

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dunia peternakan tidak lepas dari limbah yang dihasilkan setiap saat. Limbah peternakan merupakan seluruh sisa buangan dari usaha kegiatan peternakan, baik berupa limbah cair, limbah padat, maupun berupa gas. Limbah pada dasarnya tidak dapat dicegah namun dapat diolah keberadaannya. Limbah yang tidak dimanfaatkan secara maksimal akan merusak lingkungan dan dapat mencemari air, tanah, dan udara. Kondisi seperti itu sangat sering terjadi karena rata-rata peternak membuang limbah ke lingkungan sekitar tanpa penanganan dan pengolahan yang sesuai (Prambudi Fajar Bima dkk., 2020).

Salah satu akibat dari pencemaran air oleh limbah ternak ruminansia ialah meningkatnya kadar nitrogen senyawa nitrogen sebagai polutan mempunyai efek polusi yang spesifik, dimana kehadirannya dapat menimbulkan konsekuensi penurunan kualitas perairan sebagai akibat terjadinya proses eutrofikasi penurunan konsentrasi oksigen terlarut sebagai hasil proses nitrifikasi yang terjadi di dalam air yang dapat mengakibatkan terganggunya kehidupan biota air (Prambodo dkk., 2013).

Kandungan nutrisi dan senyawa organik pada air limbah dapat diolah dengan metode pengolahan biologis menggunakan mikroalga. Kelebihan pemanfaatan mikroalga dalam pengolahan biologis air limbah adalah tidak membutuhkan biaya yang tinggi serta dapat dilakukan secara berkelanjutan. Mikroalga juga memiliki siklus perkembangbiakan yang cepat (Silmi Afifah & Prajati, 2023).

Mikroalga sebagai tanaman akuatik berukuran kecil ternyata berpotensi untuk pengolahan limbah organik. Secara teknis, mikroalga menyerap kandungan senyawa organik dan nutrisi yang masih tersisa dalam limbah, dan menghasilkan oksigen yang dapat menurunkan kadar COD dan BOD dalam limbah lewat bantuan bakteri pengurai zat organik. Kemampuan penyerapan atau absorpsi ini menyebabkan mikroalga berpotensi untuk dijadikan remediator dalam aktivitas remediasi lingkungan tercemar terutama lingkungan perairan (Rusydi dkk., 2023).

Fitoremediasi merupakan teknik remediasi (pemulihan) kondisi lingkungan dengan memanfaatkan organisme dalam proses pemulihannya. Remediasi lingkungan dengan fitoremediasi lebih murah dan efektif dibandingkan teknik remediasi dengan proses fisika dan kimia. Menurut beberapa penelitian terdahulu, *Spirulina Platensis* merupakan salah satu jenis mikroalga yang efektif dalam penyisihan senyawa organik pada air limbah (Prambodo dkk., 2013).

(Mutia & Nedi, 2021) *Spirulina sp.* digunakan dalam proses restorasi lingkungan karena kemampuannya mengurangi kadar BOD dalam limbah. Selain itu, mikroalga ini juga efektif dalam mengatasi eutrofikasi perairan dengan menurunkan konsentrasi nitrogen (N) dan fosfat (P). Kemampuan tersebut muncul karena *Spirulina* memanfaatkan zat organik sebagai sumber metabolisme. *Spirulina* dapat tumbuh optimal pada rentang suhu antara 25°C hingga 40°C. Menurut penelitian (Hartami dkk., 2022), Mikroalga *Spirulina platensis* dapat mengurangi konsentrasi fosfat sebesar 83,58% dan nitrat sebesar 80,24%. Fenomena ini terjadi karena seiring bertambahnya

waktu kultur dalam reaktor, populasi sel mikroalga mengalami peningkatan. Akibatnya, penyerapan fosfat dan nitrogen oleh mikroalga menjadi lebih cepat, dikarenakan kebutuhan nutrisi tersebut yang semakin tinggi untuk mendukung pertumbuhan mikroalga.

Sehubungan dengan meningkatnya produksi spirulina maka hal ini tidak terlepas dari teknologi yang digunakan dalam proses kultur dan produksi. Adapun teknologi yang digunakan ialah fotobioreaktor. Berdasarkan penelitian terdahulu (Suminto, 2009) penggunaan fotobioreaktor mikroalga dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti intensitas cahaya, pH, dan suhu dalam memproduksi lipid yang lebih tinggi. Intensitas cahaya dalam kisaran 2500-5000 lux mampu meningkatkan pertumbuhan Spirulina secara optimal. Teknologi fotobioreaktor diketahui mampu meningkatkan produktivitas mikroalga sebesar 2 hingga 5 kali lipat dibandingkan kondisi normal.

Berdasarkan latar belakang di atas, maka diperlukan penelitian terkait "Pemanfaatan Air Limbah Peternakan Sebagai Media Pertumbuhan Mikroalga" dalam skala laboratorium dengan variasi intensitas cahaya 3000 lux, 4000 lux, dan 5000 lux.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian tugas akhir ini sebagai berikut.

1. Bagaimana karakteristik air limbah peternakan yang digunakan sebagai media pertumbuhan mikroalga?
2. Bagaimana pengaruh cahaya terhadap efisiensi pertumbuhan mikroalga?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian tugas akhir ini sebagai berikut.

1. Untuk mengidentifikasi karakteristik air limbah peternakan yang digunakan sebagai media pertumbuhan mikroalga.
2. Untuk menganalisis pengaruh cahaya terhadap efisiensi pertumbuhan mikroalga.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi Peneliti
Menambah pengetahuan dan pemahaman tentang potensi pemanfaatan air limbah peternakan sebagai media pertumbuhan mikroalga dan pengaruh cahaya serta konsentrasi nutrisi untuk pertumbuhan mikroalga.
2. Bagi Akademisi
Penelitian ini diharapkan dapat digunakan untuk menambah referensi untuk penelitian lanjutan pada masa yang akan mendatang.
3. Bagi masyarakat
Hasil penelitian ini diharapkan dapat menambah pengetahuan tentang alternatif media pertumbuhan mikroalga yaitu dengan memanfaatkan air limbah peternakan.

1.5 Batasan Penelitian

Adapun batasan dalam penelitian tugas akhir ini adalah:

- 1 Penelitian dilakukan dengan menggunakan fotobioreaktor dalam pengolahan air limbah peternakan dengan metode fitoremediasi.
- 2 Air limbah yang digunakan adalah air limbah peternakan sapi perah yang diambil dari fakultas peternakan Universitas Hasanuddin.
- 3 Mikroalga yang digunakan adalah *Spirulina Plantesis*.
- 4 Variasi yang digunakan adalah intensitas cahaya dengan variasi 3000 lux, 4000 lux, dan 5000 lux.
- 5 Parameter yang diukur adalah kepadatan sel menggunakan *sedgewick rafter counting* pada mikroskop dengan perbesaran 100 kali.

1.6 Teori

1.6.1. Air Limbah Peternakan

Limbah ternak merupakan sisa buangan dari suatu kegiatan usaha peternakan seperti usaha pemeliharaan ternak, rumah potong hewan, pengolahan produk ternak, dan sebagainya. Limbah tersebut meliputi limbah padat dan limbah cair seperti feses, urine, sisa makanan, embrio, kulit telur, lemak, darah, bulu, kuku, tulang, tanduk, isi rumen, dan lain-lain (Sihombing, 2000).

Menurut Soehadji (1992) limbah peternakan meliputi semua kotoran yang dihasilkan dari suatu kegiatan usaha peternakan baik berupa limbah padat dan cairan, gas, maupun sisa pakan.

Limbah padat merupakan semua limbah yang berbentuk padatan atau dalam fase padat (kotoran ternak, ternak yang mati, atau isi perut dari pemotongan ternak). Limbah cair adalah semua limbah yang berbentuk cairan atau dalam fase cairan (air seni atau urine, air dari pencucian alat-alat). Sedangkan limbah gas adalah semua limbah berbentuk gas atau dalam fase gas. Pencemaran karena gas metan menyebabkan bau yang tidak enak bagi lingkungan sekitar. Gas metan (CH₄) berasal dari proses pencernaan ternak ruminansia (Saidi dkk., 2022).

1.6.2. Karakteristik Air Limbah Peternakan

Karakteristik air limbah peternakan secara umum dapat dibagi menjadi tiga aspek utama: fisik, kimia, dan biologis (Saidi dkk., 2022).

1. Karakteristik fisik

- Bentuk limbah peternakan terdiri dari padat, semi padat, dan cair, dengan tekstur dan kekompakan yang bervariasi tergantung jenis dan umur ternak serta cara pemeliharaan.
- Warna limbah segar biasanya coklat muda sampai coklat terang, sedangkan limbah yang sudah lama berwarna lebih gelap atau hitam.
- Bau limbah segar menyerupai bau pakan, sedangkan limbah lama berbau busuk seperti telur busuk.
- Kandungan air limbah tinggi, biasanya lebih dari 88% untuk limbah cair, sehingga mempengaruhi metode pengolahan.
- Padatan tersuspensi dalam limbah cukup tinggi, yang dapat menyebabkan kekeruhan dan menghambat proses oksigenasi di badan air.

2. Karakteristik kimia

- Limbah mengandung bahan organik tinggi, seperti *fezes* dan *urine*, dengan nilai BOD (*Biochemical Oxygen Demand*) dan COD (*Chemical Oxygen Demand*) yang besar, misalnya BOD bisa mencapai ribuan mg/L, menandakan potensi pencemaran yang tinggi.
- pH limbah biasanya netral hingga sedikit basa.
- Kandungan nutrisi seperti nitrogen (amonia, nitrit, nitrat) dan fosfat cukup tinggi, yang dapat menyebabkan eutrofikasi jika dibuang langsung ke lingkungan.
- Limbah juga mengandung bahan anorganik dan gas seperti metana (CH₄), hidrogen sulfida (H₂S), dan karbon dioksida (CO₂) yang berasal dari proses dekomposisi anaerob.

3. Karakteristik biologis

- Limbah mengandung mikroorganisme yang berasal dari sistem pencernaan ternak, termasuk bakteri dan mikroflora-fauna lain yang berperan dalam proses penguraian organik.
- Kandungan mikroorganisme ini juga dapat menjadi sumber patogen dan menyebabkan pencemaran biologis jika tidak diolah dengan benar.

Secara keseluruhan, karakteristik air limbah peternakan sangat dipengaruhi oleh jenis ternak, umur ternak, pakan yang diberikan, serta cara pemeliharaan dan pengelolaan limbahnya. Limbah ini memiliki kandungan organik dan nutrisi yang tinggi, padatan tersuspensi yang signifikan, serta mikroorganisme yang berpotensi mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Baku mutu air limbah bagi usaha dan/atau kegiatan peternakan sapi dan babi dapat dilihat pada **tabel 1**. di bawah ini.

Tabel 1. Baku mutu air limbah bagi usaha dan/atau kegiatan peternakan sapi dan babi

Parameter	Kadar Paling Tinggi (mg/L)	Beban Pencemaran Paling Tinggi (gram/ekor/hari)	
		Sapi	Babi
BOD	100	20	4
COD	200	40	8
TSS	100	20	4
NH ₃ -N	25	5	1
pH		6-9	
Kuantitas air limbah paling tinggi		Sapi : 200 ltr/ekor/hari Babi : 40 ltr/ekor/hari	

Sumber: Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014

1.6.3. Pengelolaan Air Limbah Peternakan

Limbah ternak dapat dimanfaatkan untuk bahan makanan ternak, pupuk organik, energi dan media berbagai tujuan. Penanganan limbah ternak akan spesifik tergantung pada jenis/spesies, jumlah ternak, tatalaksana pemeliharaan, areal tanah yang tersedia untuk penanganan limbah dan target limbah (Saidi dkk., 2022).

Penanganan limbah cair dapat diolah secara fisik, kimia, dan biologi. Pengolahan secara fisik disebut juga pengolahan secara primer (*primer treatment*). Proses ini merupakan proses termurah dan termudah, karena tidak memerlukan biaya operasi yang tinggi. Metode ini hanya digunakan untuk memisahkan partikel-partikel padat di dalam limbah. Beberapa kegiatan yang termasuk dalam pengolahan secara fisik antara lain : floatasi, sedimentasi, dan filtrasi (Saidi dkk., 2022).

Pengolahan secara kimia disebut juga pengolahan sekunder (*secondary treatment*) yang biasanya relatif lebih mahal dibandingkan dengan proses pengolahan secara fisik. Metode ini umumnya digunakan untuk mengendapkan bahan-bahan berbahaya yang terlarut dalam limbah cair menjadi padat. Pengolahan dengan cara ini meliputi proses-proses netralisasi, flokulasi, koagulasi, dan ekstraksi (Saidi dkk., 2022).

Pengolahan secara biologi merupakan tahap akhir dari pengolahan sekunder bahan-bahan organik yang terkandung di dalam limbah cair. Limbah yang hanya mengandung bahan organik saja dan tidak mengandung bahan kimia yang berbahaya, dapat langsung digunakan atau didahului dengan pengolahan secara fisik. Dalam penerapannya maka konsep penanganan air limbah ternak sudah diterapkan selama ini yaitu: *aerobic treatment* (Saidi dkk., 2022).

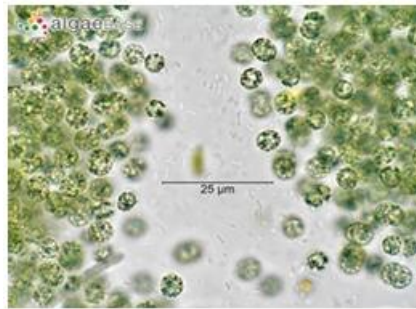
1.6.4. Jenis-jenis Mikroalga

Mikroalga merupakan organisma eukariot bersel satu yang habitatnya berada di perairan dengan ukuran 3-30 μm . Mikroalga berklorofil dapat ditemukan di air tawar maupun air laut. Mikroalga membutuhkan karbon dioksida, nutrisi, dan cahaya untuk melakukan fotosintesis. Mikroalga memiliki sifat yang hampir sama dengan tumbuhan multiseluler, tetapi ia tidak memiliki akar, batang, dan daun sejati untuk fotosintesis. Mikroalga yang sudah dapat dikenali terbagi dalam empat kelompok, yaitu alga hijau (*Chlorophyceae*), alga emas (*Chrysophyceae*), alga biru (*Cyanophyceae*), dan diatom (*Bacillariophyceae*). Sebagian besar mikroalga dapat menghasilkan produk-produk berupa karotenoid, polimer, asam peptida, asam lemak, antioksidan, enzim, terpenoid, sterol, flavonoid, dan racun (Gildantia dkk., 2022).

Menurut (Bellinger & Sigeo, 2015), alga air tawar dikelompokkan menjadi 10 divisi utama berdasarkan aspek mikroskopis, karakteristik biokimia dan sitologi. Pengelompokan alga air tawar berdasarkan karakteristik biokimia dan struktur sel dilihat dari pigmentasi, cadangan makanan dan membran luar. Berikut jenis-jenis mikroalga:

1. *Chynophyta*

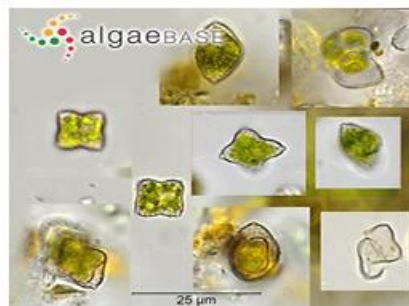
Cyanophyta atau alga biru-hijau merupakan organisme uniseluler yang tersebar luas di lingkungan air tawar. *Cyanophyta* memiliki diameter sel $<10 \mu\text{m}$ dengan DNA nukleoid (tidak diselubungi membran inti). Berdasarkan morfologi, *Cyanophyta* dibagi menjadi empat ordo, yaitu *Chroococcales*, *Oscillatoriales*, *Nostocales* dan *Stigonematales*. Kelompok *Cyanophyta* bereproduksi secara vegetatif atau aseksual. Pertumbuhan alga hijau-biru sangat tinggi pada pertengahan hingga akhir musim panas. *Cyanophyta* dapat naik ke permukaan danau membentuk lapisan tebal biomassa alga di atas kolom air dan bersaing dengan alga lain serta memiliki dampak besar terhadap populasi zooplankton dan ikan (Sigeo, 2005 dalam (Sadida, 2024)). Salah satu contohnya adalah spesies *Microcystis aeruginosa* yang biasa tumbuh di permukaan air dapat dilihat pada **gambar 1.** di bawah ini.



Gambar 1. *Microcystis*

2. *Chlorophyta*

Chlorophyta atau alga hijau merupakan organisme uniseluler yang mampu membentuk koloni besar, seperti bola dan berfilamen yang eukariotik pada lingkungan air tawar. *Chlorophyta* berbeda dari alga eukariotik lain karena memproduksi bahan penyimpanan dalam kloroplas bukan di dalam sitoplasma. *Chlorophyta* adalah kelompok alga yang paling beragam dan diperkirakan berjumlah sekitar 17.000 spesies. Keanekaragaman ini dilihat dari variasi pada morfologinya dan dikelompokkan menjadi uniseluler, koloni atau berserabut sesuai dengan bentuk pertumbuhannya. *Chlorophyta* sangat melimpah di lingkungan air tawar, yaitu sekitar 90% sedangkan di laut hanya tersebar sekitar 10%. Beberapa ordo *Chlorophyta* yang sebagian besar tersebar di laut adalah *Caulerpales*, *Dasycladales* dan *Dasycladales*. *Chlorophyta* bereproduksi secara aseksual dan seksual (Sadida, 2024). Salah satu contoh spesies dari divisi *Chlorophyta* adalah *Tetraedron* minimum dapat dilihat pada **gambar 2.** di bawah ini.



Gambar 2. *Tetraedron minimum*

3. *Bacillariophyta*

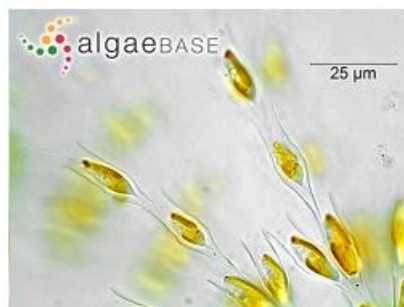
Bacillariophyta atau Diatom adalah ganggang uniseluler yang tidak berflagel, berkoloni sederhana atau membentuk rantai sel dan tersebar luas di lingkungan air laut dan air tawar. Diatom memiliki dinding sel yang khas, yaitu frustula tersusun dari silikon dioksida opaline (silika) yang dilapisi lapisan organik. Kelompok Diatom mendominasi perairan dapat dilihat dari keanekaragamannya, yaitu ada 285 genus dengan 10.000-12.000 spesies yang ada di bumi. Diatom sangat melimpah di lingkungan air tawar yang bersifat planktonik dan bentik serta

bagian utama dari biomassa alga. Salah satu contoh spesies dari divisi *Bacillariophyta* adalah *Synedra ulna* dapat dilihat pada **gambar 3**. di bawah ini (Sadida, 2024).



Gambar 3. *Synedra ulna*
4. *Chrysophyta*

Chrysophyta atau ganggang emas adalah sekelompok alga mikroskopis yang paling mudah dikenali dari warnanya yang cokelat keemasan. Warna ini berasal dari pigmen pendukung *Fucoxanthin* di dalam kloroplas yang menutupi klorofil a dan Kelompok *Chrysophyta* memiliki dua flagel yang tidak sama panjang pada organisme motil. Dinding sel tersusun atas pektin dan beberapa spesies dilapisi oleh duri atau sisik silika kecil. Sebagian besar spesies *Chrysophyta* bersifat fotosintetik, tetapi ada beberapa spesies yang heterotrofik parsial atau bahkan fagotrofik penuh. *Chrysophyta* bereproduksi secara aseksual dan seksual. Salah satu contoh spesies dari divisi *Chrysophyta* adalah *Dinobryon sertularia* dapat dilihat pada **gambar 4**. di bawah ini (Sadida, 2024).



Gambar 4. *Dinobryon sertularia*
5. *Rhodopyta*

Rhodophyta atau alga merah merupakan organisme yang memiliki karakteristik, seperti sel eukariotik, tidak berflagel, pati berupa florida, pigmen *Phycobiliprotein* (merah dan biru), tilakoid tidak bertumpuk dan kloroplasnya tidak terdapat retikulum endoplasma eksternal. *Rhodophyta* air tawar memiliki keanekaragaman yang relatif rendah dibandingkan dengan kelompok alga lain. Analisis studi terbaru menunjukkan bahwa terdapat 66 spesies dan 27 genus dari

Amerika Utara. Alga dari divisi ini umumnya tersebar di laut dan dari 5.000 spesies kurang dari 3% yang hidup di habitat air tawar. Salah satu contoh spesies dari divisi *Rhodophyta* adalah *Batrachospermum atrum* dapat dilihat pada **gambar 5.** di bawah ini (Sadida, 2024).



Gambar 5. *Batrachospermum atrum*

6. *Dinophyta*

Dinophyta atau *Dinoflagellata* adalah alga uniseluler yang sebagian besar bersifat motil biflagellata dan sisanya tidak memiliki flagela. Selain itu, kelompok alga ini juga memiliki bentuk *amoeboid*, *coccoid* dan filamen. Dinoflagellata memiliki inti sel besar yang terkondensasi di seluruh siklus sel. Bahan penyusun dinding sel Dinoflagellata berbeda dari alga lainnya karena terletak di bawah membran sel. Dinding sel pada *Dinoflagellata* terdiri dari selulosa (di dalam vesikula yang terikat membran di bawah permukaan) dan membentuk cakram diskrit (lempeng thecal) yang memberikan penampilan lapis baja yang khas pada Dinoflagellata. Spesies *Dinoflagellata* sebagian besar ditemukan di permukaan air laut sekitar 90%, sedangkan sisanya terdapat di lingkungan air tawar dan hanya ditemukan sekitar 220 spesies. Salah satu contoh spesies dari divisi *Dinophyta* adalah *Peridinium cinctum* dapat dilihat pada **gambar 6.** di bawah ini (Sadida, 2024).



Gambar 6. *Peridinium cinctum*

7. *Euglenophyta*

Euglenophyta merupakan kelompok organisme eukariotik yang jenisnya beragam dan sebagian besar memiliki flagel dengan sel tunggal (uniseluler) yang

hanya dapat ditemukan pada satu genus, yaitu *Colacium Ehrenberg*. Genus *Colacium* membentuk koloni sel individu yang bersatu dengan tabung berlendir. *Euglenophyta* merupakan kelompok alga yang hampir seluruhnya uniseluler dengan total 40 genus di seluruh dunia (sekitar 900 spesies) dan sebagian besar terdapat di air tawar. Sel-sel alga dari *Euglenophyta* biasanya bergerak secara motil dengan flagel dan memiliki kemampuan mengubah bentuk tubuh. Sekitar sepertiga dari *euglenoid* yang mampu berfotosintesis dikelompokkan sebagai alga, sedangkan sisanya yang tidak berpigmen bersifat heterotrofik dikelompokkan ke *protozoa*. Salah satu contoh dari divisi *Euglenophyta* adalah *Phacus orbicularis* dapat dilihat pada **gambar 7**. di bawah ini (Sadida, 2024).



Gambar 7. *Phacus orbicularis*

8. Cryptophyta

Cryptophyta atau *Cryptomonas* merupakan organisme uniseluler yang memiliki dua flagel yang asimetris. Terdapat 200 spesies yang biasanya berenang bebas di air laut dan air tawar. *Cryptophyta* memiliki pigmen klorofil a dan c, α -karoten dan beberapa variasi fikobilin. Cadangan makanan utama kelompok ini adalah butiran pati dan selnya terbungkus oleh periplast yang kaku serta protein yang terbuat dari pelat poligon. *Cryptomonas* dibedakan berdasarkan ada tidaknya ekstrusom yang disebut ejectosom dan terdiri dari dua pita spiral. *Cryptophyta* melakukan reproduksi melalui pembelahan sel longitudinal. Salah satu contoh spesies dari divisi *Cryptophyta* adalah *Cryptomonas ovata* dapat dilihat pada **gambar 8**. di bawah ini (Sadida, 2024).



Gambar 8. *Cryptomonas ovata*

9. *Xanthophyta*

Xanthophyta atau alga hijau-kuning bersifat nonmotil yang memiliki sel tunggal (uniseluler), berkoloni serta berfilamen. Kelompok *Xanthophyta* memiliki pigmen khas dengan klorofil a, c1, c2 yang memancarkan warna kuning atau hijau. Berdasarkan morfologinya, *Xanthophyta* terbagi menjadi beberapa macam kelompok, tetapi dibandingkan dengan kelompok *Chlorophyta*, spesies dari divisi ini relatif sedikit. Kelompok alga hijau-kuning bereproduksi secara asexual dan seksual pada tahap reproduksi. Salah satu contoh spesies dari divisi *Xanthophyta* adalah *Vaucheria frigida* dapat dilihat pada **gambar 9**. di bawah ini (Sadida, 2024).



Gambar 9. *Vaucheria frigida*
10. *Phaeophyta*

Phaeophyta atau ganggang cokelat merupakan alga yang hampir seluruhnya berasal dari laut bahkan kurang dari 1% spesies yang habitatnya di air tawar. Alga cokelat seluruhnya bersifat bentik di danau atau sungai dan memiliki distribusi yang sangat besar. Ciri-ciri sitologi kelompok ini memiliki flagela heterokont (hanya sel reproduksi), memiliki laminarin sebagai cadangan makanan utama, pigmen fotosintesis yang khas (klorofil dan γ -, β - dan ϵ - karoten) serta memiliki struktur plastida yang khas (tilakoid yang bertumpuk tiga kali lipat yang menutupi retikulum endoplasma). Salah satu contoh spesies dari divisi *Phaeophyta* adalah *Ectocarpus siliculosus* dapat dilihat pada **gambar 10**. di bawah ini (Sadida, 2024).



Gambar 10. *Ectocarpus siliculosus*

1.6.5. Mikroalga *Spirulina Plantesis*

Secara taksonomi menurut Pratiwi (2021) klasifikasi *Spirulina platensis* yaitu sebagai berikut :

Divisi	: <i>Cyanophyta</i>
Kelas	: <i>Cyanophyceae</i>
Ordo	: <i>Nostocales</i>
Famili	: <i>Oscillatoriaceae</i>
Genus	: <i>Spirulina</i>
Spesies	: <i>Spirulina platensis</i>



Gambar 11. *Spirulina platensis*

Sumber: Pratiwi, 2021

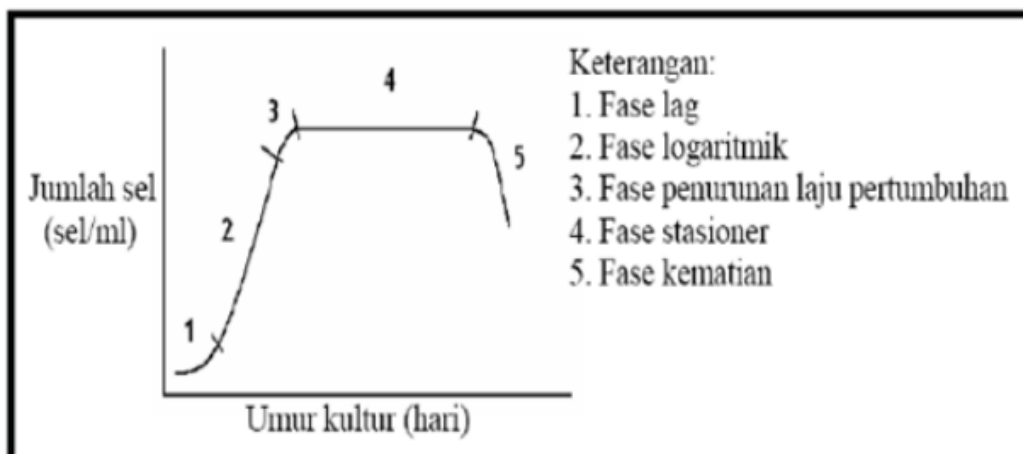
Gambar *Spirulina platensis* dapat dilihat pada **gambar 11.** di atas. *Spirulina platensis* merupakan alga berwarna biru-hijau yang digolongkan ke dalam cyanophyta, bersel satu dan berbentuk spiral. Berdasarkan habitatnya, spirulina dapat berkembang dengan baik pada perairan tropis dan subtropis, baik pada perairan tawar maupun perairan laut. *Spirulina platensis* merupakan makhluk hidup autotrof berwarna kehijauan, kebiruan, dengan sel berkolom membentuk filamen terpilin menyerupai spiral (helix) sehingga disebut juga alga biru hijau berfilamen (cyano bacterium). Bentuk tubuh *Spirulina platensis* yang menyerupai benang merupakan rangkaian sel yang berbentuk silindris dengan dinding sel yang tipis, berdiameter 1-12 mikrometer. Filamen *spirulina* hidup berdiri sendiri dan dapat bergerak bebas. *Spirulina platensis* merupakan salah satu pakan alami larva udang dan ikan yang mempunyai nilai gizi tinggi. Kandungan yang terdapat pada *Spirulina platensis* protein berkisar antara 63-68%, karbohidrat 18-20%, dan lemak 2-3% (Pratiwi, 2021).

Spirulina sp. adalah mikroalga yang banyak digunakan dalam makanan alami. *Cyanobacteria* bersel tunggal dan berserabut dari genus *Cyanobacteria*. *Spirulina sp.* merupakan mikroalga yang berprotein tinggi sehingga berpotensi untuk dikembangkan sebagai pakan alami (Nur Azimatun, 2014).

Bentuk tubuh *Spirulina sp.* menyerupai benang merupakan rangkaian sel yang berbentuk silindris dengan dinding sel yang tipis, berdiameter 1-12 mikrometer. Filamen spirulina hidup berdiri sendiri dan dapat bergerak bebas (Hariyati, 2008). *Spirulina sp.* memiliki warna hijau kebiruan, bentuk tubuh benang (*filament*) berpilin menyerupai spiral (helix), tidak bercabang, dan biasa hidup berkoloni. Aktif bergerak (motil) dengan merotasikan tubuhnya (Widianto, 2024).

1.6.6. Pertumbuhan Mikroalga

Pertumbuhan mikroalga ditandai dengan bertambahnya besar ukuran sel dan jumlah sel. Faktor pertumbuhan mikroalga mempengaruhi hasil biomassa, untuk itu diperukan optimasi komposisi yang seimbang antara banyaknya biomassa dan banyaknya produk dalam biomassa mikroalga. Menurut Hadiyanto & Azim (2012) ada 5 fase pertumbuhan pada mikroalga yang dapat dilihat pada **gambar 12**. di bawah ini.



Gambar 12. Fase pertumbuhan mikroalga
Sumber: Andriani, 2021

Fase *Lag* merupakan pertumbuhan fase awal dimana penambahan kelimpahan mikroalga terjadi dalam jumlah sedikit. Fase ini mudah diobservasi pada saat kultivasi mikroalga baru saja dilakukan atau sesaat setelah bibit mikroalga dimasukkan pada media kultivasi. Pada fase ini biasanya terjadi stressing secara fisiologi karena terjadi perubahan kondisi lingkungan media kultivasi dari media awal ke media baru. Selain itu, pada media baru karena dilakukan penambahan nutrisi dan mineral maka akan mempengaruhi sintesis metabolik mikroalga akibat perubahan kondisi nutrisi dari konsentrasi rendah ke konsentrasi tinggi. Terjadinya perubahan-perubahan semacam inilah, maka mikroalga mengalami proses penyesuaian terlebih dahulu sebelum mengalami pertumbuhan (Andriani, 2021).

Fase eksponensial merupakan tahapan pertumbuhan fase pertumbuhan lanjut yang dialami mikroalga setelah fase *lag*. Mikroalga yang dikultivasi akan mengalami penambahan biomassa secara cepat. Hal ini ditunjukkan dengan penambahan jumlah sel yang sangat cepat melalui pembelahan sel mikroalga. Bila tujuan kultivasi mendapatkan biomassa yang maksimal, maka sebaiknya mikroalga dipanen pada akhir fase eksponensial karena pada fase ini struktur sel masih berada pada kondisi normal dan secara nutrisi terjadi keseimbangan antara nutrisi dalam media dan kandungan nutrisi dalam sel. Selain itu, kandungan protein dalam sel sangat tinggi, sehingga kondisi mikroalga berada pada kondisi yang paling optimal (Andriani, 2021).

Fase penurunan laju pertumbuhan terjadi dengan indikasi pengurangan kecepatan pertumbuhan sampai sama dengan fase awal pertumbuhan, yaitu kondisi yang stagnan dimana tidak terjadi penambahan sel. Pada fase ini ditandai dengan berkurangnya nutrisi dalam media, sehingga laju pembelahan sel semakin menurun. Pada fase ini juga dapat dijumpai penambahan jumlah sel akan tetapi kualitas sel

memiliki nutrisi yang kurang baik. Pemanenan dapat dilakukan pada fase ini. Selanjutnya pada fase stasioner, diindikasikan dengan jumlah sel mikroalga yang konstan dalam kultur akibat dari keseimbangan katabolisme dan anabolisme didalam sel. Fase ini ditandai dengan rendahnya tingkat nutrisi dalam sel mikroalga. Umumnya untuk kelimpahan yang rendah dalam kultivasi terjadi fase stasioner yang pendek, sehingga menyulitkan pada saat pemanenan. Fase kematian diindikasikan oleh kematian sel mikroalga yang terjadi karena adanya perubahan kualitas air kearah yang buruk, penurunan kandungan nutrient dalam media kultivasi dan kemampuan metabolisme mikroalga menurun akibat umur yang sudah tua. Fase ini ditandai dengan penurunan jumlah sel yang cepat, warna air media kultivasi berubah, terjadi buih dipermukaan media dan warna yang pudar serta gumpalan mikroalga yang mengendap didasar wadah (Andriani, 2021).

1.6.7. Faktor yang Mempengaruhi Pertumbuhan Mikroalga

Faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan mikroalga diantaranya faktor abiotik (cahaya, pH, suhu, nutrisi, CO₂, aerasi), faktor biotik (bakteri, virus, jamur, dan lain-lain), serta faktor teknik pemanenan. Mikroalga dapat tumbuh dengan sangat cepat pada kondisi iklim yang tepat (Jelizanur dkk., 2019). Cahaya merupakan sumber energi dalam proses fotosintesis yang berguna untuk pembentukan senyawa karbon organik. Intensitas cahaya sangat menentukan pertumbuhan mikroalga yaitu dilihat dari lama penyinaran dan panjang gelombang yang digunakan untuk fotosintesis. Cahaya berperan penting dalam pertumbuhan mikroalga, tetapi kebutuhannya bervariasi yang disesuaikan dengan kedalaman kultur dan kepadatannya Latuconsina dkk., 2013).

Pada pertumbuhannya, mikroalga bergantung pada faktor lingkungan seperti derajat keasaman (pH), karena pH lingkungan akan mempengaruhi metabolisme dan pertumbuhan kultur mikroalga seperti mengubah keseimbangan karbon anorganik, mengubah ketersediaan nutrisi dan mempengaruhi fisiologi sel. Secara umum kisaran pH yang optimum untuk kultur mikroalga adalah berkisar 7-9, sedangkan pH optimum untuk alga laut berkisar antara 7,8-8,5 (Han dkk., 2013). Semakin rendah pH (kondisi asam) mengakibatkan banyak dinding sel yang terdegradasi. Kondisi pH yang rendah akan mengaktifkan enzim yang mematahkan ikatan antara polisakarida pembentuk dinding sehingga terjadi pelonggaran dinding sel dan kekakuan dinding sel berkurang (Jelizanur dkk., 2019). Derajat keasaman media menentukan kelarutan dan ketersediaan ion mineral sehingga dengan ketersediaan nutrisi yang cukup akan mempengaruhi penyerapan nutrisi oleh sel. Suhu yang optimal untuk kultivasi mikroalga antara 24-30 °C dan dapat berbeda bergantung lokasi kultivasi, komposisi media yang digunakan serta jenis mikroalga. Namun sebagian besar mikroalga dapat mentoleransi suhu antara 16-35°C. Temperature dibawah 16°C dapat memperlambat pertumbuhan dan suhu diatas 35°C dapat menimbulkan kematian pada beberapa spesies mikroalga (Kawaroe dkk., 2010). Mikroalga *Navicula sp.* dapat hidup pada suhu sekitar 25-28°C (Gupta & Agrawal, 2007).

Nutrien yang dibutuhkan oleh mikroalga terdiri dari makronutrien dan mikronutrien. Makronutrien terdiri dari C, H, N, P, K, S, Mg, dan Ca. Sedangkan mikronutrien yang dibutuhkan antara lain adalah Fe, Cu, Mn, Zn, Co, Mo, Bo, Vn, dan St. *Nutrient* N dan P sering menjadi faktor pembatas pertumbuhan mikroalga. Khusus bagi mikroalga yang memiliki kerangka dinding sel yang mengandung silikat (diatom) seperti

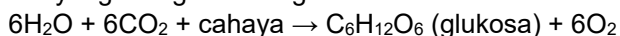
Navicula sp., unsur Si berperan sebagai faktor pembatas. Nutrisi yang diberikan kepada mikroalga bergantung jenis mikroalga dan kebutuhannya. Nutrisi memiliki fungsi khusus pada pertumbuhan dan kepadatan yang dicapai oleh organisme yang dikultivasi tanpa mengesampingkan pengaruh dari lingkungan. Secara umum defisiensi nutrisi pada mikroalga mempengaruhi penurunan kandungan protein, pigmen fotosintesis dan kandungan produk karbohidrat serta lemak (Kawaroe, dkk., 2010).

Aerasi dibutuhkan untuk mencegah terjadinya sedimentasi pada sistem kultivasi mikroalga, selain itu juga untuk memastikan bahwa semua sel mikroalga mendapat cahaya dan nutrisi yang sama, untuk menghindari stratifikasi suhu dan tercampurnya air dengan suhu yang berbeda, terutama pada kultivasi di lapangan dan untuk meningkatkan pertukaran cahaya antara medium kultivasi dan udara. Udara merupakan sumber karbon untuk fotosintesis dalam bentuk CO₂. Untuk kultivasi yang sangat padat, CO₂ yang berasal dari udara (0.003% CO₂) tidak mencukupi pertumbuhan optimal bagi mikroalga, sehingga perlu ditambahkan dengan CO₂ murni (rata-rata 1% dari volume udara) (Kawaroe dkk., 2010).

1.6.8. Fotosintesis

Fotosintesis adalah proses pembentukan molekul-molekul makanan yang kompleks dan berenergi tinggi dari komponen-komponen yang lebih sederhana oleh tumbuhan hijau dan organisme autotrofik lainnya dengan keberadaan energi cahaya. Fotosintesis melibatkan konversi energi cahaya, karbon dioksida dan air menjadi glukosa, gula lain dan senyawa organik. Fotosintesis merupakan mekanisme yang paling penting untuk menghasilkan oksigen. Oksigen dibutuhkan untuk tahap akhir respirasi seluler (Juslina, 2022).

Tumbuhan berfotosintesis menggunakan karbon dioksida dan air untuk menghasilkan gula dan oksigen yang diperlukan sebagai makanannya. Energi untuk menjalankan proses ini berasal dari fotosintesis. Berikut ini adalah persamaan reaksi fotosintesis yang menghasilkan glukosa:



Sebagaimana reaksi oksidasi penghasil energi, yaitu tempat bergantungnya semua kehidupan, fotosintesis meliputi reaksi oksidasi (reaksi terang) dan reduksi atau reaksi gelap. Proses keseluruhan pada reaksi terang adalah oksidasi air (pemindahan elektron disertai pelepasan O₂ sebagai hasil samping) dan menghasilkan sintesis ATP dan NADPH untuk membentuk senyawa organik pada reaksi gelap. Sedangkan reaksi gelap adalah reduksi CO₂ untuk membentuk senyawa organik, misalnya karbohidrat (Maftukhah dkk., 2023).

Menurut (Maftukhah dkk., 2023) reaksi terang secara umum ada 3 reaksi utama yang terjadi pada reaksi terang yaitu :

1. Oksidasi H₂O, menurut persamaan :

$$2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{e}^- + 4\text{H}^+$$
2. Reduksi NADP⁺, menurut persamaan :

$$2 \text{NADP}^+ + 4\text{e}^- + 4\text{H}^+ \rightarrow 2 \text{NADPH} + 2 \text{H}^+$$
3. Sintesis ATP (ATP *synthesis*), menurut persamaan : $\text{ADP} + \text{Pi} \rightarrow \text{ATP}$ Reaksi terang berlangsung pada sistem membran kompleks/grana (membran fotosintetik) yang tersusun dari protein kompleks, *electron carrier* dan molekul lemak. Reaksi terang mengkonversi energi menjadi berbagai produk. Pada langkah pertama adalah konversi foton menjadi bentuk elektron tereksitasi pada

molekul antena pigmen yang terdapat pada sistem antena. Baik molekul donor maupun akseptor akan melekat pada protein kompleks pusat reaksi.

Menurut (Maftukhah dkk., 2023) untuk siklus Calvin merupakan suatu siklus dalam proses fotosintesis yang termasuk dalam reaksi gelap (*dark reaction/light independent*). Reaksi ini disebut juga reaksi fiksasi karbon dan berlangsung di bagian stroma dari kloroplas. *Spirulina platensis* menghilangkan CO₂ dari lingkungan dan mereduksinya menjadi karbohidrat dengan melalui siklus Calvin. Proses ini merupakan serangkaian reaksi biokimia yang mereduksi karbon dan menyusun ulang ikatan menghasilkan karbohidrat dari molekul CO₂. Untuk fiksasi karbon (fiksasi gas CO₂ yang bebas berdifusi menjadi bentuk yang nonvolatil berupa reduced sugar) dibutuhkan ATP (energi) dan NADPH (reducing power). Reaksi yang terjadi dalam siklus Calvin secara umum dapat dituliskan sebagai berikut :



1.6.9. Nitrat

Nitrat (NO₃) adalah bentuk utama nitrogen di perairan alami dan merupakan nutrisi utama bagi pertumbuhan tanaman dan algae. Nitrat nitrogen sangat mudah larut dalam air dan bersifat stabil (Effendi, 2003). Senyawa ini dihasilkan dari proses oksidasi sempurna senyawa nitrogen di perairan. Kandungan nitrat yang terdapat didalam limbah cair peternakan sapi perah diserap oleh *Spirulina sp* untuk diubah menjadi protein. Bagi *Spirulina*, nitrat merupakan sumber nitrogen utama yang diasimilasi. Nitrat digunakan oleh mikroalga *Spirulina sp* sebagai sumber nutrisi bagi pertumbuhannya. Nitrat ini kemudian dikonversi menjadi protein (Sumiarsa dkk., 2011).

Nitrat memiliki manfaat sebagai nutrisi oleh mikroalga yang dapat membantu pertumbuhan dan sintesis dalam protein. Menurut (Eddy Agus dkk., 2003) nitrogen yang dapat dimanfaatkan oleh makroalga adalah ammonia bebas (NH₃) dan nitrat (NO₃), yang dapat berfungsi sebagai pembentukan asam amino, lemak, dan sel-sel vegetatif. Nitrat perairan alami dan juga merupakan nutrisi utama bagi pertumbuhan tanaman dan alga. Nitrat dan amonium adalah salah satu sumber utama nitrogen didalam perairan. Kandungan nitrat-nitrogen yang lebih dari 0,2 mg/l dapat mengakibatkan terjadinya pengayaan nutrisi, sehingga dapat menstimulir pertumbuhan alga dan tumbuhan air di perairan tersebut secara cepat (N dkk., 2021).

1.6.10. Fosfor

Fosfor merupakan salah satu dari makro nutrisi yang berperan secara signifikan dalam pertumbuhan dan metabolisme fitoplankton serta tumbuhan autotrof di perairan dan merupakan faktor pembatas bagi pertumbuhan fitoplankton. Fosfor dalam bentuk murni sebagai unsur P, tidak pernah ditemukan di alam. Unsur ini ditemukan di alam, termasuk di perairan dalam bentuk persenyawaan dengan unsur-unsur lainnya. Salah satu bentuk unsur P ini dan memiliki peran penting dalam kesuburan perairan adalah ion fosfat. Ion fosfat yang berada dalam kolom perairan dapat ditemukan dalam bentuk terlarut dan teradsorpsi oleh partikel. Fosfat terlarut secara umum terbagi atas fosfat organik (*dissolved organic phosphate*, DOP) dan fosfat anorganik (*dissolved inorganic phosphate*, DIP, ion fosfat) yang terdiri atas ortofosfat dan polifosfat. Fosfat dalam bentuk terlarut merupakan ion yang langsung dapat diserap oleh fitoplankton. Peran ion fosfat dalam perairan adalah sebagai limiting nutrient atau nutrisi pembatas untuk

pertumbuhan dan metabolisme mikro alga, namun juga dapat memberikan kontribusi untuk peningkatan terjadinya proses eutrofikasi pada badan air (Sari dkk., 2022).

1.6.11. Intensitas Cahaya

Mikroalga melakukan proses fotosintesis dengan bantuan energi cahaya untuk pertumbuhan. Cahaya merupakan sumber energi pada proses fotosintesis, tetapi energi yang diberikan oleh cahaya bergantung pada kualitas cahaya, intensitas cahaya dan fotoperiod. Intensitas cahaya merupakan faktor utama dan sekaligus faktor pembatas bagi proses fotosintesis mikroalga. Pada saat intensitas cahaya meningkat, maka mikroalga akan merespon dengan proses reproduksi dan pembelahan sel yang cepat. Pada kondisi yang demikian intensitas cahaya menjadi faktor utama bagi proses reproduksi sel mikroalga (Sinaga dkk., 2020). Cahaya dapat meningkatkan ATP yang dihasilkan pada proses fotosintesis, naiknya ATP akan memicu pertumbuhan sel alga (Peri dkk., 2009).

Penelitian yang dilaporkan oleh Padang dkk. (2013), bahwa perlakuan intensitas cahaya 15.000 lux memberikan puncak kepadatan sel tertinggi pada kultivasi *Navicula* sp. dibandingkan perlakuan intensitas cahaya 10.000 lux dan 5000 lux. (Sinaga dkk., 2020), melaporkan intensitas cahaya yang semakin tinggi akan menghasilkan laju pertumbuhan *Nannochloropsis* sp. yang semakin rendah. Menurut (Peri dkk., 2009), intensitas cahaya yang terlalu tinggi (11.700 lux) akan menurunkan kepadatan sel dibandingkan dengan intensitas cahaya 7.400 lux dan 3.400 lux, hal ini dikarenakan intensitas cahaya yang terlalu tinggi akan berpengaruh dengan meningkatnya suhu dan salinitas sehingga fitoplankton memiliki kendala dalam pertumbuhan yang berakibat pada rendahnya kepadatan populasi sel. Pada prinsipnya semua perlakuan intensitas cahaya dapat ditolerir oleh mikroalga untuk dapat tumbuh, namun respon fisiologis dan biokimia berbeda-beda (kepadatan metabolitnya) (Prasetyo dkk., 2022). Menurut (Suminto, 2009) penelitian menunjukkan bahwa intensitas cahaya dalam kisaran 2500-5000 lux mampu meningkatkan pertumbuhan *spirulina* secara optimal.

1.6.12. Media Pupuk Walne

Pupuk Walne adalah pupuk yang digunakan dalam kultur mikroalga, terutama *Spirulina*, yang mengandung unsur hara makro dan mikro yang kompleks. Pupuk ini merupakan campuran dari berbagai bahan kimia yang dirancang untuk memenuhi kebutuhan nutrisi mikroalga selama proses pertumbuhan. Pupuk Walne banyak digunakan dalam kultur komposisinya *Spirulina* sp. karena yang seimbang dan kandungan nutrisi makro esensial seperti nitrogen, fosfor, dan kalium. Elemen elemen ini penting untuk proses biologis *Spirulina*, termasuk sintesis protein dan fotosintesis. Dalam kondisi laboratorium yang terkontrol, dosis optimal pupuk Walne dapat meningkatkan pertumbuhan vegetatif dan reproduksi sel, menghasilkan biomassa berkualitas tinggi. Selain itu, pupuk ini juga menyediakan mikronutrien penting yang mendukung pertumbuhan *Spirulina*. Seperti yang diteliti pupuk Walne telah terbukti efektif dalam meningkatkan kepadatan sel dan kualitas biomassa *Spirulina* sp. dalam kultur laboratorium (Wibowo dkk., 2024).

Penggunaan media kultur dengan pupuk Walne dinilai lebih baik untuk meningkatkan pertumbuhan mikroalgae hijau dibandingkan dengan media *Guillard* karena kandungan nutrisinya yang lebih baik (Putri & Alaa, 2019). Penggunaan pupuk sintesis seperti pupuk Walne untuk kultur mikroalga juga dinilai lebih praktis karena

kandungan nutriennya yang sudah lengkap dibandingkan dengan pupuk organik (Budiono dkk., 2018). Penelitian yang telah dilakukan oleh Ezeani dan Abu (2019) dengan penambahan konsentrasi NaNO_3 mengakibatkan pertumbuhan *Nannochloropsis sp.* yang semakin meningkat. Ezeani dan Abu (2019), melakukan penelitian terhadap pigmen *Chlorella sp.* dengan pupuk yang berbeda. Perbedaan pupuk yang diberikan dalam media kultur *Chlorella sp.* menghasilkan kadar klorofil yang berbeda hampir dua kali lipat (Wardani dkk., 2022).

1.6.13. Manfaat Mikroalga *Spirulina Plantesis*

Spirulina saat ini telah menjadi tren, salah satunya sebagai perawatan kulit karena kandungannya yang kaya akan manfaat. Produk *Spirulina* yang sering dijumpai di pasar adalah sebagai anti-aging, termasuk pelembab, antioksidan dan sifat mencerahkan, kedua sebagai anti jerawat, dan penyembuhan luka. Selain itu, *Spirulina* juga dapat menjadi anti inflamasi, anti kanker, anti bakteri, imunomodulator, serta sebagai pelindung dari sinar matahari. Banyak penelitian ilmiah juga menunjukkan bahwa *Spirulina* kaya akan kandungan protein (50-70%), asam lemak esensial, dan nutrisi lain seperti mineral, vitamin, dan lain-lain. Terlebih lagi, *Spirulina* memiliki berbagai senyawa fitokimia seperti asam fenolik, tokoferol dan β -karoten, yang semuanya diketahui menunjukkan sifat antioksidan yang kuat (Nur Azimatun dkk., 2021).

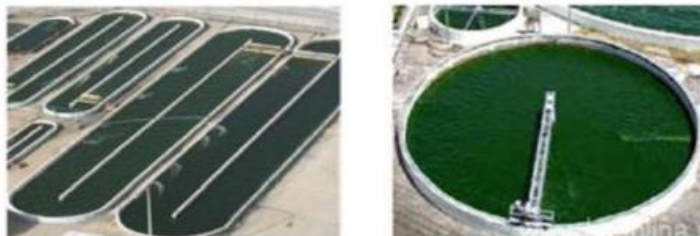
Saat ini, produksi global mikroalga dan *cyanobacteria* sebagian besar digunakan untuk produk komersial bernilai tinggi mengingat biomassa alga mengandung pigmen, protein, asam lemak esensial, polisakarida, vitamin, dan mineral yang sangat menarik sebagai produk alami, baik sebagai kosmetik, pangan, dan farmasi. *Spirulina* dapat dijadikan pelembab karena *Spirulina* dapat memperbaiki struktur epidermis dan bertindak sebagai penghidrasi kulit pada lapisan terluar kulit, terutama untuk perlindungan kulit, anti penuaan dan untuk mengontrol minyak berlebih di dalam jaringan kulit (Nur Azimatun dkk., 2021).

Bahan baku bioplastik dan produk ramah lingkungan beberapa studi melaporkan potensi *Spirulina* dalam produksi bioplastik ramah lingkungan, seperti polihidroksibutirat (PHB), serta sebagai bahan bio-material multifungsi yang bisa diaplikasikan untuk pelindung kulit dan bahan kosmetik. *Spirulina* memiliki kandungan protein sampai 60% dan pigmen *phycocyanin* sampai 15%. Kedua produk ini memiliki nilai ekonomis yang tinggi. Setelah kedua produk ini diambil, residu biomassa yang masih mengandung PHA dapat diolah menjadi bioplastik. *Spirulina* juga dapat dimanfaatkan efek antikanker berbagai penelitian menunjukkan ekstrak *Spirulina* memiliki komponen aktif seperti *alkaloid*, *flavonoid*, *steroid*, dan saponin yang berpotensi sebagai agen anti kanker dengan mekanisme induksi apoptosis dan penghambatan proliferasi sel kanker (Nur Azimatun dkk., 2021)..

Spirulina juga dapat meningkatkan kandungan protein pakan ayam penelitian lain melaporkan bahwa penambahan *Spirulina* dalam formulasi ransum ayam dapat meningkatkan kandungan protein pakan dan asam amino esensial yang seimbang, sehingga memperbaiki pencernaan dan efisiensi konversi pakan menjadi daging. Efek positif pada peningkatan konsumsi pakan, produksi telur, dan efisiensi metabolisme protein. Keunggulan *Spirulina* sebagai pakan adalah dinding selnya yang mudah dicerna (mukoprotein) dan kandungan protein serta nutrisi yang lengkap dan mudah diserap (Lokapirnasari Paramita dkk., 2011).

1.6.14. Fotobioreaktor

Proses kultivasi mikroalga membutuhkan suatu wadah berisi air dan nutrisi yang diperlukan untuk dapat hidup dan berkembang dengan baik, wadah ini disebut fotobioreaktor atau PBR (*PhotoBioReactor*). Fotobioreaktor adalah reactor buatan memanfaatkan sumber cahaya (matahari, lampu halogen, LED) sebagai sumber fotosintesis untuk pertumbuhan mikroalga. Teknologi fotobioreaktor mampu meningkatkan produktivitas mikroalga sebesar 2-5x lebih tinggi dari kondisi normalnya. Panen mikroalga dapat dilakukan di sistem terbuka (*open pond*) dan tertutup (*closed pond*). *Open pond* dapat dikategorikan ke dalam kolam yang menggunakan air alam seperti danau, tambak atau kolam. **Kelemahan dari *open pond* ini** diantaranya: Volume kultur yang besar mengakibatkan sinar matahari tidak sepenuhnya diserap oleh mikroalga di dasar kolam, proses kehilangan CO₂ ke atmosfer dan air tinggi, pengontrolan temperatur sulit, sedimentasi sel akan semakin tinggi jika dioperasikan pada turbulensi yang rendah, sehingga dimungkinkan masuknya kontaminan, kontaminasi tinggi, dan konsentrasi biomassa rendah (0.1-0,2 g/L) (Andriani, 2021).



Gambar 13. Fotobioreaktor sistem terbuka
Sumber: Andriani, 2021

Contoh fotobioreaktor sistem terbuka dapat dilihat pada **gambar 13.** di atas. Berbeda dengan sistem *open pond*, sistem *closed pond* umumnya lebih mudah disesuaikan desainnya dengan lokasi pemasangan, dapat mencegah penguapan air dan CO₂, mencegah kontaminasi atau meminimalkan mikroorganisme invasif dan mendapatkan konsentrasi biomassa tinggi (2-8 g/L). **Kelemahan dari sistem ini** adalah biaya yang tinggi apabila diterapkan dalam skala komersial, dan kesukaran dalam proses *scale up*. Dalam skala kecil, luas area permukaan terhadap rasio volume dapat dengan mudah didapatkan, akan tetapi jika skala desain ditingkatkan, rasio antara volume dan luas permukaan cenderung menurun. *Closed pond* terdiri dari 3 jenis yaitu fotobioreaktor tipe *annular*, fotobioreaktor *flatplate* dan fotobioreaktor *tubular*. Efisiensi fotosintesis tertinggi pada fotobioreaktor jenis *rubular*. Kemampuan suatu reaktor dapat dilihat dari nilai laju pertumbuhan mikroalga yang ditumbuhkan di dalamnya. Beberapa faktor yang diduga mempengaruhi laju pertumbuhan spesifik diantaranya adalah perbedaan strain, nutrisi, laju alir gas CO₂, konsentrasi gas CO₂ yang diinjeksikan serta faktor-faktor lingkungan lainnya (Andriani, 2021). Contoh fotobioreaktor sistem tertutup dapat dilihat pada **gambar 14.** di bawah ini.



Gambar 14. Fotobioreaktor Sistem Tertutup
Sumber: Dokumentasi, 2025

1.6.15. Penelitian Terdahulu

Tabel 2. Penelitian Terdahulu

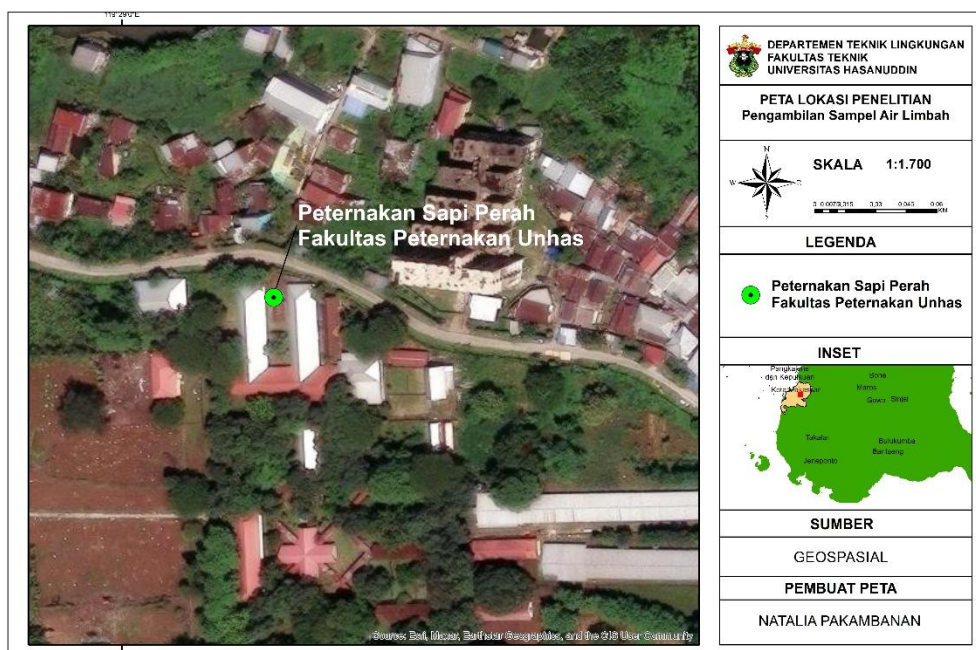
No.	Nama Penulis	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1.	(Kurniasari dkk., 2020)	<i>Performance of Spirulina Plantesis in Oxidation Ditch Reactor for treating Tofu Wastewater.</i>	Mikroalga <i>Spirulina Plantesis</i> mampu menurunkan kandungan fosfat maksimal pada air limbah tahu sebesar 33,15%. Selain itu, mikroalga mampu menurunkan kandungan Nitrat pada air limbah tahu sebesar 46,07%.
2.	(E. Ezeani & O. Abu, 2019)	<i>Commercial Microalgae Culture in Inorganic Fertilizer Media.</i>	Perbedaan konsentrasi pupuk walne tidak berpengaruh nyata terhadap peningkatan laju pertumbuhan ($p=0,280$) dan kandungan klorofil-a ($p=0,463$) mikroalga <i>Spirulina plantesis</i> . Namun, demikian konsentrasi pupuk walne 1,5 mL/L dapat meningkatkan laju pertumbuhan dan kandungan klorofil-a <i>Tetraselmis chuii</i> sebesar 0,38 sel/ml/hari dan 248,81 mg/L atau 2,392 mg/g biomassa basah.
3.	(Abdelfattah dkk., 2023)	<i>Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects</i>	Penggunaan mikroalga dalam pengolahan air limbah menawarkan solusi yang efisien, ramah lingkungan, dan ekonomis. Mikroalga mampu menghilangkan berbagai polutan tanpa menimbulkan pencemaran lanjutan, serta menghasilkan biomassa yang bernilai guna tinggi. Meskipun menunjukkan keunggulan

No.	Nama Penulis	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
			dibandingkan metode konvensional, penerapan luasnya masih menghadapi tantangan, sehingga diperlukan penelitian lanjutan untuk pengembangan lebih optimal di masa depan.
4.	(Fithria dkk., 2022)	Pengaruh Intensitas Pencahayaan Yang Berbeda Pada Kultur <i>Spirulina platensis</i> Terhadap Kandungan Protein, Kadar Pigmen Dan Aktivitas Antioksidan	Intensitas 4000 hingga 6 000 lux efektif meningkatkan pertumbuhan dan kualitas <i>Spirulina</i> , namun intensitas paling optimal adalah 9 000 lux, yang memberikan output maksimum pada semua parameter. Semakin tinggi intensitas cahaya maka akan semakin tinggi laju pertumbuhan. Namun, hal tersebut juga dipengaruhi oleh penambahan 1% pupuk walne pada saat penelitian dilakukan.
5.	(Hajri dkk., 2024)	<i>Utilizing Mixed Cultures of Microalgae to Up-Cycle and Remove Nutrients from Dairy Wastewater</i>	Mikroalga spirulina menunjukkan efisiensi penghilangan nitrogen yang tinggi yaitu 92,56% dan efisiensi penghilangan fosfor 83,45%.
6.	(Suminto, 2009)	Penggunaan Jenis Media Kultur Teknis Terhadap Produksi dan Kandungan Nutrisi Sel	Penelitian menunjukkan bahwa intensitas cahaya dalam kisaran 2500-5000 lux mampu meningkatkan pertumbuhan <i>Spirulina</i> secara optimal.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian “Pemanfaatan Air Limbah Peternakan Sebagai Media Pertumbuhan Mikroalga” dimulai dari bulan Mei sampai dengan Juli 2025. Penelitian dimulai dari survey lokasi pengambilan sampel, persiapan fotobioreaktor, pengujian karakteristik awal, proses aklimatisasi, kultivasi air limbah dan mikroalga hingga analisis kualitas air limbah peternakan. Pengolahan air limbah dilakukan di Laboratorium Kualitas Air, Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, untuk pengujian sampel dilakukan di Laboratorium Pakan Alami Balai Perikanan Budidaya Air Payau (BPBAP) Takalar. Sedangkan Lokasi pengambilan sampel air limbah peternakan dikumpulkan dari fakultas peternakan yaitu pada digester air limbah peternakan sapi perah Universitas Hasanuddin $5^{\circ}07'31''$ S $119^{\circ}29'02''$ E yang dapat dilihat pada gambar berikut. Untuk parameter yang diuji yaitu kepadatan sel mikroalga. Peta lokasi penelitian dapat dilihat pada **gambar 15**. di bawah ini.



Gambar 15. Lokasi Penelitian
Sumber: Geospasial, 2025

2.2 Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen untuk mengkaji efektivitas mikroalga *Spirulina platensis* dalam pengolahan air limbah peternakan. Eksperimen dilakukan selama 8 hari menggunakan fotobioreaktor berkapasitas 50 liter. Setiap fotobioreaktor diisi dengan campuran 50% mikroalga

Spirulina platensis dan 50% air limbah peternakan. Variasi perlakuan yang diberikan adalah intensitas cahaya pada tiga tingkat 3000 lux, 4000 lux, dan 5000 lux.

Penelitian eksperimen adalah jenis penelitian ilmiah yang bertujuan untuk membuktikan pengaruh suatu perlakuan (treatment) terhadap akibat dari perlakuan tersebut dengan cara memanipulasi dan mengontrol satu atau lebih variabel bebas dan mengamati efeknya pada variabel terikat. Penelitian ini dilakukan dengan pengaturan dan kontrol variabel yang ketat serta biasanya melibatkan kelompok eksperimen yang mendapat perlakuan dan kelompok kontrol yang tidak mendapat perlakuan, sehingga memungkinkan peneliti untuk menguji hubungan sebab-akibat antara variabel secara valid dan dapat diandalkan (Farhan Arib dkk., 2024).

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 produksi mikroalga. Menurut (Suminto, 2009) penelitian menunjukkan bahwa intensitas cahaya dalam kisaran 2500-5000 lux mampu meningkatkan pertumbuhan *spirulina* secara optimal.

Variabel terikat atau variabel dependen menjadi variabel yang diamati untuk melihat pengaruh dari variabel bebas. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah kepadatan sel mikroalga. 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 efisiensi produksi dan pertumbuhan 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 peternakan, volume media dijaga sebanyak 50 liter dalam fotobioreaktor, dan durasi setiap pengamatan ditetapkan selama 8 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 dapat dilihat pada **tabel 3.** dan **tabel 4.** di bawah ini.

Tabel 3. Alat Penelitian

No.	Alat	Fungsi
1.	Fotobioreaktor	Alat pengolahan air limbah peternakan 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.
12.	<i>Sedgwich Rafter</i>	Untuk menghitung kepadatan sel spirulina.
13.	Mikroskop	Untuk menghitung kepadatan sel spirulina.

Sumber: Penelitian, 2025

Tabel 4. Bahan Penelitian

No.	Bahan	Fungsi
1.	Air sampel	Bahan perlakuan.
2.	<i>Spirulina Plantesis</i>	Bahan perlakuan.
3.	Pupuk walne	Nutrisi tambahan untuk mendukung pertumbuhan <i>Spirulina Plantesis</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.
7.	Kaporit	Untuk menghilangkan mikroorganisme dalam air limbah peternakan.
8.	Natrium Tiosulfat	Untuk menghilangkan kandungan kaporit dalam air limbah peternakan.
9.	Air bersih	Untuk mengencerkan air limbah peternakan.
10.	Air laut steril	Untuk campuran media perbanyakan kultur <i>Spirulina Plantesis</i> .

Sumber: Penelitian, 2025

2.4 Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah air limbah peternakan yang dihasilkan dari aktivitas pencucian kandang sapi perah, seperti limbah sisa pakan ternak, pencucian peralatan dan kegiatan lainnya yang ditampung dalam digester. Air limbah peternakan ini dipilih dari beberapa Lokasi kandang hewan yang telah di survey karena mengandung konsentrasi tinggi bahan pencemar organik dan anorganik, terutama nitrogen dan fosfat, yang dapat dimanfaatkan oleh mikroalga *Spirulina platensis* sebagai sumber nutrisi. Secara umum, limbah peternakan ini memiliki karakteristik seperti kandungan bahan organik yang tinggi, pH yang netral hingga basa, serta keberadaan unsur nitrogen dan fosfat dalam jumlah yang signifikan.

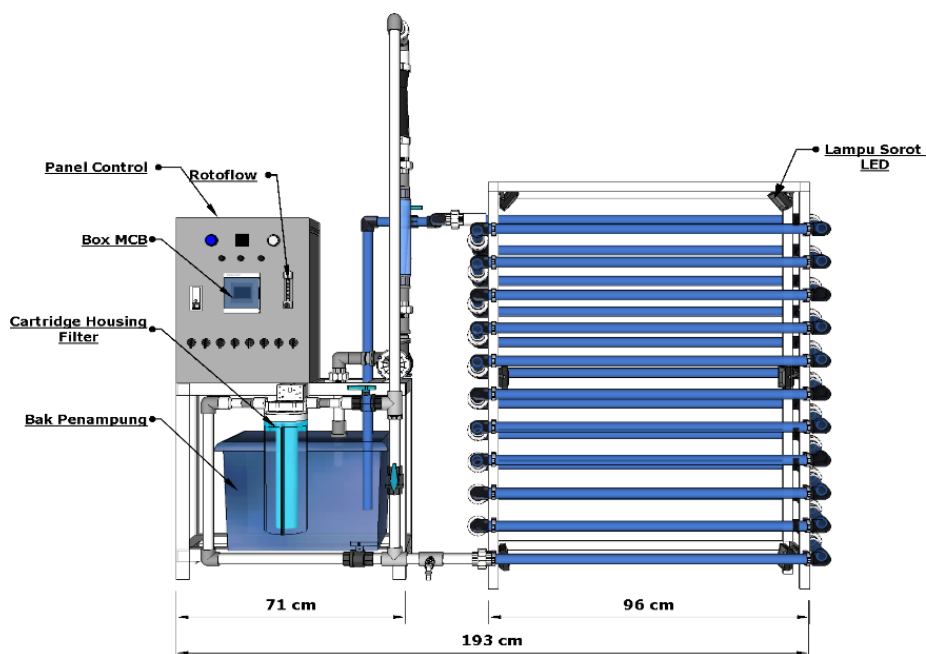
Sampel penelitian diambil dari digester air limbah peternakan sapi perah fakultas peternakan Universitas Hasanuddin. Air limbah yang digunakan telah disaring untuk menghilangkan partikel kasar dan endapan yang dapat mengganggu proses kultur mikroalga. Air limbah yang telah diambil kemudian dilakukan pengujian karakteristik awal. 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 peternakan 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 fotobioreaktor yang digunakan selama penelitian dapat dilihat pada **gambar 16**. di bawah ini.



Gambar 16. 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 peternakan 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. Spesifikasi system fotobioreaktor dapat dilihat pada **tabel 5.** di bawah ini.

Tabel 5. 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 Phase, 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 @ 1 inchi, T. 0,75 mm, Frame: Mild Steel 1mm.</i>

2.5.2 Pengambilan Sampel

Metode pengambilan sampel air limbah dilakukan secara langsung menggunakan metode *grab sampling* yang merupakan metode pengambilan sampel dimana sampel mempunyai karakteristik yang tidak berubah dalam suatu periode atau batas waktu tertentu (Udianto Fauzi dkk., 2022) pengambilan sampel dilakukan menggunakan alat *water sampler* sesuai dengan (Badan Standardisasi Nasional, 2008). Pengambilan sampel dilakukan pada digester air limbah peternakan sapi perah Universitas Hasanuddin dengan titik koordinat 5°07'31" S 119°29'02" E. Kegiatan survey dilakukan pada bulan Maret 2025 dapat dilihat pada **gambar 17.** di bawah ini.



Gambar 17. Survey Lokasi Pengambilan Sampel Air Limbah
Sumber: Dokumentasi, 2025

2.5.3 Perbanyakan Kultur Mikroalga

Mikroalga yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari Laboratorium pakan alami Balai Perikanan Budidaya Air Payau (BPBAP) Takalar sebanyak 10 liter. *Spirulina platensis* memiliki potensi besar dalam pengolahan limbah peternakan 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 proses aklimatisasi dimulai, mikroalga diperbanyak menggunakan dua jenis media kultur dengan masing-masing berkapasitas 15 liter. Media kultur tersebut terdiri dari aquades dan air laut steril yang telah ditambahkan pupuk Walne sebagai sumber nutrisi utama. Komposisi air laut dihitung terlebih dahulu sebelum melakukan kultivasi. Pupuk Walne diberikan dengan perbandingan 1:1000 antara volume pupuk dan volume media kultur yaitu 1 mL pupuk walne dalam 1 liter media kultur, bertujuan untuk memenuhi kebutuhan unsur hara makro dan mikro yang diperlukan mikroalga agar dapat tumbuh secara optimal. Komposisi nutrisi dalam pupuk Walne diformulasikan khusus untuk mendukung pembentukan biomassa mikroalga serta meningkatkan aktivitas fotosintesis. Dokumentasi perbanyakan kultur mikroalga dapat dilihat pada **gambar 18**. di bawah ini.



Gambar 18. Perbanyakan kultur mikroalga

Sumber: Dokumentasi, 2025

Selama proses kultivasi, aerasi dilakukan secara berkesinambungan untuk menjamin distribusi oksigen dan karbon dioksida yang merata dalam media kultur hingga kondisi optimal tercapai untuk tahap kultivasi selanjutnya. Aerasi atau pengadukan penting untuk menjaga kelarutan oksigen terlarut (DO) dan mendistribusikan nutrisi serta cahaya secara merata dalam media kultur. Aerasi juga mencegah pengendapan sel mikroalga, sehingga mendukung pertumbuhan yang optimal. Selain itu, intensitas cahaya sebesar 5000 lux disediakan menggunakan lampu LED pada fotobioreaktor guna mengoptimalkan fotosintesis. Dengan pengaturan aerasi dan pencahayaan yang konsisten, mikroalga mampu mengalami pertumbuhan yang signifikan dalam waktu yang relatif singkat.

2.5.4 Sterilisasi Fotobioreaktor

Langkah pertama yang harus dilakukan sebelum melakukan kultur mikroalga adalah mempersiapkan alat dan bahan, kemudian melakukan sterilisasi alat. Sterilisasi merupakan suatu proses pemusnahan semua bentuk mikroorganisme hidup termasuk spora pada alat dan bahan yang akan disterilkan (Paulina, 2019). 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 menurut (Hadiyanto & Azim, 2012).

Fotobioreaktor pada penelitian ini disterilisasi dapat dilakukan menggunakan H_2SO_4 konsentrasi rendah dengan durasi kontak yang disesuaikan agar efektif membunuh kontaminan tanpa merusak kultur utama. Tahapan pertama dalam proses sterilisasi yakni mencuci fotobioreaktor dengan sabun dan dibilas hingga bersih. Membuat larutan H_2SO_4 10% dengan cara mengencerkan larutan teknis H_2SO_4 dengan aquades kemudian Larutan H_2SO_4 digunakan untuk membilas semua fotobioreaktor, keran dan semua sambungan sambungan dalam unit fotobioreaktor. Setelah semua bagian fotobioreaktor terbilas menggunakan H_2SO_4 , kemudian fotobioreaktor dibilas menggunakan air hingga larutan H_2SO_4 tidak tersisa. Pembilasan ulang dilanjutkan dengan aquades, hingga fotobioreaktor benar-benar bersih.

2.5.5 Treatment Awal

Sebelum melakukan aklimatisasi terlebih dahulu melakukan treatment awal untuk air limbah peternakan. Air limbah yang digunakan telah di encerkan dengan 50% air bersih kemudian di tambahkan kaporit dan natrium tiosulfat fungsi kaporit untuk membunuh mikroorganisme dalam air limbah yang dapat menghambat pertumbuhan mikroalga. Kaporit yang ditambahkan kedalam air limbah sebanyak 1,5 gram didiamkan selama 1 jam. Kemudian ditambahkan 3 gram natrium tiosulfat yang berfungsi untuk menghilangkan kandungan kaporit dalam air limbah.

2.5.6 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 dkk., 2022) 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 aklimatisasi dapat dilakukan pada 6-10 hari.

Proses aklimatisasi dilakukan dengan tujuan membuat mikroalga untuk beradaptasi dengan air limbah yang akan digunakan sebagai media pertumbuhannya. Sebagaimana pada penelitian Ramadanti dkk., (2021), proses aklimatisasi mikroalga dilakukan selama 7 hari dengan penambahan air limbah secara bertahap. Pada hari pertama dilakukan dengan penambahan 50% air limbah dan 50% mikroalga dalam media 50 liter, dan dilakukan pengamatan serta kontrol suhu dan pH agar tetap berada dalam rentang yang optimal bagi pertumbuhan mikroalga. Kemudian pada hari keempat dilanjutkan dengan 75% air limbah dan 25% mikroalga dalam media 50 liter, dilakukan

pengamatan dan hasilnya menunjukkan warna hijau pekat menandakan keberhasilan tahap aklimatisasi dan menghindari fase kematian mikroalga.

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.

Proses aklimatisasi dinyatakan berhasil apabila *Spirulina* berhasil melewati fase adaptasi tanpa mengalami kematian. *Spirulina* dapat beradaptasi dengan lingkungannya kemudian pada fase selanjutnya spirulina akan mengalami peningkatan kepadatan sel. Selain itu, keberhasilan pada aklimatisasi ditandai dengan range pH yang berada pada 9-11 dan suhu 25 -35°C (Bangun Hutsmi dkk., 2015). Pada penelitian yang telah dilakukan pada proses aklimatisasi spirulina berhasil melewati fase adaptasi dan kemudian mengalami peningkatan kepadatan sel yang dapat dilihat melalui pengamatan pada mikroskop. Serta pengukuran suhu dan pH yang dilakukan setiap harinya selama masa aklimatisasi untuk memastikan range pH dan suhu pada saat aklimatisasi dilakukan.

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 dkk., 2018) yang menemukan bahwa metode aklimatisasi bertahap meningkatkan viabilitas mikroalga hingga 80% dibandingkan aklimatisasi langsung.

2.5.7 Pengolahan Air Limbah

Kultivasi mikroalga *Spirulina platensis* dalam sistem fotobioreaktor merupakan salah satu metode yang efektif dalam pengolahan air limbah peternakan. Proses kultivasi dilakukan secara bertahap 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.

Air limbah yang digunakan telah di encerkan dengan 50% air bersih kemudian di tambahkan kaporit dan natrium tiosulfat fungsi kaporit untuk membunuh mikroorganisme dalam air limbah yang dapat menghambat pertumbuhan mikroalga. Kaporit yang ditambahkan kedalam air limbah sebanyak 1,5 gram didiamkan selama 1 jam. Kemudian ditambahkan 3 gram natrium tiosulfat yang berfungsi untuk menghilangkan kandungan kaporit dalam air limbah. Dokumentasi kultivasi mikroalga dalam fotobioreaktor dapat dilihat pada **gambar 19**. di bawah ini.



Gambar 19. Kultivasi Mikroalga dalam Fotobioreaktor

Sumber: Dokumentasi, 2025

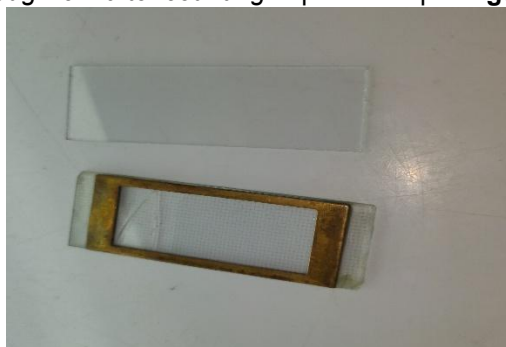
Aerasi dan pencahayaan dilakukan secara kontinu selama 24 jam untuk memastikan kondisi lingkungan yang optimal bagi pertumbuhan *Spirulina platensis*. Rasio campuran air limbah peternakan dan inokulum mikroalga sebesar 50:50 digunakan sebagai media kultivasi, dengan tambahan pupuk Walne pada hari Kultivasi dilakukan secara bertahap pada setiap variasi dengan masing masing variasi intensitas cahaya dilakukan selama 8 hari. Variasi pertama dilakukan dengan kerapatan awal sel *Spirulina platensis* sebesar 20.000 sel/ml, variasi kedua dilakukan dengan kerapatan sel 16.000 sel/ml dan variasi ketiga dengan kerapatan sel 15.000 sel/ml. Kultivasi untuk variasi intensitas 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 variasi ketiga.

Durasi kultivasi juga memainkan peran penting dalam penyerapan dan pengurangan kadar polutan dalam air limbah. Hajri dkk, 2024 menganalisis, waktu tinggal yang lebih lama memungkinkan mikroalga untuk mengakumulasi biomassa lebih banyak dan memaksimalkan proses penyerapan. Dalam penelitian ini, kultivasi *Spirulina platensis* selama 8 hari menunjukkan kadar nitrogen hingga 52,13% dan penurunan fosfor sebesar 40,31% dalam air limbah. Dalam Hajri dkk, 2024 efisiensi penghilangan nitrogen yang tinggi yaitu 92,56% dan efisiensi penghilangan fosfor 83,45%. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi antara durasi kultivasi dan intensitas yang optimal akan meningkatkan efisiensi pengolahan air limbah menggunakan mikroalga.

2.6 Teknik Pengumpulan Data

2.6.1 Perhitungan Kepadatan Sel

Perhitungan kepadatan *Spirulina sp.* dilakukan setiap hari sampai selesai untuk mendapatkan data kepadatan puncak, harian dengan menggunakan *sedgewich rafter* yang terlebih dahulu dibersihkan dan dikeringkan menggunakan kertas kemudian ditetaskan sampel dengan menggunakan suntikan pada wadah yang bervolume 1 ml hingga penuh, lalu tutup dengan *cover glass*, jangan sampai menimbulkan gelembung (Muliani dkk., 2018). Kepadatan *Spirulina sp* kemudian dihitung menggunakan mikroskop dengan perbesaran 100 kali. Kemudian diulang hingga mendapatkan jumlah populasi *Spirulina sp* yang cukup untuk kebutuhan penelitian (Wulan Purnami dkk., 2024). Dokumentasi *sedgewich rafter counting* dapat dilihat pada **gambar 20**. di bawah ini.



Gambar 20. *Sedgewich Rafter Counting*

Sumber: Dokumentasi, 2025

$$\text{Kepadatan sel } \left(\frac{\text{sel}}{\text{ml}}\right) = \frac{1000}{10} \times n \times f \quad (1)$$

Dimana:

- n = Total sel spirulina dalam 10 kotak
- f = Faktor pengenceran yang digunakan (10^1)

2.7 Uji Statistik

Uji normalitas menjadi langkah awal yang penting sebelum menerapkan analisis statistik parametrik, seperti analisis varians (ANOVA) dan regresi. Uji ini memungkinkan peneliti untuk mengetahui apakah data tersebut memenuhi asumsi dasar analisis yang akan dilakukan. Ketika data berdistribusi normal, hasil dari analisis ini dapat dipercaya dan lebih mudah diinterpretasikan. Sebaliknya, jika data tidak berdistribusi normal, peneliti perlu mempertimbangkan untuk menggunakan metode statistik non-parametrik atau melakukan transformasi data. Dengan melakukan uji normalitas yang tepat, peneliti dapat menghindari kesalahan dalam interpretasi data. Oleh karena itu, penerapan uji normalitas yang tepat menjadi krusial dalam penelitian, karena dapat mempengaruhi keputusan analisis selanjutnya (Nurhaswinda dkk., 2025).

Menurut (Ghozali I., 2018) Uji *Shapiro-wilk* digunakan untuk menguji apakah data terdistribusi normal, terutama pada sampel dengan ukuran kecil ($N < 50$). Statistik *Shapiro-Wilk* dihitung dengan rumus:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Dimana:

$x_{(i)}$ adalah data yang diurutkan dari nilai terkecil ke terbesar,

a_i adalah koefisien yang bergantung pada distribusi normal dan jumlah sampel,

x_i adalah nilai data,

\bar{x} adalah rata-rata data,

W adalah statistik uji.

Uji regresi linear berganda di SPSS. Model regresi linear berganda menjelaskan hubungan antara satu variabel dependen dengan beberapa variabel independen menggunakan rumus:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon$$

Dimana:

Y adalah variabel dependen,

X_1, X_2, \dots, X_k adalah variabel independen,

β_0 adalah intercept (konstanta),

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ adalah koefisien regresi,

ϵ adalah galat atau residual.

Metode ANOVA membantu dalam menafsirkan dan menentukan hasil eksperimen bahwa berbagai faktor mempengaruhi parameter proses lainnya (Ostertagová & Ostertag, 2013). Pakar statistik membedakan dua jenis faktor ketika melakukan eksperimen analisis varians (ANOVA): faktor tetap, yaitu variabel yang mendapat perhatian tertentu, dan Faktor yang mencerminkan pemilihan acak dari tingkat yang jumlahnya tidak terbatas disebut faktor acak. (Larson, 2008) uji percobaan bertujuan untuk menentukan variasi acak dalam populasi tertentu dengan memilih individu secara acak dari berbagai tingkat faktor (Dewi dkk., 2023).

Diagram Alir Penelitian

