

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A Produksi dan Pengolahan Kelapa Sawit di Indonesia

Salah satu komoditas andalan Indonesia dalam perekonomian adalah hasil perkebunan kelapa sawit. Total ekspor hasil kebun kelapa sawit sekitar 73,83% (Ditjenbun, 2022). Permintaan ekspor kelapa sawit memiliki tren yang terus meningkat. Prospek industri sawit tahun 2024 ada kecenderungan mengalami kenaikan terutama pada industri oleokimia, kebutuhan pangan maupun biodiesel karena adanya implementasi B35 setahun, selain itu harga minyak nabati dunia tidak mengalami perubahan dibandingkan dengan tahun 2023 namun volume ekspor akan menurun sejalan dengan meningkatnya kebutuhan minyak dari dalam negeri (Gapki.id, 2024).

Maulizal (2024) menyatakan bahwa produk dari minyak sawit dimanfaatkan kebutuhan hidup penduduk dunia misalnya bahan makanan, kosmetik, perawatan tubuh lainnya serta energi yang ramah lingkungan. Selain itu, industri kelapa sawit jtu membantu tercapainya target dari pemerintah menuju Indonesia Emas 2045 melalui bidang ekonomi, kesehatan maupun energi. Bidang ekonomi, banyak penduduk yang menggantungkan hidupnya dengan bermata pencaharian sebagai petani sawit. Apabila industri sawit menurun, maka ekonomi masyarakat menurun sehingga kemiskinan meningkat. Muntaha & Hamka (2025) menyatakan bahwa kemandirian energi di Indonesia menuntut pemerintah berusaha mencapai target transisi energi melalui produksi biofuel untuk mencapai *zero emission*.

Kelapa sawit mulai dari buah, pelepah, batang, dan limbahnya, dapat diolah menjadi berbagai macam produk. Pengolahan Tandan Buah Segar (TBS) menghasilkan *Crude Palm Oil* (CPO), kernel, tandan kosong, mesocarp fiber, cangkang, dan *Palm Oil Mills*

Effluent (POME) (Ruswanto, 2019). Proses pengolahan TBS ini akan menghasilkan limbah padat dan limbah cair. Produksi limbah padat dan limbah cair dari pabrik pengolahan kelapa sawit Indonesia memiliki kecenderungan meningkat, hal ini selaras dengan peningkatan produksi TBS dan luas areal perkebunan kelapa sawit (Yanti & Hutasuht, 2020).

B Limbah Cair Kelapa Sawit

Limbah cair kelapa sawit disebut *Palm Oil Mill Effluent* (POME) merupakan salah satu jenis limbah yang dihasilkan dari industri pengolahan minyak kelapa sawit. Kristanti et al. (2021) melaporkan bahwa limbah cair kelapa sawit merupakan salah satu jenis limbah organik agroindustri berupa air, minyak dan padatan organik yang berasal dari hasil samping proses pengolahan TBS kelapa sawit untuk menghasilkan CPO (Basyuni et al., 2017). Proses pengolahan kelapa sawit menjadi minyak kelapa sawit CPO lalu menghasilkan limbah cair dalam jumlah yang cukup besar. Limbah cair kelapa sawit terdiri atas air, minyak dan partikel padat lainnya (Kristanti et al., 2021). Limbah ini dihasilkan selama proses ekstraksi minyak dari buah kelapa sawit. Kandungan bahan organik pada limbah cair ini masih memiliki nutrisi tinggi namun senyawa kimianya berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik

Pengolahan POME di Indonesia menggunakan sistem kolam terbuka, dengan pertimbangan ekonomis dan kemudahan pengoperasian. Secara umum sistem ini melalui empat kolam yaitu kolam lemak (*fat pit*), kolam pendinginan (*cooling pond*), kolam pembusukan (*anaerobik pond*) dan kolam pematangan limbah (*maturity pond*). (Maharani et al., 2017). POME biasanya hanya diolah dengan menggunakan metode aerob dan anaerob pond untuk menurunkan kadar COD dan BOD, padahal POME masih mengandung unsur hara seperti N,P, dan K yang berguna untuk nutrisi dalam pertumbuhan mikroalga (Sari et al., 2018).

Adapun pengelolaan limbah cair kelapa sawit yang baik dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan misalnya menjadi biogas melalui proses fermentasi anaerobik,

sumber pembangkit listrik atau bahan bakar (Nasrin et al., 2022). Pengolahan limbah menjadi biogas membantu mengurangi emisi metana dan merupakan salah satu gas rumah kaca yang sangat kuat (Francisco et al., 2024). Selain itu, limbah cair kelapa sawit dapat digunakan sebagai pupuk organik yang kaya nutrisi sehingga meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas tanaman (Roni., 2019) serta limbah cair dapat diolah lebih lanjut dalam industri pakan ternak atau industri kimia (Zuber et al., 2020). Meijaard et al. (2020) menyebutkan dampak negatif limbah cair kelapa sawit terhadap lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik antara lain :

1. Pencemaran air

Pembuangan limbah yang tidak dikelola dengan baik ke sungai atau danau dapat menyebabkan penurunan kualitas air sehingga berdampak pada ekosistem akuatik dan kualitas air minum bagi manusia.

2. Penurunan kualitas tanah

Kandungan asam dan bahan kimia pada limbah cair kelapa sawit menyebabkan struktur dan kesuburan tanah menurun.

Produksi gas rumah kaca

Apabila limbah cair dibiarkan dalam udara terbuka menyebabkan gas metana menyebar ke udara, sehingga menyebabkan gas rumah kaca yang berpotensi pemanasan global. Proses ini dapat memperburuk perubahan iklim jika benar-benar tidak diatasi dengan baik.

Bau tidak sedap

Limbah yang dibuang ke sungai tentunya akan menghasilkan bau tidak sedap akibat pembusukan bahan organik dalam kandungan limbah tersebut sehingga mengganggu kenyamanan masyarakat sekitar dan menyebabkan penurunan kualitas udara.

Pencemaran udara

Akibat limbah cair yang dibuang ke sungai akan mencemari udara, sehingga terjadi penurunan kualitas udara. Hal ini menyebabkan masalah kesehatan bagi masyarakat sekitar termasuk gangguan pernapasan.

Eutrofikasi

Eutrofikasi adalah peningkatan nutrisi yang berlebihan di perairan. Eutrofikasi ini menyebabkan pertumbuhan alga yang tidak terkendali, mengurangi kadar oksigen di air dan mengakibatkan kematian massal ikan serta organisme akuatik lainnya.

Untuk mengatasi dampak negatif bagi lingkungan, maka pengolahan limbah telah diatur oleh Pemerintah Indonesia dalam peraturan terkait pengelolaan limbah cair kelapa sawit, seperti Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 29 Tahun 2018 yang mengatur tentang baku mutu air limbah bagi usaha dan/atau kegiatan minyak kelapa sawit. Peraturan ini menetapkan standar baku mutu yang harus dipenuhi sebelum limbah cair dibuang ke lingkungan.

C Pengolahan Limbah Cair Kelapa Sawit

Pengolahan limbah cair kelapa sawit telah banyak dilakukan dengan berbagai metode misalnya secara biologis, adsorpsi, elektrokoagulasi, oksidasi lanjutan.

1. Metode Adsorpsi

Metode ini menggunakan bentonit aktif dalam remediasi limbah POME. Variasi dalam aktivasi kimia bentonit secara signifikan mempengaruhi kapasitas adsorpsi, dengan bentonit dapat mengurangi kandungan minyak lemak (Sunartaty et al., 2024).

2. Metode Elektrokoagulasi

Metode ini menggunakan arus listrik untuk menginduksi koagulasi. Induksi koagulasi secara efektif menurunkan kadar TSS, *Total Dissolved Solids* (TDS), dan COD (Susanto et al., 2022).

3. Metode Proses Oksidasi Lanjutan

Metode ini dilakukan dengan fotokatalisis, proses Fenton, dan ozonasi yang mampu mendegradasi senyawa organik kompleks. Proses ini dapat mencapai mineralisasi lengkap (Vijayan et al., 2023).

4. Metode Biologis

Metode biologis, contohnya sistem kolam dan lumpur aktif. Metode ini menggunakan mikroorganisme untuk degradasi bahan organik secara efektif. Sistem kolam terbuka dapat memfasilitasi proses aerobik dan anaerobik yang menunjukkan efisiensi penghilangan kontaminan meningkat (Jumadi et al., 2022). Metode biologis juga dapat menggunakan tanaman yang dikenal dengan istilah fitoremediasi. Salah satu contoh metode ini menggunakan bayam air (*Ipomoea aquatica*), untuk remediasi limbah POME. Metode ini secara efektif menurunkan kadar COD 86,3%, nitrat, dan fosfat. Namun, konsentrasi POME yang tinggi juga mempengaruhi pertumbuhan tanaman sehingga perlu memperhatikan penambahan konsentrasi POME (Zulfahmi et al., 2021).

Selain itu, metode pengolahan limbah secara biologis dapat menggunakan mikroalga sebagai agen pengolah limbah untuk mengurangi zat pencemar. Pemanfaatan mikroalga dalam remediasi karena mudah dikultivasi, murah dan fleksibel untuk diterapkan (Sari et al., 2014). Pemanfaatan mikroalga dalam remediasi juga dapat mengikat ion logam berat pada permukaan selnya sehingga akan bereaksi dengan enzim pengikat. Hal ini akan menurunkan konsentrasi logam berat pada air tercemar (Fadhila & Purwanti, 2022).

D Pengolahan Limbah Cair Menggunakan Mikroalga

Pengolahan limbah cair menggunakan mikroalga adalah sebuah teknik yang memanfaatkan mikroorganisme fotosintetik ini untuk menghilangkan atau mengurangi polutan dalam air limbah (Plöhn et al., 2021). Mikroalga memiliki kemampuan unik untuk menyerap nutrisi seperti nitrogen dan fosfor, serta bahan organik dan logam berat yang

terkandung dalam air limbah (Priya et al., 2022). Proses ini tidak hanya membersihkan air limbah, tetapi juga dapat menghasilkan biomassa yang dapat dimanfaatkan lebih lanjut, misalnya sebagai bahan bakar hayati (*biofuel*) (Low et al., 2021) atau pakan ternak (Amalina et al., 2021). Adapun mekanisme kerja mikroalga dalam mengolah limbah cair :

1. Absorpsi Nutrien

Mikroalga menggunakan nitrogen dan fosfor sebagai sumber nutrisi untuk pertumbuhannya (Maltsev et al., 2023). Mikroalga mengurangi konsentrasi nutrien dalam air limbah sehingga mencegah eutrofikasi ketika air ini dilepas ke lingkungan (Wang et al., 2017).

2. Degradasi Bahan Organik

Mikroalga dapat berkolaborasi dengan bakteri dalam air limbah untuk menguraikan bahan organik menjadi senyawa yang lebih sederhana untuk proses metabolisme (Jia & Yuan, 2016).

3. Pengikatan Logam Berat

Beberapa jenis mikroalga memiliki kemampuan untuk menyerap logam berat seperti kadmium, timbal, dan merkuri dari air limbah (Kaplan, 2013). Ini terjadi melalui mekanisme biosorpsi, di mana sel mikroalga mengikat logam berat ini pada permukaan selnya (Xiao, 2023).

E Bioekologi Mikroalga

Mikroalga adalah organisme mikroskopis yang bersel satu dengan ukuran, bentuk maupun jenis yang beragam. Hidupnya soliter ataupun berkoloni (Rajkumar & Yaakob, 2013). Mikroalga dikenal dengan nama fitoplankton (Pachiappan et al., 2018). Mikroalga memiliki pigmen fotosintetik, bersifat fotoautotrof dan mempunyai kemampuan menyerap sinar matahari dan karbondioksida untuk menghasilkan biomassa dan sekitar 50% oksigen yang ada di atmosfer (Rahayu & Susilo, 2021).

Keanekaragaman spesies mikroalga ada sekitar 200.000-800.000 yang ada di bumi, namun hanya sekitar 35.000 yang telah teridentifikasi (Hadiyanto & Maulana, 2012). Beberapa contoh spesies mikroalga antara lain : *Spirulina platensis*, *Nannochloropsis oculata*, *Chlorella vulgaris*, *Dunnaliella salina*, *Tetraselmis chuii*, dan lain-lain. Kebanyakan spesies mikroalga menghasilkan senyawa tertentu misalnya antioksidan, asam lemak, enzim, karotenoid, polimer, peptida, toksin dan sterol (Beacker, 1994).

Adapun mikroalga yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. *Tetraselmis chuii*

Tetraselmis chuii merupakan salah satu alga yang termasuk kedalam class *chlorophyceae*. Alga ini memiliki bentuk oval hingga elips, uniseluler dan memiliki empat flagella. Habitat dari *Tetraselmis chuii* ada di daserah estuarine dan daerah pasang surut air laut (Koniyo, 2008). Selain itu, *Tetraselmis chuii* memiliki pigmen klorofil yang digunakan untuk membantu proses fotosintesis. Hidupnya optimal pada kondisi salinitas antara 25-35 ppm. Faktor yang mempengaruhi kehidupannya selain salinitas adalah suhu, pH dan intensitas cahaya (Erlina & Hastuti, 1986). *Tetraselmis chuii* dikultivasi dengan penambahan garam sintetis dalam penelitian ini. Gatamaneni et al. (2018) menyatakan bahwa kondisi lingkungan yang mempengaruhi kultivasi mikroalga adalah salinitas, pH, suhu, cahaya dan kelembaban.

Tetraselmis chuii memiliki potensi dalam remediasi limbah cair terutama dalam hal mengurangi polutan organik seperti nitrogen, fosfor, maupun logam berat. Mikroalga ini mampu mengurangi kadar fosfor hingga 79% pada limbah akuakultur (Sirakov & Velichkova, 2014). *Tetraselmis chuii* juga toleran terhadap limbah yang memiliki kandunga logam berat misalnya Pb pada limbah batik (Meisyara, 2019).

Klasifikasi *Tetraselmis chuii* menurut Butcher (1959) adalah sebagai berikut :



Filum : Chlorophyta
 Kelas : Chlorophyceae
 Ordo : Volvocales
 Sub ordo: Chlamidomonacea
 Genus : *Tetraselmis*
 Spesies: *Tetraselmis chuii*

Gambar 2. 1 - Morfologi *Tetraselmis chuii*

Sumber: <http://planktonnet.awi.de/index.php?contenttype=image>

2. *Nannochloropsis oculata*

Salah satu mikroalga yang hidup di laut, air tawar maupun air payau adalah *Nannochloropsis oculata*. Mikroalga ini memiliki pigmen astaxanthin, zeaxanthin, dan canthaxanthin. Menurut Qian, et al. (2013) menyatakan bahwa *Nannochloropsis oculata* memiliki kandungan karbohidrat, protein dan kadar klorofil yang tinggi sehingga mempunyai peranan sebagai sumber makanan penting dan zat aditif bagi organisme yang hidup di laut. Mikroalga ini uniseluler, tidak motil dan tidak berflagel serta ukuran kecil dan berbentuk bola. *Nannochloropsis oculata* mampu hidup dengan baik pada pH 8-9,5 dan intensitas cahaya 100-1000 lux, salinitas 25-35 ppt serta suhu optimal pada kisaran 25⁰-30⁰C.

Nannochloropsis oculata memiliki kemampuan untuk remediasi limbah cair industri tahu misalnya toleran terhadap gas amoniak (NH₃) dan fosfat (Asmawati & Purnomo 2024; Rizal et al., 2020). Selain itu, mikroalga ini mampu meremediasi tembaga dari limbah pertambangan (Martínez-Macias, et al., 2019). *Nannochloropsis oculata* sendiri juga sudah digunakan dalam remediasi limbah POME namun dalam keadaan monokultur bukan konsorsium (Emparan et al., 2020). Klasifikasi *Nannochloropsis oculata* menurut Adehoog & Simon (2001) adalah sebagai berikut :



Filum : Chlorophyta
 Kelas : Eustigmatophyceae

Ordo : Eustigmales
Sub ordo: Eustigmaceae
Genus : *Nannochloropsis*
Spesies: *Nannochloropsis oculata*

Gambar 2. 2 - Morfologi *Nannochloropsis oculata*

Sumber : Malakootian, Hatami, Dowlatshahi, and Rajabizadeh (2016) licensed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)

3. *Chlorella vulgaris*

Salah satu golongan mikroalga yang berpigmen hijau adalah *Chlorella vulgaris*. *Chlorella* memiliki bentuk sel bulat dan berkembang biak dengan cara membelah diri dan membentuk spora. Mikroalga hijau bersifat fotoautotrof ini memiliki habitat di air tawar dan air laut, berpigmen hijau, terdiri atas uniseluler. Sel *Chlorella* berbentuk bulat dengan diameter antara 2-8 μm . *Chlorella vulgaris* mampu tumbuh pada salinitas 25-35, dengan suhu 20-23°C (Jana, 2024).

Mikroalga ini mempunyai potensi sebagai pakan alami, ternak, suplemen, penghasil komponen bioaktif, bahan baku farmasi (Mendes et al., 2024). Hal ini karena kandungan yang dimiliki *Chlorella* cukup banyak seperti karbohidrat, protein, asam lemak tak jenuh, vitamin, klorofil, enzim dan serat yang tinggi (Prartono, 2010; Mendes et al., 2024). *Chlorella* memiliki senyawa bioaktif alami antara lain fenol, sulfat polisakarida, karotenoid, vitamin. Vitamin yang dimiliki *Chlorella* sebagai senyawa bioaktif mampu memberikan respon regulasi sel yang positif yakni meningkatkan kekebalan tubuh dan antioksidan (Novianti et al., 2019; Yu et al., 2023).

Potensi *Chlorella vulgaris* dalam remediasi limbah cair yang mampu reduksi total nitrogen dan fosfat (Znad et al., 2018). Selain itu, *Chlorella vulgaris* juga telah digunakan untuk remediasi limbah cair tekstil yang mengandung logam berat (Lim et al., 2010). Penelitian

sebelumnya, remediasi limbah POME menggunakan *Chlorella vulgaris* dan *Scenedesmus dimorphus* juga telah diteliti (Kamarudin et al., 2013). Klasifikasi *Chlorella vulgaris* menurut Bold & Wynne (1985) adalah sebagai berikut :



Filum : Chlorophyta
Kelas : Chlorophyceae
Ordo : Chlorellales
Famili : Chlorellaceae
Genus : *Chlorella*
Spesies: *Chlorella vulgaris*

Gambar 2. 3 - Morfologi *Chlorella vulgaris*

Sumber : <https://www.ccap.ac.uk/catalogue/strain-211-21a>

F Interaksi antar spesies mikroalga

Interaksi antara spesies mikroalga dalam konsorsium seringkali menunjukkan performa lebih baik dibanding kultur tunggal (Padmaperuma et al., 2018). Kombinasi spesies dalam kultur campuran dapat saling melengkapi dalam interaksinya menyerap nitrogen, fosfor, logam berat maupun senyawa organik lainnya (Li et al., 2022). Interaksi ini akan meningkatkan stabilitas hidup mikroalga disaat limbah cair mengalami fluktuasi. Walters et al. (2025) menunjukkan bahwa konsorsium mikroalga mampu bertahan dalam kondisi lingkungan pH, suhu, salinitas maupun senyawa racun lain yang terkandung dalam limbah dibandingkan monokultur mikroalga.

Hubungan sinergis antarspesies merupakan interaksi yang umum pada spesies mikroalga dalam penyerapan senyawa organik, misalnya pada *Chlorella sp* mampu menyerap nitrogen (Alazaiza, 2023), *Scenedesmus sp* mengakumulasi fosfor dan limbah organik lainnya (Ruiz-Ruiz, 2024). Efisiensi interaksi ini akan meningkatkan laju penurunan COD, BOD,

ammonia maupun fosfat secara simultan. Shaidatul et al. (2023) melaporkan bahwa konsorsium mikroalga mampu meningkatkan efisiensi pemurnian air limbah dan biomassa.

Namun, interaksi antar spesies tidak selalu sinergis, dapat juga mengalami kompetisi sehingga terjadi dominasi pada satu spesies tertentu yang menyebabkan penurunan keanekaragaman dan efisiensi penurunan kadar polutan (Emparan, et al., 2019). Oleh karena itu, perlu pemilihan kombinasi spesies mikroalga yang baik, rasio inoculum yang akurat, intensitas cahaya dan waktu pertumbuhan yang optimal sebagai penentu dalam konsorsium mikroalga.

G Pertumbuhan Mikroalga

Pertumbuhan mikroalga dalam proses kultivasi sangat penting diketahui. Zachleder et al. (2016) menyatakan bahwa fase pertumbuhan yang terdapat pada mikroalga antara lain :

1. Fase lag

Fase ini adalah fase awal pertumbuhan pada mikroalga sehingga pada fase ini terjadi penyesuaian atau adaptasi terhadap lingkungan apabila terjadi perubahan pemberian nutrisi maupun faktor pertumbuhan lainnya.

2. Fase logaritmik atau eksponensial

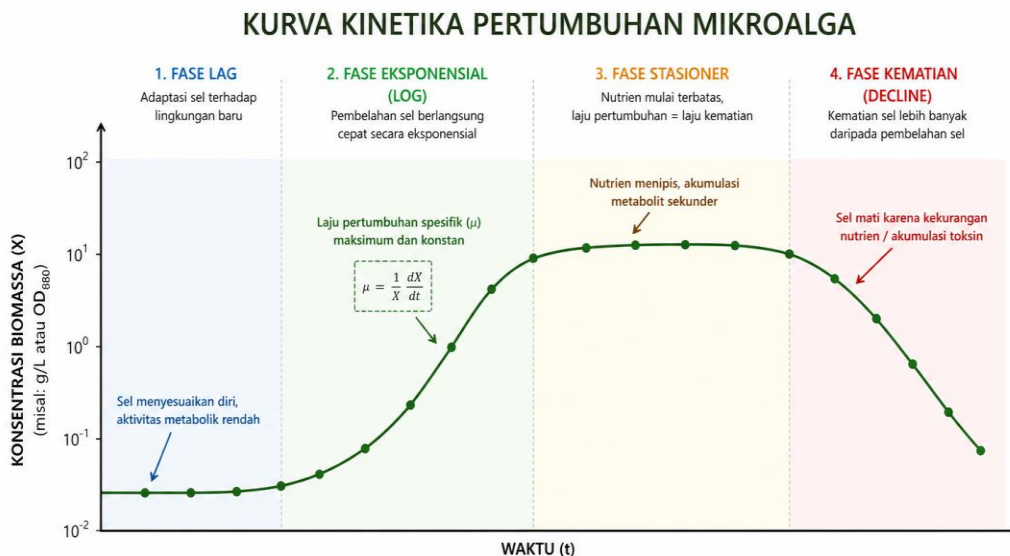
Sel pada mikroalga telah mampu menyesuaikan diri dengan lingkungan baru untuk mulai tumbuh dan berkembang selama masih tersedia nutrisi dan faktor yang menunjang lainnya.

3. Fase stasioner

Sel pada fase ini mulai berkurang fase pembelahannya yang artinya ketersediaan nutrisi sudah mulai berkurang, kondisi lingkungan tidak optimal, dan terjadi akumulasi zat metabolisme misalnya lipid, polisakarida dan zat aktif lainnya.

4. Fase kematian

Fase ini terjadi ketika jumlah sel mikroalga mulai menurun drastis akibat kehabisan nutrisi, muncul kontaminan dan lingkungan yang tidak mendukung pertumbuhannya (Isnansetyo & Kurniastuty, 1995). Untuk mengetahui fase tersebut secara detail dapat dilihat pada kurva berikut.



Gambar 2. 4 - Kurva Pertumbuhan Mikroalga

H Kinetika Pertumbuhan Mikroalga

Kinetika pertumbuhan mikroalga merupakan proses kompleks yang dipengaruhi oleh interaksi berbagai parameter lingkungan dan biokimia (Lee et al., 2015; Schediwy et al., 2019). Pemanfaatan mikroalga dalam pengolahan limbah perlu memperhatikan kinetika laju pertumbuhan untuk mengetahui jumlah sel dan biomassa mikroalga dalam kurun waktu tertentu (Schediwy et al., 2019). Prediksi pertumbuhan mikroalga sangat penting dalam pemodelan kinetika (Eze et al., 2018). Pemodelan-pemodelan tersebut bertujuan untuk menyatakan konstanta konsumsi substrat dengan menganggap bahwa substrat bertindak sebagai inhibitor pada konsentrasi yang tinggi, dan bertindak sebagai aktivator pada konsentrasi yang lebih rendah (Tazadit et al., 2014).

Adapun pemodelan kinetika laju pertumbuhan mikroalga antara lain: model persamaan Monod (Hermanto et al., 2020), model kinetika berdasarkan konsumsi substrat (Kurniawan & Effendi, 2014; Asmar, 2022), model kinetika Gompertz dan model Richard (Setiantoro et al., 2024).

1. Model Persamaan Monod

Model ini menyatakan bahwa laju pertumbuhan mikroalga berbanding lurus dengan konsentrasi nutrisi yang tersedia. Persamaan model monod menurut Tunay et al. (2022) adalah sebagai berikut :

$$\mu = \mu_{\max} * C / (K_{Ci} + S) \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

μ : laju pertumbuhan spesifik (per satuan waktu)

$\mu_{\max}$: laju pertumbuhan spesifik maksimum (T^{-1})

C : konsentrasi karbon anorganik (M/L^3)

K_{Ci} :konstanta setengah saturasi (konsentrasi substrat saat laju pertumbuhan setengah dari $\mu_{\max}$).

Model monod ini telah digunakan pada penelitian alga dengan parameter intensitas Cahaya dan laju pengenceran (Hermanto et al., 2020).

2. Model kinetika berdasarkan Konsumsi Substrat

Model ini berfokus pada hubungan antara konsentrasi substrat dengan laju pertumbuhan spesifik. Secara umum, persamaan model ini menghubungkan antara konsumsi substrat (r_s), laju pertumbuhan spesifik (μ) dan konsentrasi substrat (S). persamaan umum model Aiba (2005) adalah :

$$\mu = \mu_{\max} X S / (K_s + S + K_p * P) \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan :

μ : laju pertumbuhan spesifik (per satuan waktu)

- μ_{max} : laju pertumbuhan spesifik maksimum
- S : konsentrasi substrat
- K_s : Konstanta setengah saturasi
- K_p : Konstanta inhibisi produk
- P : Konsentrasi produk

Model Aiba merupakan modifikasi dari model Monod yang menambahkan substrat menjadi faktor penghitung dalam menentukan pertumbuhan mikroalga. Penggunaan model Aiba ini digunakan oleh Hao & Lee (2002).

3. Model Kinetika Andrew

Model ini berfokus pada pertumbuhan mikroalga dalam suatu lingkungan yang dinamis. Model ini mempertimbangkan factor lingkungan lain misalnya nutrisi, Cahaya, suhu dan pH (Lee & Zhang, 2016). Hubungan antara laju pertumbuhan dan factor lingkungan pada model Andrew bersifat non-linier (sesuai dengan fenomena alam). Karakteristik model ini adalah jenis mikroalga dapat disesuaikan pada kondisi lingkungan yang berbeda, sesuai dengan fenomena alam (Schediwy et al., 2019). Penerapan model ini dapat digunakan untuk membuat kultur mikroalga, memprediksi produksi biomassa dan mendesain proses bioremediasi.

4. Model Kinetika Gompertz

Model ini berbentuk sigmoid asimetris yang pertama kali dirumuskan oleh Benjamin Gompertz (1825) digunakan untuk menggambarkan pertumbuhan mikroalga. Model ini menunjukkan laju pertumbuhan awal cepat namun kemudian melambat saat populasi hampir mencapai kapasitas maksimum. Adapun rumus persamaan Gompertz sebagai berikut :

$$X(t) = X_{max} \cdot \exp \left[-\exp \left(\frac{\mu_{me}}{X_{maz}} (\lambda - t) + 1 \right) \right] \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan :

- $X(t)$: biomassa pada waktu t

- X_{max} : biomassa maksimum
- μ_m : laju pertumbuhan maksimum
- λ : fase lag (waktu adaptasi mikroalga)
- e : bilangan euler (≈ 2.718)

Model ini cocok untuk pertumbuhan mikroalga pada fase eksponensial hingga fase stationer. Keunggulan model Gompertz adalah pada fase lag yang secara eksplisit mengkuantifikasi lama adaptasi mikroalga sehingga relevan untuk mengolah limbah cair (Putri et al., 2023).

5. Model Kinetika Richards

Model Richards adalah model sigmoid yang umum dan lebih fleksibel. Model ini menambahkan parameter untuk mengontrol bentuk kurva pertumbuhan (Richards, 1959). Model ini mendeskripsikan kinetika pertumbuhan mikroalga pada media kompleks dimana fase pertumbuhannya tidak selalu simetris akibat fluktuasi beban organik atau interaksi antar spesies (Mohdt al., 2021.; Sundari et al., 2024) Adapun persamaan dasar model Richards (1959) adalah sebagai berikut:

$$X(t) = X_{max} \cdot [1 + (m - 1) \exp(-k \cdot t)]^{\frac{-1}{m-1}} \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan :

- $X(t)$: biomassa pada waktu t
- X_{max} : biomassa maksimum
- k : laju pertumbuhan relatif
- m : parameter fleksibilitas yang menentukan bentuk kurva.

Apabila $m > 1$: kurva mendekati bentuk logistik

Apabila $m = 1$: kurva sama model logistik

Apabila $m < 1$: kurva lebih tajam

Model ini cocok untuk penelitian eksperimen dengan variabel dari kondisi lingkungan atau medianya yang kompleks. Fan et al. (2004) menyatakan bahwa kompleksitas tambahan

parameter lingkungan berpotensi rumit apabila data terbatas dan waktu sampling tidak merata. Validasi model ini mempertimbangkan analisis konsumsi substrat dan fase pertumbuhan secara simultan

I Konsorsium Mikroalga

Konsorsium adalah asosiasi atau gabungan dua atau lebih yang bekerjasama untuk mencapai tujuan bersama. Konsorsium mikroalga artinya gabungan mikroalga dua atau lebih untuk bekerjasama untuk menghasilkan dan mencapai suatu tujuan (Gurunani et al., 2022).. Konsorsium mikroalga digunakan dalam pengolahan air limbah dan produksi biomassa dengan cara memanfaatkan interaksi sinergis antara mikroalga dan mikroorganisme lainnya (dos Santos et al., 2021). Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa konsorsium mikroalga mampu menghilangkan polutan atau zat pencemar lebih tinggi dibandingkan dengan monokultur. Degradasi menggunakan konsorsium mikroalga mampu menghilangkan nitrogen 92,7% dan 49,66% fosfor dari air limbah (Magro et al., 2021).

Kerjasama mikroalga dengan bakteri heterotrofik dalam konsorsium mampu meningkatkan degradasi bahan organik dari limbah perkotaan (Andrade et al., 2022). Selain degradasi zat organik dari air limbah, konsorsium mikroalga juga menghasilkan biomassa yang lebih tinggi dibandingkan dengan monokultur misalnya kandungan karbohidrat yang cocok untuk produksi bioetanol (Magro et al., 2021). Gabungan mikroalga dan bakteri juga memproduksi lipid dan pupuk hayati (Sátiro et al., 2024). Kemampuan mikroalga memungkinkan berkembang dalam kondisi lingkungan yang beragam pada sistem pengolahan air limbah (Andrade et al., 2022).

J Faktor-faktor yang mempengaruhi keberhasilan pengolahan biologis

Beberapa faktor yang mempengaruhi pengolahan biologis limbah cair sesuai pada suatu lokasi antara lain situasi dan kondisi lokasi, jumlah mikroorganisme, jenis, dan toksisitas bahan kimia yang ada (Idris, 2022). Nutrisi terkadang ditambahkan saat perlakuan

untuk merangsang atau mempercepat aktivitas mikroorganisme. Mikroorganisme biasanya berkembang dalam kondisi lingkungan yang optimal, dan ketika populasi sel mikroba meningkat, zat berbahaya akan terdegradasi secara efisien. Terdapat kemungkinan dalam memasukkan mikroorganisme dari lokasi lain yang sesuai untuk mendegradasi kontaminan tertentu apabila aktivitas biologis yang diperlukan di lokasi tersebut kurang.

Keberhasilan pengolahan limbah menggunakan mikroalga dipengaruhi oleh beberapa faktor misalnya kondisi lingkungan, karakteristik spesies mikroalga yang digunakan maupun ketersediaan nutrisi. Pengolahan limbah cair dengan menggunakan kolam sistem terbuka selama kultivasi, lebih rentan terhadap kontaminan namun biaya lebih murah dibandingkan dengan kolam sistem tertutup namun sistem tertutup memiliki kelebihan dalam mengantisipasi kondisi lingkungannya seperti pH, suhu maupun salinitas (Das et al., 2019).

K Penyerapan dan Penyimpanan Karbon dengan Mikroalga

Penyerapan dan penyimpanan karbon atau CCS menggunakan mikroalga merupakan teknologi yang menjanjikan untuk mitigasi perubahan iklim. Mikroalga adalah organisme fotosintetik yang dapat menyerap karbon dari atmosfer atau gas buang melalui proses fotosintesis, menghasilkan biomassa yang kaya akan karbon. Adapun mekanismenya adalah sebagai berikut :

1. Penyerapan karbon oleh mikroalga

Proses Fotosintesis

Mikroalga menggunakan proses fotosintesis untuk menyerap karbon dan menghasilkan oksigen serta biomassa. Karbon yang diserap oleh mikroalga dikonversi menjadi bahan organik (glukosa) dan oksigen sebagai produk sampingan.

Kultur mikroalga

Mikroalga dikultur dalam sistem yang dirancang untuk mengoptimalkan penyerapan karbon dan produksi biomassa. Kultur mikroalga dapat dirancang dalam suatu reaktor dalam sistem terbuka dan tertutup. Fotobioreaktor sistem tertutup adalah reaktor dengan sistem

tertutup yang memungkinkan kontrol lingkungan yang lebih baik (suhu, cahaya, pH, dan lain-lain) untuk pertumbuhan mikroalga. Fotobioreaktor sistem terbuka adalah reaktor dengan sistem terbuka lebih sederhana dan murah, tetapi kurang efisien dibandingkan fotobioreaktor dalam hal kontrol lingkungan dan produktivitas.

Fotobioreaktor adalah reaktor yang tembus pandang dengan instalasi emisi gas dan suplai media pemberian nutrisi/limbah diawal perlakuan (Widyaningrum et al., 2013; Rusdiani et al., 2016). Penggunaan fotobioreaktor ini mampu meningkatkan produktivitas mikroalga sebesar 2-5 kali lipat. Hal ini terjadi karena kecepatan aliran fluida mempengaruhi kecepatan pertumbuhan mikroalga (Mahdi et al., 2012).

Fotobioreaktor *Open Raceway Pond* (ORP) adalah salah satu teknologi yang digunakan untuk membudidayakan mikroalga dalam skala besar di luar ruangan (Pawar, 2016). Sistem ini terdiri dari kolam dangkal yang biasanya berbentuk oval atau persegi panjang dengan kedalaman sekitar 20-30 cm. Kolam tersebut dilengkapi dengan alat pengaduk mekanis, seperti dayung berputar, yang berfungsi untuk menjaga sirkulasi dan homogenitas campuran mikroalga di dalamnya (de Morais et al., 2025). Sirkulasi ini sangat penting agar semua mikroalga mendapatkan paparan cahaya matahari yang cukup serta untuk mencegah sedimentasi (Katarzyna et al., 2015).

ORP dipilih karena biayanya yang relatif rendah dan kesederhanaannya dibandingkan dengan fotobioreaktor tertutup (Pawar, 2016). Salah satu kelebihan dari fotobioreaktor *open raceway pond* adalah kemampuannya untuk digunakan pada lahan yang luas dengan modal awal yang lebih murah (de Morais et al., 2025). ORP unggul dalam produksi biomassa mikroalga dalam jumlah besar, terutama dalam industri biofuel, pakan ternak, dan nutrisi (Igou, 2022). Namun, terdapat pula tantangan dalam hal kontrol lingkungan, seperti suhu, kualitas air, dan kontaminasi yang lebih sulit dikelola dibandingkan dengan fotobioreaktor tertutup (Udaypal et al., 2026).

Mikroalga mendapatkan nutrisi dari air yang mengandung senyawa organik atau anorganik yang larut misalnya karbon organik, nitrogen, fosfor, dan mineral lain sangat penting untuk pertumbuhan alga yang optimal (Zhou et al., 2014). Paparan sinar matahari menjadi faktor utama karena mikroalga memanfaatkan energi cahaya untuk fotosintesis, yang merupakan proses dasar untuk mengubah karbondioksida menjadi biomassa. Pencapaian yang memadai dan sirkulasi air yang baik, akan meningkatkan produktivitas mikroalga di *raceway open pond* (Foladori et al., 2018).

Račys et al. (2010) menyatakan bahwa salah satu kelemahan utama dari ORP adalah tingkat evaporasi yang tinggi, terutama di daerah dengan iklim panas, yang dapat mempengaruhi kualitas air dan konsentrasi nutrisi. Selain itu, karena sistem ini terbuka, mikroalga yang dibudidayakan dalam kolam rentan terhadap kontaminasi oleh organisme lain, seperti bakteri, jamur, atau mikroalga liar. Hal ini bisa mempengaruhi komposisi dan kualitas mikroalga yang dihasilkan (Zhou et al., 2014).

2. Pemanfaatan dan Penyimpanan Biomassa Mikroalga

Pemanfaatan biomassa mikroalga yang digunakan setelah penyerapan karbon dapat dimanfaatkan berbagai macam. Penyerapan karbon telah dilakukan, selanjutnya biomassa dipanen menggunakan berbagai teknik seperti sedimentasi, flotasi, sentrifugasi atau filtrasi. Biomassa mikroalga yang dipanen dapat digunakan dalam berbagai cara misalnya bahan baku biofuel, pakan ternak, suplemen nutrisi, kosmetik pupuk organik (Anggraini et al., 2018).

3. Keuntungan menggunakan mikroalga dalam penyerapan karbon

Vale et al. (2020) menyatakan bahwa keuntungan yang diperoleh dalam penyerapan karbon adalah: efisiensi penyerapan karbon. Mikroalga memiliki tingkat penyerapan karbon yang sangat tinggi dibandingkan tanaman darat. Mikroalga dapat tumbuh diberbagai kondisi, termasuk air limbah dan lahan marginal tanpa bersaing dengan produksi pangan. Mikroalga

tidak hanya menyerap karbon tetapi juga menghasilkan produk bernilai tinggi yang dapat meningkatkan ekonomi bioteknologi.

L Kelarutan Karbon dalam Media Berbasis Biomassa Mikroalga

Kelarutan karbon dalam media kultur dapat digunakan dalam fotosintesis untuk menghasilkan biomassa. Yang et al. (2000) melaporkan bahwa penambahan karbon bermanfaat untuk pertumbuhan sel dalam kultur mikroalga autotrofik. Karbon dapat larut dan diikat dalam bentuk bahan organik oleh proses biologis. Adapun faktor yang mempengaruhi kelarutan karbon antara lain :

1. Konsentrasi mikroalga

Aktivitas fotosintetik dan jumlah mikroalga dalam media akan mempengaruhi laju penyerapan dan kelarutan karbon. Berdasarkan penelitian sebelumnya Sun et al. (2021) menyatakan bahwa produktivitas biomassa *Scenedesmus dimorphus* meningkat sampai 63% dengan penambahan propilena karbonat ini akan mempengaruhi tingkat serapan karbon.

2. Suhu dan cahaya

Kondisi yang optimal untuk fotosintesis akan meningkatkan penyerapan karbon oleh mikroalga. Pada penelitian sebelumnya, Purba et al. (2012) menyatakan bahwa serapan karbon menggunakan mikroalga *Tetraselmis chuii* menunjukkan hasil yang signifikan yakni pada suhu 30°C dan 35°C serapan karbon efektif. Nilai konstanta berubah seiring dengan meningkatnya suhu. Peningkatan suhu dapat meningkatkan laju reaksi akibat dari tumbukan antar molekul CO₂ dan H₂O.

Hal ini sesuai dengan Hukum Arrhenius yang menyatakan konstanta laju reaksi meningkat seiring dengan peningkatan suhu. Namun, jumlah sel akan semakin sedikit apabila nilai konstanta laju reaksi semakin tinggi (Vasumathi, et al., 2012). Hal ini terjadi karena mikroalga memiliki nilai rentang kehidupan pada suhu tertentu. Akibatnya semakin tinggi

suhu maka mikroalga banyak yang mati dan tingkat kehidupannya semakin menurun (Serra-Maia et al., 2016)..

Selain suhu, intensitas cahaya juga merupakan faktor penting dalam fotosintesis (Purba et al., 2012). Proses fotosintesis memerlukan bahan anorganik karbon untuk menghasilkan senyawa organik dan menghasilkan energi. Muchammad et al. (2013) meneliti bahwa intensitas cahaya sebesar 4000 luks dengan variasi konsentrasi 5% CO₂ dalam efisiensi penyerapan karbon pada *Ankistrodesmus sp.*

3. Aerasi

Proses aerasi yang baik mampu meningkatkan distribusi karbon dalam media kultur dan meningkatkan kelarutannya (Sun et al., 2021).

M Desain *Open Raceway Pond* (ORP)

Open Raceway Pond (ORP) atau *High Rate Algal Pond* (HRAP) merupakan teknologi untuk kultur mikroalga dengan skala besar yang mendukung produksi alga di dunia sebesar 95% karena biaya investasi dan operasional relative lebih rendah dibandingkan fotobioreaktor tertutup (PBR) (Kumar et al., 2015; Skifa et al., 2024).

1. Geometri Kolam dan Rasio Aspek

Geometri kolam merupakan parameter fundamental yang mempengaruhi karakteristik aliran dan konsumsi energi. Parameter kunci dalam desain ORP meliputi kedalaman kultur, rasio panjang terhadap lebar saluran (Length-to-Width ratio, L/W), dan bentuk belokan (bends). Umumnya memiliki kedalaman kolam antara 10–30 cm. Kedalaman dangkal dimanfaatkan untuk mengoptimalkan penetrasi cahaya ke seluruh kolam, meskipun kondisi ini dapat mengurangi efisiensi transfer massa CO₂ (Kumar et al., 2015; Skifa et al., 2024). Kedalaman kolam hingga 40–50 cm dapat meningkatkan produktivitas dan penyerapan amonia, namun perlu energi lebih besar dalam pencampuran (Kumar et al., 2015). Rasio

Panjang terhadap Lebar (L/W): Rasio L/W merupakan factor kritis untuk meminimalkan zona mati di sepanjang dinding tengah dan belokan.

Penelitian sebelumnya melaporkan bahwa Computational Fluid Dynamics (CFD) oleh Hadiyanto et al. (2013) dan Skifa et al. (2024) merekomendasikan rasio $L/W > 10$ untuk mencapai distribusi kecepatan yang lebih seragam dan mengurangi volume zona mati. Meskipun rasio L/W yang lebih tinggi (>15) dapat menurunkan konsumsi daya per unit area, manfaatnya cenderung mencapai titik jenuh (plateau), sehingga rasio 10–15 sering dianggap optimal (Hadiyanto et al., 2013; Pirasaci et al., 2017). Belokan tajam pada ORP konvensional menyebabkan pembentukan pusaran besar (*large eddies*) dan kehilangan energi hidrolis yang signifikan. Modifikasi geometri belokan, seperti penggunaan profil "kotak" (*box-like*), pelebaran dinding tengah, atau penambahan radius kelengkungan, terbukti dapat mengurangi kehilangan energi hingga 87% dan menghilangkan zona stagnan (Liffman et al., 2013; Kumar et al., 2015; Skifa et al., 2024).

2. Hidrodinamika dan Pencampuran (Mixing)

Pencampuran dalam ORP berfungsi untuk mencegah sedimentasi sel, mendistribusikan nutrisi secara homogen, melepaskan oksigen terlarut berlebih (yang dapat menghambat fotosintesis), dan menciptakan siklus terang-gelap (light/dark cycle) yang penting untuk efisiensi fotosintetik (Kumar et al., 2015; Skifa et al., 2024).

Kecepatan Aliran: Kecepatan aliran cairan umumnya dipertahankan antara 0,1–0,3 m/s (10–30 cm/s). Kecepatan di bawah 0,1 m/s berisiko menyebabkan sedimentasi alga, sementara kecepatan di atas 0,6 m/s dapat menimbulkan shear stress yang merusak sel, terutama pada spesies yang sensitif (Hadiyanto et al., 2013; Kumar et al., 2015; Skifa et al., 2024). Zona Mati (Dead Zones): Zona mati didefinisikan sebagai area dengan kecepatan aliran $< 0,1$ – $0,2$ m/s, di mana sel alga cenderung mengendap dan kondisi anaerobik dapat terbentuk, memicu pertumbuhan bakteri patogen atau produksi toksin (Hadiyanto et al., 2013; Pirasaci et al.,

2017). Simulasi CFD menunjukkan bahwa zona mati paling sering terjadi di ujung dinding tengah setelah belokan. Strategi mitigasi termasuk optimasi rasio L/W dan modifikasi geometri belokan (Hadiyanto et al., 2013; Pirasaci et al., 2017). Meskipun turbulensi diperlukan untuk pencampuran vertikal, shear stress berlebih akibat pusaran mikro (*micro-eddies*) dapat merusak dinding sel alga. Desain harus menyeimbangkan antara pencampuran yang cukup untuk eksposur cahaya dan menjaga shear stress di bawah ambang batas kerusakan sel (Hadiyanto et al., 2013; Skifa et al., 2024).

3. Sistem Pengaduk dan Sirkulasi

Mekanisme pengadukan menentukan efisiensi energi dan kualitas pencampuran. *Paddle Wheel* adalah sistem pengaduk paling umum digunakan karena kesederhanaan mekanis dan biaya rendah. Efisiensi paddle wheel dipengaruhi oleh jumlah bilah, diameter, kecepatan rotasi, dan jarak_clearance_ antara ujung bilah dan dasar kolam. Bilah berbentuk datar (flat) atau miring (15 derajat) telah dilaporkan meningkatkan produktivitas dan efisiensi energi dibandingkan desain tradisional (Li et al., 2014; Zeng et al., 2016; Skifa et al., 2024). Penempatan paddle wheel dekat dengan belokan atau penggunaan bilah yang tidak sejajar (non-aligned) dapat mengurangi pulsasi aliran dan meningkatkan pencampuran [Hreiz et al., 2014; Pirasaci et al., 2017].

Sistem airlift-driven atau penggunaan sump (kolam dalam) untuk injeksi CO₂ telah dikembangkan. Sistem airlift dilaporkan dapat mengurangi konsumsi energi hingga 80% dibandingkan paddle wheel konvensional sambil mempertahankan kecepatan sirkulasi yang memadai (Kumar et al., 2015). Sump juga meningkatkan waktu kontak CO₂-cair, meningkatkan efisiensi fiksasi karbon hingga 66–95% (Li et al., 2013; Kumar et al., 2015). Vortex Generators: Inovasi terbaru mencakup penggunaan Delta Wings atau Vortex-Induced Vibration (VIV) untuk meningkatkan pencampuran vertikal tanpa input energi eksternal yang signifikan. Studi menunjukkan bahwa sistem VIV dapat meningkatkan produksi biomassa

hingga 20% dengan meningkatkan frekuensi siklus terang-gelap (Akca et al., 2023; Skifa et al., 2024).

4. Inovasi Desain ORP

Untuk mengatasi keterbatasan ORP terbuka (kontaminasi, penguapan, kehilangan CO₂), beberapa modifikasi desain antara lain *Covered Raceway Pond* (CRP) ORP dengan lembaran plastik transparan dapat mengurangi penguapan air, mencegah kontaminasi, dan meningkatkan efisiensi fiksasi CO₂ hingga 95% dengan menahan gas di atas permukaan kultur (Li et al., 2013; Kumar et al., 2015; Pirasaci et al., 2017). Sistem *Horizontal Bioreactor Enclosed* (HBR) adalah contoh implementasi CRP yang menggabungkan biaya rendah ORP dengan kontrol lingkungan PBR (Pirasaci et al., 2017).

Hybrid PBR-ORP adalah sistem hibrid menggunakan PBR tertutup sebagai sumber inokulum kontinu untuk mempertahankan dominasi strain target di ORP terbuka. Pendekatan ini terbukti meningkatkan produktivitas biomassa hingga 40% dan lipid hingga 62% dibandingkan ORP konvensional, sekaligus mengatasi masalah kontaminasi biologis (Yun et al., 2018). Penambahan zona sedimentasi langsung dalam desain ORP dapat mempermudah panen biomassa melalui gravitasi dan mengurangi kekeruhan air, sehingga meningkatkan penetrasi cahaya dan laju pertumbuhan spesifik (Habibi et al., 2018).

Desain ORP modern bergeser dari pendekatan empiris sederhana menuju optimisasi berbasis CFD yang mempertimbangkan interaksi kompleks antara geometri, hidrodinamika, dan transfer massa (Habibi et al., 2018). Kunci keberhasilan desain ORP terletak pada minimisasi zona mati melalui rasio $L/W > 10$ dan modifikasi belokan, pemilihan sistem pengaduk yang hemat energi (seperti airlift atau paddle wheel teroptimasi), dan integrasi strategi untuk meningkatkan retensi CO₂ dan penetrasi cahaya (Skifa et al., 2024).

N Karakteristik *Open Raceway Pond* (ORP) dengan Sistem Batch

Yun et al. (2018) menyatakan bahwa *Open Raceway Pond* (ORP) dengan sistem *Batch* adalah fotobioreaktor terbuka yang berbentuk kolam dengan digerakkan oleh *paddle wheel*. Adapun karakteristik utama fotobioreaktor adalah sistem batch memungkinkan pemberian nutrisi satu siklus batch, efisiensi biaya operasional yang rendah, mudah terkontaminasi oleh organisme lain, faktor lingkungan seperti cahaya dan suhu sulit dikendalikan, mudah diterapkan dalam jumlah besar serta pemeliharaan mudah (Pirasaci et al., 2017)

O Faktor yang mempengaruhi kultivasi pada *Open Raceway Pond* (ORP) Sistem Batch

Kultivasi mikroalga dalam ORP pada sistem batch dipengaruhi pertumbuhan dan produktivitas mikroalga. Ruano et al (2012) menyatakan bahwa faktor utama yang mempengaruhi kultivasi dalam ORP pada sistem batch :

1. Intensitas cahaya dan fotoperiodisitas

Intensitas cahaya

Kebutuhan cahaya untuk mikroalga berpengaruh dalam meningkatkan laju fotosintesis dan pertumbuhan mikroalga. Namun apabila berlebihan juga berakibat fotoinhibisi pada mikroalga (Vasumathi et al., 2012).

Fotoperiodisitas

Pengaturan siklus cahaya dan gelap dapat mensimulasi kondisi alami dan meningkatkan efisiensi fotosintesis (Yang, et al., 2000).

2. Aerasi

Aerasi akan membantu pengadukan medium, distribusi nutrisi yang merata dan mencegah penumpukan gas oksigen yang bersifat toksik (Pirasaci et al., 2017).

3. Suhu

Setiap jenis mikroalga memiliki suhu optimal untuk pertumbuhan. Suhu optimal bervariasi tergantung pada jenis mikroalga (Serra-Maia et al., 2016).

4. Nutrisi dan pemberian nutrisi (*feeding regime*)

Plöhn et al. (2021) menyatakan bahwa nutrisi yang diperlukan mikroalga berupa unsur makro (Nitrogen, Fosfor dan Kalium) dan unsur mikro (Fe, Mg, dan Zn) untuk pertumbuhan dapat diambil dari limbah yang digunakan hingga satu siklus.

5. *pH*

Medium kultur perlu pengaturan *pH* karena mempengaruhi proses biologis dan biokimia dalam sel mikroalga. *pH* yang tidak sesuai dapat menghambat enzim fotosintetik dan mengganggu keseimbangan ionik. Pengontrolan *pH* digunakan untuk menjaga *pH* dalam kisaran optimal, biasanya dengan menambahkan buffer atau agen pengatur *pH* (Serra-Maia et al., 2016).

6. Pengadukan

Pengadukan yang efektif memastikan distribusi nutrisi dan gas yang merata sehingga mencegah sedimentasi sel. Intensitas pengadukan perlu dilakukan secara konsisten untuk menjaga suspensi sel tanpa merusak struktur sel mikroalga (Pirasaci et al., 2017).

7. Kontaminasi

Fotobioreaktor ORP di lingkungan terbuka rentan terhadap organisme asing. Kontaminasi dapat berupa bakteri, lalat, atau mikroorganisme lainnya (Pirasaci et al., 2017).

P Kontribusi Mikroalga dalam Mitigasi Perubahan Iklim

Amini et al. (2019) menyatakan bahwa mikroalga menyerap karbon organik serta nutrisi seperti nitrogen (NO_3 , NH_4^+) dan fosfor (PO_4^{3-}). Pengolahan limbah cair menggunakan mikroalga dapat mengurangi pelepasan karbon organik yang dapat meningkatkan emisi gas rumah kaca seperti metana (CH_4) (Wei et al., 2023).

Untuk menganalisis penyerapan karbon dari mikroalga dapat dihitung berdasarkan rasio konversi *Chemical Oxygen Demand* (COD) (Gupta et al., 2017). Pada prinsipnya 1 mg COD secara teoritis setara dengan 0,375 mg karbon organik. Rasio ini berdasarkan pada

oksidasi sempurna karbon. Setiap mol karbon membutuhkan 1 mol oksigen (32 g O₂ per 12 g C) sehingga secara massa perbandingan oksigen terhadap karbon adalah 2,67. Oleh karena itu, massa karbon adalah $1/2,67 \text{ mg} = 0,375 \text{ mg}$ karbon (IPCC, 2019).. Namun dalam faktanya, rasio ini bervariasi tergantung pada jenis bahan organik yang dihitung.



SEKOLAH PASCASARJANA