

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Limbah sebagai hasil kegiatan manusia, dan proses alam yang belum dapat dimanfaatkan secara ekonomis, terbagi menjadi limbah cair, padat, dan gas (Zevhiana & Rachmanto, 2024). Limbah cair seperti air limbah merupakan air yang kualitasnya telah menurun baik secara komposisi fisik, kimia dan biologinya akibat aktivitas antropogenik. Mayoritas air limbah mengandung 99,9% air dengan jumlah kontaminan organik dan anorganik tersuspensi dan terlarut. Air limbah dibagi menjadi air limbah domestik dan air limbah industri, dimana air limbah domestik berasal dari aktivitas sehari-hari manusia dan terdiri dari *grey water* dan *black water*, yang mengandung patogen dan bahan kimia berbahaya (Koul et al., 2022).

Air limbah domestik yang dibuang langsung ke lingkungan tanpa proses pengolahan terlebih dahulu akan berpotensi merusak lingkungan. Jika air limbah dibuang ke perairan terdekat, maka akan menyebabkan perubahan pH, penurunan kadar oksigen terlarut, dan pencemaran lainnya yang bisa menyebabkan kematian makhluk hidup akuatik. Oleh karena itu, sangat penting untuk memastikan pemenuhan batas baku mutu yang dapat diterima selama pengolahan air limbah sebelum dibuang atau digunakan kembali (Alazaiza et al., 2023). Beberapa bentuk pengolahan yang dapat dilakukan untuk menurunkan dan mengurangi kandungan nutrisi dan senyawa organik pada air limbah salah satunya yakni dengan pengolahan biologis menggunakan mikroalga (Darwin et al., 2023).

Mikroalga merupakan organisme perairan bersifat uniseluler yang umumnya memerlukan karbon dioksida, cahaya dan nutrisi untuk melakukan fotosintesis. Laju pertumbuhan yang cepat, kemampuan beradaptasi terhadap tekanan lingkungan dan banyaknya senyawa biokimia yang dihasilkan oleh mikroalga menunjukkan potensi besar mikroalga untuk digunakan dalam berbagai pengaplikasian (Ru et al., 2020). Mikroalga dianggap sebagai salah satu organisme yang menjanjikan dalam berbagai pengaplikasian di bidang bioteknologi karena potensi penggunaannya untuk beragam bentuk energi terbarukan yang bermanfaat (Siqueira et al., 2018).

Pertumbuhan mikroalga dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti cahaya, rasio C/N, pH, suhu, waktu retensi, serta modifikasi yang tepat dapat membantu mikroalga beradaptasi dan memberikan kinerja yang optimal pada kondisi air limbah yang berubah-ubah (Wan et al., 2021). Beberapa jenis mikroalga yang dapat digunakan pada pengolahan air limbah yaitu *Laminaria japonica*, *Spirogyra*, *Chlorella sp.*, *Spirulina platensis* dan beberapa jenis mikroalga lainnya (Siqueira et al., 2018). Menurut beberapa penelitian terdahulu, *Spirulina platensis* merupakan salah satu jenis mikroalga yang efektif dalam penyisihan senyawa organik pada air limbah.

Spirulina platensis efektif dalam meningkatkan kualitas air limbah yang terkontaminasi. *Spirulina platensis* memiliki kemampuan untuk menghilangkan bahan organik. *Spirulina platensis* adalah bakteri yang mengandung klorofil

(*Cyanobacteria*), yang memungkinkannya membuat makanan sendiri melalui fotosintesis. *Spirulina platensis* dapat tumbuh dengan baik pada media atau media pertumbuhan dengan pH sekitar 8,5 hingga 11. Suhu terendah agar *Spirulina platensis* dapat bertahan hidup adalah 15°C dan suhu optimal adalah 35°C hingga 40°C (Simamora et al., 2017).

Penelitian yang dilakukan Nurdiana et al., (2021) menunjukkan penyisihan nitrat sebesar 80,24% dan fosfat sebesar 83,58% dengan menggunakan perbandingan volume antara air limbah dan mikroalga 1:2. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan Restuhadi et al., (2017) bahwa semakin tinggi konsentrasi sel mikroalga maka kebutuhan mikroalga terhadap nitrat juga meningkat sehingga konsentrasi nitrat pun semakin menurun. Kristin Ari Fitria et al., (2023) dalam penelitiannya menggunakan *Chlorella sp.* dan *Scenedesmus sp.* untuk pengolahan air limbah domestik dan hasilnya menunjukkan bahwa konsorsium mikroalga menunjukkan potensi lebih besar dalam menghilangkan nutrisi yaitu berkisar 78-98% dari air limbah domestik.

Dalam penelitian Rusdiani et al., (2016) menyoroti metode inovatif yang menggabungkan bioteknologi dan rekayasa lingkungan dalam mengatasi pencemaran air yaitu penggunaan kultur mikroalga dalam teknologi fotobioreaktor. Teknologi fotobioreaktor diketahui mampu meningkatkan produktivitas mikroalga sebesar 2 hingga 5 kali lipat dibandingkan kondisi normal.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Bagaimana karakteristik air limbah domestik yang digunakan dalam penelitian ini?
2. Bagaimana pengaruh intensitas cahaya terhadap efisiensi pengolahan air limbah domestik menggunakan mikroalga?
3. Bagaimana efektivitas pengolahan air limbah domestik menggunakan mikroalga?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini sebagai berikut.

1. Mengidentifikasi karakteristik air limbah domestik yang digunakan dalam penelitian ini.
2. Menganalisis pengaruh intensitas cahaya terhadap efisiensi pengolahan air limbah domestik menggunakan mikroalga.
3. Menganalisis efektivitas pengolahan air limbah domestik menggunakan mikroalga.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan pemahaman tentang potensi pemanfaatan mikroalga dan penggunaan teknologi fotobioreaktor dalam efisiensi penyisihan fosfor dan nitrogen pada air limbah domestik serta pengaruh cahaya dan konsentrasi nutrisi terhadap produksi mikroalga.

1.5 Ruang Lingkup

Sesuai dengan tujuan dari penelitian ini, maka ruang lingkup dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Penelitian yang dilakukan adalah penelitian eksperimental di Laboratorium Kualitas Air Universitas Hasanuddin menggunakan fotobioreaktor dalam pengolahan air limbah domestik dengan sistem *batch*.
2. Air limbah yang digunakan adalah air limbah domestik yang diambil dari IPAL Komunal.
3. Variasi yang digunakan adalah intensitas cahaya dengan variasi 3000 lux, 4000 lux dan 5000 lux.
4. Parameter yang dianalisis yaitu Nitrogen (N) dan Fosfor (P).

1.6 Teori

1.6.1 Air Limbah

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air, Air limbah merupakan sisa dari suatu hasil usaha dan atau kegiatan yang berwujud cair. Dalam Peraturan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 5 Tahun 2022, air limbah didefinisikan sebagai air yang berasal suatu proses dalam suatu kegiatan. Falahiyah & Eksekutif (2022) juga mendeskripsikan air limbah sebagai air yang telah digunakan yang berasal dari rumah tangga atau perumahan, komersial, institusi atau tempat rekreasi, termasuk air limbah dari kamar mandi, toilet, ruang cuci atau dapur.

Secara garis besar, sumber air limbah dapat berasal dari berbagai sumber berikut, yaitu:

1. Air buangan yang bersumber dari rumah tangga (*domestic waste water*), yaitu air limbah yang berasal dari pemukiman penduduk. Pada umumnya air limbah ini terdiri dari ekskreta (tinja dan air seni), air bekas cucian dapur dan kamar mandi, dan umumnya terdiri dari bahan-bahan organik.
2. Air buangan industri (*industrial wastes water*), yang berasal dari berbagai jenis industri akibat proses produksi. Zat-zat yang terkandung di dalamnya sangat bervariasi sesuai dengan bahan baku yang dipakai oleh masing-masing industri, antara lain: nitrogen, sulfida, amoniak, lemak, garam-garam, zat pewarna, mineral, logam berat, zat pelarut, dan sebagainya. Oleh sebab itu, pengolahan jenis air limbah ini, agar tidak menimbulkan polusi lingkungan menjadi lebih rumit.

3. Air buangan kotapraja (*municipal wastes water*), yaitu air buangan yang berasal dari daerah: perkantoran, perdagangan, hotel, restoran, tempat-tempat umum, tempat-tempat ibadah, dan sebagainya. Pada umumnya zat-zat yang terkandung dalam jenis air limbah ini sama dengan air limbah rumah tangga.

1.6.2 Karakteristik Air Limbah Domestik

Limbah cair rumah tangga atau domestik adalah air limbah yang berasal dari keperluan sanitasi, yaitu gabungan dari dapur, kamar mandi, toilet, ruang cuci, dan lain-lain. Komposisi limbah cair rata-rata mengandung bahan organik dan senyawa mineral dari sisa makanan, urin, dan sabun. Komposisi limbah cair rumah tangga yang berbentuk padat dapat dibedakan menjadi komponen organik dan anorganik, dengan perbandingan air sebesar 99% dan padatan sebesar 1%. Untuk bahan organik dapat berupa karbohidrat, protein, lipid dan juga mengandung unsur utama untuk tumbuhan seperti nitrogen dan fosfor. Sedangkan zat anorganik dapat berupa garam, logam, dan partikel (Novilyansa, dkk, 2020).

Secara garis besar karakteristik air limbah domestik ini terdiri dari 3 komponen utama yaitu karakteristik secara fisika, kimia maupun biologi. Karakteristik tersebut memiliki nilai ambang batas yang berbeda-beda dari kebijakan yang dikeluarkan oleh pemerintah, baik pemerintah pusat maupun pemerintah daerah. Limbah cair domestik memiliki beberapa karakteristik sesuai dengan sumbernya, karakteristik limbah cair domestik digolongkan menjadi tiga yaitu fisika, kimia, dan biologi (Sandra, dkk, 2022).

a. Karakteristik Fisika

1. *Total Solid* (TS), biasanya padatan terdapat pada dasar air yang mengakibatkan pendangkalan, padatan juga terdiri dari zat organik dan zat anorganik.
2. *Total Suspended Solid* (TSS), merupakan padatan yang berupa lumpur kering yang berada di dalam air limbah domestik. TSS berasal dari lumpur yang berhasil lolos dalam proses penyaringan pada pengolahan air limbah domestik. Berdasarkan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2016), batas kadar maksimum yang ditetapkan untuk parameter TSS pada air limbah domestik yaitu 30 mg/L.
3. Warna, warna limbah yang semula abu-abu berubah warna menjadi kehitaman akibat dari aktivitas mikroorganisme yang berada di dalam air.
4. vKekeruhan akan mengakibatkan sulitnya cahaya untuk masuk ke dalam air limbah.
5. Temperatur, apabila temperatur pada air limbah tidak sesuai dengan baku mutu yang telah ditetapkan akan mempengaruhi reaksi yang terjadi di dalam air.
6. Bau, disebabkan oleh bahan-bahan organik yang diuraikan oleh mikroorganisme yang berada di air limbah domestik.

b. Karakteristik Kimia

1. *Biological Oxygen Demand* (BOD), banyaknya oksigen yang diperlukan untuk mengoksidasi atau menguraikan bahan-bahan organik yang terdapat pada air limbah domestik. Batas baku mutu untuk kadar BOD pada air limbah maksimal 30 mg/l (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2016).
2. *Chemical Oxygen Demand* (COD), banyaknya oksigen yang dibutuhkan untuk menguraikan zat-zat pencemar melalui proses kimia. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2016) menetapkan maksimal 100 mg/l untuk batas baku mutu kadar COD pada air limbah domestik.
3. Protein, adanya protein dapat menimbulkan bau yang tidak sedap akibat terurainya zat-zat yang ada pada limbah domestik. Protein berasal dari makhluk hidup yang terdapat pada air limbah.
4. Karbohidrat, bahan-bahan yang mengandung karbohidrat akan diuraikan oleh bakteri dan dapat menghasilkan alkohol dan gas karbondioksida.
5. Minyak dan lemak, merupakan bahan yang paling sering dijumpai di perairan. Minyak dan lemak sangat sulit untuk terurai di dalam air limbah. Pada air limbah domestik, kadar baku mutu minyak dan lemak ditetapkan maksimal 5 mg/l oleh (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2016).
6. Detergen, digunakan untuk membersihkan bahan-bahan yang mengandung kotoran seperti tanah dan lemak sehingga kotoran tersebut dapat dipisahkan.
7. Derajat keasaman (pH), air limbah domestik dapat disebut netral apabila memiliki pH sebesar 6,5-7,5. Apabila pH kurang atau lebih dari itu, maka akan mengganggu keseimbangan ekosistem yang berada dalam air dan mempengaruhi reaksi di dalam air.

c. Karakteristik Biologi

Parameter yang banyak digunakan yaitu banyaknya mikro-organisme yang terkandung dalam air limbah. Kandungan bakteri patogen dan organisme golongan *E. Coli* terdapat juga dalam air limbah tergantung darimana sumbernya namun keduanya tidak berperan dalam proses pengolahan air limbah.

Pencemar pada air limbah domestik biasanya terdiri dari padatan tersuspensi berukuran besar atau sedang (misalnya feses dan sisa makanan), koloid dan larutan (misalnya urin), dan senyawa kimia (contohnya sabun atau deterjen). Karakteristik air limbah domestik menurut Wisjnuprpto (2023) dapat dilihat pada tabel 1. Gbekley et al. (2023) mendeskripsikan empat jenis air limbah domestik, yaitu:

1. *Blackwater* merupakan air limbah yang berasal dari toilet. Limbah ini mengandung tinja dan urin yang kaya akan bahan organik, patogen, dan nutrisi seperti nitrogen serta fosfor.
2. *Greywater*, dimana limbah ini berasal dari aktivitas rumah tangga seperti mandi, mencuci pakaian, dan mencuci peralatan dapur. *Greywater* biasanya memiliki kandungan organik dan patogen lebih rendah dibandingkan *blackwater*.
3. *Yellowwater*, limbah yang berasal dari urin yang dikumpulkan secara terpisah, limbah ini kaya akan nutrisi seperti nitrogen (dalam bentuk amonia) dan fosfor.
4. *Stormwater* merupakan limbah yang dihasilkan dari limpasan air hujan, yang sering membawa partikel tanah, bahan kimia dan polutan lain ke dalam saluran

air. Meski sering dianggap berbeda dari limbah domestik biasa, *stormwater* dapat menjadi bagian dari pengelolaan limbah domestik jika menyatu dengan sistem pembuangan limbah.

Tabel 1. Karakteristik limbah cair domestik

No.	Parameter	Nilai (mg/L)
1.	BOD	100-300
2.	COD	160-300
3.	TSS	100-500
4.	TDS	100-500
5.	Total Nitrogen	5-86
6.	Total Fosfor	2-10
7.	Logam berat	0
8.	Minyak dan lemak	0-40

Sumber: (Wisjnuaprpto, 2023)

1.6.3 Parameter Nitrogen (N)

Nitrogen merupakan salah satu parameter penting dalam penilaian kualitas air limbah domestik. Kehadirannya dalam bentuk senyawa seperti amonia (NH_3), nitrit (NO_2^-), dan nitrat (NO_3^-) dapat berdampak signifikan terhadap lingkungan perairan. Konsentrasi nitrogen yang tinggi dalam air limbah domestik sering kali berasal dari sisa metabolisme manusia, deterjen, dan limbah makanan. Menurut Bahri (2018), air limbah domestik yang belum diolah memiliki kandungan total nitrogen antara 20-70 mg/L, dengan nitrogen organik antara 8-25 mg/L, dan amonia antara 12-45 mg/L.

Dalam ekosistem perairan, kelebihan nitrogen dapat memicu fenomena eutrofikasi, yaitu pertumbuhan berlebihan fitoplankton atau alga yang mengakibatkan penurunan kadar oksigen terlarut. Hal ini berdampak negatif pada kehidupan organisme akuatik lainnya. Selain itu, amonia dalam konsentrasi tinggi bersifat toksik bagi ikan dan organisme air lainnya. Oleh karena itu, pengendalian konsentrasi nitrogen dalam air limbah domestik menjadi krusial untuk mencegah degradasi kualitas lingkungan perairan (Faradila et al., 2023).

Mikroalga menggunakan nitrogen untuk mendukung sintesis biomolekul esensial seperti protein, asam nukleat, dan klorofil. Selama proses fotosintesis, mikroalga mengambil nitrogen dari air melalui mekanisme aktif transportasi ion, di mana enzim nitrat reduktase berperan dalam mereduksi nitrat menjadi bentuk amonium yang lebih mudah digunakan dalam biosintesis. Kehadiran mikroalga juga dapat membantu menurunkan konsentrasi nitrogen dalam air limbah melalui asimilasi langsung (Asthary et al., 2018).

Selain itu, penghapusan nitrogen juga didukung oleh proses sinergis antara mikroalga dan mikroorganisme lain dalam air limbah. Mikroorganisme heterotrofik dapat mengubah nitrogen organik menjadi amonium melalui dekomposisi, yang kemudian dimanfaatkan oleh mikroalga. Pengurangan kadar nitrogen ini tidak hanya mengurangi potensi eutrofikasi pada ekosistem penerima, tetapi juga menghasilkan biomassa mikroalga yang bernilai tinggi sebagai sumber bioenergi atau pakan. Dalam penelitian Silambarasan et al. (2021) menyatakan bahwa sistem mikroalga

dapat menghilangkan hingga 75-90% nitrogen dari air limbah domestik dalam waktu 5-10 hari, tergantung pada kondisi lingkungan seperti intensitas cahaya, pH, dan suhu.

1.6.4 Parameter Fosfor (P)

Fosfor juga merupakan salah satu parameter penting dalam penilaian kualitas air limbah domestik. Kehadirannya dalam bentuk senyawa fosfat (PO_4^{3-}) dapat berdampak signifikan terhadap ekosistem perairan. Sumber utama fosfor dalam air limbah domestik meliputi deterjen, limbah makanan, dan ekskresi manusia. Menurut penelitian, air limbah domestik yang belum diolah memiliki kandungan total fosfat antara 4 hingga 12 mg/L, dengan fosfat organik berkisar antara 1 hingga 4 mg/L, dan fosfat anorganik antara 3 hingga 10 mg/L.

Konsentrasi fosfat yang tinggi dalam badan air dapat memicu eutrofikasi, yaitu pertumbuhan berlebihan alga dan tumbuhan air yang mengakibatkan penurunan kadar oksigen terlarut. Hal ini berdampak negatif pada kehidupan organisme akuatik lainnya dan dapat menyebabkan kematian massal ikan serta gangguan ekosistem. Oleh karena itu, pengendalian kadar fosfat dalam air limbah domestik menjadi krusial untuk mencegah degradasi kualitas lingkungan perairan (Bahri, 2018).

Mikroalga juga memanfaatkan fosfor sebagai nutrisi penting dalam pengolahan air limbah domestik. Fosfor di dalam air limbah biasanya terdapat dalam bentuk ion ortofosfat (PO_4^{3-}), yang merupakan bentuk utama fosfor yang tersedia bagi mikroalga. Santoso et al. (2021) menyatakan bahwa fosfor berperan penting dalam berbagai proses metabolisme, termasuk sintesis asam nukleat, fosfolipid membran, dan pembentukan ATP, yang merupakan sumber energi utama bagi sel. Mikroalga menyerap fosfor melalui mekanisme transportasi aktif pada membran sel. Proses ini didukung oleh enzim fosfatase yang membantu melepaskan fosfor terlarut dari senyawa organik, sehingga mikroalga dapat memanfaatkannya untuk pertumbuhan dan reproduksi.

1.6.5 Pengelolaan Air Limbah Domestik

Pencemaran perairan oleh air limbah perlu mendapatkan perhatian karena air adalah sumber utama untuk semua makhluk hidup, apalagi untuk manusia dalam menjalankan aktifitasnya. Teknologi pengolahan air limbah, termasuk *greywater* berbagai rupa, dari yang simple hingga yang membutuhkan teknologi, dapat dilakukan secara fisik, kimia atau biologi. Tujuan utama pengelolaan air limbah adalah meningkatkan pelayanan dalam pengolahan air limbah yang ramah terhadap lingkungan dan dapat meningkatkan kualitas lingkungan dan masyarakat yang nyaman, bersih dan sehat.

Mahyuddin et al. (2023) menyatakan pengelolaan air limbah dapat digolongkan pada 3 teknik, teknik tersebut adalah pengerjaan fisik, biologi dan kimia. Pengaplikasian tiga teknik tersebut tersila pada mutu limbah dan keadaan sarana yang ada. Pengerjaan fisik merupakan cara pengerjaan dimana diterapkan proses

fisik contohnya flotasi, flokulasi, *screening*, sedimentasi dan *mixing*, filtrasi dan transfer gas. Pengerjaan kimia adalah cara pengerjaan dimana penyeleksian kontaminan yang diakibatkan karena bertambahnya bahan kimia dan melalui reaksi kimia seperti disinfeksi, presipitasi dan adsorpsi. Yang terakhir yaitu pengerjaan biologi adalah cara pengerjaan dimana kontaminan dipinggirkan dengan aktivitas biologi yang bermaksud untuk menghindarkan substansi organik biodegradable dalam limbah cair.

Konsep pengelolaan air limbah dibentuk melalui pengalaman, dimana sistem pengelolaan dibagi menjadi tiga yaitu sistem individu yang dikendalikan oleh rumah tangga, sistem skala permukiman dikendalikan oleh kelompok masyarakat, sistem kawasan/ perkotaan dikendalikan oleh institusi yaitu pemerintah daerah atau organisasi. Dari ketiga sistem tersebut kesemuanya membutuhkan dukungan dari berbagai aspek untuk menunjang pengelolaan air limbah secara berkelanjutan. Pengelolaan air limbah dalam skala domestik konsepnya dapat dilakukan dengan sistem setempat dimana sistem ini berupa skala individu, maupun komunal yang melayani 2 sampai dengan 10 RT (Rumah Tangga), dan sistem terpusat yang pelayanannya dalam skala pemukiman, kawasan tertentu dan perkotaan (Nawasis, 2020).

Dalam konsep pengelolaan air limbah dapat dilakukan beberapa strategi bertahap yang dapat dilakukan secara bijak (Komala, 2019).

1. Optimalisasi sistem setempat, dalam strategi ini perlu dilakukan peningkatan sistem pengolahan dan pengelolaan, mendorong pembangunan sistem tersebut dengan melalui sumber dana khusus daerah, dan mengoptimalkan pembangunan sistem pengolahan yang baru.
2. Pengembangan selektif sistem terpusat, dimana dilakukan pembangunan sistem pengolahan baru secara terpusat baik dari skala perkotaan, pemukiman maupun skala kawasan tertentu, serta meningkatkan kapasitas dan melakukan rehabilitasi ditiap skala tersebut.
3. Pengembangan teknologi tinggi, dalam hal ini diperlukan penerapan teknologi tingkat tinggi yang terpusat baik dalam skala perkotaan maupun pemukiman.

Sistem pengelolaan air limbah merupakan serangkaian perlakuan untuk mengelola air limbah yang ditunjang dengan berbagai sarana dan prasarana. Air limbah terdiri dari air limbah kaku atau *black water* dan air limbah non kaku atau *grey water*. Sistem pengelolaan air limbah terbagi dua yaitu sistem pengelolaan air limbah setempat (SPAL-S) dimana pengelolaannya langsung dilakukan di lokasi sumber limbah dan nantinya akan diangkut dengan menggunakan sarana pengangkut untuk selanjutnya masuk pada tahapan sub-sistem pengolahan dan sistem pengelolaan air limbah terpusat (SPAL-T) dimana pada sistem ini air limbah dialirkan langsung secara kolektif mulai dari sumber limbah ke sub sistem pengolahan secara terpusat sebelum dilakukan pembuangan secara langsung ke badan air. Sistem pengelolaan air limbah yang berkelanjutan harus dilakukan secara menyeluruh baik dari aspek fisik yaitu secara teknis maupun non fisik seperti lembaga, hukum, masyarakat dan pembiayaan (Nawasis, 2020).

Pengelolaan air limbah domestik sistem setempat dapat diartikan bahwa pengolahan air limbah dilakukan pada lahan yang tersedia di rumah tangga, penghasil sumber air limbah. Teknologi yang digunakan untuk sistem setempat individu umumnya berupa tangki septik, dalam sistem ini hanya berfokus pada aspek teknis dalam pengelolaan. Menurut Nawasis, (2020), sistem pengolahan air limbah setempat memiliki 5 komponen yaitu:

1. Buangan air limbah domestik dari hasil kegiatan rumah tangga seperti dapur, kamar mandi, tempat cuci, dan WC.
2. Penampungan dan pengolahan air limbah domestik dalam sarana tangki septik yang kedap dan sesuai SNI (Standar Nasional Indonesia).
3. Penyedotan lumpur tinja secara berkala menggunakan jasa penyedotan resmi yang diakui atau terdaftar pada pemerintah setempat. Penyedotan lumpur tinja umumnya dilakukan 3 tahun sekali.
4. Transportasi lumpur tinja ke IPLT (Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja) untuk diolah lebih lanjut. Transportasi lumpur tinja harus memenuhi standar yang menjamin tidak terjadi tumpahan atau ceceran lumpur tinja selama perjalanan ke IPLT.
5. Pengolahan lumpur tinja di IPLT sesuai dengan SOP (*Standar Operasional Procedure*)

Berdasarkan PERDA No. 1 Tahun 2019, cakupan pelayanan sistem pengolahan air limbah domestik meliputi skala perkotaan yang pelayanannya minimal mencapai 20.000 jiwa, skala pemukiman melayani 50-20.000 jiwa dan skala kawasan tertentu seperti rumah susun, hotel, pertokoan, pusat perbelanjaan, pondok pesantren, perkantoran dan gedung pemerintah.

Pengelolaan air limbah terpusat merupakan sistem yang fasilitas pengolahannya berada di luar yang dibatasi oleh jarak dengan menggunakan sistem perpipaan dan dialirkan bersamaan dari lokasi sumber air limbah baik perumahan maupun industri hingga ke sistem pengolahan terpusat. Pengelolaan air limbah terpusat tidak lepas dari berbagai aspek selain aspek teknis adapun aspek pembiayaan, aspek institusi atau kelembagaan dan aspek peran serta masyarakat yang begitu mempengaruhi pengelolaan tersebut.

Sistem pengolahan air limbah terpusat terdiri dari beberapa komponen yaitu:

1. Sistem pelayanan
Sistem pelayanan terdiri dari sarana dan prasarana untuk mengumpulkan dan mengolah air limbah dari sumber melalui perpipaan hingga sampai pada sistem pengumpulan.
2. Sistem pengumpulan
Sistem ini merupakan perantara air limbah dari tempat sumber air limbah untuk nantinya bisa dialirkan ke sistem pengolahan secara menyeluruh.
3. Sistem pengolahan terpusat
Sistem pengolahan ini yang akan bertugas untuk mengolah air limbah yang telah diterima dari berbagai sumber layanan dan pengumpul.

1.6.6 Mikroalga

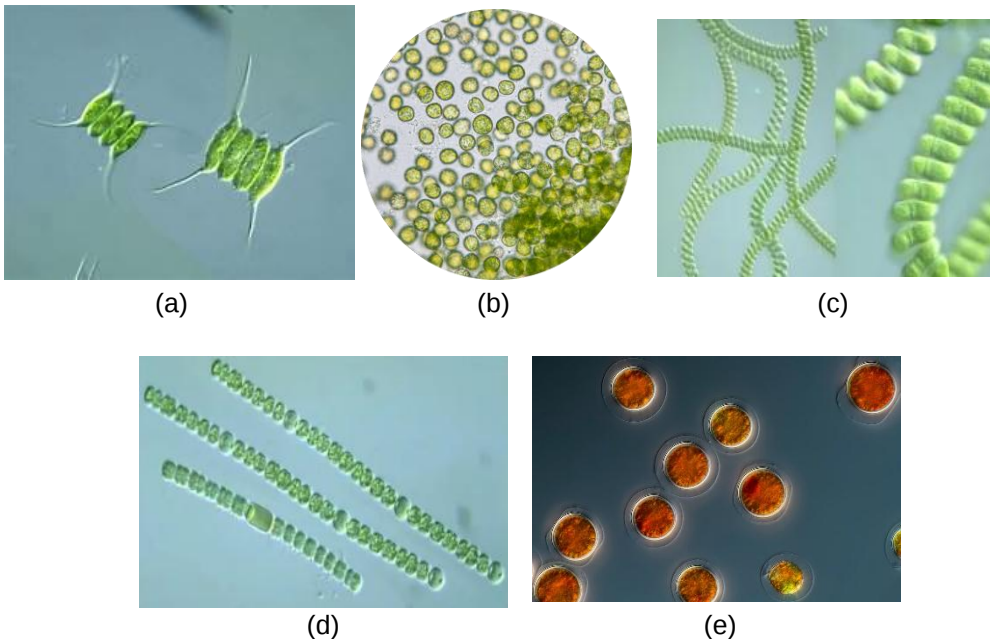
Mikroalga merupakan kelompok tumbuhan berukuran renik yang termasuk dalam kelas alga, dengan diameter 3-30 μm , baik sel tunggal maupun koloni yang hidup di seluruh wilayah perairan tawar maupun laut, yang lazim disebut fitoplankton. Mikroalga sendiri merupakan organisme autotrof yang tumbuh melalui proses fotosintesis. Struktur uniseluler mikroalga memungkinkan mengubah energi matahari menjadi energi kimia dengan mudah. Di dunia mikrobial, mikroalga termasuk eukariotik, umumnya bersifat fotosintetik dengan pigmen fotosintetik hijau (klorofil), cokelat (fikosantin), biru kehijauan (fikobilin), dan merah (fikoeritin). Morfologi mikroalga berbentuk uniseluler atau multiseluler tetapi belum ada pembagian tugas yang jelas pada sel-sel komponennya, dimana hal ini yang membedakan mikroalga dari tumbuhan tingkat tinggi (Hindarti & Ayuningtyas, 2020).

Mikroalga menjadi fokus penelitian sejak tahun 1960an dalam bidang ekologi dan lingkungan. Mikroalga memerlukan karbondioksida, cahaya dan nutrisi untuk melakukan fotosintesis. Potensi mikroalga sebagai sumber biofuel dan teknologi terbarukan untuk pangan dan energi masa depan telah meningkat, kemampuannya sebagai bioremediasi untuk lingkungan yang tercemar. Dalam aspek bioteknologi, kelompok *Cyanobacteria*, *Chlorophyceae*, dan *Ocrophyta* menjadi klasifikasi yang paling sering digunakan (Siqueira et al., 2018).

Klasifikasi mikroalga agak rumit, terutama karena keanekaragaman hayatinya. Beberapa penelitian terus dilakukan untuk mengkaji taksonomi mikroalga selama bertahun-tahun, namun data baru tentang sifat alga terus menerus memerlukan perubahan. Sampai saat ini, satu hal yang pasti dalam pembagian umum dari 3 kingdom mikroalga yaitu *protist*, *plants*, dan *bacteria*. Perwakilan utama dalam kingdom *protist* adalah *Bacillariophyta* atau diatom (organisme monoseluler), ganggang cokelat dan di-noflagellata (*Dinoflagellata*). Ganggang cokelat (*Phaeophyceae*) adalah organisme multiseluler, hidup di perairan laut dingin yang luas (Zdziebłowska et al., 2024).

Kingdom *plants* meliputi alga hijau (*Chlorophyta*) yang tumbuh di perairan tawar atau asin hingga kedalaman 10 meter, dan alga merah (*Rhodophyta*), yang morfologinya mirip dengan tumbuhan pada umumnya. Kingdom *bacteria* terdiri dari *Cyanobacteria* yang ditemukan hampir di seluruh dunia. Mayoritas spesies *Cyanobacteria* bersifat autotrofik dan menghasilkan senyawa organik penting melalui fotosintesis. Kingdom ini juga mencakup spesies yang mampu mengasimilasi nitrogen dari udara atmosfer. Salah satu perwakilan dari kingdom ini adalah *Arthrospira Platensis* atau yang dikenal dengan *Spirulina* (Lafarga et al., 2020).

Genus yang paling dikenal adalah *Spirulina*, yang merupakan nama dagang untuk menggambarkan dua spesies utama *Cyanobacteria*: *Arthrospira platensis* dan *Arthrospira maxima*. *Spirulina* adalah mikroalga yang paling banyak dibudidayakan di seluruh dunia – lebih dari 30% produksi biomassa mikroalga global berasal dari *Spirulina*. *Spirulina* terutama dikenal karena kandungan proteinnya yang tinggi, yaitu sekitar 60% dari berat kering dan bahkan dapat mencapai 70% apabila dibudidayakan dalam kondisi yang tidak terbatas oleh nitrogen (Costa et al., 2019).



Gambar 1. Beberapa spesies mikroalga dari beberapa kelas berbeda. (a) *Scenedemus*, (b) *Chlorella*, (c) *Spirulina*, (d) *Anabaena*, (e) *Haematococcus*.

Faktor yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga. Untuk mencapai produksi mikroalga maksimum melalui fotobioreaktor, beberapa faktor yang mempengaruhi pertumbuhan dan produksi kandungan kimia mikroalga menurut Ahmad et al., (2021) beberapa faktor yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga, yaitu:

1. Derajat Keasaman (pH)

pH menentukan alkalinitas atau keasaman media air. Kisaran pH optimal untuk pertumbuhan mikroalga dan kemampuan fotosintesis adalah 6-8. Perubahan pH dapat mempengaruhi pertumbuhan mikroalga dalam banyak hal. Pada siang hari, pH meningkat karena proses asimilasi fotosintesis CO_2 mikroalga dan pada malam hari pH menurun karena proses respirasi spesies. Peningkatan CO_2 dapat menyebabkan akumulasi biomassa yang tinggi namun menyebabkan penurunan pH yang berdampak buruk pada fisiologi mikroalga.

2. Salinitas

Perubahan rentang salinitas dapat mempengaruhi pertumbuhan mikroalga. Mikroalga ada yang dapat tumbuh pada kisaran salinitas tinggi, namun ada juga yang dapat tumbuh pada kisaran salinitas rendah. Namun sebagian besar mikroalga dapat tumbuh optimal pada salinitas yang sedikit lebih rendah dibandingkan habitat aslinya. Penyesuaian salinitas pada media yang diperkaya dapat dilakukan dengan pengenceran dengan air tawar. Kisaran salinitas optimal untuk pertumbuhan mikroalga adalah 25-35‰.

3. Nutrisi

Untuk pertumbuhan mikroalga yang optimal diperlukan fosfor dan nitrogen sebagai unsur hara makro dan Fe, Mg, K, Mo, B, Co, Zn, diperlukan sebagai unsur jejak.

Penelitian menunjukkan bahwa media pertumbuhan yang kekurangan nitrogen mempercepat alga menghasilkan lebih banyak lipid. Kelebihan dan kekurangan unsur hara dapat menyebabkan perubahan morfologi dan fisiologis mikroalga karena menghambat jalur metabolisme.

4. Suhu

Umumnya alga dapat bertahan pada kisaran suhu 15°-40°C. Beberapa penelitian mengungkapkan bahwa mikroalga dapat tumbuh paling baik pada kisaran suhu 25°-30°C. Suhu pertumbuhan optimal bervariasi tergantung pada spesies mikroalga. Pengendalian suhu pada sistem budidaya terbuka terbilang cukup sulit dan mahal karena sistem ini lebih sensitif terhadap panas berlebih, penguapan dalam medium, pendinginan dan komposisi. Salah satu alasan sistem tertutup seperti fotobioreaktor paling sering digunakan karena lebih mudah untuk mengontrol suhu dalam sistem ini.

5. Intensitas Cahaya

Intensitas cahaya dan efisiensi fotosintesis berperan penting dalam produktivitas alga karena mempengaruhi laju pertumbuhan, produksi biomassa, dan akumulasi lipid. Komponen yang mempengaruhi intensitas cahaya adalah kepadatan biomassa alga, kedalaman kultur, dan jenis fotobioreaktor. Peningkatan intensitas cahaya diperlukan jika konsentrasi dan kedalaman sel kultur lebih tinggi, namun harus diingat bahwa terkadang sinar matahari langsung dan cahaya buatan dengan kepadatan tinggi juga dapat menyebabkan fenomena fotokimia.

Mikroalga melakukan fotosintesis dengan menyerap cahaya sebagai sumber energi untuk mengonversi karbon dioksida (CO_2) dan air (H_2O) menjadi senyawa organik, seperti karbohidrat, serta melepaskan oksigen (O_2) sebagai produk sampingan. Proses ini terjadi dalam kloroplas, di mana pigmen fotosintetik utama seperti klorofil-a, klorofil-b, dan fikobiliprotein menyerap cahaya, terutama pada panjang gelombang merah (~680 nm) dan biru (~450 nm). Cahaya yang diserap akan digunakan dalam reaksi terang untuk memecah molekul air melalui fotolisis, menghasilkan ATP dan NADPH yang kemudian digunakan dalam reaksi gelap (siklus Calvin) untuk mengasimilasi karbon dari CO_2 menjadi senyawa organik yang dibutuhkan sel. Selain cahaya, mikroalga juga memerlukan nutrisi esensial seperti nitrogen (N) dan fosfor (P) untuk mendukung pertumbuhan dan sintesis biomolekul (Anggraini et al., 2023).

6. Karbon Dioksida (CO_2)

Mikroalga menggunakan CO_2 sebagai sumber karbon. Mikroorganisme ini tidak dapat tumbuh tanpa penambahan CO_2 . Pasokan CO_2 yang tidak mencukupi seringkali menjadi faktor pembatas produktivitas. Oleh karena itu, pengurangan jumlah CO_2 di atmosfer melalui fotosintesis mikroalga dianggap aman dan bermanfaat bagi ekosistem manusia.

Fase pertumbuhan mikroalga. Dalam kultur mikroalga, perkembangan sel terdiri dari lima fase: adaptasi (lag), fase eksponensial (logaritmik), fase penurunan laju pertumbuhan (deklinasi), fase stasioner, dan fase kematian. Setiap organisme memiliki fase pertumbuhan yang berbeda. Kondisi pertumbuhan secara umum menentukan perbedaan panjang atau kemiringan kurva pertumbuhan.

Keanekaragaman tahap pertumbuhan tergantung pada inokulum, teknik budidaya, konsentrasi nutrisi, intensitas cahaya dan suhu Becker dalam (Lubis & Lubis, 2023).

Fase lag merupakan fase pertumbuhan pertama yang dilalui mikroalga dan mengalami penurunan kadar metabolisme akibat inokulum yang tidak merata, setelah itu terjadi proses adaptasi terhadap media kultur. Fase eksponensial (logaritmik) merupakan fase kedua pertumbuhan mikroalga, dimana terjadi laju pertumbuhan dan rasio konsentrasi komponen biokimia menjadi konstan. Menurut Andersen dalam Lubis & Lubis, (2023) fase eksponensial dapat ditandai dengan mulai terjadi peningkatan kepadatan sel pada mikroalga.

Fase penurunan laju pertumbuhan yakni fase yang ditandai dengan pembelahan sel yang terjadi namun tidak separah tahap sebelumnya, sehingga laju pertumbuhannya juga menurun dibandingkan dengan tahap sebelumnya. Fase selanjutnya adalah fase stasioner dimana adanya keseimbangan pertumbuhan sel pada fase ini sehingga terjadi kepadatan sel yang relatif tetap. Keterbatasan intensitas cahaya yang dapat diserap mikroalga menyebabkan fase stasioner Lee dan Shen dalam (Lubis & Lubis, 2023). Fase kematian ditandai dengan habisnya jumlah nutrisi dalam medium, sel yang masih hidup tidak dapat tumbuh dan hanya dapat bertahan hidup kemudian sel-sel tersebut akan mati. Selain itu, kondisi lingkungan yang buruk, media kultur yang sudah tua, kekurangan nutrisi dan kurangnya penyerapan cahaya atau kontaminasi mikroorganisme lain dapat menyebabkan fase ini terjadi.

Pengolahan air limbah menggunakan mikroalga. Mikroalga berkembang sebagai agen bioremediasi yang kuat dalam pengolahan air limbah, mencerna dan menghilangkan polutan dari air limbah. Strain mikroalga tertentu memiliki kemampuan bawaan untuk menyerap berbagai macam polutan termasuk logam berat, senyawa nitrogen bahkan senyawa kimia berbahaya sehingga mendorong pendekatan dari berbagai sisi dalam pemurnian air dan pengelolaan lingkungan. Kemampuan beradaptasi mikroalga dalam pengolahan air limbah telah memicu banyak penelitian dari berbagai sumber. Mikroalga telah menjadi pesaing kuat dalam memulihkan keseimbangan lingkungan, mulai dari pengolahan air limbah domestik, limbah industri, produksi biofuel, pengolahan makanan hingga industri tekstil (Mohd Udaiyappan et al., 2020).

Teknologi berbasis mikroalga memiliki beberapa manfaat seperti hemat energi dan mengurangi penggunaan bahan kimia, mikroalga memiliki kemampuan serapan hara anorganik yang tinggi dan dapat dibudidayakan secara besar-besaran di bioreaktor. Selain itu, pengolahan air limbah biologis dengan mikroalga lebih ramah lingkungan dibandingkan metode fisik dan kimia, yang seringkali lebih mahal untuk diterapkan dan berkontribusi terhadap polusi sekunder. Berdasarkan analisis siklus hidup, sistem pengolahan air limbah menggunakan mikroalga dapat diintegrasikan dengan baik dalam sistem pengolahan air yang ada untuk menghasilkan biofuel dari alga (Hasan et al., 2023).

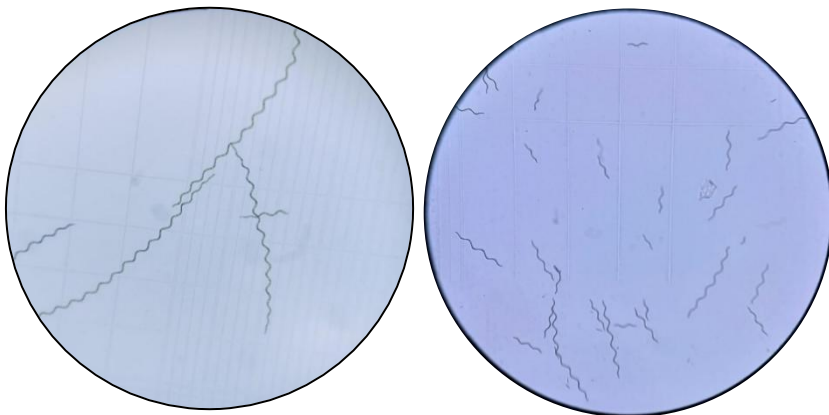
1.6.7 Mikroalga *Spirulina Platensis*

Salah satu mikroalga yang saat ini telah dikembangkan dan terus diteliti adalah *Spirulina plantesis*. *Spirulina* merupakan alga berwarna biru-hijau yang digolongkan ke dalam cyanobacteria, bersel satu dan berbentuk spiral serta mengandung klorofil dan dapat bertindak sebagai organisme yang dapat melakukan fotosintesis untuk membuat makanan sendiri. Berdasarkan habitatnya, spirulina dapat berkembang dengan baik pada perairan tropis dan subtropis, baik pada perairan tawar maupun perairan laut. *Spirulina plantesis* mempunyai kandungan nutrisi yang tinggi seperti protein, asam lemak, vitamin dan antioksidan, sehingga mempunyai kemampuan tumbuh optimal, bahan pangan alami dan bahan baku industri, suplemen makanan, farmasi dan kosmetik (Hanani, dkk, 2020).

Spirulina plantesis memiliki kemampuan untuk tumbuh pada media yang memiliki alkalitas tinggi yaitu dengan pH 8,5-11. Suhu terendah untuk *Spirulina* yaitu antara 15°C dan pertumbuhan optimal berada pada suhu 25°-35°C. Mikroalga *Spirulina plantesis* mengandung protein sebesar 55-70%. Ada tiga tahapan utama dalam siklus hidup *Spirulina platensis*, yaitu pembelahan trikoma, pemanjangan hormon, dan proses pematangan pemanjangan trikoma. Ketika trikoma dewasa dapat membelah menjadi filamen dan hormon, sel hormon berkembang biak melalui pembelahan biner dan tumbuh secara longitudinal membentuk heliks (spiral) sepanjang siklus hidup.

Salah satu genus yang paling terkenal adalah *Spirulina*, yang merupakan nama umum untuk menggambarkan dua spesies *Cyanobacteria*: *Arthrospira platensis* dan *Arthrospira maxima*. *Spirulina* adalah salah satu jenis mikroalga yang paling banyak dibudidayakan di seluruh dunia dimana lebih dari 30% produksi biomassa mikroalga dunia berasal dari *Spirulina* (Yuan et al., 2018). Berikut merupakan tingkatan taksonomi dari jenis mikroalga *Spirulina platensis*.

Divisi : Chyanophyta
Kelas : Chyanophyceae
Ordo : Oscillatoriales
Famili : Oscillatoriacea
Genus : *Spirulina*
Spesies : *Spirulina Platensis*



Gambar 2. Hasil pengamatan mikroskop mikroalga *Spirulina platensis*

1.6.8 Pupuk Walne

Pupuk Walne adalah media nutrisi yang umum digunakan dalam budidaya mikroalga, termasuk *Spirulina platensis*. Pupuk ini mengandung berbagai unsur hara makro dan mikro yang esensial untuk pertumbuhan mikroalga, seperti nitrogen, fosfor, vitamin, dan mineral. Dalam konteks pengolahan air limbah domestik, *Spirulina platensis* dapat memanfaatkan nutrisi yang terdapat dalam limbah tersebut, seperti nitrogen dan fosfor, untuk pertumbuhannya. Dengan demikian, kombinasi pupuk Walne dan air limbah domestik dapat menyediakan lingkungan yang kaya nutrisi bagi *Spirulina platensis*, yang pada gilirannya dapat membantu dalam proses bioremediasi dengan mengurangi konsentrasi nutrisi berlebih dalam air limbah.

Menurut Hasim et al. (2022), pupuk walne baik bagi *Spirulina platensis* karena media walne mengandung komposisi nutrisi yang lengkap yaitu terdiri atas unsur makro dan mikro jika dibandingkan dengan media lain. Penggunaan media kultur dengan pupuk Walne dinilai lebih baik untuk meningkatkan pertumbuhan mikroalga hijau. Dalam penelitian Putri & Alaa (2019) menyimpulkan bahwa media kultur dengan pupuk walne mampu menyediakan nutrisi yang lebih baik untuk pertumbuhan mikroalga *Haematococcus* jika dibandingkan dengan media Guillard, ini dikarenakan media walne mengandung unsur nitrogen dan fosfor yang lebih tinggi sehingga membuat produksi biomassa mikroalga lebih tinggi. Penggunaan pupuk sintesis seperti pupuk Walne untuk kultur mikroalga juga dinilai lebih praktis karena kandungan nutrisinya yang sudah lengkap dibandingkan dengan pupuk organik (Budiono et al., 2018).



Gambar 3. Pupuk walne

Dalam penelitian Alyaniazy (2023) mendeskripsikan pembuatan pupuk walne yakni bahan kimia dilarutkan dalam aquades 1000 ml (1 liter) yang sudah diautoklaf, kemudian diautoklaf kembali selama 30 menit dengan suhu 121°C. Pemberian nutrisi dilakukan dengan pupuk walne pada dosis 1 ml/L media. Adapun komposisi pupuk walne dapat dilihat dalam tabel berikut.

Tabel 2. Komposisi pupuk walne

No	Komponen	Komposisi
1.	$\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Klorida heksahidrat)	1,3 gr

No	Komponen	Komposisi
2.	MnCl ₄ ·4H ₂ O (Klorida tetrahidrat)	0,36 gr
3.	H ₃ BO ₃ (Asam borat)	33,60 gr
4.	NaH ₂ PO ₄ ·2H ₂ O (Natrium dihidrogen fosfat dihidrat)	20 gr
5.	NaNO ₃ (Natrium nitrat)	100 gr
6.	Na ₂ ·EDTA (Disodium etilendiaminetetraasetat)	45 gr
	Larutan <i>Trace Metal Solution</i> :	
	• ZnCl₂ (Seng (II) klorida) • CuSO₄·5H₂O (Tembaga (II) sulfat pentahidrat) • CoCl₂·6H₂O Kobalt (II) klorida heksahidrat) • (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O (Amonium molibdat tetrahidrat)	1 ml

Sumber: Alyaniazy (2023)

1.6.9 Fotobioreaktor

Pemilihan dan desain fotobioreaktor untuk mikroalga bergantung pada berbagai faktor seperti pencahayaan, pasokan udara, akumulasi oksigen dan suhu (Ahmad et al., 2021). Fotobioreaktor dapat berupa sistem tertutup dan sistem terbuka yang memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Prospek dan keterbatasan kedua sistem dirangkum dalam tabel berikut.

Tabel 3. Kelebihan dan kekurangan fotobioreaktor sistem terbuka dan sistem tertutup

No	Kelebihan	Kekurangan
Sistem Terbuka		
1	Konstruksi, pengoperasian dan perawatannya mudah.	Resiko tinggi terhadap kontaminasi dan heterotrof
2	Kebutuhan energi rendah	Produktivitas biomassa buruk (0,1-0,2 mg/l)
3	Lebih baik untuk budidaya mikroalga secara massal	Difusi CO ₂ ke atmosfer, kehilangan penguapan dan pemanfaatan cahaya yang buruk
4	Tidak bersaing dengan lahan pertanian	Kebutuhan area/ruangan yang luas
5	Banyak digunakan untuk memperoleh protein, beta karotin, dan astaxanthin	Sulitnya pengendalian dan ketergantungan terhadap iklim
6	Pelacak surya dapat digunakan untuk budidaya sistem terbuka	Terbatas pada beberapa strain mikroalga tertentu dan sulit untuk tumbuh dalam jangka waktu yang lama.
Sistem Tertutup		
1	Kontrol yang baik terhadap budidaya dan parameter pertumbuhan	CAPEX dan OPEX yang tinggi

No	Kelebihan	Kekurangan
2	Tidak bergantung pada iklim	Kemungkinan terjadinya overheating dan biofouling
3	Kurangnya kehilangan air dan CO ₂	Akumulasi oksigen dapat menurunkan biomassa
4	Kepadatan mikroalga, konsentrasi dan produktivitas biomassa yang lebih tinggi (2-8 mg/l)	Pembentukan biofilm alga menyebabkan pengotoran pada permukaan PBR sehingga menghambat penetrasi cahaya.
5	Sedikit resiko kontaminasi	Sedikit kesulitan dalam meningkatkan mikroalga
6	Rasio biomassa lebih tinggi	Tekanan geser dapat merusak sel

Sumber: (Yin et al., 2020)

Sistem terbuka. Budidaya mikroalga di kolam terbuka dengan menggunakan energi dari sinar matahari menjadi sistem terbaik dalam enam dekade terakhir dan dapat dilakukan di kolam buatan dan badan air alami seperti danau dan laguna. Beberapa sistem terbuka dianggap populer karena strukturnya yang sederhana, ekonomis, dan kapasitas produksi yang tinggi, seperti kolam melingkar dan kolam *raceaway*. Tanah dan beton yang dipadatkan merupakan bahan konstruksi untuk membuat kolam dengan sistem terbuka. Sedangkan sistem tertutup biasanya terbuat dari akrilik atau kaca *plexiglass*, yang harganya lebih mahal. Sistem terbuka sangat penting dinilai dari kemudahan skalabilitas, perspektif ekonomi, dan produktivitas biomassa mikroalga. Meski memiliki banyak kelebihan, intensitas cahaya dan suhu yang tidak terpantau dapat mempengaruhi toleransi mikroalga sehingga menurunkan produktivitas biomassa. Distribusi cahaya yang buruk juga menjadi masalah karena cahaya tidak dapat mencapai kedalaman tertentu, sehingga distribusi cahaya tidak merata (Ahmad et al., 2021). Berikut merupakan contoh gambar budidaya mikroalga di kolam terbuka.

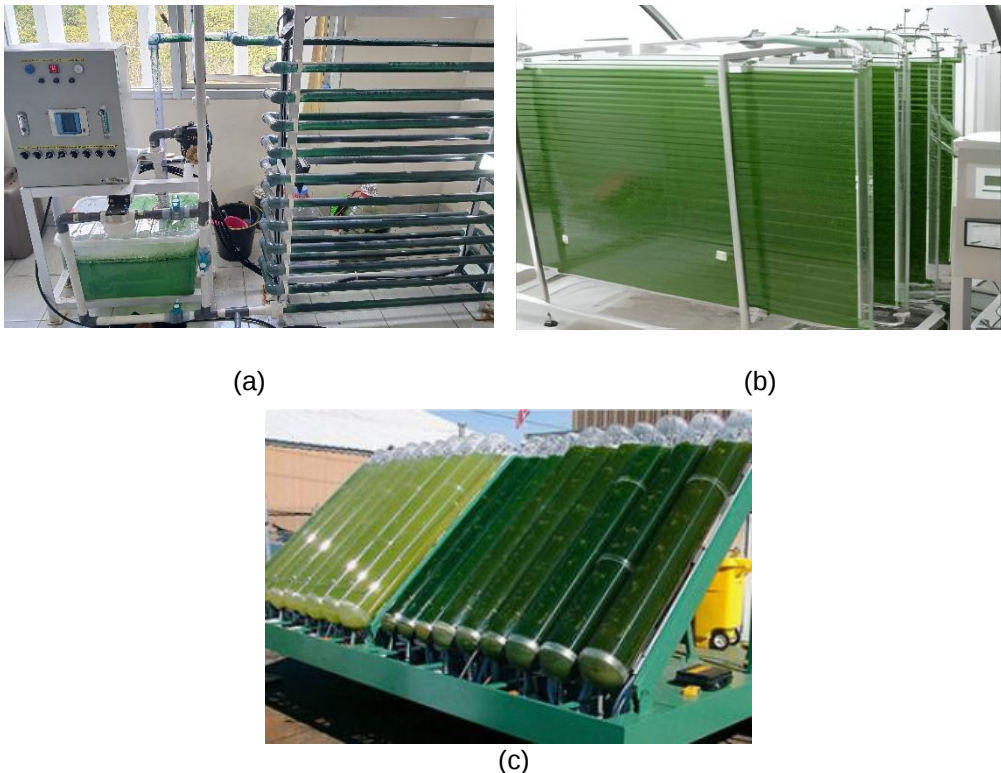


Gambar 4. Sistem budidaya mikroalga terbuka

Sumber: (Ahmad et al., 2021)

Sistem tertutup. Sistem tertutup berupa wadah tertutup buatan yang membantu sel mikroalga untuk melakukan fotosintesis menggunakan penerangan

buatan atau sinar matahari langsung sebagai sumber energinya. Fotobioreaktor dengan sistem tertutup umumnya dicirikan oleh konfigurasi geometris dengan fotobioreaktor sistem tertutup yang paling umum digunakan adalah fotobioreaktor tubular vertikal dan horizontal, fotobioreaktor kolom vertikal (dengan sistem pengangkut udara), dan fotobioreaktor panel datar. Dalam keluarga fotobioreaktor, sistem tertutup memiliki efisiensi lebih tinggi dibandingkan sistem terbuka karena memiliki rasio permukaan terhadap volume yang tinggi, namun hal ini menjadikan sistem tertutup dinilai tidak ekonomis (Reardon & Chisholm, 2019). Contoh sistem budidaya alga secara tertutup dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 5. Sistem budidaya mikroalga tertutup. (a) Fotobioreaktor berbentuk tabung, (b) Fotobioreaktor panel datar, (c) Fotobioreaktor kolom vertikal.

Sumber: (Ahmad et al., 2021)

1.6.10 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu dapat merujuk pada berbagai jenis penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya dalam bidang yang sama atau berkaitan dengan penelitian yang sedang dilakukan. Hal ini dapat digunakan untuk memperkuat argumen dalam penelitian atau untuk memberikan konteks yang lebih luas. Penelitian terdahulu juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi kesenjangan dalam literatur yang dapat diisi oleh penelitian saat ini. Penelitian terdahulu menjadi gambaran atau acuan bagi penulis ketika melakukan penelitian ini. Beberapa penelitian terdahulu yang relevan

terkait pengolahan air limbah menggunakan mikroalga dijabarkan dalam tabel berikut.

Tabel 4. Penelitian terdahulu

No	Judul Penelitian dan Peneliti	Metode Penelitian	Variabel	Hasil Penelitian
1	Produksi <i>Spirulina platensis</i> dalam fotobioreaktor kontinyu menggunakan media limbah cair pabrik kelapa sawit (Suharyanto et al., 2016)	<i>S. platensis</i> ditumbuhkan secara batch pada berbagai komposisi media, yaitu (1) LC-PKS 25% dan media sintetik 75%, (2) LC-PKS 50% dan media sintetik 50%, (3) LC-PKS 75% dan media sintetik 25%, serta (4) LC-PKS 90% dan media sintetik 10%. <i>Spirulina platensis</i> ditumbuhkan pada suatu bejana kaca volume 3 L dan diaerasi dengan aerator. Inokulum <i>S. platensis</i> ditambahkan sebanyak 10% dari volume media pertumbuhan.	Parameter yang diamati meliputi nilai densitas optik (OD) pada λ 480 nm, biomassa kering, dan nilai total karbon.	<i>Spirulina platensis</i> dapat ditumbuhkan dalam fotobioreaktor kontinyu menggunakan media LC-PKS 90% dan media sintetik 10% dengan laju dilusi 0,015 jam ⁻¹ . Pertumbuhan <i>S. platensis</i> setelah tiga hari pada perbesaran skala percobaan delapan kali relatif konstan, dengan biomassa 0,25 g/L dan OD = 0,5. disertai penurunan nilai TC dan nilai BOD. Laju alir keluar (outflow) menghasilkan kadar cemaran limbah yang konstan yang menunjukkan sistem dari fotobioreaktor kontinyu ini berjalan dengan baik.
2	Komposisi Kimia <i>Spirulina platensis</i> yang Dikultivasi dalam Fotobioreaktor dengan Fotoperiode Berbeda (Sari Afriani et al., 2018)	Metode penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan dua kali ulangan. <i>S. platensis</i> dikultur dengan volume masing-masing 10 L menggunakan media pertumbuhan berupa kombinasi antara pupuk Urea, pupuk organik RI1 <i>Plant catalyst</i> (URC) dengan perlakuan lama pencahayaan	Variabel yang diamati meliputi kurva pertumbuhan, rendemen biomassa kering, kandungan karbohidrat, protein, lemak dan komponen aktif.	Penggunaan fotobioreaktor terkontrol (FK) dan fotobioreaktor tanpa kontrol (FTK) memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kurva pertumbuhan, total rendemen biomassa, kandungan karbohidrat dan lemak, sedangkan perlakuan perbedaan fotoperiode berpengaruh terhadap kurva pertumbuhan, total rendemen biomassa, kandungan karbohidrat, protein dan lemak. Hasil uji fitokimia positif mengandung senyawa flavonoid, fenol, steroid dan saponin.

No	Judul Penelitian dan Peneliti	Metode Penelitian	Variabel	Hasil Penelitian
		(fotoperiode) 24:0, 16:8, 12:12 dan 6:18 (jam terang:jam gelap).		
3	<i>Cultivation of Spirulina Platensis for Carbon Dioxide Bio Sequestration in Hybrid Photobioreactor With Real-Time Monitoring System</i> (Satya et al., 2024)	Penelitian dilakukan pada kerapatan fluks foton (PFD) yang bervariasi. Intensitas cahaya diukur dengan <i>lux meter logger</i> (LX113S, Lutron Taiwan) dan data pencahayaan yang diperoleh diubah menjadi PFD (dinyatakan dalam $\mu\text{mol}/(\text{m}^2.\text{s})$).	Variabel yang diamati meliputi data <i>real-time</i> seperti pH, oksigen terlarut (DO), suhu, kinetika pertumbuhan <i>Cynobacterium</i> , penyerapan CO_2 , laju pelepasan oksigen dan keseimbangan massa karbon.	Penelitian ini berhasil merancang fotobioreaktor hibrid untuk membudidayakan <i>Spirulina Platensis</i> serta mengoptimalkan produksi biomassa dan penyerapan CO_2 menggunakan siklus gelap/terang dalam rangkaian prosesnya. Dengan injeksi CO_2 15% di bawah PFD $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2.\text{s})$ memberikan kondisi terbaik untuk produksi biomassa.
4	<i>Performance Of Membrane Photobioreactors for Integrated and Removal Spirulina Strain Cultivation Membrane Bioreactor Waste Nutrients</i> (Theepharakspan et al., 2023)	Penelitian dilakukan dengan metode studi eksperimental dengan pengoperasian secara kontinyu selama 40 hari dengan HRT dan SRT yang bervariasi.	Variabel yang diamati meliputi variasi <i>Hydraulic Retention Time</i> (HRT) dan <i>Solid Retention Time</i> (SRT).	Membran fotobioreaktor terbukti efisien dalam mengolah sisa nitrat dan nitrogen yang tersisa dalam MBR dengan membudidayakan <i>Spirulina</i> . Fe memainkan peran penting dalam pertumbuhan mikroalga dan meningkatkan efisiensi penghilangan nutrisi. Praktik pengoperasian membran fotobioreaktor yang baik ditunjukkan pada waktu retensi hidrolis (HRT) dan waktu retensi padatan (SRT) masing-masing 7,7–7,8 hari dan 60–80 hari, dengan menambahkan bikarbonat sebagai sumber karbon eksternal.

No	Judul Penelitian dan Peneliti	Metode Penelitian	Variabel	Hasil Penelitian
5	Penurunan <i>Chemical Oxygen Demand</i> (COD) Dan Fosfat ($\text{PO}_4\text{-P}$) Limbah Laundry Menggunakan EM_4 dan Mikroalga <i>Spirulina sp</i> (Kristin Ari Fitria et al., 2023).	Penelitian melibatkan penggunaan sistem <i>batch</i> untuk mengolah air limbah laundry dengan mikroalga dan EM_4 .	Variabel yang diamati meliputi konsentrasi EM_4 , aerasi, dan waktu retensi divariasikan untuk mempelajari dampaknya terhadap pH, COD, dan $\text{PO}_4\text{-P}$.	Konsentrasi EM_4 , aerasi dan waktu tinggal berpengaruh terhadap penurunan COD dan $\text{PO}_4\text{-P}$. pH selama penelitian stabil sekitar 8.1-8.3, penurunan COD dan $\text{PO}_4\text{-P}$ tertinggi terjadi pada reaktor dengan penambahan EM_4 5% dan aerasi pada hari ke-3, konsentrasi COD akhir sebesar 283.5 mg/l dengan penurunan 81.75%, dan konsentrasi $\text{PO}_4\text{-P}$ akhir 11.25 mg/l dengan penurunan 48.15%.
6	Pengembangan Teknik Kultivasi <i>Spirulina sp.</i> Sebagai Sumber Biomassa Energi Terbarukan dalam Fotobioreaktor <i>Airlift</i> (Hindarti & Ayuningtyas, 2020).	Mikrolaga <i>Spirulina Sp.</i> dikembangkan di dalam fotobioreaktor tipe <i>airlift</i> skala <i>intermediate</i> sistem batch. Metode yang digunakan adalah eksperimental dengan kultur tiap intensitas cahaya yang berbeda dilakukan sebanyak 3 kali ulangan. Produktivitas mikroalga didapatkan dengan metode analisis gravimetri/ berat kering. Data produktifitas mikroalga berdasarkan hasil penelitian kemudian diolah menggunakan <i>Analysis of</i>	Data yang diperlukan adalah besar intensitas cahaya sebagai variabel bebas, dan kuantitas/ bobot biomassa mikrolaga <i>Spirulina sp.</i> hasil kultivasi sebagai variabel terikat	Intensitas cahaya yang berbeda didapatkan biomassa yang semakin hari semakin meingkat, namun peningkatan pertumbuhan tersebut tidak sama. Semakin tinggi intensitas cahaya maka suhu juga akan semakin meningkat, karena cahaya sebagai gelombang elektromagnetik memiliki energi yang dilepaskan bisa menimbulkan panas. Suhu yang tinggi dapat mempengaruhi metabolisme sel dan mempengaruhi kinerja enzim, semakin tinggi suhu akan menyebabkan reaksi enzim menurun yang pada akhirnya akan berpengaruh pada pertumbuhan sel mikroalga.

No	Judul Penelitian dan Peneliti	Metode Penelitian	Variabel	Hasil Penelitian
		<i>Variance</i> (ANOVA) dengan perangkat lunak Excel.		
7	Pengaruh Pertumbuhan <i>Spirulina Platensis</i> terhadap Kandungan Pigmen Beda Salinitas (Widawati et al., 2022)	Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan menggunakan Rancangan Acak Lengkap. Data hasil penelitian dicatat, ditabulasi, dan divisualisasikan dalam bentuk grafik diolah dengan menggunakan program Microsoft Excel serta diolah secara statistik menggunakan program SPSS 16.	Variabel yang diamati meliputi pigmen klorofil-a dan pigmen fikobiliprotein.	Salinitas memiliki pengaruh signifikan terhadap pertumbuhan dan laju pertumbuhan, namun tidak pada kandungan pigmen mikroalga <i>Spirulina platensis</i> . Kandungan klorofil a dan fikobiliprotein yang terdiri dari fikosianin, allofikosianin dan fikoeritrin, tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan pada salinitas yang berbeda.
8	Perbandingan Antara Mikroalga <i>Chlorella Sp</i> dan <i>Spirulina Platensis</i> dalam Penurunan Nitrat Fosfat pada Air Limbah Domestik Menggunakan <i>Oxidation Ditch Algae Reactor</i> (ODAR) (Nurdiana et al., 2021)	Penelitian ini menggunakan skala pilot oksidasi parit dengan sistem <i>batch</i> dalam kondisi <i>intermitten aerasi</i> yang memiliki kapasitas 500 liter dengan kapasitas operasi 250 liter pada kecepatan 60 rpm.	Variasi jenis mikroalga dan variasi perbandingan volume limbah dengan mikroalga (1:0 dan 1:2).	Mikroalga jenis <i>Spirulina plantesis</i> memiliki kemampuan yang lebih efektif untuk menyisihkan nitrat dan fosfat pada air limbah domestik apabila dibandingkan dengan mikroalga jenis <i>Chlorella sp</i> . Hasil optimum penyisihan nitrat dan fosfat terjadi pada variasi perbandingan 1:2 menggunakan mikroalga berjenis <i>Spirulina plantesis</i> dengan persen penyisihan sebesar 80,24% dan 83,58%.
9	Modifikasi Media <i>Spirulina Platensis</i> Sebagai Upaya Pemanfaatan Air	Metode penelitian yang digunakan adalah Rancangan Acak Lengkap (RAL).	Variabel yang diamati yaitu kepadatan <i>Spirulina</i>	Pemanfaatan air limbah budidaya ikan lele sebagai media tumbuh <i>Spirulina platensis</i> dengan penambahan pupuk teknis sebanyak

No	Judul Penelitian dan Peneliti	Metode Penelitian	Variabel	Hasil Penelitian
	Limbah Budidaya Ikan Lele (Widyantoro et al., 2018)		<i>Platensis</i> yang diukur berdasarkan <i>Optikal Density</i> (OD).	75% dapat menghasilkan kepadatan maksimal.
10	<i>Upstream Bioprocessing Of Spirulina Platensis Microalgae Using Rainwater and Recycle Medium From Post-Cultivation for C-Phycocyanin Production</i> (Lim et al., 2023).	Metode penelitian menggunakan metode <i>pre-treatment</i> , khususnya mikrofiltrasi dan sinar UV diselidiki. Metode ini diterapkan untuk mengolah bahan daur ulang dan air hujan yang digunakan untuk menumbuhkan <i>Spirulina</i> .	Variabel yang diamati yaitu konsentrasi biomassa, produktivitas biomassa dan akumulasi <i>phycocyanin Spirulina</i> untuk menilai pertumbuhan <i>Spirulina</i> dalam kondisi <i>pre-treatment</i> yang berbeda.	Penggunaan metode <i>pra-perlakuan</i> dan sumber air hujan alternatif dapat meningkatkan produktivitas biomassa <i>Spirulina</i> dan berpotensi mengurangi dampak lingkungan selama proses budidaya mikroalga.

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian “Pengolahan Air Limbah Domestik Menggunakan Mikroalga” dimulai dari bulan Juli sampai dengan Oktober 2024. Penelitian dimulai dari survey lokasi pengambilan sampel, persiapan fotobioreaktor, pengujian karakteristik awal, proses aklimatisasi, kultivasi air limbah dan mikroalga hingga analisis kualitas air limbah domestik. Pengolahan air limbah dilakukan di Laboratorium Kualitas Air, Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, untuk pengujian sampel dilakukan di Laboratorium Pengujian Kualitas Air Perikanan, Departemen Perikanan, Fakultas Perikanan, Universitas Hasanuddin. Sedangkan lokasi pengambilan sampel air limbah domestik dikumpulkan dari Instalasi Pengolahan Air Limbah Komunal di Kelurahan Banta-bantaeng yang dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 6. Lokasi pengambilan sampel
Sumber: *Google Earth*

2.2 Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen untuk mengkaji efektivitas mikroalga *Spirulina platensis* dalam pengolahan air limbah domestik. Eksperimen dilakukan selama 7 hari menggunakan fotobioreaktor berkapasitas 50 liter. Setiap fotobioreaktor diisi dengan campuran 50% mikroalga *Spirulina platensis* dan 50% air limbah domestik. Variasi perlakuan yang diberikan adalah intensitas cahaya pada tiga tingkat 3000 lux, 4000 lux, dan 5000 lux.

Penelitian Eksperimen merupakan jenis penelitian yang bertujuan membuktikan pengaruh suatu perlakuan terhadap akibat dari perlakuan tersebut (Arib et al., 2024). Pada penelitian eksperimental, terdapat beberapa variabel utama yang harus diperhatikan. Terdiri dari variabel bebas yang mempengaruhi proses pengolahan air limbah, variabel terikat yang menunjukkan hasil dari proses, dan variabel kontrol yang harus dijaga agar tetap konstan selama eksperimen. Diharapkan bahwa penelitian ini akan mengatur dan mengevaluasi variabel-variabel ini untuk menentukan parameter yang paling cocok untuk mencapai penurunan kadar kontaminan yang paling besar.

Variabel bebas atau variabel independen merupakan variabel yang memengaruhi variabel lain. Dalam penelitian ini, variabel bebas yang digunakan adalah intensitas cahaya dengan tiga variasi, yaitu 5000 lux, 4000 lux, dan 3000 lux. Variasi ini dilakukan untuk memahami sejauh mana perubahan intensitas cahaya memengaruhi kemampuan mikroalga dalam menurunkan kadar nitrogen dan fosfor dalam air limbah domestik.

Variabel terikat atau variabel dependen menjadi variabel yang diamati untuk melihat pengaruh dari variabel bebas. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah kadar nitrogen dan fosfor yang diukur setiap hari selama masa penelitian. Selain itu, pH dan suhu juga diamati secara berkala sebagai indikator kondisi lingkungan yang memengaruhi optimalisasi pertumbuhan mikroalga. Variabel-variabel ini dipengaruhi oleh perubahan intensitas cahaya yang diberikan dan menjadi fokus utama dalam menentukan efektivitas pengolahan air limbah oleh mikroalga.

Variabel kontrol merupakan variabel yang dijaga agar tetap konstan atau tidak berubah selama penelitian. Komposisi media yang digunakan terdiri dari 50% mikroalga dan 50% air limbah domestik, volume media dijaga sebanyak 50 liter dalam fotobioreaktor, dan durasi setiap pengamatan ditetapkan selama 7 hari untuk setiap variasi intensitas cahaya. Pengendalian ini bertujuan untuk meminimalkan faktor eksternal yang dapat memengaruhi hasil penelitian.

2.3 Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian sebagai berikut:

Tabel 5. Alat penelitian		
No.	Alat	Fungsi
1.	Fotobiorektor	Alat pengolahan air limbah domestik menggunakan mikroalga.
2.	Galon 15 liter	Sebagai media perbanyakan kultur mikroalga.
3.	Pipet tetes	Untuk menambahkan nutrisi ke dalam perbanyakan kultur mikroalga dan pada sampel kultivasi.
4.	Aerator	Menyediakan oksigen pada mikroalga dan mencegah pembentukan biofilm.
5.	Aluminium foil	Sebagai penutup bagian terbuka pada media perbanyakan kultur untuk mencegah kontaminan masuk ke dalam media.

No.	Alat	Fungsi
6.	Kapas	Sebagai penutup bagian terbuka pada media perbanyakan kultur untuk mencegah kontaminan masuk ke dalam media.
7.	Gelas ukur	Untuk mengukur volume cairan yang dimasukkan ke dalam media pengolahan.
8.	Kertas saring	Untuk memisahkan partikel padat yang terdapat dalam air limbah.
9.	Termometer	Untuk mengukur suhu sampel.
10.	pH meter	Untuk mengukur pH sampel.
11.	Lux meter	Untuk mengukur intensitas cahaya pada fotobioreaktor selama proses pengolahan.

Tabel 6. Bahan penelitian

No.	Bahan	Fungsi
1.	Air sampel	Bahan perlakuan.
2.	<i>Spirulina Platensis</i>	Bahan perlakuan.
3.	Pupuk Walne	Nutrisi tambahan untuk mendukung pertumbuhan <i>Spirulina Platensis</i> .
4.	Aquades	Untuk sterilisasi alat dan media perbanyakan kultur.
5.	HCl	Untuk sterilisasi fotobioreaktor.
6.	NaOH	Meningkatkan pH air untuk membantu menjaga stabilitas pertumbuhan mikroalga.

2.4 Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah air limbah domestik yang dihasilkan dari aktivitas rumah tangga, seperti limbah dapur, kamar mandi, cucian dan kegiatan lainnya yang ditampung dalam IPAL Komunal. Air limbah domestik ini dipilih dari tiga lokasi IPAL Komunal yang telah disurvei karena mengandung konsentrasi tinggi bahan pencemar organik dan anorganik, terutama nitrogen dan fosfor, yang dapat dimanfaatkan oleh mikroalga *Spirulina platensis* sebagai sumber nutrisi. Secara umum, limbah domestik ini memiliki karakteristik seperti kandungan bahan organik yang tinggi, pH yang netral hingga basa, serta keberadaan senyawa amonia dan fosfat dalam jumlah yang signifikan.

Sampel penelitian diambil secara purposif dari populasi air limbah domestik dengan karakteristik awal tertentu, yaitu kandungan nitrogen dan fosfor yang cukup untuk mendukung pertumbuhan mikroalga. Air limbah yang digunakan telah disaring untuk menghilangkan partikel kasar dan endapan yang dapat mengganggu proses kultur mikroalga. Jumlah sampel air limbah yang digunakan untuk setiap perlakuan adalah 50 liter, yang kemudian dicampur dengan kultur mikroalga *Spirulina platensis* dalam rasio 1:1 (50% air limbah dan 50% mikroalga).

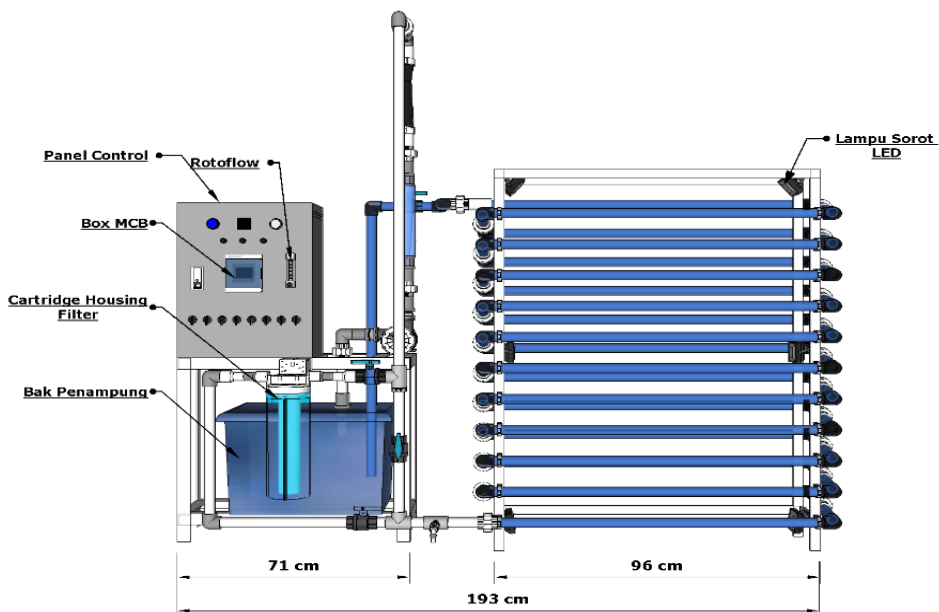
Mikroalga *Spirulina platensis* yang digunakan sebagai sampel telah melalui proses aklimatisasi dengan air limbah domestik selama 7 hari sebelumnya. Aklimatisasi ini bertujuan untuk memastikan mikroalga mampu beradaptasi dengan lingkungan limbah dan memaksimalkan kemampuannya dalam menyerap nutrisi.

Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan dapat menggambarkan efektivitas mikroalga dalam kondisi yang mendekati kondisi aktual.

2.5 Tahapan Pelaksanaan Penelitian

2.5.1 Pembuatan Fotobioreaktor

Bahan yang digunakan pada fotobioreaktor terbuat dari bahan Polikarbonat Transparan (*Acrylic*) yang sifatnya sangat mudah ditembus oleh cahaya yang dibutuhkan oleh mikroalga untuk berfotosintesis. Bahan ini sangat kuat, ringan dan tidak mudah pecah, sehingga sangat baik untuk digunakan sebagai material bioreaktor. Dengan sistem tubular, bioreaktor yang dikembangkan mudah untuk dipindahkan dan dapat disesuaikan dengan ukuran atau luas lahan yang tersedia. Hal ini menjadi salah satu kelebihan tambahan jika dibandingkan dengan bioreaktor konvensional dengan sistem tabung kaca berukuran besar.



Gambar 7. Fotobioreaktor

Fotobioreaktor dilengkapi dengan panel kontrol untuk mengontrol operasional reaktor seperti pompa, aliran udara, dan pencahayaan. Di bawah panel kontrol terdapat bak sebagai media penampungan air limbah domestik dan mikroalga yang diolah dengan volume bak 50 liter. Pompa yang terhubung dari bak penampungan untuk memastikan sirkulasi media dalam pipa dimana sirkulasi membantu dalam distribusi nutrisi dan cahaya secara merata. Pipa digunakan untuk mengatur aliran media dari bak penampung, dan katup yang berfungsi untuk pengosongan sistem pada proses sterilisasi fotobioreaktor. Serta lampu LED yang

menjadi variasi pada penelitian dipasang untuk mendukung intensitas cahaya tertentu yang diperlukan.

Penggunaan lampu LED dalam fotobioreaktor mikroalga memiliki berbagai keunggulan dibandingkan dengan jenis lampu lainnya, seperti lampu fluoresen dan lampu pijar. Salah satu keunggulan utama adalah efisiensi energi yang lebih tinggi, di mana lampu LED mampu mengubah sekitar 80–90% energi listrik menjadi cahaya, sementara lampu pijar hanya sekitar 5–10%, dengan sebagian besar energi terbuang sebagai panas. Dalam penelitian Shen et al. (2019) menyatakan bahwa LED tidak menghasilkan panas berlebih seperti lampu pijar, sehingga mempermudah pengendalian suhu dalam fotobioreaktor dan menjaga kondisi optimal bagi pertumbuhan mikroalga. Keunggulan lain yang tidak kalah penting adalah fleksibilitas dalam pengaturan intensitas dan pola pencahayaan. Lampu LED dapat dikontrol dengan sistem otomatisasi untuk mengoptimalkan intensitas cahaya.

Tabel 7. Spesifikasi sistem fotobioreaktor

SPESIFIKASI SISTEM	
Tipe	<i>Tubular Circulation System</i>
Kapasitas	Total: 50 Liter, Tubular: 15 Liter, Tank: 35 Liter
Daya	457 Watt
Voltase	1 <i>Phase</i> , 220 V AC, 50 Hz
Kecepatan Sirkulasi	30 liter/menit
Suhu kerja	20 – 35 °C
Dimensi	L. 165 cm, W. 75 cm, H. 220 cm
Berat	87 kg
Sistem Pencahayaan	LED <i>Spectrum</i> 3000, 4000, dan 5000 lux
Material	Tubular: <i>Acrylic Tube @</i> 1 inchi, T. 0,75 mm, Frame: <i>Mild Steel</i> 1 mm.

2.5.2 Pengambilan Sampel

Metode pengambilan sample air limbah dilakukan secara langsung menggunakan metode *grab sampling* yang merupakan metode pengambilan sampel dimana sampel mempunyai karakteristik yang tidak berubah salam suatu periode atau batas waktu tertentu (Nursaini & Harahap, 2022) pengambilan sampel dilakukan menggunakan alat *water sampler* sesuai dengan (Badan Standardisasi Nasional, 2008). Pengambilan sampel dilakukan pada IPAL Komunal di Jln. Banta-bantaeng Lorong 8 dengan titik koordinat 5° 9'40.20"S 119°25'37.73"E. IPAL Komunal ini terdiri dari 3 bak kompartemen, yaitu bak screen, bak kontrol dan bak pengendapan yang menampung air limbah domestik dari 50 KK. Kegiatan survey dilakukan pada bulan juli 2024 dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 8. Survey lokasi pengambilan sampel air limbah

2.5.3 Perbanyakan Kultur Mikroalga

Mikroalga yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari Balai Perikanan Budidaya Air Payau (BPBAP) Takalar sebanyak 10 liter. *Spirulina platensis* memiliki potensi besar dalam pengolahan limbah domestik serta mampu berkembang dalam berbagai kondisi media. Proses awal dimulai dengan perbanyakan mikroalga di laboratorium untuk memastikan jumlah sel mikroalga mencukupi untuk skala penelitian yang lebih besar.

Sebelum tahap aklimatisasi, dilakukan perbanyakan mikroalga dilakukan dalam dua media kultur, masing-masing memiliki volume 15 liter. Media kultur menggunakan aquades yang telah diberi pupuk Walne sebagai sumber nutrisi utama. Pupuk Walne disiapkan dengan perbandingan 1:100 antara volume pupuk dan volume media kultur, yang bertujuan untuk memberikan unsur hara makro dan mikro yang dibutuhkan mikroalga untuk pertumbuhan optimal. Komposisi nutrisi pupuk Walne dirancang secara spesifik untuk mendukung sintesis biomassa mikroalga dan aktivitas fotosintesis.



Gambar 9. Perbanyakan kultur mikroalga

Selama proses perbanyakan, aerasi diberikan secara terus-menerus untuk memastikan distribusi oksigen dan karbondioksida di dalam media kultur hingga kultur mencapai kondisi optimal untuk proses kultivasi selanjutnya. Selain itu, penyinaran dengan intensitas cahaya 5000 lux diterapkan untuk memaksimalkan proses fotosintesis dengan menggunakan lampu LED yang ada pada fotobioreaktor. Dengan kombinasi aerasi dan pencahayaan yang stabil, mikroalga dapat tumbuh secara eksponensial dalam waktu singkat.

2.5.4 Sterilisasi Fotobioreaktor

Sterilisasi adalah kegiatan pembersihan atau pemusnahan organisme atau biota yang tidak dikehendaki dari suatu kegiatan budidaya. Sterilisasi dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu secara fisik misalnya dengan pemanasan, dan secara kimiawi dengan penambahan bahan kimia seperti larutan asam kuat atau basa kuat. Fotobioreaktor pada penelitian ini disterilisasi secara kimiawi. Menurut Santoso et al., (2014) sterilisasi dapat dilakukan menggunakan HCl. Tahapan pertama dalam proses sterilisasi yakni mencuci fotobioreaktor dengan sabun dan dibilas hingga bersih. Membuat larutan HCl 10% dengan cara mengencerkan larutan teknis HCl 98% sebanyak 2 liter dengan air aquadest sebanyak 19,6 liter. Larutan HCl 10% digunakan untuk membilas semua fotobioreaktor, keran dan semua sambungan-sambungan dalam unit fotobioreaktor. Setelah semua bagian fotobioreaktor terbilas menggunakan HCl, kemudian fotobioreaktor dibilas menggunakan air hingga larutan HCl tidak tersisa. Pembilasan ulang dilanjutkan dengan aquadest, hingga fotobioreaktor benar-benar bersih.

2.5.5 Aklimatisasi

Proses aklimatisasi mikroalga bertujuan untuk memberikan kesempatan bagi mikroalga beradaptasi terhadap lingkungan air limbah yang memiliki karakteristik berbeda dibandingkan media kultur murni. Aklimatisasi ini penting untuk memastikan mikroalga mampu bertahan hidup dan tetap aktif dalam melakukan proses fotosintesis dan pengolahan limbah. Dalam penelitian Ramadanti et al. (2021) menganalisis proses aklimatisasi yang dilakukan secara bertahap selama tujuh hari. Metode ini efektif untuk mengurangi risiko stres mikroalga akibat perubahan mendadak pada kondisi lingkungan media.

Pada hari pertama aklimatisasi, campuran media yang digunakan terdiri dari 50% air limbah dan 50% mikroalga dalam volume total 50 liter. Campuran ini dirancang untuk meminimalkan paparan awal mikroalga terhadap limbah dalam konsentrasi tinggi, yang dapat mengandung senyawa toksik. Selama periode ini, suhu dan pH diamati dan dikontrol agar tetap berada dalam rentang optimal untuk pertumbuhan mikroalga, yaitu pH 8.5-11 dan suhu sekitar 25-35°C. Pemantauan berkala dilakukan untuk memastikan bahwa kondisi lingkungan mendukung aktivitas metabolisme mikroalga.

Pada hari keempat, proporsi air limbah dalam media ditingkatkan menjadi 75%, sementara komposisi mikroalga dikurangi menjadi 25%. Peningkatan secara bertahap ini memberikan kesempatan mikroalga untuk menyesuaikan diri dengan konsentrasi limbah yang lebih tinggi tanpa mengalami fase kematian atau penurunan aktivitas. Pada tahap ini, hasil pengamatan menunjukkan perubahan warna media menjadi hijau pekat, yang merupakan indikasi keberhasilan aklimatisasi. Warna hijau pekat mencerminkan tingginya densitas biomassa mikroalga, menunjukkan bahwa mikroalga telah berhasil beradaptasi dengan kondisi limbah dan siap untuk digunakan dalam proses pengolahan limbah utama.

Keberhasilan tahap aklimatisasi ini menandai pentingnya pendekatan bertahap dalam integrasi mikroalga dengan air limbah. Penyesuaian lingkungan melalui metode aklimatisasi tidak hanya mengurangi risiko kegagalan mikroalga, tetapi juga memberikan data awal tentang tingkat toleransi mikroalga terhadap polutan tertentu. Hal ini sejalan dengan penelitian lain, seperti yang dilakukan oleh Widyantoro et al., (2018) yang menemukan bahwa metode aklimatisasi bertahap meningkatkan viabilitas mikroalga hingga 80% dibandingkan aklimatisasi langsung.

2.5.6 Pengolahan Air Limbah Domestik

Kultivasi mikroalga *Spirulina platensis* dalam sistem fotobioreaktor merupakan salah satu metode yang efektif dalam pengolahan air limbah domestik. Proses kultivasi dilakukan secara *batch* dalam fotobioreaktor dengan volume sebesar 50 liter dengan mempertimbangkan berbagai parameter operasional seperti intensitas cahaya, aerasi, dan pemberian nutrisi. Penelitian ini berfokus pada pengaruh variasi intensitas cahaya (3000 lux, 4000 lux, dan 5000 lux) terhadap pertumbuhan mikroalga dan efisiensi pengolahan limbah. Intensitas cahaya menjadi salah satu faktor kunci karena berkaitan langsung dengan proses fotosintesis mikroalga, yang memengaruhi produktivitas biomassa serta kemampuan mikroalga dalam mengurangi kandungan nitrogen dan fosfor di dalam air limbah.



Gambar 10. Kultivasi Mikroalga dalam Fotobioreaktor

Aerasi dan pencahayaan dilakukan secara kontinu selama 24 jam untuk memastikan kondisi lingkungan yang optimal bagi pertumbuhan *Spirulina platensis*. Rasio campuran air limbah domestik dan inokulum mikroalga sebesar 50:50 digunakan sebagai media kultivasi, dengan tambahan pupuk Walne pada hari pertama untuk mendukung pertumbuhan awal mikroalga. Variasi intensitas cahaya diterapkan selama 7 hari pada setiap perlakuan. Parameter pendukung seperti pH dan suhu diukur secara berkala untuk mengevaluasi performa mikroalga dalam proses pengolahan limbah.

Kultivasi dilakukan secara bertahap pada setiap variasi dengan masing-masing variasi intensitas cahaya dilakukan selama 7 hari. Variasi pertama dilakukan dengan kerapatan awal sel *Spirulina platensis* sebesar $20,25 \times 10^4$ sel/ml, variasi kedua dilakukan dengan kerapatan sel 14×10^4 sel/ml dan variasi ketiga dengan kerapatan sel $12,25 \times 10^4$ sel/ml. Kultivasi untuk variasi intensitas cahaya pertama dilakukan bersamaan dengan tahap aklimatisasi untuk stok mikroalga pada tahap kedua begitupun dengan kultivasi variasi kedua yang dilakukan bersamaan dengan proses aklimatisasi untuk stok mikroalga kultivasi intensitas cahaya variasi ketiga.

Durasi kultivasi juga memainkan peran penting dalam penyerapan nutrisi dan pengurangan kadar polutan dalam air limbah. Wan et al. (2021) menganalisis, waktu tinggal yang lebih lama memungkinkan mikroalga untuk mengakumulasi biomassa lebih banyak dan memaksimalkan proses penyerapan nutrisi. Dalam penelitian ini, kultivasi *Spirulina platensis* selama 7 hari menunjukkan kadar amonium (NH_4^+) hingga 70% dan penurunan fosfor sebesar 65% dalam air limbah domestik.

Studi lain oleh Abdel-Raouf et al. (2017) menyatakan bahwa kultivasi selama 10 hari dengan intensitas cahaya 4000-6000 lux mampu menurunkan kadar nitrogen hingga 80% dan fosfor hingga 75%. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi antara durasi kultivasi dan intensitas cahaya yang optimal akan meningkatkan efisiensi pengolahan air limbah menggunakan mikroalga.

2.5.7 Teknik Pengumpulan Data

Karakteristik air limbah domestik yang diolah dan dihasilkan pada IPAL Komunal Kelurahan Banta-bantaeng secara umum dipengaruhi oleh aktivitas kegiatan rumah tangga yang dilakukan penduduk. Kandungan nitrogen umumnya berbentuk amonia (NH_3), nitrat (NO_3^-), dan nitrit (NO_2^-). Keduanya berasal dari penggunaan deterjen, sisa makanan, urin, serta limbah dapur dan kamar mandi. Aktivitas rumah tangga seperti mencuci, mandi dan membuang sisa makanan ke saluran air berkontribusi terhadap peningkatan kadar nutrisi tersebut di dalam air limbah domestik.

Fosfor dari deterjen menjadi penyumbang utama eutrofikasi di perairan karena fosfor bertindak sebagai pembatas nutrisi bagi pertumbuhan alga. Begitu pula dengan nitrogen, terutama dalam bentuk amonia, dapat menjadi toksik jika konsentrasinya tinggi di lingkungan perairan, merusak ekosistem dan menurunkan kualitas air (Faradila et al., 2023). Pengolahan air limbah domestik yang masih belum efektif dalam menurunkan kandungan nitrogen dan fosfor dapat berpotensi

mencemari badan air jika konsentrasinya masih melebihi baku mutu, ketika air limbah domestik memasuki sungai atau badan air lainnya dapat menyebabkan peningkatan nutrisi, memicu *blooming algae* yang merusak ekosistem perairan dan mengganggu oksigen terlarut (Pratama et al., 2020).

Analisa penurunan kadar nitrogen dan fosfor dari hasil pengolahan air limbah domestik dianalisa melalui hasil uji parameter yang telah dilakukan. Pada penelitian ini, dilakukan 3 variasi intensitas cahaya dimana hasil pengujian dianalisis penurunan kadar setiap hari selama 7 hari pada masing-masing variasi. Variasi intensitas cahaya ada 3 yaitu 3000 lux, 4000 lux, dan 5000 lux dimana setiap intensitas dilakukan pengambilan dan pengujian sampel dilakukan selama 7 hari berturut-turut dimulai dari hari pertama proses kultivasi dilakukan. Sehingga diperoleh total 21 sampel pengujian. Untuk analisisnya menggunakan perhitungan rumus pada persamaan (1) dengan keterangan A = Kadar parameter pada inlet dan B = Kadar parameter pada outlet (Firdaus et al., 2018). Lalu membandingkan hasil perhitungan efisiensi penurunan dengan dengan Peraturan Pemerintah No. 82 Tahun 2021 peruntukan kelas IV.

$$\%Efisiensi = \frac{A - B}{A} \times 100\%$$

Efektivitas air limbah selama proses pengolahan adalah nilai yang dihitung berdasarkan nilai rata-rata persentase penurunan parameter pencemar. Nilai rata-rata efektivitas air limbah akan dibandingkan berdasarkan kriteria efektivitas pada Tabel berikut.

Tabel 8. Kriteria efektivitas

No	Nilai Presentase Efektivitas	Keterangan
1.	> 80%	Sangat efektif
2.	60% < X ≤ 80%	Efektif
3.	40% < X ≤ 60%	Cukup efektif
4.	20% < X ≤ 40%	Kurang efektif
5.	≤ 20%	Tidak efektif

Sumber: Nababan & Ridwan (2016)

Data yang diperoleh dari hasil pengujian akan dianalisis menggunakan IBM SPSS untuk mengetahui pengaruh intensitas cahaya terhadap penyisihan kadar nitrogen dan fosfor. Sebelum melakukan uji statistik, dilakukan terlebih dahulu uji normalitas untuk melihat apakah data hasil penelitian terdistribusi normal atau tidak. Pemilihan jenis uji normalitas yang digunakan dapat dilihat dari jumlah sampel yang ada. Untuk jumlah sampel > 50 dapat menggunakan uji normalitas Kolmogorov-Smirnov. Adapun untuk jumlah sampel < 50 dapat menggunakan uji normalitas Shapiro-Wilk. Uji normalitas Shapiro-Wilk adalah metode yang efektif untuk menilai normalitas data pada ukuran sampel antara 3 – 50. Statistik Shapiro-Wilk menghasilkan nilai W, di mana nilai p-value terkait digunakan untuk menilai normalitas. Jika p-value < 0,05, maka data dianggap tidak berdistribusi normal.

Jika salah satu data variabel yang tidak terdistribusi normal berarti uji statistik parametrik tidak bisa dilakukan untuk semua variabel. Dengan demikian, semua variabel dilakukan uji analisis regresi *robust*. Uji robust adalah metode statistik yang dirancang untuk memberikan hasil yang valid meskipun asumsi tertentu, seperti normalitas data, tidak terpenuhi. Uji ini lebih tahan terhadap pelanggaran asumsi klasik, seperti distribusi tidak normal, heteroskedastisitas, atau adanya outlier. Uji robust dipilih ketika variabel dependen tidak berdistribusi normal karena metode parametrik tradisional (seperti ANOVA atau regresi linear biasa) mengasumsikan normalitas. Dengan uji robust, hasil analisis tetap akurat dan dapat diandalkan (Wilcox, 2021).

Salah satu pendekatan yang umum digunakan adalah *Brown-Forsythe Test*, yang merupakan modifikasi dari uji ANOVA standar. *Brown-Forsythe Test* berfungsi untuk menguji apakah terdapat perbedaan signifikan antara kelompok-kelompok berdasarkan median data. Metode ini dihitung dengan membandingkan penyimpangan absolut data terhadap median dari setiap kelompok. Jika nilai signifikansi (*p-value*) hasil uji lebih kecil dari 0.05, maka dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan signifikan antar kelompok. Sebaliknya, jika *p-value* lebih besar dari 0.05, maka tidak ada perbedaan signifikan yang terdeteksi.

Brown & Forsythe (1974) mengemukakan teori statistik yang mendasari *Brown-Forsythe Test* adalah robust statistics, yang bertujuan untuk mengatasi pengaruh kuat dari outlier atau distribusi data yang tidak normal. Uji ini sering digunakan sebagai alternatif ANOVA ketika asumsi homogenitas varians (diperiksa dengan uji Levene) tidak terpenuhi. Hal ini karena Brown-Forsythe lebih fokus pada median, yang kurang dipengaruhi oleh data ekstrem dibandingkan rata-rata. Dalam penelitian dengan data eksperimental yang kompleks, seperti ekologi, bioremediasi, atau bioteknologi, uji ini sangat relevan untuk menganalisis data yang cenderung memiliki penyimpangan dari asumsi klasik.

2.6 Diagram Alir Penelitian

