

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Diare masih menjadi salah satu penyebab utama kematian pada anak, dan sebagian besar kasusnya berkaitan langsung dengan konsumsi air minum yang terkontaminasi fekal. Kondisi ini menegaskan bahwa pengendalian kualitas air minum, khususnya terhadap bakteri indikator seperti *Escherichia coli* (*E. coli*), merupakan kebutuhan yang sangat mendesak. Berdasarkan laporan WHO, diare tercatat sebagai penyebab kematian ketiga terbanyak pada anak usia 1–59 bulan dengan jumlah kematian sekitar 505.000 kasus setiap tahun, diakibatkan oleh konsumsi air minum yang terkontaminasi fekal. Infeksi paling umum berasal dari *E. coli*, *Salmonella*, *Shigella*, serta parasit seperti *Cryptosporidium* dan *Giardia* (WHO, 2024).

Di Indonesia sendiri, diare tetap menjadi masalah endemik dan penyebab utama kematian pada balita dan bayi. Kontaminasi mikrobiologis, terutama oleh bakteri seperti *E. coli*, menjadi indikator utama kualitas air minum yang tidak higienis. Pemilihan *E. coli* sebagai target utama dalam penelitian ini sangat krusial karena bakteri tersebut merupakan indikator universal kontaminasi fekal yang memiliki standar baku mutu "*zero tolerance*" (0 koloni/100 mL) baik dalam regulasi nasional maupun internasional seperti WHO sehingga keberadaannya dalam jumlah sekecil apa pun menandakan risiko kesehatan yang serius (Kementrian Kesehatan, 2023).

Pengolahan air minum skala rumah tangga atau metode *point-of-use* (POU) telah banyak dikembangkan sebagai solusi praktis, khususnya di wilayah yang tidak memiliki infrastruktur pengolahan air terpusat (Ihsan & Derosya, 2024). Namun, berbagai teknologi POU yang ada saat ini masih menghadapi sejumlah keterbatasan. Metode perebusan, misalnya, membutuhkan bahan bakar dan berpotensi menghasilkan emisi CO₂ yang tinggi. Klorinasi berisiko menimbulkan produk sampingan desinfeksi yang dapat membahayakan kesehatan, sementara metode *Solar Water Disinfection* (SODIS) sangat bergantung pada kondisi cuaca

dan masih memerlukan penguatan bukti efektivitas (Nair dkk., 2023). Selain itu, penggunaan adsorben konvensional seperti karbon aktif dan zeolit meskipun efektif, tetap memiliki kendala berupa biaya operasional yang relatif tinggi serta masalah teknis pada proses pemisahan, karena bentuknya yang serbuk dapat meninggalkan residu pada air hasil olahan (Ristiyanto, 2020). Oleh karena itu, masih dibutuhkan teknologi pengolahan air minum skala rumah tangga yang mampu bekerja secara efektif dalam menonaktifkan bakteri, ekonomis, aman, mudah diterapkan, dan adaptif pada berbagai kondisi, termasuk di wilayah dengan keterbatasan sumber daya.

Meskipun metode konvensional klorinasi (kaporit) dan radiasi sinar UV efektif dalam disinfeksi skala cepat, keduanya memiliki keterbatasan pada implementasi darurat skala rumah tangga. Klorinasi berisiko tinggi menghasilkan produk sampingan disinfeksi (*disinfection by-products*) berupa senyawa karsinogenik *trihalometana* (THMs) apabila bereaksi dengan zat organik air pascabencana (Ihsan dkk., 2025) sedangkan teknologi sinar UV sangat bergantung pada ketersediaan jaringan energi listrik yang umumnya lumpuh total di wilayah bencana (Ihsan dan Derosya, 2024).

Material *Layered Double Hydroxide* (LDH) menawarkan efektivitas disinfeksi yang lebih tinggi dibandingkan adsorben konvensional melalui mekanisme penyerapan yang bersifat spesifik. Secara mekanistik, LDH memiliki struktur berlapis dengan muatan permukaan positif yang kuat, sehingga mampu menarik dan menjerat dinding sel bakteri termasuk *E. coli* yang secara alami bermuatan negatif melalui interaksi elektrostatis (*Coulomb*) (Forano dkk., 2018). Keunggulan ini memungkinkan LDH tidak hanya bekerja sebagai penyaring fisik, tetapi juga sebagai agen penonaktif bakteri yang selektif, efisien, serta tidak bergantung pada penggunaan bahan kimia tambahan maupun energi panas.

Efektivitas LDH sebagai material penyisihan terhadap *E. coli* dibuktikan dalam berbagai penelitian. Penelitian oleh Johan dkk., (2023) menunjukkan bahwa LDH Foil mampu menurunkan konsentrasi *E. coli* dari sekitar 10^3 CFU/mL menjadi hampir nol dalam waktu kontak 24 jam. Sementara itu, penelitian oleh Ihsan dkk., (2025) melaporkan bahwa pelat LDH mampu menurunkan *E. coli* hingga 99%

dalam 3 jam dan mencapai eliminasi total setelah 24 jam. Namun, penelitian-penelitian tersebut masih menggunakan prekursor laboratorium seperti $\text{Mg}(\text{OH})_2$, NaOH , atau reagen kimia murni yang relatif mahal dan tidak mudah diperoleh masyarakat. Oleh karena itu, penelitian ini mencoba menyederhanakan proses sintesis dengan memanfaatkan pupuk MgSO_4 dan abu soda sebagai bahan yang lebih murah dan mudah diakses tanpa mengurangi potensi pembentukan Mg-Al LDH.

Sintesis *in-situ* LDH tipe Magnesium-Aluminium (Mg-Al LDH) pada permukaan aluminium foil komersial. Mg-Al LDH merupakan tipe LDH paling sering dijumpai dan digunakan (Neto dkk., 2021). Aluminium foil digunakan sebagai substrat karena mudah diperoleh, murah, dan memiliki fleksibilitas tinggi. Produk yang dihasilkan kemudian disebut sebagai LDH Foil. Penggunaan LDH Foil memungkinkan pengembangan teknologi POU yang portabel, mudah diaplikasikan pada berbagai bentuk wadah, serta memiliki luas permukaan yang memadai untuk pembentukan kristal LDH. Selain itu, format lembaran ini juga menyelesaikan masalah yang umumnya muncul pada adsorben berbentuk serbuk, karena media dapat diangkat dengan mudah setelah proses disinfeksi selesai. Dengan demikian, penelitian ini menawarkan kebaruan berupa proses fabrikasi LDH Foil yang lebih sederhana, ekonomis, dan realistis untuk diterapkan di lapangan dengan memanfaatkan bahan yang mudah diperoleh secara lokal.

Meskipun penelitian LDH telah berkembang, terdapat celah penelitian bahwa pengembangan LDH dalam bentuk lembaran atau foil sebelumnya masih sangat bergantung pada reagen kimia murni yang mahal, berbahaya, dan prosedur penyiapan yang rumit (Johan dkk., 2024; Ihsan & Derosya, 2024), sehingga sulit diaplikasikan di daerah dengan keterbatasan sumber daya atau wilayah bencana. Kebaruan penelitian ini terletak pada simplifikasi fabrikasi LDH Foil menggunakan prekursor lokal yang murah dan mudah diakses, yaitu pupuk magnesium sulfat (MgSO_4) dan abu soda (Na_2CO_3). Pendekatan ini mengadaptasi metode Fukugaichi dkk., (2022) namun dengan modifikasi signifikan pada efisiensi tahapan perendaman dan penggunaan bahan-bahan non-laboratoris.

Air baku yang disimulasikan di latar belakang adalah fluida statis yang telah tercemar oleh bakteri *E. coli* melampaui baku mutu Permenkes No. 2 Tahun 2023 (0 koloni/100 mL). Fenomena ini banyak ditemui pada air sumur dangkal masyarakat akibat jarak *septic tank* yang dekat, serta pada Depot Air Minum Isi Ulang (DAMIU) yang sistem disinfeksi UV-nya kurang terawat, maupun air minum pada rumah makan. Latar belakang penelitian ini juga menyoroti kondisi air pascabencana (seperti banjir), bahwa fluida air berubah menjadi sangat keruh, bercampur dengan material organik, dan berpotensi membawa patogen dalam jumlah masif. Pada kondisi darurat tersebut, akses terhadap energi atau infrastruktur pengolahan air bersih terputus. Oleh karena itu, dibutuhkan teknologi POU yang mandiri, dengan lembaran LDH foil ini dirancang sebagai pengolahan portabel yang cukup dicelupkan ke dalam fluida air tercemar tersebut untuk mereduksi mikroorganisme secara cepat melalui interaksi elektrostatis.

Dalam membuktikan efektivitas dan validitas kinerjanya, LDH Foil ini tidak hanya diuji pada air skala laboratorium yang diinokulasi bakteri secara terkontrol, tetapi juga diujikan pada sampel air minum yang terkontaminasi secara alami (seperti air dari depot isi ulang). Pendekatan ini sangat penting untuk mengevaluasi kinerja LDH Foil dalam matriks air yang lebih kompleks dan memastikan teknologinya dapat diaplikasikan pada kondisi nyata di masyarakat. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat menawarkan solusi disinfeksi air yang ekonomis dan praktis guna mendukung pencapaian SDGs poin 6 tentang Air Bersih dan Sanitasi.

1.2. Maksud dan Tujuan Penelitian

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengembangkan inovasi solusi teknologi pengolahan air minum yang berkelanjutan dan ekonomis pada skala *point-of-use* (POU) melalui fabrikasi LDH Foil. Hal ini dilakukan melalui sintesis *in-situ* material Magnesium-Aluminium *Layered Double Hydroxide* (Mg-Al LDH) pada substrat berbasis bahan lokal dan prekursor murah seperti pupuk magnesium sulfat (MgSO_4) dan abu soda (Na_2CO_3).

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis karakterisasi LDH Foil yang terbentuk untuk mengidentifikasi struktur kristalin, morfologi, dan komposisi elemental guna mengonfirmasi keberhasilan pembentukan lapisan Mg-Al LDH.
2. Mengevaluasi efektivitas LDH Foil dalam menyisihkan *E. coli* melalui uji *batch* pada dua jenis sampel air:
 - (a) air *akuades* yang diinokulasi *E. coli* pada skala laboratorium, dan;
 - (b) air minum dari depot isi ulang yang terkontaminasi secara alami.
3. Mengevaluasi risiko sekunder dari aplikasi LDH Foil melalui pengukuran pelepasan ion aluminium (Al) ke dalam air hasil olahan, guna memastikan hasil olahan tersebut memenuhi baku mutu yang dipersyaratkan.

1.3. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah:

1. Bagi Masyarakat
 - a. Menyediakan alternatif teknologi pengolahan air minum yang murah, mudah diaplikasikan, dan efektif dalam mengurangi risiko penyakit akibat *E. coli*.
 - b. Meningkatkan akses terhadap air bersih di daerah yang kesulitan menggunakan teknologi konvensional.
2. Bagi Ilmu Pengetahuan
 - a. Memberikan kontribusi baru dalam rekayasa material antibakteri, khususnya mengenai optimasi sintesis *in-situ* Mg-Al LDH pada substrat fleksibel sebagai media disinfeksi air.
 - b. Memperluas pemahaman mengenai mekanisme interaksi elektrostatis antara permukaan bermuatan positif material LDH dengan dinding sel bakteri patogen.
 - c. Menjadi referensi ilmiah untuk penelitian lanjutan mengenai aplikasi LDH dalam bidang lingkungan dan kesehatan.
3. Bagi Lingkungan
 - a. Membuka peluang pengembangan teknologi filtrasi air minum yang ramah lingkungan, dengan memanfaatkan bahan yang relatif murah dan mudah diperoleh (aluminium foil + pupuk MgSO_4).

- b. Mengurangi limbah padat melalui pemanfaatan aluminium foil sebagai bahan baku fungsional dalam sistem pengolahan air.
 - c. Mengurangi ketergantungan pada media filtrasi impor atau mahal, sehingga mendorong kemandirian teknologi pengolahan air dalam negeri.
4. Bagi Kesehatan
- a. Mengurangi risiko penyakit bawaan air (*waterborne diseases*) seperti diare, disentri, dan infeksi usus akibat kontaminasi *Escherichia coli*.
 - b. Mendukung pencapaian SDGs poin 6 (*Clean Water and Sanitation*).

1.4. Ruang Lingkup

Ruang lingkup pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan pada Maret hingga Juni 2026 di Laboratorium Mikrobiologi Lingkungan dan Laboratorium Penelitian, Departemen Teknik Lingkungan Universitas Andalas.
2. Pembentukan Mg-Al LDH pada penelitian ini menggunakan:
 - a. Aluminium foil komersial sebagai sumber ion Al^{3+} sekaligus substrat pembentukan LDH.
 - b. Pupuk magnesium sulfat ($MgSO_4$) sebagai sumber ion Mg^{2+} .
 - c. Abu soda (Na_2CO_3) sebagai sumber ion karbonat (CO_3^{2-}) dan agen pembentuk kondisi basa.
 - d. Akuades sebagai media pelarut.

Kombinasi ketiga bahan tersebut memungkinkan terbentuknya lapisan Mg-Al LDH bertipe karbonat (Mg-Al- CO_3 LDH) pada permukaan aluminium foil melalui proses sintesis *in-situ*.

3. Sintesis material LDH Foil dilakukan secara *in-situ* pada permukaan aluminium foil komersial untuk membentuk lapisan Magnesium-Aluminium *Layered Double Hydroxide* (Mg-Al LDH) menggunakan prekursor murah berupa larutan pupuk $MgSO_4$ sebagai sumber ion magnesium dan abu soda (Na_2CO_3) sebagai reagen alkali.
4. Proses fabrikasi LDH Foil dilakukan melalui metode perendaman pada suhu ruang dengan variasi waktu selama 6 jam dan 24 jam untuk membandingkan pengaruh durasi terhadap kualitas pembentukan kristal LDH.

5. Percobaan dilakukan menggunakan dua jenis sampel air:
 - a) Air yang diinokulasi *E. coli* pada skala laboratorium terkontrol, menggunakan *akuades* sebagai media dasar untuk memastikan konsentrasi *E. coli* awal yang seragam (100 CFU/mL).
 - b) Air minum dari rumah makan yang mengisi air minum mereka melalui depot isi ulang yang secara alami mungkin telah terkontaminasi, untuk mengevaluasi kinerja LDH Foil dalam matriks air yang lebih kompleks dan kondisi nyata.
6. Uji penyisihan dilakukan secara *batch* menggunakan LDH Foil sebagai adsorben dengan penambahan 16 cm² LDH Foil ke dalam 100 mL air sampel. Percobaan dilakukan sebanyak tiga kali (*triplo*).
7. Pengujian efektivitas dilakukan dengan pengambilan sampel dalam rentang waktu kontak 0, 3, dan 24 jam.
8. Analisis kualitas mikrobiologi air dilakukan untuk mengukur konsentrasi bakteri *Escherichia coli* menggunakan metode *Colony Forming Unit* (CFU) melalui penanaman sampel pada media selektif, kemudian jumlah koloni khas *E. coli* yang tumbuh dihitung dan dinyatakan dalam satuan CFU/100 mL.
9. Analisis kualitas kimia dibatasi pada pengukuran konsentrasi Aluminium (Al) terlarut dalam air hasil olahan. Hal ini dilakukan sebagai parameter kendali mutu untuk memastikan bahwa proses fabrikasi dan penggunaan LDH Foil tidak menyebabkan peluruhan logam ke dalam air minum yang dapat melampaui batas aman kesehatan.
10. Hasil pengolahan dibandingkan dengan standar kualitas air minum yang berlaku menurut Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023.
11. Karakterisasi morfologi dan struktur LDH Foil dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Energy Dispersive X-Ray* (EDX) dan *X-ray Diffraction* (XRD) guna mengonfirmasi keberhasilan pembentukan fase Mg-Al LDH serta menganalisis rasio molar Mg/Al pada permukaan foil.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini terdiri dari :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, maksud dan tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan penelitian, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas tentang *Escherichia coli* sebagai indikator pencemar air minum, teknologi pengolahan air minum, teori tentang adsorpsi, material *Layered Double Hydroxide* (LDH), serta penelitian-penelitian terdahulu yang relevan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tahapan penelitian yang dilakukan, mulai dari studi literatur, persiapan bahan dan pembuatan aluminium foil berlapis LDH, rancangan reaktor batch skala laboratorium, metode pengujian terhadap air minum terkontaminasi *Escherichia coli*, parameter yang dianalisis, serta lokasi dan waktu penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi hasil karakterisasi material LDH, hasil uji penyisihan *Escherichia coli*, serta pembahasan mengenai efektivitas adsorben LDH dibandingkan dengan teori maupun penelitian terdahulu.

BAB V PENUTUP

Bab ini menyajikan kesimpulan dari hasil penelitian dan memberikan saran untuk penelitian selanjutnya agar pengembangan pemanfaatan LDH dalam pengolahan air minum dapat lebih optimal.