

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air limbah domestik merupakan air limbah yang berasal dari aktivitas rumah tangga, fasilitas komersial, dan institusional yang dihasilkan dari kegiatan mandi, mencuci, memasak, serta pembuangan biologis yang berasal dari kloset (Tchobanoglous dkk., 2014). Menurut Kementerian Lingkungan Hidup. (2025), air limbah domestik mengandung bahan organik dan nutrisi seperti senyawa nitrogen yang terdiri dari amoniak (NH_3), nitrit (NO_2^-), dan nitrat (NO_3^-). Senyawa nitrogen di perairan memiliki peran penting dalam keseimbangan ekosistem, namun dalam konsentrasi tinggi dapat bersifat merugikan dan menyebabkan terjadinya eutrofikasi.

Pengolahan air limbah domestik di Indonesia masih terkendala dalam penyisihan nitrogen. Di Kelurahan Air Pacah, Kota Padang, sistem IPAL komunal menggunakan ABR (*Anaerobic Baffle Reactor*) dan AF (*Anaerobic Filter*) menghasilkan efluen amoniak sebesar 66 mg/L yang tidak memenuhi baku mutu, meskipun penyisihan COD (*Chemical Oxygen Demand*)/BOD (*Biochemical Oxygen Demand*) mencapai >90%. Keterbatasan ini disebabkan oleh kondisi anaerobik yang tidak mendukung transformasi nitrogen secara menyeluruh. Akibatnya, siklus nitrogen terhenti pada tahap amoniak, serupa dengan kinerja tangki septik individual yang hanya mengandalkan amonifikasi tanpa proses nitrifikasi dan denitrifikasi (Komala & Hidayah, 2022).

Permasalahan ini menegaskan perlunya teknologi pengolahan yang sederhana, ekonomis, dan mampu mendukung proses transformasi nitrogen secara biologis. *Trickling Filter* merupakan salah satu teknologi yang memenuhi karakteristik tersebut. Sistem berbasis *biofilm* ini menghasilkan gradien oksigen pada media berpori, sehingga memungkinkan terjadinya proses *nitrification-denitrification* dalam satu reaktor (Liu dkk., 2016). Nourmohammadi dkk. (2013), melaporkan bahwa reaktor *Trickling Filter* skala pilot bermedia plastik yang dioperasikan pada HRT 4 jam mampu menurunkan konsentrasi amoniak dari 28 mg/L menjadi 0,29

mg/L dengan efisiensi penyisihan mencapai 99%, sehingga memenuhi baku mutu yang berlaku. Selain itu, Wang dkk. (2015), menunjukkan bahwa *Trickling Filter* bermedia *sponge* dan zeolit yang dioperasikan pada HRT (*Hydraulic Retention Time*) 21 jam mampu menurunkan konsentrasi amoniak dari 26 mg/L menjadi 4 mg/L dengan efisiensi penyisihan sebesar 85%, yang juga telah memenuhi baku mutu amoniak. Namun, penelitian tersebut masih menggunakan media sintetis maupun anorganik sehingga diperlukan kajian penggunaan media alami yang memiliki kemampuan sebagai tempat pertumbuhan biofilm.

Salah satu material alami yang berpotensi adalah *Arenga pinnata* (ijuk). Massaid dkk. (2025), telah melakukan pengujian terhadap media alami di antaranya jerami, ijuk, papan pakis, tandan sawit, dan serabut kelapa dan *sphagnum moss* menunjukkan bahwa *Arenga pinnata* (ijuk) memiliki porositas 73,93%. Selain itu nilai pH (*Potential of Hydrogen*) dan TDS (*Total Dissolved Solids*) dari ijuk setelah perendaman 30 hari yaitu 6,89 dan 43 mg/l yang mana menepati peringkat pertama dengan konsentrasi TDS terendah. Selain itu, nilai TSS dan COD ijuk setelah dilakukan perendaman 30 hari yaitu 196 mg/l dan 225 mg/l yang mana menepati peringkat kedua dengan konsentrasi TSS dan COD terendah. Berbeda dengan *Trickling Filter* konvensional yang umumnya menggunakan media batu kerikil atau plastik sintetis, penggunaan *Arenga pinnata* menawarkan keunggulan berupa porositas yang lebih tinggi kerikil (51%), ketersediaan lokal di wilayah tropis, serta biaya yang lebih rendah. Namun, penelitian terkait perubahan konsentrasi nitrogen secara vertikal pada media alami *Arenga pinnata* masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis profil nitrogen pada setiap segmen media sebagai pendekatan awal dalam mengevaluasi transformasi nitrogen yang terjadi pada *Trickling Filter*. Durasi pengoperasian *Trickling Filter* ini selama 18 hari untuk mengevaluasi kemampuan awal media *Arenga pinnata* sebagai media pertumbuhan biofilm dan mendukung proses transformasi nitrogen.

Penelitian ini menampilkan profil nitrogen vertikal reaktor yang diukur pada setiap ketinggian 30 cm (5 segmen) untuk mengamati proses biologis amoniak, nitrit, nitrat, dan total nitrogen. Mengacu pada penelitian Danshita dkk. (2020), profil nitrogen pada reaktor *Down-flow Hanging Sponge* menunjukkan nitrifikasi dominan di segmen atas (penurunan amoniak dan peningkatan nitrat ± 17 mg N/L),

diikuti denitrifikasi di segmen bawah (penurunan nitrat < 10 mg N/L) dengan efisiensi penyisihan total nitrogen sebesar 55% akibat gradien oksigen vertikal. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini mengajukan hipotesis bahwa *Trickling Filter* bermedia *Arenga pinnata* akan membentuk profil serupa, yaitu penurunan NH_3 di lapisan atas (nitrifikasi aerobik), peningkatan nitrat di lapisan tengah, dan penurunan nitrogen total di lapisan bawah untuk mencapai penyisihan total nitrogen. Profil nitrogen yang terbentuk juga dipengaruhi oleh kondisi operasional, terutama HRT. HRT yang lebih pendek meningkatkan laju hidraulik dan turbulensi sehingga transfer oksigen ke *biofilm* lebih baik dan zona nitrifikasi meluas ke seluruh ketinggian media, sedangkan HRT yang lebih panjang cenderung membatasi zona nitrifikasi aktif hanya di lapisan atas kolom reaktor (Liu dkk., 2016).

Pada penelitian ini dilakukan proses *seeding* menggunakan lumpur aktif dari PT Abaisiat Raya untuk mempercepat pembentukan *biofilm* dan profil nitrogen. Menurut Fatimah dkk. (2025), *seeding* mendorong terbentuknya *biofilm* coklat-kuning pekat yang ditandai peningkatan MLVSS (*Mixed Liquor Volatile Suspended Solids*) dan mempercepat konversi amoniak menjadi nitrit menjadi nitrat. Secara umum, profil nitrogen berkaitan langsung dengan efisiensi pengolahan, karena perubahan konsentrasi amoniak, nitrit, nitrat dan total nitrogen mencerminkan efektivitas nitrifikasi dan denitrifikasi. Oleh karena itu, profil nitrogen digunakan sebagai dasar perhitungan *Amonia Conversion Efficiency* (ACE) dan *Nitrogen Removal Efficiency* (NRE).

Reaktor *Trickling Filter* pada penelitian ini merupakan unit skala laboratorium yang secara konseptual dapat diaplikasikan baik sebagai unit pengolahan individual (*on-site*, melengkapi tangki septik) maupun komunal (*off-site*, melengkapi ABR atau AF seperti yang terdapat di Kelurahan Air Pacah, Kota Padang). Penggunaan air limbah domestik artifisial dipilih untuk mengontrol kondisi eksperimental, namun karakteristiknya dirancang mendekati karakteristik air limbah domestik asli Indonesia sehingga hasil penelitian ini dapat dijadikan referensi pengembangan di skala lapangan.

1.2 Maksud dan Tujuan Penelitian

1.2.1 Maksud Penelitian

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui potensi penggunaan media ijuk (*Arenga pinnata*) sebagai media *biofilm* pada *Trickling Filter* dalam pengolahan air limbah domestik artifisial, dengan menggunakan analisis profil nitrogen sebagai pendekatan untuk menggambarkan kinerja media tersebut.

1.2.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menentukan efisiensi penyisihan nitrogen dari air limbah domestik artifisial menggunakan *Trickling Filter* dengan media *Arenga pinnata* dengan HRT 12 jam; 8 jam; dan 6 jam.
2. Menganalisis profil nitrogen (amoniak, nitrit, nitrat, dan total nitrogen) sebagai indikator kinerja media *Arenga pinnata* pada kondisi *seeding* dan *non seeding* dengan variasi HRT 12 jam, 8 jam, dan 6 jam.
3. Menganalisis kemampuan media *Arenga pinnata* sebagai media pertumbuhan *biofilm* dalam mendukung proses penyisihan senyawa nitrogen pada *Trickling Filter*.

1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah:

1. Memberikan alternatif pengembangan teknologi pengolahan air limbah domestik berbasis *biofilm* menggunakan *Trickling Filter* dengan media alami *Arenga pinnata* yang sederhana, ekonomis, dan mudah diperoleh, sehingga berpotensi diterapkan sebagai teknologi pendukung dalam peningkatan kinerja sistem pengolahan air limbah domestik.
2. Memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan media alami sebagai media pertumbuhan *biofilm* pada sistem pengolahan biologis, khususnya dalam memahami potensi pemanfaatan *Arenga pinnata* untuk mendukung proses transformasi senyawa nitrogen pada air limbah domestik.
3. Menjadi referensi bagi penelitian lanjutan maupun pengembangan teknologi *Trickling Filter* berbasis media alami, terutama terkait optimasi kondisi operasi,

peningkatan performa penyisihan nitrogen, serta peluang penerapannya pada sistem pengolahan air limbah domestik skala individual maupun komunal.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini dilakukan pada Laboratorium Penelitian dan Laboratorium Air, Departemen Teknik Lingkungan UNAND dengan waktu penelitian 30 hari menggunakan reaktor kontinu. Waktu penelitian 30 hari (10 hari persiapan alat dan bahan penelitian, 18 hari reaktor beroperasi secara kontinu, dan 2 hari waktu untuk *seeding*) ditetapkan mengacu pada penelitian Fatimah dkk. (2025) yang menunjukkan bahwa pembentukan *biofilm* stabil dan profil nitrogen yang representatif dapat dicapai dalam rentang waktu tersebut. *Trickling Filter* beroperasi pada kondisi suhu ruangan laboratorium berkisar 25-30°C dan tekanan atmosfer normal, yang merupakan kondisi optimal bagi aktivitas bakteri nitrifikasi (*Nitrosomonas* dan *Nitrobacter*) pada rentang suhu 25-35°C (Tchobanoglous dkk., 2014).
2. Reaktor kontinu ini berupa *Trickling Filter* dengan media *Arenga pinnata* yang merupakan pengolahan aerobik dengan menggunakan sistem aliran ke bawah. Media lekat yang digunakan pada reaktor aerob adalah *Arenga pinnata* yang disusun dalam turus dan di rangkai secara vertikal menggunakan benang. Pemilihan *Trickling Filter* dengan sistem aliran ke bawah didasarkan pada kemampuannya menghasilkan gradien oksigen pada media berpori sehingga memungkinkan terjadinya proses nitrifikasi-denitrifikasi dalam satu reaktor (Liu dkk., 2016), sementara media *Arenga pinnata* dipilih karena memiliki porositas tinggi (73,93%) yang mendukung pertumbuhan *biofilm* (Massaid dkk., 2025).
3. Reaktor *Trickling Filter* skala laboratorium pada penelitian ini dirancang sebagai studi awal (*proof of concept*) yang secara konseptual dapat dikembangkan baik untuk sistem individual (*on-site*) maupun komunal, tergantung kapasitas dan kebutuhan pengolahan di lapangan.
4. Sampel yang digunakan pada saat *running* pada reaktor kontinu berupa air limbah domestik artifisial dengan karakteristik mengacu kepada karakteristik air limbah domestik asli.

5. Pada penelitian ini dilakukan pengambilan sampel di 5 titik pada media *Arenga pinnata* yang terdapat pada *Trickling Filter*. Penetapan 5 titik pengambilan sampel pada setiap ketinggian 30 cm didasarkan pada pendekatan Danshita dkk. (2020) yang menunjukkan bahwa pengukuran profil nitrogen secara vertikal pada beberapa segmen mampu menggambarkan distribusi zona nitrifikasi dan denitrifikasi secara representatif.
6. Penelitian ini dilakukan dengan 2 perlakuan yaitu tanpa *seeding* dan dengan *seeding*. Perbandingan dua perlakuan ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh inokulasi awal mikroorganisme terhadap kecepatan pembentukan *biofilm* dan kinerja penyisihan nitrogen, mengacu pada Fatimah dkk. (2025) yang menunjukkan bahwa *seeding* mempercepat konversi amoniak menjadi nitrit dan menjadi nitrat.
7. Pada proses *seeding*/pembibitan berasal dari lumpur aktif (*activated sludge*) dari PT Abaisiat Raya. PT Abaisiat Raya dipilih sebagai sumber lumpur aktif karena merupakan industri pengolahan karet yang memiliki instalasi pengolahan air limbah aktif dengan komunitas mikroorganisme nitrifikasi yang sudah teraklimatisasi.
8. Penelitian ini menggunakan 3 variasi HRT yaitu 12 jam, 8 jam, dan 6 jam dengan waktu pengambilan sampel 3 kali pada selang waktu 3 hari. Variasi HRT 12, 8, dan 6 jam dipilih mengacu pada rentang HRT yang umum digunakan pada *Trickling Filter* skala laboratorium untuk pengolahan nitrogen air limbah domestik (Nourmohammadi dkk., 2013), dengan tujuan mengidentifikasi HRT optimal yang menghasilkan efluen memenuhi baku mutu PermenLH No. 11 Tahun 2025.
9. Parameter yang dianalisis pada penelitian ini meliputi parameter fisika berupa pH dan parameter kimia berupa DO dan Nitrogen (Amoniak, Nitrat, Nitrit, dan Total Nitrogen).
10. Analisis Amoniak dengan metode spektrofotometri secara Fenat yang mengacu pada SNI 06-6989.30-2005), Analisis Nitrat dengan metode spektrofotometri secara Brusin Sulfanilat yang mengacu pada SNI 06-2480-1991, Analisis Nitrit secara spektrofotometri yang mengacu pada SNI 06-6989.9-2004, dan Analisis Total Nitrogen dengan metode Absorpsiometri dengan alat ukur

Spektrofotometer yang mengacu pada *Standard Methods for the Examination Of Water and Wastewater* (2017).

11. Analisis yang dilakukan pada penelitian ini berupa analisis statistik deskriptif, data ditampilkan dalam *time series*, dan juga *Two-Way Anova*. Analisis statistik deskriptif dipilih karena penelitian ini bersifat eksploratif untuk menggambarkan kinerja reaktor melalui persentase efisiensi dan rentang konsentrasi nitrogen pada setiap kondisi operasional, yang merupakan pendekatan umum pada penelitian reaktor biologis skala laboratorium (Danshita dkk., 2020). Penyajian data dalam bentuk *time series* dipilih karena reaktor beroperasi secara kontinu selama 18 hari dengan pengambilan sampel berkala setiap 3 hari, sehingga penyajian deret waktu paling representatif untuk menggambarkan tren perubahan konsentrasi nitrogen dan mengidentifikasi kondisi *steady state* reaktor pada setiap variasi HRT.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini adalah:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisikan latar belakang penelitian yang berfokus pada permasalahan nitrogen dalam air limbah domestik, khususnya keterbatasan sistem anaerobik konvensional seperti tangki septik, ABR, dan *Anaerobic Biofilter* dalam menyisihkan nitrogen. Selanjutnya dijabarkan maksud dan tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan laporan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan tentang kajian literatur yang menjadi dasar teoritis penelitian. Pembahasan dimulai dari karakteristik dan baku mutu air limbah domestik, siklus nitrogen beserta komponen-komponennya (amoniak, nitrat, nitrit, dan total nitrogen), serta parameter biomassa MLSS dan MLVSS. Selanjutnya dibahas proses pengolahan air limbah secara biologis mencakup sistem pertumbuhan tersuspensi (*suspended growth*) dan pertumbuhan terlekat (*attached growth*), reaktor *biofilm* seperti MBBR dan FBBR, serta prinsip kerja *Trickling Filter*. Bab ini

juga membahas mekanisme pembentukan dan karakteristik *biofilm* dalam proses nitrifikasi-denitrifikasi, jenis-jenis media *biofilm*, karakteristik media *Arenga pinnata*, profil nitrogen sepanjang ketinggian reaktor *Trickling Filter*, pengaruh *seeding* dan *non seeding* terhadap pembentukan *biofilm*, fraksi nitrogen dalam sistem *biofilm*, serta penelitian-penelitian terdahulu yang relevan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang tahapan penelitian secara sistematis, diawali dengan studi literatur. Selanjutnya diuraikan persiapan alat yang meliputi perancangan dan konfigurasi reaktor *Trickling Filter* dengan media *Arenga pinnata* beserta peralatan analisis laboratorium. Persiapan bahan mencakup pembuatan air limbah domestik artifisial, studi karakteristik inokulan lumpur aktif dari PT Abaisiat Raya, dan bahan analisis nitrogen. Bab ini juga menjelaskan proses operasional reaktor secara *non seeding* dan *seeding* dengan tiga variasi HRT (12, 8, dan 6 jam), metode pengambilan sampel di lima titik ketinggian media, metode analisis laboratorium menggunakan spektrofotometri standar, serta metode analisis data yang mencakup penyajian data *time series*, *profile* komponen nitrogen, efisiensi penyisihan nitrogen (ACE dan NRE), serta nitrogen *balance*. Analisis parameter pendukung seperti DO dan pH juga diuraikan pada bab ini.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan seluruh hasil penelitian. Diawali dengan karakteristik air limbah domestik artifisial dan karakteristik inokulan yang digunakan, kemudian kondisi operasional reaktor selama pengujian. Pembahasan utama mencakup kinerja reaktor *Trickling Filter* terhadap penyisihan amoniak, nitrit, nitrat, dan total nitrogen pada kondisi *non seeding* dan *seeding* di berbagai HRT, *profile* nitrogen sepanjang ketinggian reaktor yang menggambarkan gradien nitrifikasi pada segmen atas dan denitrifikasi pada segmen bawah, serta evaluasi kinerja menggunakan parameter ACE, NRE, NLR, dan NRR. Bab ini juga

membahas kondisi hasil olahan *Trickling Filter* terhadap pemenuhan baku mutu air limbah domestik yang berlaku.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisikan kesimpulan yang dirumuskan berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, mencakup kinerja optimal reaktor, perbandingan kondisi *non seeding* dan *seeding*, serta potensi media *Arenga pinnata* sebagai media *biofilm* alami. Selain itu, disampaikan saran yang dapat dijadikan rekomendasi bagi penelitian lanjutan maupun penerapan teknologi *Trickling Filter* di lapangan.

