

Fabrikasi Agen Antimikroba Ramah Lingkungan Berbasis Lapisan Ganda Hidroksida pada Substrat Aluminium Foil

Taufiq Ihsan^{1,2*}, dan Vera Surtia Bachtiar^{1,2}

¹Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Universitas Andalas, Indonesia; e-mail: taufiqihsan@eng.unand.ac.id

²Program Studi Program Profesi Insinyur, Sekolah Pascasarjana, Universitas Andalas, Indonesia

ABSTRAK

Kontaminasi air oleh mikroorganisme patogen merupakan masalah kesehatan global yang membutuhkan solusi disinfeksi yang efektif dan mudah diakses. Penelitian ini bertujuan untuk fabrikasi agen antimikroba ramah lingkungan berbasis Lapisan Ganda Hidroksida (*layered double hydroxide/LDH*) pada substrat aluminium foil yang mudah diproduksi dan diaplikasikan untuk disinfeksi air. Morfologi seperti lembaran memungkinkan pengambilan kembali LDH yang pada dasarnya berbentuk bubuk, dari air yang telah disterilkan sebelumnya secara batch. Pelapisan foil aluminium dengan Mg-Al LDH dicapai dengan merendamnya dalam larutan magnesium alkali, yang menghasilkan pembentukan LDH di permukaan. Material yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan Difraksi Sinar-X (XRD) dan Mikroskopi Elektron Pemindaian (SEM) untuk menganalisis struktur kristal dan morfologi permukaan. Uji aktivitas antimikroba menunjukkan bahwa material LDH pada aluminium foil memiliki kemampuan menghilangkan *Escherichia coli* dengan efisiensi penyisihan mencapai 90,9% dalam waktu 3 jam. Studi ini menunjukkan bahwa LDH pada aluminium foil berpotensi diaplikasikan sebagai agen antimikroba ramah lingkungan dan praktis untuk disinfeksi air, seperti air ceret dalam skala rumah tangga.

Kata kunci: Lapisan Ganda Hidroksida (LDH), aluminium foil, disinfeksi air minum, *Escherichia coli*, adsorpsi patogen

ABSTRACT

Water contamination by pathogenic microorganisms is a global health issue that demands effective and accessible disinfection solutions. This study aims to fabricate an environmentally friendly antimicrobial agent based on Layered Double Hydroxide (LDH) on an aluminum foil substrate that is easily produced and applied for water disinfection. The sheet-like morphology allows for the retrieval of the inherently powdered LDH from the pre-sterilized water in a batch-like manner. Coating the aluminum foil with Mg-Al LDH was achieved by immersing it in an alkaline magnesium solution, resulting in the formation of LDH on the surface. The resulting material was characterized using X-ray Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM) to analyze the crystal structure and surface morphology. Antimicrobial activity tests showed that the LDH material on the aluminum foil effectively removed *Escherichia coli* with a removal efficiency of 90.9% within 3 hours. This study demonstrates the potential of LDH on aluminum foil as a practical and environmentally friendly antimicrobial agent for water disinfection, such as in household-scale water kettles.

Keywords: Layered Double Hydroxide (LDH), aluminum foil, drinking water disinfection, *Escherichia coli*, pathogen adsorption

Citation: Ihsan, T., dan Bachtiar, V. S. (2026). Fabrikasi Agen Antimikroba Ramah Lingkungan Berbasis Lapisan Ganda Hidroksida pada Substrat Aluminium Foil. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(1), 1-6, doi:10.14710/jil.24.1.1-6

1. PENDAHULUAN

Kurangnya air minum dan polusinya telah menjadi perhatian global yang besar, terutama di antara orang-orang yang mengalami kemiskinan di negara-negara berkembang (du Plessis, 2022; Salehi, 2022; World Health Organization, 2023). Mengenai kontaminasi di seluruh dunia, kontaminasi oleh mikroorganisme patogen adalah yang paling umum. Pasokan air keran yang aman adalah cara paling pasti untuk menyediakan air minum yang bebas patogen (Abkar et al., 2024). Bagaimanapun, pasokan air keran

rumit, terutama di daerah miskin dan terpencil, serta karena alasan keuangan. Situasinya sama untuk sumur (Cháuque et al., 2022; Deng, 2021; Nenohai et al., 2023). Oleh karena itu, penduduk di daerah tanpa air ledeng atau sumur saat ini mengolah air minum mereka menggunakan metode *point-of-use* (POU) (Ihsan & Derosya, 2024; Pooi & Ng, 2018).

Lapisan ganda hidroksida (*layered double hydroxide/ LDH*) memiliki prospek dalam disinfeksi untuk pengolahan air. Sudah diketahui bahwa LDH menjerap sebagian besar mikroorganisme dan virus

(Ihsan et al., 2023; Liu et al., 2013). Namun, karena LDH terbentuk dalam bubuk berukuran nano, tidak mudah untuk memisahkannya dari larutan berair setelah pengolahan. Akibatnya, memperoleh LDH dalam bentuk lembaran lebih disukai karena lebih mudah ditangani. Diketahui juga bahwa LDH dapat diproduksi langsung pada permukaan pelat aluminium (Fukugaichi et al., 2022). Penelitian sebelumnya telah memperkenalkan foil LDH yang mudah disiapkan yang diperoleh dengan mengolah foil aluminium dengan air laut dan NaOH pada suhu ruangan sebagai alat sanitasi POU baru (Johan et al., 2023). Foil LDH ini berhasil menyerap sebagian besar spesies *Escherichia coli* (*E. coli*) dari air. Foil LDH memiliki keuntungan karena mudah disiapkan, dapat digunakan dengan mudah di rumah, dan tidak memberikan rasa atau bau pada air. Akan tetapi, penggunaan air laut sebagai sumber magnesium (Mg) untuk pembuatan LDH memiliki keterbatasan. Tantangan tetap ada, yakni keberadaan air laut yang tidak tersedia di daerah pedalaman, sehingga membatasi aplikasinya sebagai alat disinfeksi POU universal. Oleh karena itu, diperlukan strategi baru yang menggunakan bahan baku alternatif yang mudah diperoleh, aman, dan tersedia secara lokal untuk memproduksi foil LDH yang efektif. Penelitian ini menyajikan kebaruan dengan memanfaatkan pupuk sebagai sumber Magnesium (Mg) pengganti air laut untuk fabrikasi foil LDH. Penggunaan bahan baku yang mudah diakses ini sangat penting untuk mewujudkan alat disinfeksi air yang dapat diproduksi sendiri oleh masyarakat (*self-made*) guna mendukung ketersediaan air minum bersih di daerah pedesaan dan terpencil.

Berdasarkan hal di atas, penelitian ini mencakup dua metode untuk menyiapkan foil LDH dan karakteristiknya. Kesederhanaan proses penyiapan foil LDH dipertimbangkan berdasarkan kemudahan ketersediaan bahan dalam pembentukan foil LDH. Dalam penelitian ini, kebaruan utamanya adalah menggunakan bahan pengganti air laut, yaitu sumber magnesium dari pupuk, dalam fabrikasi foil LDH. Pendekatan ini bertujuan untuk merancang alat antibakteri yang berkelanjutan, aman, dan mudah digunakan untuk mendisinfeksi air. Alat-alat ini berbeda dari yang disediakan atau diperoleh oleh pemerintah, seperti klorin, alat penyaringan, hingga flokulan. Sebaliknya, individu dan masyarakat dapat membuat dan memanfaatkannya sama mudahnya seperti merebus air ataupun disinfeksi tenaga surya.

Sasaran utamanya adalah untuk menyediakan solusi bagi daerah pedesaan dan terpencil di mana memperoleh air bersih dapat menjadi tantangan. Strategi yang diuraikan dalam studi ini disesuaikan untuk memenuhi kebutuhan dan atribut khusus untuk masing-masing kawasan di negara berkembang. Strategi tersebut dimaksudkan untuk membantu para pemimpin masyarakat dan individu menyiapkan sistem disinfeksi air yang efektif. Dengan demikian, tujuan penelitian ini adalah untuk memfabrikasi agen antimikroba ramah lingkungan berbasis LDH pada

substrat aluminium foil yang mudah diproduksi dan diaplikasikan untuk disinfeksi air minum.

2. METODE PENELITIAN

Dalam pembuatan foil LDH, dilakukan dalam dua perlakuan; perlakuan pendahuluan dan perlakuan utama (Johan et al., 2023). Aluminium foil komersial dipotong persegi (25 cm²). Satu potongan direndam dalam larutan 0,2 M NaOH selama 5 menit untuk melarutkan lapisan permukaan aluminium oksida; langkah ini disebut sebagai perlakuan pendahuluan. Setelah itu, untuk perlakuan utama, aluminium foil yang telah mendapatkan perlakuan pendahuluan direndam dalam 100 mL larutan alkali MgCl₂ atau Mg(NO₃)₂ yang ditambahkan dengan 1 M NaOH 1 mL (sehingga pH larutan menjadi ±10). Proses perendaman dibiarkan selama 24 jam. Setelah itu, aluminium foil diangkat, dibilas dengan air suling, dikering-anginkan, dan digunakan sebagai aluminium foil LDH. Berikutnya, foil LDH dilakukan analisis difraksi sinar-X (XRD) dari sampel foil LDH menggunakan Bruker D8 Advance dengan radiasi CuKα pada 40 kV dan 40 mA.

Dalam percobaan disinfeksi, peralatan dan larutan disterilkan pada suhu 121°C selama 20 menit dengan *autoclave*, kecuali untuk larutan TSB yang mengandung biakan *E. coli* sekitar 10⁸ CFU/mL. Larutan ini disiapkan dengan inkubasi pada suhu 37 °C lalu diencerkan dengan air suling hingga mencapai 10⁵ CFU/mL. Terakhir, 1 mL larutan dicampur dengan 99 mL air suling dalam botol 200 mL untuk menyiapkan larutan uji dengan jumlah biakan *E. coli* sekitar 10³ CFU/mL. Tahapan berikutnya, botol sampel dikocok pada suhu 25 °C dan kecepatan 80 rpm selama 24 jam dengan dan tanpa menambahkan selembar foil LDH. Perubahan jumlah *E. coli* yang hidup dari larutan uji ditentukan dari waktu ke waktu menggunakan metode *plate count* menggunakan agar *lysogeny broth* (LB) sebagai media. Percobaan disinfeksi dilakukan secara triplo.

Data jumlah *E. coli* dari percobaan disinfeksi yang dilakukan secara triplo dianalisis untuk mendapatkan nilai rata-rata (*mean*) dan deviasi standar (*standard deviation*) pada setiap titik waktu (0, 3, dan 24 jam). Nilai deviasi standar digunakan untuk merepresentasikan variabilitas data (kesalahan eksperimental) dan ditampilkan sebagai batang galat (*error bar*) pada grafik hasil, yang menunjukkan keandalan setiap pengukuran. Efisiensi penyisihan bakteri dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Efisiensi Penyisihan (E)} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0}$$

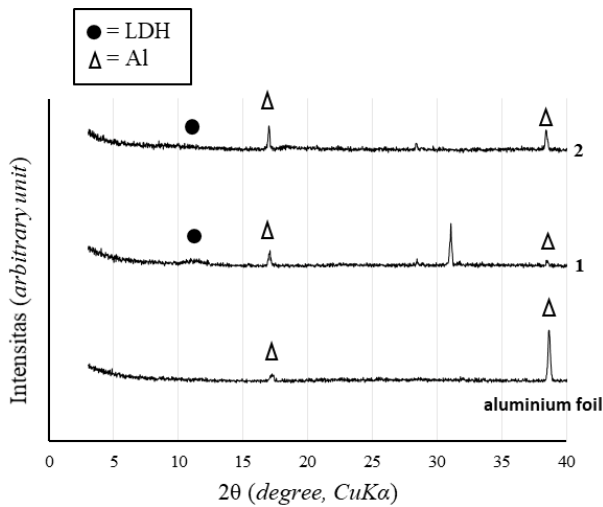
di mana C₀ adalah konsentrasi awal *E. coli* (CFU/mL) dan C_t adalah konsentrasi *E. coli* (CFU/mL) pada waktu t.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik Foil LDH

Karakteristik fisik foil LDH berdasarkan metode ini, seperti yang diringkas dalam Tabel 1. Gambar 1

menampilkan pola XRD dari aluminium foil dan foil LDH yang telah diberi perlakuan menggunakan $MgCl_2$ dan $Mg(NO_3)_2$. Pola XRD memberikan informasi penting mengenai struktur kristal dan fasa material yang dianalisis.



Gambar 1. Pola Difraksi Sinar-X (XRD) dari Aluminium Foil dan Foil LDH dengan Perlakuan Menggunakan (1) $MgCl_2$ dan (2). $Mg(NO_3)_2$

Berdasarkan Gambar 1, terdapat puncak yang tajam dan intens pada 2θ sekitar 38° dan 45° merupakan karakteristik dari aluminium (Al). Puncak ini muncul pada semua sampel, baik aluminium foil maupun foil LDH, menunjukkan bahwa aluminium masih menjadi komponen utama dalam foil LDH.

Puncak LDH teramati pada 2θ sekitar 11° dan 23° , namun dengan intensitas yang relatif lemah. Hal ini mengindikasikan bahwa kandungan LDH dalam foil relatif rendah dan kristalinitasnya juga rendah. Kristalinitas yang rendah dapat disebabkan oleh beberapa faktor, terutama karena metode sintesis yang digunakan. Metode perendaman pada suhu ruang dan waktu perendaman yang relatif singkat (24 jam), seperti yang dilakukan dalam penelitian ini, cenderung menghasilkan pertumbuhan kristal LDH yang tidak sempurna (rendah kristalinitas) dan ukuran kristal yang sangat kecil. Fukugaichi et al. (2022) juga melaporkan bahwa sintesis LDH pada substrat aluminium pada suhu kamar dapat menghasilkan film yang kurang kristalin dibandingkan dengan sintesis hidrotermal yang

melibatkan suhu dan tekanan tinggi. Selain itu, adanya cacat pada struktur kristal atau keberadaan fasa amorf juga dapat menjadi kontributor.

Lebih lanjut, sintesis LDH secara in situ langsung pada permukaan substrat aluminium foil cenderung menghasilkan lapisan LDH yang tipis. Intensitas puncak XRD yang lemah ini tidak selalu berarti kegagalan sintesis, melainkan mengkonfirmasi bahwa lapisan LDH yang terbentuk sangat tipis dan mungkin memiliki orientasi kristal yang tidak sempurna di permukaan foil, sehingga sinyal difraksi dari kristal LDH menjadi kurang dominan dibandingkan substrat aluminium (Ihsan et al., 2025).

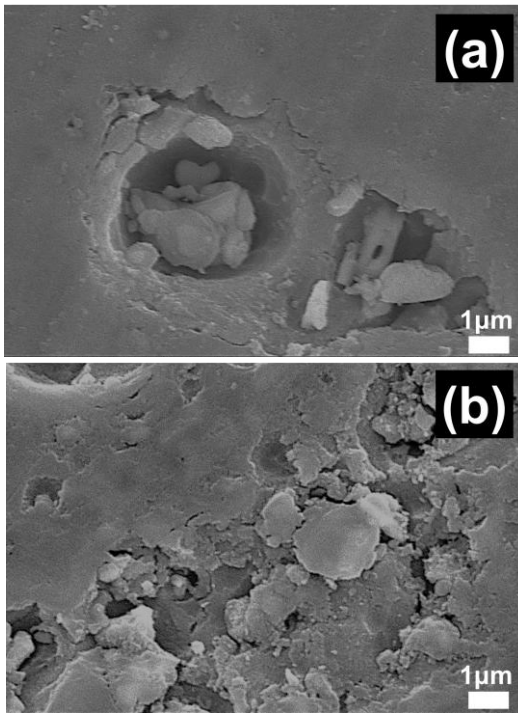
Selain itu terdapat perbedaan intensitas puncak LDH pada foil yang diberi perlakuan $MgCl_2$ dan $Mg(NO_3)_2$. Puncak LDH pada foil $MgCl_2$ tampak sedikit lebih intens dibandingkan foil $Mg(NO_3)_2$. Hal ini menunjukkan bahwa jenis anion pada larutan prekursor dapat mempengaruhi proses pembentukan dan kristalinitas LDH.

Meskipun kristalinitasnya rendah, gambar SEM pada Gambar 2 menunjukkan adanya kemungkinan struktur kristal LDH. LDH umumnya memiliki morfologi platelet heksagonal yang khas. Pada Gambar 2 ini, morfologi tersebut tidak terlihat dengan jelas. Struktur yang tampak, lebih menyerupai agregat partikel dengan bentuk yang tidak beraturan. Meskipun XRD menunjukkan adanya puncak LDH, intensitasnya yang rendah mengindikasikan kemungkinan adanya fasa amorf dalam material tersebut. Fasa amorf ini dapat menyebabkan struktur yang tampak pada gambar SEM menjadi kurang teratur. Namun hal ini juga menyiratkan bahwa LDH tumbuh langsung dari permukaan.

Selain itu, foil LDH dalam penelitian ini, menunjukkan adanya fenomena perubahan warna pada permukaan foil, mirip dengan hampir semua foil yang diambil sampelnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Fenomena ini dapat dikaitkan dengan beberapa faktor, diantaranya aluminium dapat teroksidasi membentuk lapisan oksida aluminium yang berwarna kecoklatan. Oksidasi ini dapat terjadi selama proses sintesis atau selama penyimpanan. Perlu penelitian lebih lanjut untuk dapat menjelaskan fenomena ini.

Tabel 1. Karakteristik fisik sampel foil LDH

No sampel	Perlakuan Pendahuluan	Perlakuan Utama		pH	Warna foil
		Reagen	Larutan		
1	0,2M NaOH 50 mL	1M NaOH 1 mL	0,05M $MgCl_2$ 100 mL	10,16	Coklat terang
2	0,2M NaOH 50 mL	1M NaOH 1 mL	0.05M $Mg(NO_3)_2$ 100 mL	10,13	Perak k keabuan



Gambar 2. Hasil Analisis SEM dari Sampel Foil LDH dengan Perlakuan Rendaman Menggunakan Larutan (a) $MgCl_2$ dan (b) $Mg(NO_3)_2$



Gambar 3. Foto Penampakan (1) Aluminium Foil dan Foil LDH dengan Perlakuan Rendaman Menggunakan Larutan (2) $MgCl_2$, (3) $Mg(NO_3)_2$

Prinsipnya, foil LDH dapat dengan mudah disintesis dengan merendamnya dalam semua larutan alkali di atas pada suhu kamar. Metode yang digunakan berdampak signifikan pada komposisi

kimia, ukuran partikel, bentuk, dan keadaan agregasi LDH. Hal ini membuka kemungkinan untuk memproduksi foil LDH sesuai permintaan.

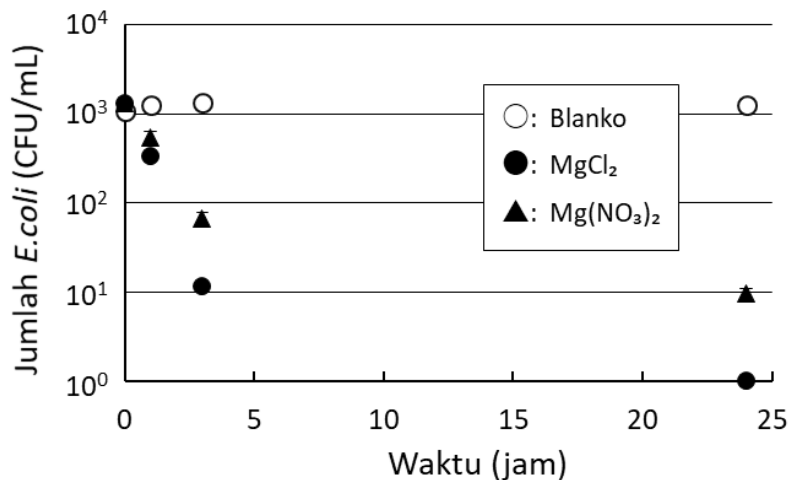
3.2. Kemampuan Disinfeksi Foil LDH

Hasil penelitian menunjukkan perbedaan signifikan antara jumlah *E. coli* yang hidup pada larutan blanko dengan larutan yang ditambahkan foil LDH. Pada larutan blanko tanpa foil LDH, jumlah *E. coli* yang hidup relatif konstan pada kisaran 10^3 CFU/mL selama 24 jam pengamatan (Gambar 4). Hal ini menunjukkan bahwa *E. coli* dapat bertahan hidup dan berkembang biak dalam air tanpa adanya intervensi.

Namun, ketika foil LDH ditambahkan ke dalam larutan uji, terjadi penurunan jumlah *E. coli* yang hidup secara drastis. Dalam waktu 3 jam, jumlah *E. coli* yang hidup telah berkurang lebih dari setengahnya. Penurunan ini terus berlanjut hingga mencapai kurang dari 10 CFU/mL setelah 24 jam, bahkan mencapai nol CFU/mL pada larutan uji yang diberi foil LDH dengan perlakuan menggunakan $MgCl_2$.

Fenomena ini mengindikasikan efektivitas foil LDH dalam mengurangi jumlah *E. coli* yang hidup di dalam air. Mengingat LDH diketahui tidak beracun bagi bakteri (Forano et al., 2018), penurunan jumlah *E. coli* yang hidup ini dapat dikaitkan dengan mekanisme adsorpsi, di mana *E. coli* terjerat dan menempel pada permukaan foil LDH.

Bergantung pada hasil disinfeksi, hal ini memperkuat bahwa dua pendekatan yang kami terapkan dapat menghilangkan 58,7-90,9% *E. coli* dalam air dalam waktu 3 jam. Setelah 24 jam, tingkat eliminasi meningkat menjadi 94,8-100%, berkat keterlibatan LDH. Temuan kami menunjukkan bahwa penggunaan foil LDH untuk memurnikan air minum memerlukan evaluasi menyeluruh atas kelebihan dan kekurangannya. Kami memeriksa tampilan bubuk, reagen yang digunakan, dan menyiapkan larutan untuk menentukan efektivitas foil LDH



Gambar 4. Perubahan Jumlah Viabilitas *E. coli* pada Waktu yang Berbeda Setelah Penambahan Foil LDH, dengan Jumlah Viabilitas Awal Sekitar 10^3 CFU/mL. Batang Galat Menunjukkan Standar Deviasi. Jumlah *E. coli* pada Sampel Foil dengan $MgCl_2$ di 24 Jam adalah Nol

3.3. Mekanisme Adsorpsi dan Interaksi LDH dengan *E. coli*

LDH memiliki struktur berlapis unik yang menghasilkan muatan positif pada permukaannya. Muatan positif ini berperan penting dalam mekanisme adsorpsi dan interaksi dengan bakteri *E. coli* yang bermuatan negatif (Ihsan et al., 2023). Proses ini diawali dengan adsorpsi elektrostatis, di mana gaya tarik elektrostatis antara permukaan LDH dan dinding sel bakteri menyebabkan *E. coli* terjerat dan menempel pada permukaan LDH. Selain interaksi elektrostatis, kemungkinan juga terjadi interaksi kimia antara gugus hidroksil (OH⁻) pada permukaan LDH dengan gugus fungsional pada dinding sel bakteri, seperti ikatan hidrogen. Menariknya, anion pada lapisan interlayer LDH, seperti Cl⁻ atau NO³⁻, juga turut berperan dalam interaksi dengan *E. coli*, baik melalui pertukaran ion maupun interaksi elektrostatis (Forano et al., 2018; Johnston et al., 2021; Qiao et al., 2025; Xuan et al., 2025).

Setelah teradsorpsi, material LDH dapat memicu kerusakan pada dinding sel *E. coli*. Kerusakan ini dapat terjadi melalui beberapa mekanisme. Pertama, LDH dapat menghasilkan spesies oksigen reaktif (ROS) yang bersifat merusak membran sel bakteri, menyebabkan stres oksidatif (Sies et al., 2022). Kedua, struktur berlapis LDH yang tajam dapat secara fisik menusuk dan merusak dinding sel bakteri (Mishra et al., 2018). Kerusakan dinding sel ini pada akhirnya menyebabkan kebocoran isi sel dan gangguan fungsi seluler *E. coli*. Akibatnya, bakteri akan mengalami kematian atau penghambatan pertumbuhan (Kawai et al., 2023).

Penting untuk dicatat bahwa efisiensi adsorpsi dan disinfeksi ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, di antaranya pH larutan, konsentrasi awal bakteri, waktu kontak, jenis dan konsentrasi anion pada interlayer LDH, serta ukuran dan morfologi material LDH itu sendiri. Pemahaman mendalam mengenai mekanisme interaksi antara LDH dengan *E. coli* ini sangat krusial untuk optimasi material LDH dan kondisi operasional, dengan tujuan meningkatkan efisiensi disinfeksi air.

3.4. Tantangan dan Penelitian Masa Depan

Meskipun hasil penelitian ini menunjukkan potensi foil LDH sebagai agen antimikroba untuk disinfeksi air, masih terdapat beberapa tantangan yang perlu diatasi dan penelitian lanjutan yang perlu dilakukan untuk mengoptimalkan material dan aplikasinya.

Salah satu tantangan utama adalah meningkatkan skalabilitas produksi foil LDH agar dapat diproduksi secara massal dengan biaya yang efisien. Metode pelapisan yang digunakan dalam penelitian ini relatif sederhana, namun perlu dioptimalkan untuk produksi dalam skala besar. Beberapa aspek yang perlu dipertimbangkan antara lain efisiensi penggunaan bahan baku, penggunaan peralatan yang mudah diakses dan beroperasi serta kontrol kualitas produk foil LDH

Penelitian ini telah menunjukkan efektivitas foil LDH dalam menghilangkan *E. coli*. Namun, mekanisme antibakteri yang terlibat perlu diinvestigasi lebih lanjut. Penelitian mendalam mengenai interaksi antara LDH dengan bakteri, termasuk identifikasi jenis interaksi kimia dan produksi ROS, dapat memberikan pemahaman yang lebih baik dan memungkinkan optimasi material untuk meningkatkan aktivitas antibakteri.

Fabrikasi foil LDH perlu diuji pada berbagai jenis air, termasuk air tanah dan air permukaan. Kondisi air yang berbeda-beda apakah dapat mempengaruhi kinerja foil LDH atau tidak. Selain itu, studi lebih lanjut diperlukan untuk mengevaluasi efektivitas foil LDH pada jenis model patogen (bakteri atau virus) lainnya serta kondisi air yang sebenarnya.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menunjukkan potensi Lapisan Ganda Hidroksida (LDH) pada aluminium foil sebagai agen antimikroba ramah lingkungan untuk disinfeksi air. Metode kopresipitasi yang digunakan terbukti efektif dalam fabrikasi material LDH pada substrat aluminium foil, menghasilkan struktur yang terkonfirmasi melalui analisis XRD dan morfologi yang diamati dengan SEM. Material ini menunjukkan aktivitas antimikroba yang signifikan terhadap *Escherichia coli*, dengan efisiensi penyisihan mencapai 90.9% dalam waktu 3 jam.

Implikasi ilmiah dari studi ini adalah penegasan bahwa mekanisme adsorpsi elektrostatis LDH, yang didorong oleh muatan positif permukaannya terhadap bakteri *E. coli* yang bermuatan negatif, tetap efektif meskipun LDH disintesis sebagai lapisan tipis dengan kristalinitas rendah pada substrat foil. Secara praktis, keberhasilan fabrikasi foil LDH menggunakan sumber magnesium alternatif dari pupuk menunjukkan sebuah terobosan untuk menghasilkan alat disinfeksi air POU yang dapat diproduksi secara swadaya (*self-made*) oleh masyarakat di daerah pedesaan atau terpencil yang kekurangan akses air laut dan sumber daya disinfeksi konvensional. Dengan demikian, LDH pada aluminium foil berpotensi dikembangkan lebih lanjut sebagai alternatif disinfektan air yang ramah lingkungan, mudah diakses, dan dapat diaplikasikan pada berbagai skala, termasuk untuk penggunaan rumah tangga.

Meskipun demikian, terdapat keterbatasan yang perlu diatasi. Terutama, kristalinitas LDH yang rendah seperti teramati dalam analisis XRD, serta perlunya optimasi skalabilitas produksi foil LDH agar dapat diproduksi massal secara efisien. Oleh karena itu, penelitian di masa depan disarankan untuk menginvestigasi mekanisme antibakteri yang lebih mendalam, termasuk identifikasi interaksi kimia dan produksi spesies oksigen reaktif (ROS). Selain itu, evaluasi efektivitas foil LDH pada berbagai jenis air (air tanah, air permukaan) dan spektrum patogen yang lebih luas (seperti virus atau bakteri lain) adalah krusial untuk memvalidasi aplikasi material ini dalam kondisi lingkungan nyata.

DAFTAR PUSTAKA

- Abkar, L., Moghaddam, H. S., & Fowler, S. J. (2024). Microbial ecology of drinking water from source to tap. *Science of The Total Environment*, 908, 168077. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168077>
- Chaúque, B. J. M., Benetti, A. D., & Rott, M. B. (2022). Epidemiological and immunological gains from solar water disinfection: Fact or wishful thinking? *Tropical Medicine & International Health*, 27(10), 873–880. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/tmi.13807>
- Deng, Y. (2021). Making Waves: Principles for the Design of Sustainable Household Water Treatment. *Water Research*, 198, 117151. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117151>
- du Plessis, A. (2022). Persistent degradation: Global water quality challenges and required actions. *One Earth*, 5(2), 129–131. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.01.005>
- Forano, C., Bruna, F., Mousty, C., & Prevot, V. (2018). Interactions between Biological Cells and Layered Double Hydroxides: Towards Functional Materials. *The Chemical Record*, 18(7–8), 1150–1166. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/tcr.201701012>
- Fukugaichi, S., Tomosugi, Y., & Aono, H. (2022). Facile synthesis of hydrophilic layered double hydroxide film on aluminum plate. *Inorganic Chemistry Communications*, 109647.
- Ihsan, T., & Derosya, V. (2024). Drinking water problems in rural areas: Review of point-of-use methods to improve water quality and public health. *Larhyss Journal*, 58, 55–71.
- Ihsan, T., Johan, E., Fukugaichi, S., & Matsue, N. (2023). Enhancing rural drinking water safety using an Mg–Al-type layered double hydroxide foil as a new point-of-use disinfection tool. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 13(11), 921–930. <https://doi.org/10.2166/washdev.2023.206>
- Ihsan, T., Novia, F., Derosya, V., Ediharsi, T. A., & Azzahra, A. (2025). Sustainable layered double hydroxide foils: Calcium hydroxide and alternative magnesium sources for rapid point-of-use water disinfection in rural and disaster settings. *Journal of Ecological Engineering*, 26(11), 342–350. <https://doi.org/10.12911/22998993/208261>
- Johan, E., Ihsan, T., Fukugaichi, S., & Matsue, N. (2023). Aluminum foil immersed in alkalized seawater removes *Escherichia coli* from household drinking water. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 13(9), 681–686. <https://doi.org/10.2166/washdev.2023.057>
- Johnston, A.-L., Lester, E., Williams, O., & Gomes, R. L. (2021). Understanding Layered Double Hydroxide properties as sorbent materials for removing organic pollutants from environmental waters. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105197. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105197>
- Kawai, Y., Kawai, M., Mackenzie, E. S., Dashti, Y., Kepplinger, B., Waldron, K. J., & Errington, J. (2023). On the mechanisms of lysis triggered by perturbations of bacterial cell wall biosynthesis. *Nature Communications*, 14(1), 4123. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39723-8>
- Liu, J., Duan, C., Zhou, J., Li, X., Qian, G., & Xu, Z. P. (2013). Adsorption of bacteria onto layered double hydroxide particles to form biogranule-like aggregates. *Applied Clay Science*, 75–76, 39–45. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.02.007>
- Mishra, G., Dash, B., & Pandey, S. (2018). Layered double hydroxides: A brief review from fundamentals to application as evolving biomaterials. *Applied Clay Science*, 153, 172–186. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.12.021>
- Nenohai, J. A., Minata, Z. S., Ronggopuro, B., Sanjaya, E. H., & Utomo, Y. (2023). Penggunaan Karbon Aktif dari Biji Kelor dan Berbagai Biomassa Lainnya dalam Mengatasi Pencemaran Air : Analisis Review. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(1), 29–35. <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/jil.21.1.29-35>
- Pooi, C. K., & Ng, H. Y. (2018). Review of low-cost point-of-use water treatment systems for developing communities. *Npj Clean Water*, 1(1), 11. <https://doi.org/10.1038/s41545-018-0011-0>
- Qiao, Y., Li, Y., Wang, Y., & Qiu, J. (2025). Layered double hydroxide for electrochemical ion separation. *Desalination*, 596, 118353. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118353>
- Salehi, M. (2022). Global water shortage and potable water safety; Today's concern and tomorrow's crisis. *Environment International*, 158, 106936. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106936>
- Sies, H., Belousov, V. V., Chandel, N. S., Davies, M. J., Jones, D. P., Mann, G. E., Murphy, M. P., Yamamoto, M., & Winterbourn, C. (2022). Defining roles of specific reactive oxygen species (ROS) in cell biology and physiology. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 23(7), 499–515. <https://doi.org/10.1038/s41580-022-00456-z>
- World Health Organization. (2023). *Drinking-water*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Xuan, Y., Feng, X., Liu, S., & Liu, X. (2025). Layered double hydroxide-based membranes for advanced water treatment: Structural engineering and multifunctional applications. *Chemical Engineering Journal*, 511, 161746. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.161746>