heavy metals that are carcinogenic. However, the problem of pollution can be overcome by nanotechnology-based waste treatment that utilizes Indonesian natural resources in the form of Sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.). This study uses the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Metaanalyses) method. The PRISMA method was chosen to explain the purpose of this study, which is to determine the efficiency of using nanotechnology-based bioreactors to degrade heavy metals. The results of this study explain that the use of nanotechnology-based bioreactors from Sunn hemp has a good level of efficiency. This is because nanotechnology in the form of silver nanoparticles and nanocellulose produced from Sunn hemp can be used to absorb heavy metal content in industrial wastewater.

## ABSTRAK

Indonesia menduduki peringkat 82 dari 163 negara dalam kinerja keseluruhan dalam pencapaian tujuan SDGs (*Sustainable Development Goals*) dengan skor sebesar 69,2. Data tersebut juga membuktikan bahwa SDGs di Indonesia belum terpenuhi, terutama target keenam mengenai ketersediaan air bersih dan sanitasi. Pada umumnya, hal itu diakibatkan oleh aktivitas manusia seperti aktivitas industri yang menghasilkan limbah berbahaya salah satunya limbah cair mengandung logam berat yang bersifat karsinogenik. Namun, permasalahan pencemaran tersebut dapat diatasi dengan pengolahan limbah berbasis nanoteknologi yang memanfaatkan sumber daya alam Indonesia berupa tanaman orok-orok (*Crotalaria juncea* L.). Studi ini menggunakan metode PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyse*). Metode PRISMA dipilih untuk menjelaskan tujuan dari studi ini, yaitu untuk mengetahui efisiensi penggunaan bioreaktor berbasis nanoteknologi untuk mendegradasi logam berat. Hasil dari studi ini menjelaskan bahwa penggunaan bioreaktor berbasis nanoteknologi dari tumbuhan orok-orok memiliki tingkat efisien yang baik. Hal itu dikarenakan nanoteknologi berupa nanopartikel perak dan nanoselulosa yang dihasilkan dari tanaman orok-orok dapat digunakan untuk mengabsorpsi kandungan logam berat di dalam limbah cair industri.

## CONTACT

MuhammadFadillah\_13076200  
64@mhs.unj.ac.id

## KEYWORDS

Bioreaktor, Nanoteknologi,  
*Crotalaria juncea* L.,  
Industri, Limbah cair, Logam  
berat

## INTRODUCTION

*Sustainable Development Goals* (SDGs) atau biasa juga disebut sebagai Tujuan Pembangunan Berkelanjutan merupakan suatu program skala global yang telah disepakati oleh negara-negara anggota Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) dengan tujuan menciptakan kehidupan dunia yang lebih baik untuk kedepannya. Beberapa negara ikut berkontribusi untuk memenuhi tujuan dari program SDGs, salah satunya Indonesia. Menurut data dari Sachs dkk. (2022), Indonesia berada di peringkat 82 dari 163 negara dalam kinerja keseluruhan dalam pencapaian tujuan SDGs dengan skor sebesar 69,2. Nilai tersebut masih terbelah dibawah target SDGs, terutama untuk tujuan keenam (ketersediaan air bersih dan sanitasi). Pada data tersebut menunjukkan ketercapaian dibawah target SDGs poin 6 (target 6.1) yang memiliki target sebesar 82% populasi dunia mempunyai akses air bersih yang baik. Dilansir dari laman Indonesia.go.id, hanya terdapat 12 persen rumah tangga yang memiliki akses air minum yang aman dari

91 persen rumah tangga yang memiliki akses. Hal tersebut umumnya terjadi akibat aktivitas yang dilakukan oleh manusia yang menyebabkan lingkungan sekitarnya menjadi rusak, seperti kegiatan industri.



Gambar 1. Kinerja Indonesia dalam SDGs  
Sumber: (Sachs dkk., 2022)

Akibat dari adanya kegiatan atau aktivitas manusia seperti kegiatan industri dapat menyebabkan peningkatan pencemaran lingkungan. Pencemaran yang terjadi umumnya disebabkan oleh pembuangan limbah B3 dan dengan adanya perubahan iklim menyebabkan terjadinya pengendapan limbah B3 di dasar perairan (Riani, 2013; Fadillah, 2022). Limbah B3 yang dihasilkan oleh aktivitas industri biasanya mengandung logam berat yang berbahaya bagi kehidupan makhluk hidup.

Logam berat termasuk senyawa berbahaya yang bersifat dapat menyebabkan kanker atau karsogenik (Kurniasari dkk., 2012; Fadillah 2022). Logam berat juga memiliki sifat tidak bisa terurai oleh organisme di lingkungan atau bersifat nondegradable (Agustina, 2014). Menurut Fadillah (2022), umumnya di lingkungan manusia terdapat beberapa jenis logam berat yang meliputi aluminium (Al), merkuri (Hg), zinc (Zn), cadmium (Cd) dan lain-lain. Tingginya pencemaran lingkungan oleh limbah cair industri yang mengandung logam berat terjadi juga akibat pertumbuhan industri di Indonesia.

Saat ini terdapat kurang lebih 122 kawasan industri yang ada di Indonesia. Menurut data dari Kementerian Perindustrian RI (2020), Pada triwulan III 2020, industri di Indonesia mengalami pertumbuhan sebesar 4,31% year over year (yoy). Beberapa industri yang mengalami kenaikan adalah industri farmasi dan industri logam dasar yang secara berturut-turut sebesar 14,96% dan 5,19% (Kementerian Perindustrian RI, 2020). Pertumbuhan industri tersebut menimbulkan pencemaran akibat limbah cair yang mengandung logam berat. Berdasarkan penelitian dari Susanti, dkk. (2014), limbah industri farmasi dan industri makanan memiliki kandungan logam berat Zn secara berturut-turut sebesar 211,65 ppm dan 254,12 ppm. Kandungan Zn sebesar itu sudah termasuk pencemaran berat, sedangkan kandungan maksimal Zn yang aman adalah <90 ppm (Komarawidjaja, 2017; Fadillah, 2022). Namun, penanggulangan pencemaran air oleh logam berat dapat memanfaatkan teknologi adsorben berbasis nanopartikel (Nurdila, dkk., 2015).

Nanopartikel merupakan bagian teknologi material yang luas dan termasuk zat padat, serta memiliki satu dimensi dengan ukuran kurang dari seratus nanometer. Nanopartikel ini menunjukkan warna dan sifat yang khas dengan variasi bentuk dan ukuran, yang dapat dimanfaatkan dalam bidang bioimaging (Khan, *et al.*, 2017). Nanopartikel diklasifikasikan berdasarkan sifat fisik dan kimianya, seperti *carbon-based nanoparticles*, *metal nanoparticles*, *lipid-based nanoparticles*, *cellulose nanoparticles (nanocellulose)*, dan sebagainya. Nanopartikel bisa dihasilkan dari beberapa sumber dan metode yang digunakan. Nanopartikel logam ataupun nanopartikel senyawa organik dapat disintesis dengan memanfaatkan suatu tanaman yang mengandung senyawa tertentu, seperti flavonoid dan selulosa. Terdapat beberapa tanaman yang memiliki kandungan flavonoid dan selulosa, salah satunya adalah tanaman orok-orok.

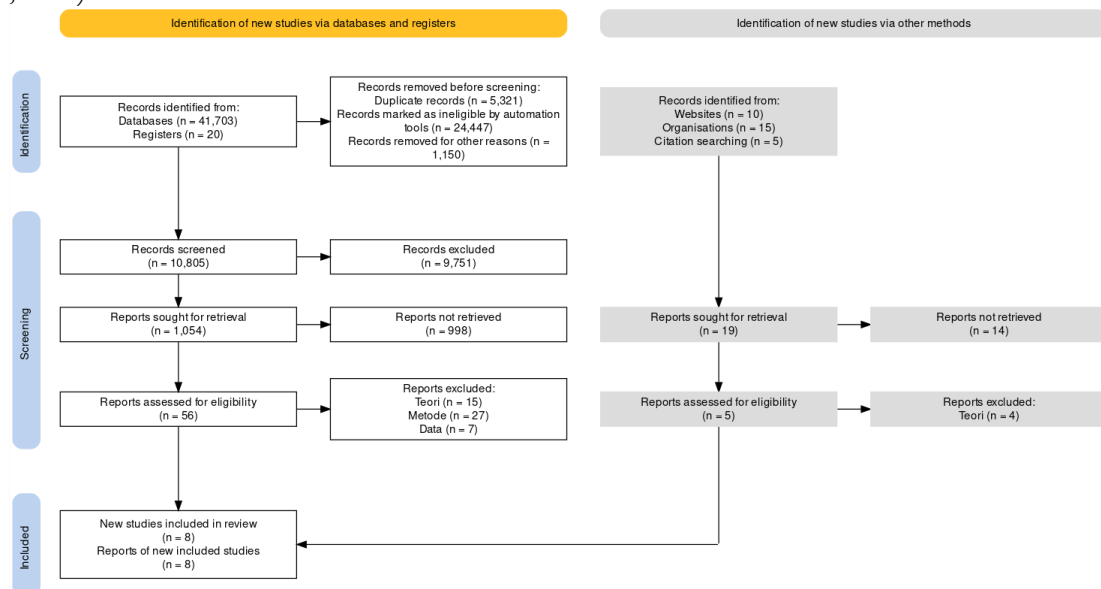
Tanaman orok-orok yang bernama latin *Crotalaria juncea* L. merupakan tanaman leguminosa serta termasuk ke dalam keluarga semak dan perdu (Seta *et al.*, 2020). Tanaman orok-orok memiliki kandungan senyawa yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan nanopartikel, seperti selulosa (67,8% dalam akar dan 78,3% dalam batang (AlSnafi, 2016)) dan senyawa antioksidan (flavonoid 0.845 mg Ekuivalen Rutin/g, tanin (0.281 mg Ekuivalen Asam Tanat/g, dan fenolik (1.394 mg Ekuivalen Asam Galat/g) (Dinakaran, *et al.*, 2014)). Beberapa senyawa tersebut dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan produk nanoteknologi, seperti nanopartikel perak dan nanopartikel selulosa. Kedua hasil sintesis tersebut dapat dimanfaatkan untuk mengabsorpsi ataupun mendegradasi kandungan logam berat dalam limbah cair. Degradasi logam berat yang terkandung di dalam limbah cair juga dapat menggunakan beberapa metode, salah satunya filtrasi atau bioreaktor membran (Siregar, 2009; Fitriyani, 2022).

Bioreaktor termasuk salah satu teknologi alternatif untuk pengolahan air limbah. Terdapat beberapa jenis bioreaktor yang digunakan, seperti bioreaktor membran. Selama beberapa dekade terakhir, banyak penelitian mengenai bioreaktor membran karena memiliki potensi untuk menghasilkan limbah cair yang tidak berbahaya bagi lingkungan dan dianggap sebagai teknologi mutakhir untuk mengolah air limbah (Al-Asheh, *et al.*, 2021). Dalam sistem bioreaktor membran, pengolahan air limbah dilakukan melalui kombinasi bagian biologis (untuk biodegradasi aliran limbah) dan bagian filtrasi membran (untuk pemisahan air limbah yang diolah dari biosolid menggunakan modul membran) (Pervez, *et al.*, 2020).

Oleh karena itu, artikel ini akan membahas mengenai sistem pengolahan limbah cair industri yang mengandung logam berat menggunakan sistem bioreaktor berbasis nanoteknologi. Artikel ini berkontribusi untuk ketersediaan air bersih dan sanitasi, ekosistem laut, dan ekosistem darat dalam tujuan SDGs. Konsep artikel ini akan difokuskan penerapannya di bidang industri skala besar yang menghasilkan limbah cair mengandung logam berat. Dengan berkurangnya kandungan logam berat di dalam limbah cair industri, menjadikan lingkungan sekitar industri tidak akan tercemar.

## METHODS

Artikel ini menggunakan metodologi penelitian berupa *Structure Literature Review*. Analisis literatur terkait menggunakan metode PRISMA. Artikel relevan diambil dari Google Scholar dan Sciedirect menggunakan perangkat lunak Google dan Publish or Perish V8. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian meliputi *bioreactor*, *nanotechnology*, *Crotalaria juncea L.*, *sunb hemp*, dan *invasive plant*. Pada gambar 2 menggambarkan mengenai proses pencarian dan analisis artikel terkait. Pembuatan *flow diagram* menggunakan *website* PRISMA Flow Diagram (Haddaway dkk., 2022).



Gambar 2. PRISMA *flow diagram*

## RESULTS AND DISCUSSIONS

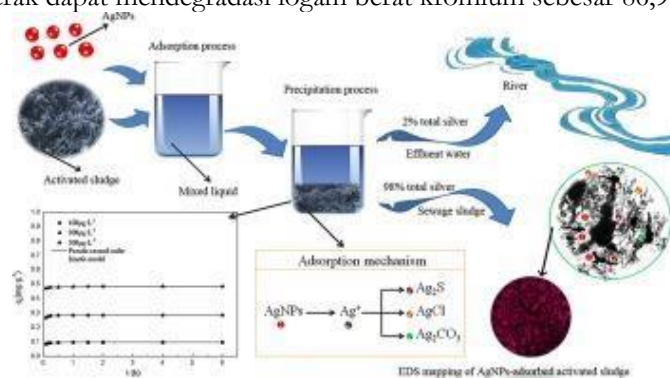
Dalam mendukung target pembangunan untuk memenuhi kebutuhan air bersih dan pengurangan kontaminasi logam berat akibat kegiatan industri dapat dilakukan dengan cara pengolahan limbah industri. Terdapat beberapa cara pengolahan limbah industri yang dilakukan di beberapa negara, salah satunya adalah dengan menggunakan nanoteknologi. Nanoteknologi dapat digunakan untuk mengabsorpsi logam berat dalam limbah industri. Nanoteknologi seperti nanopartikel perak dan nanoselulosa dapat dihasilkan dengan proses biosintesis atau sintesis dengan memanfaatkan suatu tumbuhan yang memiliki senyawa tertentu seperti tumbuhan orok-orok. Seperti yang sudah diketahui, bahwa tumbuhan orok-orok merupakan jenis tumbuhan invasif. Tumbuhan invasif merupakan jenis tanaman yang menyebar dan mendominasi dalam ekosistem dan mengganggu ataupun merusak jenis tumbuhan lain secara agresif (Nopiyanti dan Riastuti, 2019). Namun, hal tersebut dapat diatasi dengan memilih tempat penanaman tumbuhan orok-orok agar tidak merusak ekosistem asli. Terdapat juga beberapa solusi lanjutan untuk mengendalikan tanaman invasif, meliputi melakukan penilaian risiko tumbuhan invasif, restorasi ekosistem, dan sosialisasi kepada masyarakat sekitar mengenai tumbuhan invasif (Sitepu, 2020).

## Pemanfaatan Tumbuhan Orok-Orok untuk Biosintesis Nanopartikel Perak dan Nanoselulosa

Tumbuhan orok-orok (*Crotalaria juncea* L.) memiliki potensi untuk menghasilkan produk nanoteknologi yang mampu dimanfaatkan sebagai pendegradasi atau pengabsorpsi logam berat dalam limbah industri, seperti nanopartikel perak dan nanoselulosa.

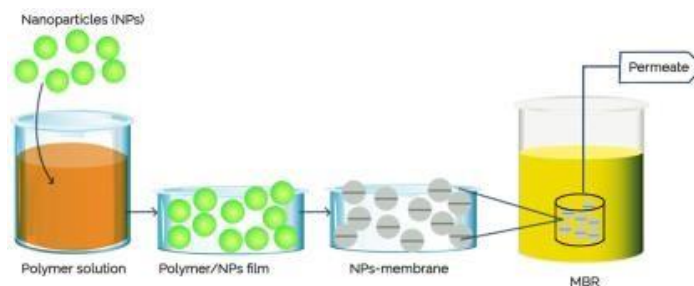
### Biosintesis Nanopartikel Perak

Biosintesis nanopartikel perak dilakukan dengan mencampurkan larutan  $\text{AgNO}_3$  dengan ekstrak tumbuhan yang mengandung senyawa pereduksi atau senyawa antioksidan. Mekanisme reaksi diawali dengan mereaksikan ekstrak tumbuhan dengan larutan  $\text{AgNO}_3$ . Setelah itu ion  $\text{Ag}^+$  akan mengalami reduksi dan mengalami nukleasi (proses pembentukan fasa induk atau pemusatan). Pada akhirnya akan menghasilkan nanopartikel perak yang stabil. Metode yang umumnya digunakan untuk sintesisnya adalah metode reduksi kimia. Metode tersebut dilakukan dengan melarutkan  $\text{AgNO}_3$  di air murni dan mengencerkan ekstrak tumbuhan di air deionisasi, kemudian kedua larutan dicampurkan dan diaduk dengan pengaduk magnetik lalu disimpan dalam botol kaca. Nanopartikel perak memiliki mekanisme adsorpsi terhadap logam berat. Mekanisme adsorpsi oleh nanopartikel perak meliputi adsorpsi elektrostatis, pengendapan aglomerasi, oksidasi, dan sulfurisasi (Chen, dkk., 2019). Mekanisme adsorpsi ini telah dibuktikan dapat mendegradasi kandungan logam berat di perairan. Berdasarkan hasil penelitian dari Kanthimathi dkk. (2021), nanopartikel perak dapat mendegradasi logam berat kromium sebesar 86,9%.



Gambar 3. Mekanisme Adsorpsi oleh Nanopartikel Perak  
Sumber: (Chen, dkk., 2019)

Nanopartikel perak yang akan dimasukkan ke dalam bioreaktor terlebih dahulu dilakukan preparasi membran. Membran nanopartikel perak disiapkan dengan metode *wet spinning*. Metode tersebut diawali dengan menambahkan nanopartikel perak secara perlahan ke dalam larutan polimer dan dibiarkan semalaman. Lalu, campuran tersebut disimpan dalam penangas air selama 24 jam. Kemudian membran nanopartikel perak dikeringkan (Pervez, dkk., 2020).



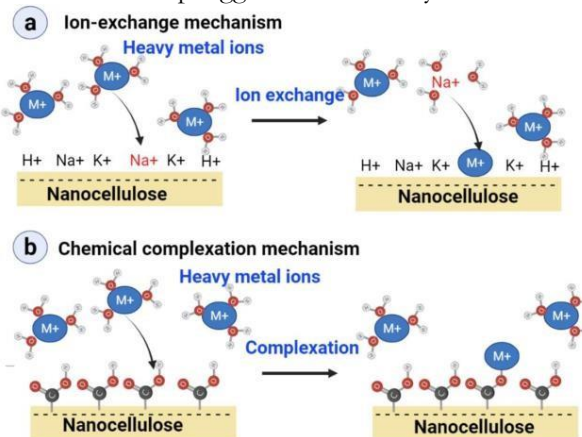
Gambar 4. Preparasi Membran Nanopartikel Perak  
Sumber: (Pervez, dkk., 2020)

### Biosintesis Nanoselulosa

Biosintesis nanoselulosa dilakukan dengan mereaksikan suatu larutan asam dengan serbuk selulosa hasil isolasi dari tumbuhan orok-orok. Metode ini diawali dengan mencampurkan serbuk selulosa dengan asam sulfat ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), diencerkan campuran tersebut dan dilakukan pengendapan. Jika sudah 24 jam, lakukan pembilasan endapan yang terbentuk dan dinetralkan hingga pH 8. Selanjutnya, dilakukan sentrifugasi dan hasilnya ditambahkan akuades untuk menghasilkan nanoselulosa (Ningtyas, dkk., 2020).

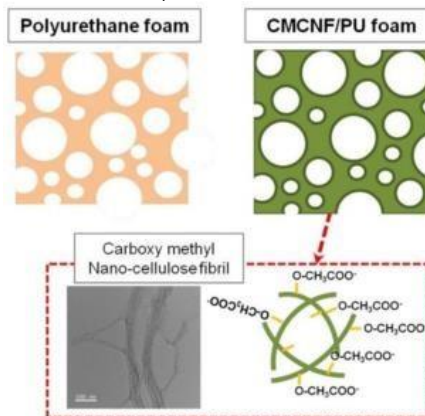
Mekanisme degradasi logam berat dengan nanoselulosa mempunyai kesamaan, yaitu adsorpsi. Pertukaran ion (Mekanisme yang melibatkan adsorpsi ion logam berbahaya menggantikan ion-ion lain yang sudah berasosiasi dengan permukaan nanoselulosa) dan kompleksasi kimia (Mekanisme yang memiliki interaksi situs khusus antara gugus karboksil dan hidroksil nanoselulosa dengan ion logam berbahaya tertentu) adalah dua mekanisme utama

yang terlibat dalam penyerapan logam berat ketika menggunakan adsorben berbasis nanoselulosa (Salama, dkk., 2021). Menurut Ibrahim dkk. (2021), nanoselulosa telah diaplikasikan untuk sistem degradasi kandungan logam berat di dalam air limbah dan memiliki efisiensi penggunaan air hasilnya kembali.



Gambar 5. Mekanisme Penghilangan Logam Berat Menggunakan Nanoselulosa Sumber: (Salama, dkk., 2021)

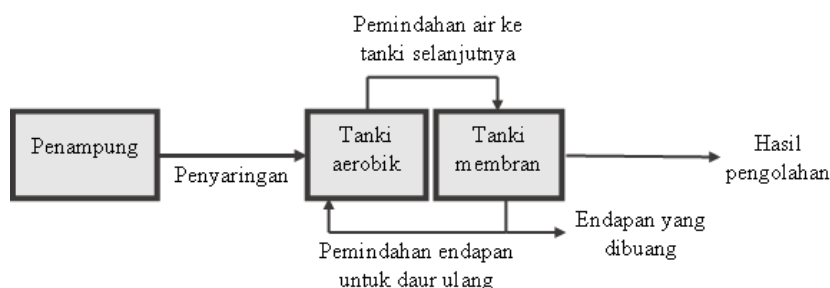
Preparasi dari nanoselulosa dalam bioreaktor ini memiliki kesamaan. Preparasi nanoselulosa dilakukan melalui pencampuran dengan polimer organik atau sintetik. Namun, hasil pencampurannya akan didispersi ke suatu matriks atau busa poliuretan yang berpori (Salama, dkk., 2021).



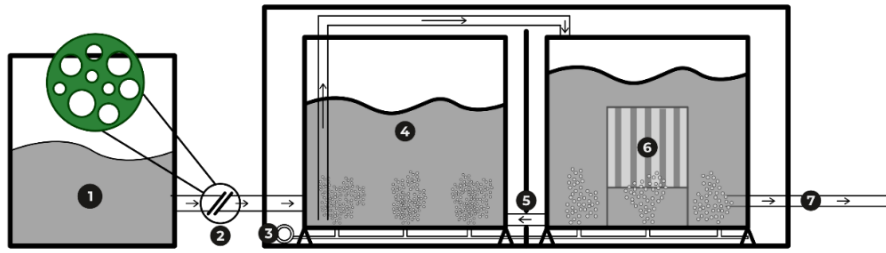
Gambar 6. Preparasi Nanoselulosa Karboksimetilasi (CM) dengan Busa Poliuretan (PU) Sumber: (Hong, dkk., 2018; Salama, dkk., 2021)

## Bioreaktor

Untuk mekanisme bioreaktor di artikel ini memiliki beberapa kesamaan dengan mekanisme bioreaktor membran (aerobik). Mekanisme diawali dengan menampung limbah cair industri dan selanjutnya dilakukan penyaringan dengan nanoselulosa. Limbah cair yang sudah disaring dialirkan ke dalam tangki aerobik, di dalam tangki ini dilakukan penambahan udara (gelembung halus) atau proses aerasi. Jika sudah dilakukan aerasi, limbah cair dialiri ke dalam tangki membran yang menggunakan membran nanopartikel perak dan dilakukan juga penambahan udara (gelembung kasar). Limbah cair yang telah melewati proses dalam bioreaktor membran adalah limbah cair yang kandungan logam beratnya sudah didegradasi dan nantinya limbah cair tersebut sudah bisa dibuang ke sungai sekitar industri.



Gambar 7. Mekanisme Sistem Bioreaktor Berbasis Nanoteknologi



**Gambar 8.** Rancangan Alat Bioreaktor Berbasis Nanoteknologi Adapun beberapa fungsi dari setiap bagian reaktor yang dapat dilihat di Tabel 1.

Tabel 1. Fungsi setiap Bagian Reaktor

Bagian Bioreaktor	Fungsi
1 (Penampungan)	Menampung limbah cair hasil proses produksi yang mengandung logam berat
2 (Penyaring berbasis nanoselulosa)	Menyaring logam berat yang dikandung oleh limbah cair dengan mekanisme pertukaran ion dan kompleksasi kimia
3 ( <i>Air compressor</i> )	Mengalirkan udara ke dalam setiap tangki (tangki aerobik dan tangki membran)
4 (Tangki aerobik)	Menjadi tempat penambahan udara atau aerasi sebelum memasuki tangki membran
5 (Pipa endapan)	Mengalirkan endapan hasil proses di tangki membran untuk dilakukan proses aerasi kembali
6 (Tangki membran nanopartikel perak)	Menjadi tempat proses utama untuk melakukan degradasi logam berat menggunakan membran nanopartikel perak dengan mekanisme adsorpsi
7 (Pipa hasil proses)	Mengalirkan air limbah hasil proses degradasi menuju sungai sekitar industri

Penggunaan sistem bioreaktor dalam artikel ini memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan. Kelebihan dari bioreaktor antara lain limbah cair hasil pengolahan tidak berdampak negatif bagi lingkungan, produksi endapan yang lebih rendah, dan waktu mulai pengoperasian yang relatif lebih singkat. Sedangkan untuk kekurangan dari bioreaktor ini, yaitu membutuhkan dana yang besar untuk pembuatannya, risiko pengotoran membran yang lebih tinggi, dan membutuhkan tenaga profesional untuk pengoperasian bioreaktor.

## CONCLUSIONS

Artikel ini berupa rancangan alat dan program mengenai bioreaktor berbasis nanoteknologi dari tumbuhan orok-orok (*Crotalaria juncea* L.) guna mewujudkan ketersediaan air bersih di Indonesia pada tahun 2030. Bioreaktor menggunakan nanoteknologi berupa nanoselulosa dalam tahap penyaringan awal dan nanopartikel perak dalam tanki membran. Nanoteknologi tersebut memanfaatkan tumbuhan orok-orok yang memiliki kandungan senyawa antioksidan dan selulosa yang tinggi. Rancangan bioreaktor ini diestimasikan dapat mendegradasi kandungan logam berat dalam limbah cair industri sebesar 95%, sehingga mampu memenuhi ketersediaan air bersih di Indonesia pada tahun 2030.

## REFERENCES

- Adam, L. dan Hidayatina, A. (2015). Peran kelembagaan dalam pelaksanaan KPS penyediaan air minum. *Jurnal Ekonomi dan Pembangunan*, 23(2): 85–94.
- Agustina, T. (2014). Kontaminasi logam berat pada makanan dan dampaknya pada kesehatan. *TEKNOBUGA: Jurnal Teknologi Busana dan Boga*, 1(1): 53–65.
- Al-Asheh, S., Bagheri, M., dan Aidan, A. (2021). Membrane bioreactor for wastewater treatment: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4: 1–15.
- Al-Snafi, A. E. (2016). The contents and pharmacology of *Crotalaria juncea*- A review. *IOSR Journal Of Pharmacy*, 6(6): 77–86.

- Chen, L., Feng, W., Fan, J., Zhang, K., dan Gu, Z. (2019). Removal of silver nanoparticles in aqueous solution by activated sludge: Mechanism and characteristics. *Science of The Total Environment*, 711: 1–3.
- Dinakaran, S. K., Banji, D., Avasarala, H., dan Banji, O. (2014). Determination of antioxidant capacity,  $\alpha$ -Amylase and lipase inhibitory activity of *Crotalaria Juncea* Linn in vitro inhibitory activity of *Crotalaria Juncea* Linn. *Journal of Dietary Supplements*, 11(2): 175–183.
- Fadillah, M. (2022). Potensi tanaman orok-orok (*Crotalaria juncea* L.) dan rancangan sistem fitoremediator untuk limbah cair tambang demi mewujudkan ketersediaan air bersih. *Risenologi*, 7(2): 7–15.
- Fitriyani, A. (2022). Efektivitas nanopartikel kulit kacang tanah (*Arachis hypogea* L.) sebagai adsorben timbal (Pb) dan tembaga (Cu) pada limbah cair industri aki. Skripsi. Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta.
- Haddaway, N. R., Page, M. J., Pritchard, C. C., dan McGuinness, L. A. (2022). PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis Campbell Systematic Reviews, 18, e1230.
- Hong, H.-J., Lim, J. S., Hwang, J. Y., Kim, M., Jeong, H. S., dan Park, M. S. (2018). Carboxymethylated cellulose nanofibrils (CMCNFs) embedded in polyurethane foam as a modular adsorbent of heavy metal ions. *Carbohydr. Polym*, 195: 136–142.
- Kanthimathi, G., Senthilkumar, O., Sankar, C., Prathibha, B. S., dan Kumar, S. M. S. (2021). Green synthesis of silver nanoparticles using *Vitex negundo* extracts and their application in the effluent treatment of cracker industries. *Journal of Physics Conference Series*, 2070(1): 1–6.
- Kementerian Perindustrian Republik Indonesia. (2020). *Analisis Perkembangan Industri Pengolahan Non Migas Indonesia 2020*, edisi 4, Pusat Data dan Informasi Kementerian Perindustrian, dilihat pada 10 Januari 2023.
- Khan, I., Saeed, K., dan Khan, I. (2017). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7): 908–931.
- Komarawidjaja, W. (2017). Paparan limbah cair industri mengandung logam berat pada lahan sawah di Desa Jelegong, Kecamatan Rancaekek, Kabupaten Bandung. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 18(2): 173–181.
- Kurniasari, L., Riwayati, I., dan Suwardiyono, S. (2012). Pektin sebagai alternatif bahan baku biosorben logam berat. *Jurnal Ilmiah Momentum*, 8(1): 1–5.
- Ningtyas, K. R., Muslihudin, M., dan Sari, I. N. (2020). Sintesis nanoselulosa dari limbah hasil pertanian dengan menggunakan variasi konsentrasi asam. *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*, 20(2): 142–147.
- Nopiyanti, N., dan Riastuti, R. D. (2019). Pola sebaran tumbuhan invasif dikawasan Taman Nasional Bukit Sulap Kota. *BIOEDUSAINS: Jurnal Pendidikan Biologi dan Sains*, 2(2): 152–159.
- Nurdila, F. A., Asri, N. S., dan Suharyadi, E. (2015). Adsorpsi logam tembaga (Cu), besi (Fe), dan nikel (Ni) dalam limbah cair buatan menggunakan nanopartikel cobalt ferrite ( $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ). *Jurnal Fisika Indonesia*, 19(55): 23–27
- Pervez, M. N., Balakrishnan, M., Hasan, S. W., Choo, K.-H, Zhao, Y., Cai, Y., Zarra, T., Belgiorno, V., dan Naddeo, V. (2020), A critical review on nanomaterials membrane bioreactor (NMs-MBR) for wastewater treatment. *Npj Clean Water*, 3(43): 1–21.
- Riani, E. (2013) *Perubahan Iklim dan Kehidupan Biota Akuatik (Dampak pada Bioakumulasi Bahan Berbahaya dan Beracun & Reproduksi)*. Bogor: IPB Press.
- Sachs, J. D., Lafortune, G., Kroll, C., Fuller, G., dan Woelm F. (2022) *Sustainable Development Report 2022*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Seta, T. P. D., Muhammad, M., dan Masrullita, M. (2020). Pemanfaatan biji orok-orok (*Crotalaria juncea*) sebagai bahan baku pembuatan minyak nabati dengan metode ekstraksi padat-cair. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 8(2): 42–52.
- Siregar, T. H. (2009). Pengurangan cemaran logam berat pada perairan dan produk perikanan dengan metode adsorpsi. *Squalen*, 4(1): 24–30.

- Sitepu, B. S. (2020). Keragaman dan pengendalian tumbuhan invasif di KHDTK Samboja, Kalimantan Timur. *Jurnal Sylva Lestari*, 8(3): 351–365.
- Susanti, R., Mustikaningtyas, D., dan Sasi, A. F. (2014). Analisis kadar logam berat pada sungai di Jawa Tengah. *Saintekno: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 12(1): 35–40.