

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ketersediaan air minum yang aman dan layak konsumsi merupakan tantangan global yang terus berkembang, terutama di negara berkembang. Menurut *World Health Organization* (WHO), air minum yang terkontaminasi menyebabkan lebih dari 505.000 kematian akibat diare setiap tahun, dengan mayoritas korban berasal dari bayi dan anak-anak (WHO, 2023). Salah satu kontaminan biologis utama dalam air minum adalah *Escherichia coli* (*E.coli*), yang sering dijadikan indikator kontaminasi fekal (Kristanti dkk., 2022).

Kondisi di Indonesia menunjukkan situasi kontaminasi air minum yang memprihatinkan. UNICEF (2020) melaporkan bahwa hampir 70% sumber air minum rumah tangga di Indonesia terkontaminasi limbah fekal. Penelitian lain menemukan bahwa sekitar 35% Depot Air Minum Isi Ulang (DAMIU) di wilayah Pasar Minggu, Jakarta, terkontaminasi *E.coli* (Rohimah dkk., 2022). Kontaminasi ini menunjukkan bahwa sistem pengolahan skala komersial kecil seperti DAMIU seringkali gagal mempertahankan kualitas mikrobiologis, sehingga memerlukan solusi disinfeksi di tingkat *Point-of-Use* (POU). Masalah ini semakin serius pada daerah pasca bencana, di mana akses terhadap sumber air bersih sangat terbatas (Lee dkk., 2023). Mengingat tantangan ini, diperlukan solusi pengolahan air minum di tingkat rumah tangga (*Household Water Treatment/HWT*) yang tidak hanya efektif, tetapi juga *low-cost*, *sustainable*, dan *user-friendly* untuk mengatasi kontaminasi mikrobiologis.

Dalam mengatasi keterbatasan akses air minum layak, berbagai metode POU telah banyak digunakan pada HWT. Beberapa metode yang umum adalah perebusan, klorinasi, *Solar Disinfection* (SODIS), dan filtrasi. Meskipun efektif dalam kondisi tertentu, setiap metode memiliki keterbatasan. Perebusan membutuhkan energi tambahan dan berpotensi meningkatkan emisi karbon. Klorinasi sering menimbulkan rasa dan bau. SODIS bergantung pada intensitas sinar matahari. Sementara itu, filtrasi memerlukan perawatan berkala yang tidak selalu dilakukan oleh pengguna, sehingga menurunkan efektivitasnya (Zewge & Mulugeta, 2023).

Berbagai keterbatasan tersebut mendorong pengembangan metode pengolahan air alternatif yang lebih sederhana, efektif, dan mudah diterapkan pada skala rumah tangga. Salah satu metode yang banyak dikembangkan adalah adsorpsi. Metode adsorpsi merupakan salah satu metode konvensional yang banyak digunakan dalam pengolahan air karena kemampuannya menghilangkan berbagai kontaminan organik, anorganik, maupun mikroba (Sajid dkk., 2022).

Salah satu alternatif material adsorben yang sedang berkembang untuk aplikasi disinfeksi POU adalah *Layered Double Hydroxide* (LDH). Material ini memiliki struktur berlapis yang memungkinkan adsorpsi berbagai ion dan mikroorganisme patogen. Beberapa studi menunjukkan LDH mampu menyisihkan bakteri dan virus dari air, serta relatif aman digunakan untuk aplikasi air minum (Villar da Gama dkk., 2022; Ye dkk., 2022). Penelitian lain melaporkan bahwa LDH dengan komposisi tertentu dapat menginaktivasi *E. coli* secara signifikan melalui mekanisme adsorpsi (Cardinale dkk., 2023), menjadikannya agen disinfektan yang menjanjikan.

Dalam meningkatkan kemudahan aplikasi pada sistem POU, LDH dapat disintesis secara *in-situ* pada permukaan material padat seperti aluminium foil. Pendekatan ini menghasilkan material berbentuk lembaran yang praktis, mudah dipisahkan dari air hasil pengolahan, serta sesuai untuk penggunaan skala rumah tangga yang dikembangkan pada lapisan tipis LDH (Fukugaichi dkk., 2022; Johan dkk., 2023). Pendekatan ini mengatasi masalah pemisahan dan residu yang melekat pada adsorben butiran. Pemilihan aluminium foil sebagai substrat didasarkan pada beberapa pertimbangan krusial: ketersediaannya yang melimpah, mendukung konsep ekonomi sirkular; harganya yang terjangkau; sifatnya yang ringan dan fleksibel, memudahkan penanganan dan aplikasi; serta kandungan aluminium di permukaannya dapat berfungsi sebagai salah satu prekursor pembentuk LDH.

Pada penelitian ini, proses sintesis material dan proses disinfeksi dilakukan secara terpisah. Pembentukan Mg-Al LDH dilakukan terlebih dahulu melalui sintesis *in-situ* pada permukaan aluminium foil menggunakan prekursor lokal berupa $MgSO_4$ dan $Ca(OH)_2$. Setelah material LDH Foil terbentuk, material tersebut kemudian digunakan pada tahap disinfeksi untuk penyisihan *E. coli* pada air minum. Dengan

demikian, pembentukan material tidak berlangsung selama proses desinfeksi, melainkan dilakukan terlebih dahulu di luar sistem desinfeksi.

Inti dari inovasi ini adalah penggunaan prekursor yang bersumber dari bahan lokal dan murah untuk sintesis LDH di atas substrat aluminium foil. Hasil sintesis ini dinamakan sebagai LDH Foil. Secara kimiawi, substrat aluminium foil (Al) berfungsi menyediakan ion Al^{3+} . Dalam kondisi basa kuat yang diinisiasi oleh kapur sirih ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), lapisan oksida Al_2O_3 pada permukaan Foil akan terlarut, melepaskan Al^{3+} ke dalam larutan. Sementara itu, pupuk MgSO_4 (magnesium sulfat) menyediakan ion Mg^{2+} . Dalam larutan bersuhu tinggi dan pH optimal (ditingkatkan oleh $\text{Ca}(\text{OH})_2$), ion Mg^{2+} dan Al^{3+} akan mengalami *co-precipitation* secara *in-situ* pada permukaan Foil, membentuk struktur Mg-Al LDH dengan SO_4^{2-} atau CO_3^{2-} sebagai anion interlayer. Penggunaan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sebagai sumber basa (OH^-) menggantikan reagen kimia murni yang mahal seperti NaOH atau NH_3 , sehingga menekan biaya produksi secara signifikan.

Penelitian terdahulu terkait fabrikasi LDH Foil telah dilakukan, namun umumnya menggunakan reagen kimia yang mahal dan memerlukan keahlian khusus, seperti NH_3 ataupun NaOH (Johan dkk., 2023; Ihsan dkk., 2023). Dengan demikian, terdapat kesenjangan dalam pengembangan material LDH *low-cost* berbasis prekursor lokal untuk aplikasi disinfeksi air minum rumah tangga. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tadi melalui keterbaruan yang terfokus pada tiga aspek utama: pengembangan LDH berbasis prekursor *low-cost* menggunakan pupuk MgSO_4 dan kapur sirih ($\text{Ca}(\text{OH})_2$); sintesis LDH secara *in-situ* pada substrat aluminium foil, dan; pemanfaatan material LDH Foil yang disintesis untuk penyisihan *E. coli* sebagai solusi disinfeksi POU air minum. Penelitian ini mengedepankan pendekatan kuantitatif dengan pengujian efektivitas penyisihan *E. coli* dan karakterisasi material hasil sintesis, guna menjawab kebutuhan akan solusi pengolahan air yang efektif, aman, murah, dan mudah diaplikasikan di tingkat rumah tangga.

1.2 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan lembaran *Layered Double Hydroxide* (LDH) Foil yang difabrikasi secara *in-situ* dengan prekursor

lokal dan mengevaluasi kinerjanya sebagai disinfektan air minum skala rumah tangga.

Tujuan Penelitian ini adalah:

1. Menganalisis karakteristik fisikokimia (morfologi, komposisi unsur dan struktur kristal) LDH yang disintesis secara *in-situ* pada permukaan aluminium foil menggunakan pupuk $MgSO_4$ dan kapur sirih sebagai prekursor, dengan membandingkan pengaruh durasi waktu fabrikasi.
2. Menguji efektivitas LDH Foil dalam menyisihkan *E. coli* pada sampel air terkontaminasi baik dalam kondisi terkontrol di laboratorium maupun pada sampel air minum riil dari Depot Air Minum Isi Ulang (DAMIU) yang terkontaminasi.
3. Mengevaluasi risiko sekunder aplikasi LDH Foil dengan mengukur pelepasan ion aluminium (Al) ke dalam air hasil olahan untuk memastikan pemenuhan baku mutu air minum.

1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Menawarkan alternatif metode *Point-of-Use* (POU) yang efektif dan praktis dalam format lembaran (LDH Foil) untuk disinfeksi air minum pada tingkat rumah tangga.
2. Mengoptimalkan pemanfaatan bahan baku sekunder dan lokal seperti pupuk dan kapur sirih serta aluminium foil (yang biasanya sering menjadi sampah yang tidak diolah) sebagai solusi sirkular dan *low-cost* terhadap permasalahan kontaminasi air minum, khususnya oleh *E. coli*.
3. Memiliki potensi untuk menjadi dasar pengembangan teknologi disinfeksi air yang aman dan berkontribusi dalam upaya menurunkan angka penyakit diare akibat konsumsi air yang terkontaminasi mikroba, terutama pada kelompok rentan seperti bayi dan anak-anak.
4. Menyediakan data awal mengenai kinerja teknologi LDH Foil untuk potensi pengembangan dan implementasi di daerah pedesaan atau wilayah pasca-bencana di Sumatra Barat, ketika akses terhadap infrastruktur air bersih terpusat seringkali terbatas.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan pada rentang Februari 2026 hingga Juni 2026 di Laboratorium Mikrobiologi Lingkungan dan Laboratorium Penelitian Departemen Teknik Lingkungan Universitas Andalas.
2. Pengujian efektivitas dilakukan pada dua jenis sampel air, yaitu air akuades yang diinokulasi dengan *E. coli* di laboratorium sebagai kondisi terkontrol, dan sampel air minum dari Depot Air Minum Isi Ulang (DAMIU) yang diperoleh dari rumah makan Aia Badarun, Jl. Irigasi, Kelurahan Cupak Tengah, Kecamatan Pauh, Kota Padang. Sampel DAMIU digunakan hanya sebagai sampel air minum riil yang sudah tercemar bakteri *E. coli* secara riil di lapangan (tanpa inokulasi bakteri tambahan di laboratorium) untuk mengevaluasi kemampuan LDH Foil dalam menyisihkan *E. coli* pada kondisi air nyata, sehingga lokasi pengambilan sampel bukan merupakan objek penelitian.
3. Efektivitas LDH Foil dievaluasi berdasarkan konsentrasi akhir *E. coli* setelah proses pengolahan, dengan target memenuhi baku mutu air minum sebesar 0 CFU/100 mL sesuai dengan Peraturan Menteri Kesehatan (Permenkes) RI No. 2 Tahun 2023.
4. Bahan baku yang digunakan pada sintesis LDH adalah aluiminium Foil komersial (sebagai substrat dan prekursor Al^{3+}), magnesium sulfat (MgSO_4) dari pupuk (sebagai prekursor Mg^{2+}), dan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) dari kapur sirih komersial (sebagai agen basa).
5. Durasi waktu sintesis *in-situ* LDH Foil adalah 6 jam dan 24 jam. Variasi 24 jam dipilih sebagai waktu sintesis yang lebih panjang untuk mengevaluasi perkembangan lapisan LDH serta mempertimbangkan potensi penerapannya pada skenario penggunaan POU dalam siklus harian.
6. Konsentrasi *E. coli* (sebagai parameter utama efektivitas), dianalisis menggunakan metode *Colony Forming Unit* (CFU) pada konsentrasi awal 100 CFU/mL. Waktu kontak untuk uji penyisihan *E. coli* dibatasi pada 0, 3, dan 24 jam.
7. Pengujian efektivitas LDH Foil dilakukan pada dua variasi waktu sintesis, yaitu 6 jam dan 24 jam, menggunakan sampel air artifisial. Selanjutnya, pengujian

pada sampel air minum riil dari Depot Air Minum Isi Ulang (DAMIU) dilakukan menggunakan LDH Foil dengan waktu sintesis yang memberikan efektivitas penyisihan *E. coli* terbaik berdasarkan hasil pengujian pada air artifisial.

8. Analisis statistik untuk membandingkan efektivitas penyisihan *E. coli* antarvariasi waktu sintesis LDH Foil (6 jam dan 24 jam) dilakukan menggunakan uji statistik non-parametrik Uji *Mann-Whitney U* pada tingkat kepercayaan 95%.
9. Analisis material LDH Foil fokus pada morfologi permukaan dan komposisi unsur menggunakan *Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (SEM-EDX) serta struktur kristal menggunakan *X-ray Diffraction* (XRD).
10. Pelepasan ion aluminium (Al) ke dalam air hasil olahan, diukur menggunakan *Atomic Absorption Spectrometry* (AAS) untuk memastikan konsentrasi Al tidak melampaui baku mutu air minum yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Kesehatan (Permenkes) RI No. 2 Tahun 2023.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini terdiri dari:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup penelitian, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan teori-teori yang mendukung penelitian, meliputi karakteristik LDH, mekanisme adsorpsi dan disinfeksi, kontaminasi *E. coli* pada air minum, teknologi POU, sintesis LDH pada aluminium foil, penelitian terdahulu, serta dasar teori analisis statistik yang digunakan dalam penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tahapan penelitian yang meliputi waktu dan lokasi penelitian, alat dan bahan, prosedur sintesis LDH Foil menggunakan

prekursor lokal berupa pupuk MgSO_4 dan kapur sirih, karakterisasi material menggunakan XRD dan SEM-EDX, pengujian efektivitas penyisihan *E. coli* pada sampel air artifisial dan air DAMIU, pengujian aluminium terlarut menggunakan AAS, serta metode analisis data. Data dianalisis secara deskriptif melalui perhitungan rerata, standar deviasi, dan persentase penyisihan *E. coli*, kemudian dilanjutkan dengan uji statistik menggunakan uji normalitas (*Shapiro-Wilk*), uji homogenitas (*Levene's Test*), dan Uji *Mann-Whitney U* untuk mengetahui perbedaan efektivitas LDH Foil hasil sintesis 6 jam dan 24 jam.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil sintesis dan karakterisasi LDH Foil, hasil pengujian efektivitas penyisihan *E. coli* pada air artifisial dan air DAMIU, hasil pengujian aluminium terlarut, serta pembahasan mengenai hubungan karakteristik material dengan kinerja penyisihan *E. coli*. Selain itu, pada bab ini dilakukan analisis statistik terhadap hasil pengujian, pembahasan mekanisme penyisihan, keunggulan dan keterbatasan metode, serta implikasi keamanan penggunaan LDH Foil sebagai teknologi disinfeksi POU.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil penelitian serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.