

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Menurut Mandalam & Palsson (1998) ada 3 persyaratan dasar untuk kultur mikroalga fotoautotropik berdensitas tinggi yang tumbuh dalam fotobioreaktor tertutup. Pertama adalah sumber cahaya yang kuat. Kedua adalah pertukaran gas yang efisien. Sedangkan syarat terakhir adalah komposisi medium yang cocok.

Mengacu pada syarat pertama, penelitian-penelitian sebelumnya di Laboratorium Rekayasa Bioproses (RBP) Universitas Indonesia yang telah banyak membahas tentang efek pencahayaan terhadap pertumbuhan mikroalga *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Namun sedikit yang membahas syarat kedua, yaitu bagaimana sistem pertukaran gas yang baik. Puteri (2007) telah meneliti dan mendapatkan nilai kecepatan superficial (U_G) optimum untuk kondisi operasi di volume kultur 600 ml. Nilai U_G yang didapatnya ini tentu saja hanya berlaku untuk volume kultur 600 ml saja, tidak di volume lain. Oleh karenanya, ketika terjadi peningkatan skala, penentuan U_G ini masih dilakukan secara percobaan (*trial*) tanpa melalui suatu basis tertentu. Hal ini seperti yang dilakukan Isaeni (2009) yang mencari U_G optimum untuk kondisi operasi di volume kultur 18 L.

Penentuan U_G sebenarnya bisa ditentukan dengan suatu basis yang berasal dari parameter hidrodinamika. Parameter hidrodinamika sangat tepat untuk dijadikan basis, karena sangat berkaitan langsung dengan segala sesuatu yang berkaitan dengan aliran dalam fluida. Fenomena perpindahan dalam suatu aliran fluida meliputi 3 jenis perpindahan yaitu, perpindahan momentum, perpindahan massa, dan perpindahan panas (Bird, Stewart, Lightfoot; 1960). Parameter hidrodinamika yang sangat berkaitan dalam fenomena perpindahan yang dibahas dalam penelitian ini meliputi kecepatan superficial gas (U_G) yang berkaitan dengan perpindahan momentum, Retention Time Distribution (RTD) dan *gas hold up* (ϵ) yang berkaitan dengan perpindahan massa secara konvektif, serta koefisien perpindahan massa yang berkaitan perpindahan massa secara difusi. Untuk perpindahan massa secara reaksi kimia tidak dibahas dalam penelitian ini.

4.1. EVALUASI HASIL ISO- U_G DAN ISO-RTD

4.1.1 Iso- U_G

Kecepatan superfisial (U_G) disebut juga fluks volumetrik, yaitu laju aliran volumetrik gas dibagi *cross-sectional area* dari fermenter (Doran, 1995).

Penelitian di Laboratorium Rekayasa Bioproses (RBP) Universitas Indonesia yang melakukan produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg pada kondisi operasi U_G yang sama pada volume yang berbeda adalah Andika (2005) dan Puteri (2007). Andika (2005) melakukan produksi biomassa pada volume kultur 250 ml sedangkan Puteri (2007) pada volume kultur 600 ml. Kecepatan superfisial (U_G) yang digunakan sama di 2,4 m/h. Andika (2005) mendapatkan hasil berupa peningkatan berat kering akhir *Chlorella* sebanyak 11,46 kali dari berat kering awal setelah 104 jam kultivasi. Sedangkan Puteri (2007), hanya mendapat peningkatan sebanyak 6,5 kali dari berat kering awal dalam waktu kultivasi yang sama

Dari hasil penelitian mereka ini jika dibandingkan atas dasar iso- U_G , maka dapat ditarik suatu kesimpulan baru. Ada perbedaan hasil yang cukup jauh antara hasil di volume 18 L dan 40 L. Bahkan untuk volume 600 ml (yang lebih besar) justru terjadi penurunan hingga mencapai 1,76 kali dari hasil di volume 250 ml (yang lebih kecil). Kesimpulan akhirnya adalah bahwa parameter kecepatan superfisial (U_G) belum dapat digunakan sebagai basis *scale up*.

Kesimpulan ini cocok secara teoritis. Parameter U_G sangat menentukan besar kecilnya aliran dalam reaktor. Jika U_G di set sama sedangkan reaktornya memiliki volume berbeda, maka tentu saja pola alirannya akan jauh berbeda. Besarnya U_G tergantung dari geometri reaktor terutama luas alas. Maka jika reaktor makin besar, maka pengaruh pengadukan karena aerasi dari udara- CO_2 pada U_G tertentu, terhadap proses perpindahan massa akan makin berkurang. Semakin besar volume maka pengadukan akan makin lama untuk homogen. Oleh karena itu pertumbuhan di volume 600 ml lebih kecil dari pertumbuhan di 250 ml. Sebab volume yang lebih besar membutuhkan waktu yang lebih lama untuk bercampur secara homogen, dan karena luasnya permukaan dasar reaktor yang dilewati gas menyebabkan pencampuran bahkan kurang merata.

4.1.2 Iso-RTD

Penelitian tentang Iso-RTD dilakukan oleh Syahri (2008) Laboratorium Rekayasa Bioproses (RBP) Universitas Indonesia. Syahri melakukan uji hidrodinamika dengan menentukan *Retention Time Distribution* (RTD) pada fotobioreaktor dengan volume kultur 18 L. Basis yang digunakan adalah kondisi hidrodinamika yang sama dengan Andika (2005) yang dilakukan pada volume kultur 250 mL dan U_G 2,4 m/h.

Pengujian dilakukan dengan menggunakan zat warna *methylene blue* yang diteteskan pada sejumlah air dalam reaktor. Selanjutnya dilihat distribusi konsentrasi *methylene blue* dalam reaktor pada beberapa variasi laju alir volumetrik (V) udara yang dihembuskan ke dalam reaktor dengan sejumlah volume air tertentu. Hasilnya lalu dibandingkan dengan distribusi zat yang sama di reaktor 250 ml milik Andika (2005). Laju volumetrik (V) yang diperoleh lalu dirubah dalam bentuk kecepatan superfisial (U_G).

Hasil dari uji RTD dapat dilihat pada tabel 4.2 berikut ini .

Tabel 4.1. U_G yang diperoleh dari uji iso-RTD sesuai dengan volume air yang digunakan

Volume (ml)	U_G (m/h)
10.000	11,18
15.000	18.63
18.000	22,36
21.750	26,08

Dari hasil tabel di atas didapat U_G yang digunakan untuk volume 18 L adalah 22,36 m/h. Namun nilai U_G ini tidak serta merta digunakan untuk kondisi operasi pertumbuhan mikroalga. Hal ini karena setelah dilihat secara visual ternyata turbulensi aliran yang ditimbulkan oleh U_G ini di volume 18 L terlalu besar sehingga dikhawatirkan terjadi *shear stress* pada mikroalga. Akhirnya nilai U_G diturunkan sedikit demi sedikit hingga profil turbulensinya relatif sama dengan profil turbulensi di reaktor 250 ml. U_G yang didapat akhirnya adalah 15,66

m/h. Selanjutnya nilai U_G ini digunakan sebagai kondisi operasi untuk produksi bioamassa mikroalga *Chlorella vulgaris* Buitenzorg.

Hasil pertumbuhan mikroalga yang didapat oleh Syahri (2008) bila dengan dibandingkan oleh hasil pertumbuhan di volume 250 ml (Andika, 2005) ternyata juga cukup jauh perbedaannya. Perolehan biomassa mikroalga yang didapatkan di volume 18 L lebih rendah dari perolehan di volume 250 ml. Penurunan hasil ini cukup jauh hingga 1,61 kali lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa dengan parameter RTD tidak dapat digunakan sebagai basis *scale up*.

Kesimpulan ini juga cocok secara teoritis. Walaupun RTD sudah dibuat sama, namun tetap saja proses pencampuran dalam reaktornya akan berbeda. Makin besar reaktor mengakibatkan proses pengadukan dan pencampuran makin solid di kontrol. Parameter RTD hanya menunjukkan data waktu tinggal suatu zat dalam pencampuran di reaktor. Sedangkan kondisi seberapa sering zat itu berkontak dengan gas dalam reaktor, belum diketahui. Makin besar reaktor maka kemungkinan aliran gelembung gas akan kurang merata. Hal itulah yang menyebabkan terjadi penurunan hasil biomassa pada reaktor yang lebih besar.

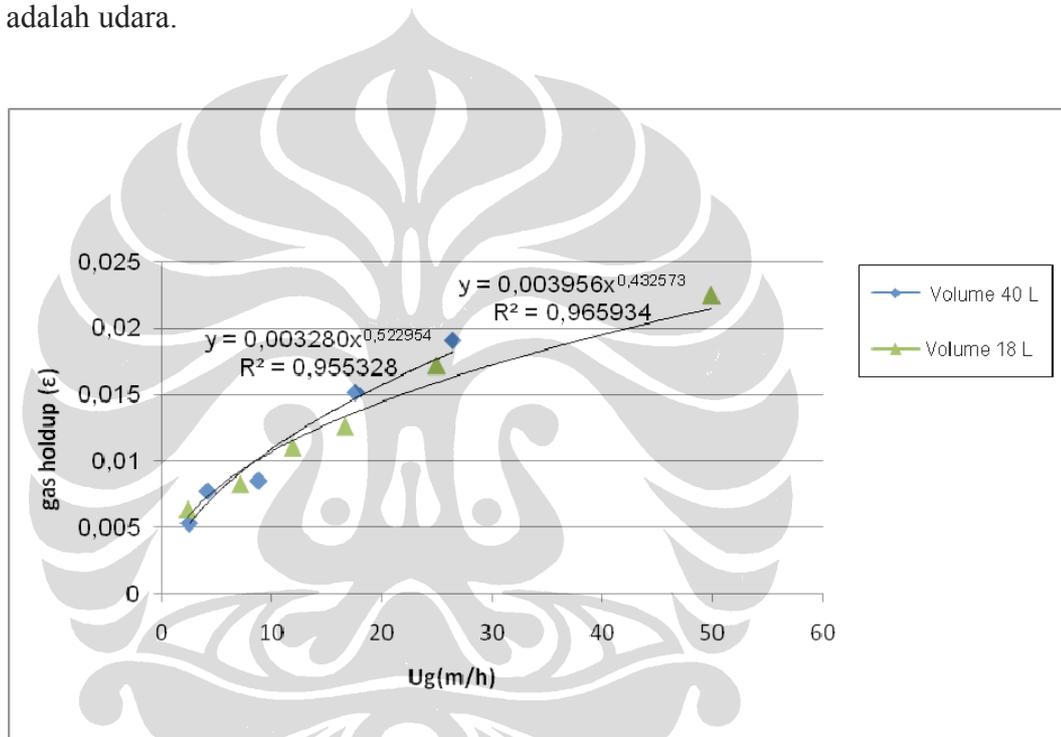
4.2 PENGEMBANGAN PARAMETER ISO- ϵ DAN ISO- K_{La}

Karena dua parameter hidrodinamika sebelumnya, yaitu iso- U_G dan iso-RTD telah gagal untuk dijadikan basis dalam scale up di fotobioreaktor kolom gelembung, maka dalam penelitian ini parameter hidrodinamika lain diujikan. Parameter yang dimaksud adalah *gas hold up* (ϵ) dan koefisien perpindahan massa (K_{La}). Dua parameter ini sangat penting dalam proses pertumbuhan mikroalga.

4.2.1 *Gas holdup* (ϵ)

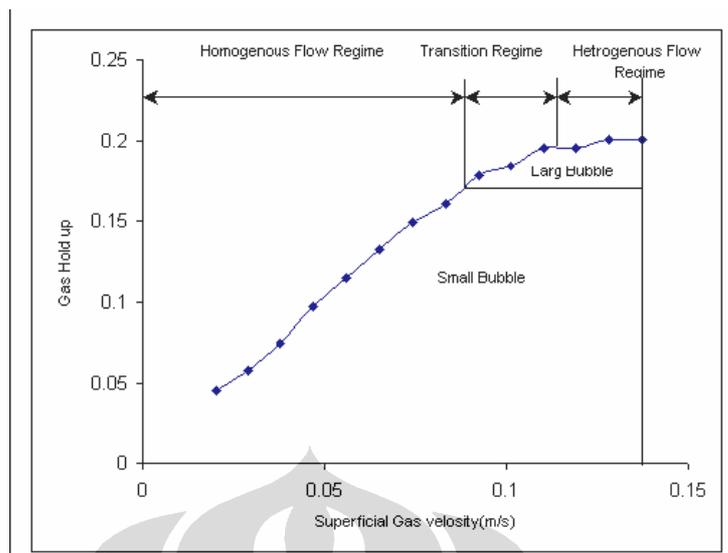
Gas holdup (ϵ) merupakan fungsi dari beda ketinggian sebelum dan sesudah diaerasi. Parameter ini menunjukkan seberapa banyak gas yang dapat tertahan oleh cairan medium/kultur jika diaerasikan pada suatu kecepatan superfisial gas (U_G) tertentu. Gas yang tertahan ini merupakan gas yang potensial untuk melakukan perpindahan massa dengan sel kultur. Untuk itu dalam proses hidrodinamika ini, tujuan operasinya adalah membuat gas makin banyak tertahan untuk mengoptimalkan proses perpindahan massa.

Besarnya *gas holdup* sendiri tidak lepas dari pengaruh efek kecepatan superfisial (U_G) yang digunakan dalam aerasi di reaktor. Hal ini dapat dilihat dari grafik berikut ini. Grafik ini merupakan hasil pengukuran *gas holdup* (ϵ) yang didapatkan dengan memvariasikan kecepatan superfisial (U_G) pada dua reaktor dengan volume yang berbeda. Volume yang pertama adalah 18 L yang merupakan volume yang digunakan oleh Syahri (2008) dan Isnaeni (2009). Sedangkan volume kedua adalah 40 L yang merupakan perbesaran skala (*scale up*) dari volume 18 L. Pengukuran ϵ dilakukan dalam media air dengan gas pengaerasi adalah udara.



Gambar 4.1. Pengaruh kecepatan superfisial (U_G) terhadap *gas holdup* (ϵ) pada volume reaktor 18 L dan 40 L

Dari grafik diatas terlihat bahwa kecepatan superfisial (U_G) yang semakin diperbesar akan memperbesar *gas holdup* (ϵ). Hal ini cocok dengan hasil penelitian Moshtari *et al* (2009) seperti terlihat pada grafiknya berikut ini.



Gambar 4.2. Efek kecepatan superfisial pada gas hold up pada sistem gas-udara.
sumber :Moshtari *et al* (2009)

Gambar 4.1, selain menunjukkan efek kecepatan superfisial (U_G) juga menunjukkan perbedaan nilai ϵ untuk volume 18 L dan 40 L. Nilai ϵ pada volume 40 L ternyata lebih besar dari nilai ϵ pada volume 18 L pada kondisi U_G yang sama. Hal ini dikarenakan karena perbedaan tinggi cairan yang digunakan. *Gas hold up* (ϵ) adalah fungsi ketinggian. Maka dengan makin turunnya level cairan, tekanan cairan makin berkurang dan hambatan cairan terhadap gas aerasi akan makin berkurang sehingga gas bisa menaikkan ketinggian cairan lebih tinggi.

Pada volume 40 L, ketinggian cairan 41,7 cm sedangkan volume 18 L ketinggian cairannya 53 cm. Hal ini terjadi karena penyesuaian ketinggian terhadap luas alas yang digunakan, dimana luas alas 40 L lebih besar hampir 3 kali luas alas 18 L. Kondisi ini dilakukan untuk juga untuk melihat efek dari perbesaran skala atau geometri reaktor pada ϵ . Ternyata dengan perbesaran dimensi alas mengakibatkan penurunan level cairan dan juga mengakibatkan perbesaran ϵ .

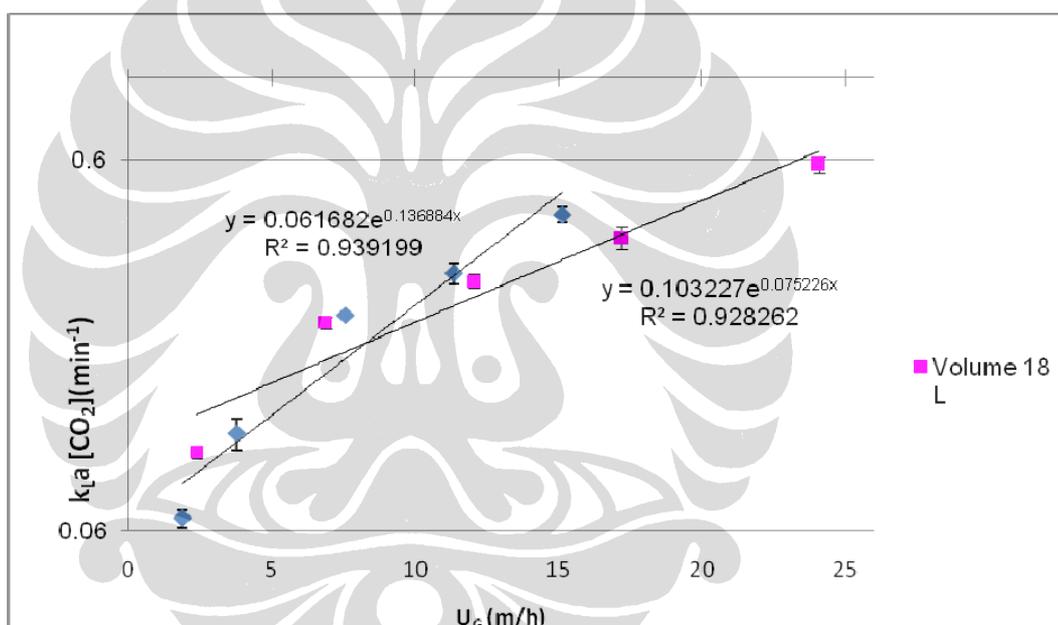
4.2.2 Koefisien Perpindahan Massa (K_{La})

Koefisien perpindahan massa (K_{La}) menunjukkan besarnya perpindahan massa gas ke dalam cairan di reaktor. Tentu saja parameter ini sangat penting

karena merupakan indikator langsung seberapa besar massa gas berpindah ke cairan.

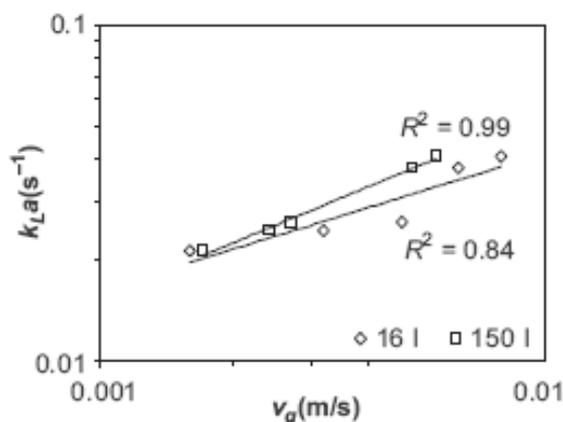
Koefisien perpindahan massa (K_{La}) dalam penelitian ini ditentukan dengan menggunakan metode dinamik. Prosesnya adalah dengan mengukur pertambahan konsentrasi oksigen pada air yang belum sama sekali diaerasi menggunakan *DO-meter* dari waktu t_1 , t_2 dan waktu-waktu berikutnya hingga konsentrasi yang ditunjukkan oleh *DO-meter* makin konstan (*steady*). Selanjutnya data diolah menurut persamaan 2.6 pada bagian Bab II laporan ini dan k_{La} ditentukan dari slope grafik yang didapat dari pengolahan data tersebut.

Hasil pengukuran k_{La} pada beberapa variasi U_G dapat dilihat pada grafik berikut.



Gambar 4.3. Pengaruh kecepatan superfisial (U_G) terhadap koefisien perpindahan massa (k_{La}) pada dua volume reaktor yang berbeda

Dari grafik diatas terlihat bahwa kecepatan superfisial (U_G) yang semakin diperbesar akan memperbesar koefisien perpindahan massa (k_{La}). Hasil ini cocok seperti hasil yang dilakukan Alam dan Razali (2005) berikut ini.



Gambar 4.4. Besarnya k_{La} menurut besarnya kecepatan superfisial pada air destilasi 30 °C

Sumber : Alam dan Razali (2005).

Grafik 4.3 juga menunjukkan harga k_{La} pada volume 40 L lebih besar dari harga k_{La} pada volume 18 L pada U_G yang sama. Hal ini sama seperti yang dijelaskan pada bagian *gas hold up* sebelumnya, adalah karena dipengaruhi oleh geometri reaktor. Karena luas penampang permukaan cairan di 40 L lebih besar dan ketinggian cairan lebih rendah maka tahanan cairan lebih kecil. Sehingga gas lebih banyak masuk dalam cairan dan proses perpindahan massa lebih besar.

4.3. PENGUJIAN ISO- ϵ DAN ISO k_{La} PADA PRODUKSI MIKROALGA *CHLORELLA VULGARIS* BUITENZORG

Dari grafik 4.1 dan 4.3, kecepatan superfisial (U_G) yang akan dijadikan kondisi operasi pada reaktor 40 L dapat ditentukan berdasarkan kondisi iso- ϵ dan iso- k_{La} . Kondisi iso- ϵ dan iso- k_{La} yang menjadi acuan adalah pada reaktor 18 L. Isnaeni (2009) telah mendapatkan kecepatan superfisial (U_G) optimum untuk reaktor 18 L sebesar 8.498 m/h. Pada U_G ini hasil biomassa yang didapatkan di 18 L adalah yang terbaik dari beberapa variasi U_G yang telah diujicobakan.

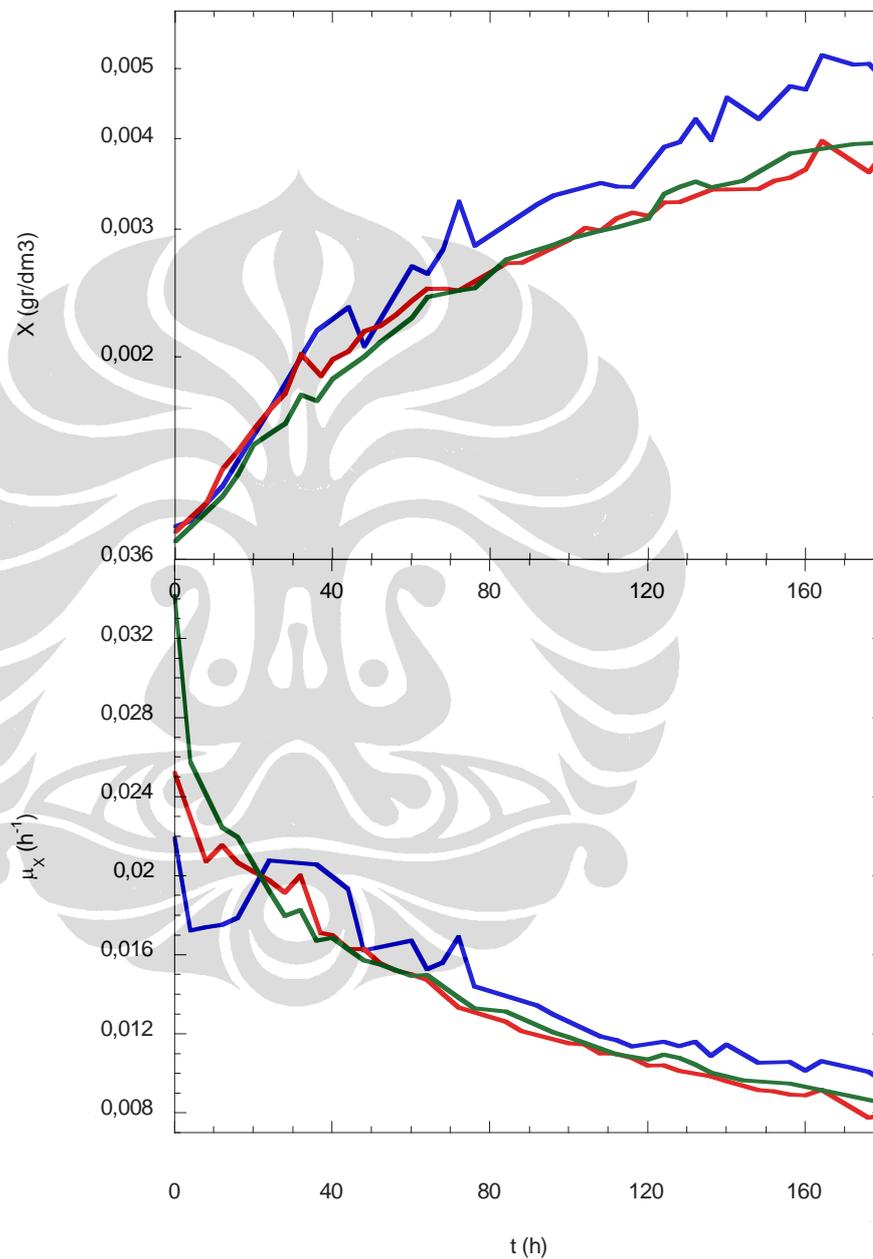
Sesuai grafik 4.1 dan berdasarkan U_G optimum di reactor 18 L, maka U_G berdasarkan iso- ϵ untuk reaktor 40 L adalah sebesar 21,68 m/h. Sedangkan U_G berdasarkan iso- k_{La} untuk reaktor 40 L sesuai grafik 4.3, didapatkan sebesar 19,36 m/h.

Dengan harga U_G yang sudah didapatkan berdasarkan iso- ϵ dan iso- k_{La} diatas, maka produksi biomassa mikroalga *chlorella vulgaris* Buitenzorg diujikan

sesuai dengan U_G tersebut. Setiap percobaan diulang sebanyak 2 kali lalu dirataratakan.

4.3.1 Hasil Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

Hasil pertumbuhannya dapat dilihat sebagai berikut pada grafik 4.4.



Gambar. 4.5. Perbandingan hasil berat kering dan pertumbuhan mikroalga *Chlorella vulgaris* Buitenzorg pada operasi iso- ϵ dan iso- k_{1a} di fotobioreaktor vol 18 L dan vol 40 L. (—) Kondisi di 18 L. (—) Kondisi di 40 L iso- ϵ , (—) Kondisi di 40 L iso- k_{1a}

Dari grafik 4.4 tampak bahwa hasil berat kering (g/dm^3) di volume kultur 40 L untuk kondisi iso- ϵ , dari waktu ke waktu relatif lebih sama dengan hasil berat kering di volume kultur 18 L bila dibanding dengan kondisi iso- k_{La} . Pada laju pertumbuhan μ (h^{-1}) di volume 40 L dengan kondisi iso- ϵ juga terlihat lebih sama dengan pola pertumbuhan μ (h^{-1}) di volume 18 L bila dibandingkan dengan kondisi iso- k_{La} . Hal ini menunjukkan bahwa pengaturan kondisi iso- ϵ pada dua reaktor yang berbeda, adalah kondisi yang paling stabil sehingga walaupun telah terjadi perbesaran volume, pola pertumbuhan bisa dijaga stabil sesuai dengan target yang kita mau tanpa terpengaruh oleh pengaruh perbesaran volume tersebut. Dengan demikian bisa ditarik kesimpulan bahwa parameter iso- ϵ adalah parameter yang bisa digunakan untuk *scale up*.

Hasil akhir pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg selama kultivasi, untuk tiap kondisi dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4.2. Berat kering akhir yang didapat selama kultivasi (180 jam)

X_f acuan (g/dm^3) Volume kultur 18 L	X_f iso-ϵ (g/dm^3) Volume kultur 40 L	X_f iso-k_{La} (g/dm^3) Volume kultur 40 L
0,00481	0,00385	0,00396

Dari tabel di atas, bila dibandingkan dengan hasil uji pada kondisi iso- U_G dan iso-RTD pada peneliti-peneliti sebelumnya, hasil berat kering akhir untuk kondisi iso- ϵ dan iso- k_{La} tidak menyimpang jauh dari hasil acuan. Perbedaan hasil dengan sistem pengaturan parameter hidrodinamika hanya berkisar antara 1,21 – 1,45 kali dari acuan. Dengan demikian sesuai dengan kesimpulan sebelumnya, parameter iso- ϵ bisa digunakan untuk *scale up*.

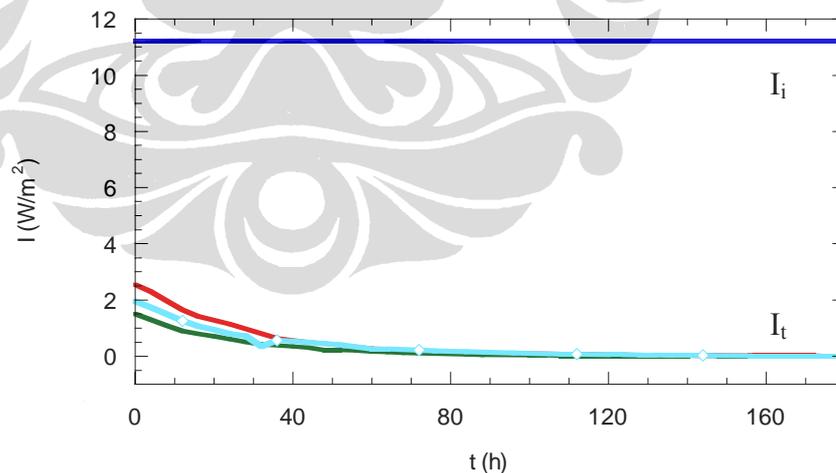
Ada beberapa alasan untuk menjelaskan fenomena ini. Seperti yang disampaikan (Doran, 1995) dalam bukunya yang berjudul "*Bioprocess Engineering Principle*" bahwa *gas hold up* (ϵ) menunjukkan seberapa besar fraksi gas yang tertahan di cairan. Menurutnya juga makin besar ϵ maka akan makin besar laju perpindahan massanya. Maka cukup dengan mengetahui parameter ϵ secara tidak langsung kita juga telah "mengetahui" kondisi perpindahan massanya. Selain itu parameter ini secara eksperimen lebih mudah dan lebih

akurat untuk ditentukan sehingga jika ingin mendapatkan U_G yang tepat untuk kondisi iso- ε akan lebih mudah dan akurat.

Lalu mengapa parameter k_{La} yang jelas-jelas berhubungan langsung dengan fenomena perpindahan, ternyata tidak bisa menunjukkan hasil yang lebih baik (dalam kemiripannya dengan hasil acuan). Ada beberapa alasan juga mengenai hal ini. Pertama, bahwa dengan kenyataan ini telah menunjukkan bahwa proses pencampuran dalam reaktor kolom gelembung yang berbentuk *flat plate* sangat tidak seragam. Pencampuran tidak merata di setiap titik kolom. Bahkan bisa jadi, pada U_G tertentu terdapat daerah yang sama sekali tidak teraerasi. Daerah ini dinamakan *death zone*. Daerah ini bisa menimbulkan kematian mikroalga. Jadi walaupun sudah dilakukan pengukuran dengan menggunakan *DO-meter* secara langsung, namun pembacaannya tidak mewakili seluruh kejadian di tangki karena faktor pencampuran yang tidak merata tadi.

4.3.2 Energi Cahaya yang Digunakan Selama Produksi Biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg

Profil intensitas cahaya selama masa kultivasi, dapat dilihat pada grafik berikut.



Gambar. 4.6. Intensitas cahaya yang digunakan untuk produksi biomassa mikroalga *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. I_i adalah cahaya yang diterima kultur. I_t adalah cahaya yang ditransmisikan oleh medium pada operasi iso- ε dan iso- k_{La} di fotobioreaktor vol 18 L dan vol 40 L. (—) Kondisi di 18 L. (—) Kondisi di 40 L iso- ε , (—) Kondisi di 40 L iso- k_{La}

Dari gambar di atas, tampak bahwa konsumsi energi cahaya pada ketiga kondisi, baik di volume acuan (18 L), iso- ϵ (40 L) dan iso- k_{La} (40 L) relatif sama. Karena pencahayaan yang diberikan adalah kontinyu, maka intensitas cahaya yang diterima (I_i) adalah tetap. Pada saat-saat awal kultivasi, masih ada sedikit perbedaan profil intensitas cahaya yang ditransmisikan oleh medium (I_t). Hal ini menunjukkan bahwa di tiap kondisi, pada awal pertumbuhan memberikan masa adaptasi yang berbeda-beda hasilnya. Namun setelah masa itu lewat, di tengah pertumbuhan, hasil transmisi cahaya sama di tiap kondisi.

Jika dibandingkan, kondisi iso- ϵ masih lebih memberikan hasil yang sama dengan acuan dibandingkan dengan kondisi iso- k_{La} . Hal ini menunjukkan bahwa kondisi iso- k_{La} paling stabil terhadap perubahan volume dan bisa dijadikan basis *scale up*.

Tabel 4.3. Energi cahaya yang digunakan selama kultivasi dan efisiensinya

Sistem Operasi	Volume Kultur (L)	E_x (J/kg)	E (J/kg)	η_{bp} (%)
Acuan	18	46264,3	2073885,5	2,23
Iso- ϵ	40	18421,3	4766233,6	0,386
Iso- k_{La}	40	130995,7	5454147	2,4

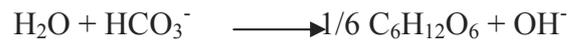
Dilihat dari tabel di atas, terlihat bahwa energi yang digunakan untuk memproduksi mikroalga *Chlorella vulgaris* Buitenzorg (E_x) pada sistem iso- ϵ paling kecil. Selain itu efisiensi cahaya yang digunakan η_{bp} , yang merupakan perbandingan antara E_x dan E (energi yang tersedia selama kultivasi), juga paling kecil. Hal ini menunjukkan bahwa sistem iso- ϵ paling sedikit dalam memanfaatkan cahaya untuk pertumbuhan *Chlorella vulgaris* Buitenzorg. Bila dibandingkan dengan hasil pertumbuhan, dimana pertumbuhannya sesuai dengan acuan, ini berarti pada sistem iso- ϵ dengan menggunakan pencahayaan sedikit sudah mampu mendapatkan hasil yang lebih besar bila dibanding system lainnya. Maka untuk penggunaan berikutnya, cahaya yang disediakan selama kultivasi (E) tidak perlu besar sehingga bisa menghemat biaya.

4.3.3 Kandungan $[\text{HCO}_3^-]$ dalam Medium Kultur

Senyawa bikarbonat $[\text{HCO}_3^-]$ terbentuk karena adanya CO_2 terlarut dalam medium yang juga mengandung air. Saat udara mengaerasi kultur, maka akan terjadi reaksi ekstraselular seperti berikut :

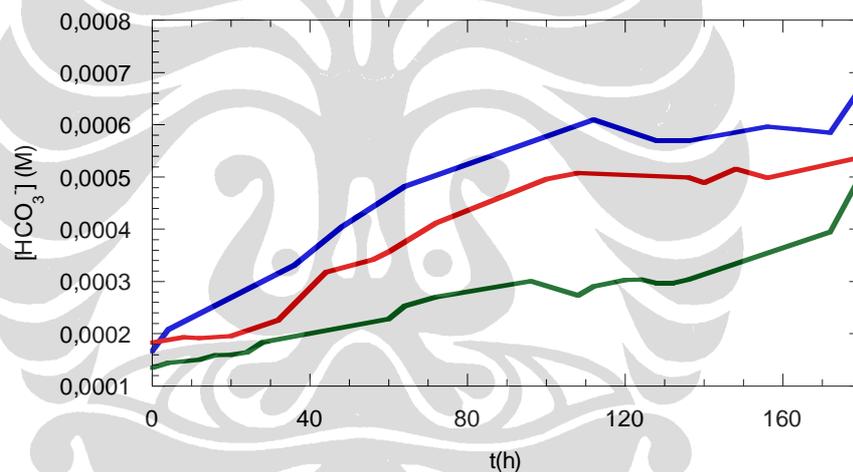


Senyawa bikarbonat diserap oleh sel dan bereaksi dengan air yang berada dalam sel membentuk senyawa organik seperti glukosa dan ion OH^-



Konsentrasi $[\text{HCO}_3^-]$ merupakan fungsi perubahan pH kultur yang terjadi akibat aktivitas pertumbuhan sel *Chlorella vulgaris* Buitenzorg.

Hasil pengukuran pH yang diubah menjadi konsentrasi $[\text{HCO}_3^-]$ yang terukur selama kultivasi dapat dilihat pada grafik berikut ini.



Gambar. 4.7. Perbandingan konsentrasi $[\text{HCO}_3^-]$. (—) Kondisi di 18 L. (—) Kondisi di 40 L iso- ϵ , (—) Kondisi di 40 L iso- $k_{L,a}$

Dari gambar diatas, profil yang ditunjukkan sama dengan parameter analisa lainnya. Dimana kondisi kondisi iso- ϵ masih lebih memberikan profil konsentrasi $[\text{HCO}_3^-]$ yang sama dengan acuan dibandingkan dengan kondisi iso- $k_{L,a}$. Hal ini menunjukkan sekali lagi bahwa kondisi iso- $k_{L,a}$ paling stabil terhadap perubahan volume dan bisa dijadikan basis *scale up*.

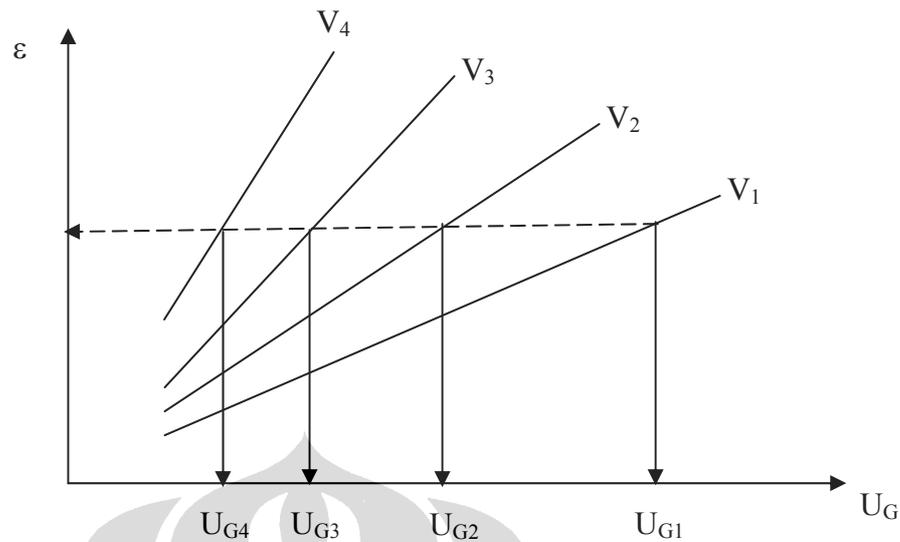
4.4 MODEL *SCALE UP* DENGAN MENGGUNAKAN PARAMETER HIDRODINAMIKA

Dalam proses *scale up*, berarti bahwa kita meningkatkan skala hasil produksi dengan meningkatkan skala volume reaktor untuk produksi. Ketika volume reaktor ingin diperbesar, banyak faktor yang harus dipertimbangkan agar target hasil produksi yang diinginkan bisa tercapai. Faktor-faktor tersebut antara lain adalah berapa volume reaktor yang harus dibuat, bagaimana dimensi reaktornya dan bagaimana kondisi operasinya.

Dalam penelitian ini, diasumsikan bahwa volume dan dimensi reaktor yang akan dibuat sudah diketahui namun kondisi operasinya belum diketahui. Maka langkah selanjutnya adalah menentukan kondisi operasi berdasarkan parameter yang bisa menjadi basis dalam *scale up*. Kondisi operasi yang paling utama ditentukan pada reaktor kolom gelembung adalah kecepatan superfisial gas (U_G). Dalam menentukan harga U_G sebagai kondisi operasi inilah, parameter hidrodinamika dijadikan sebagai basis penentuan atau bisa disebut sebagai basis *scale up*.

Seperti yang telah disampaikan dalam bagian 4.3, parameter hidrodinamika dengan yang berhasil menjadi basis *scale up* untuk produksi biomassa *Chlorella vulgaris* Buitenzorg pada fotobioreaktor kolom gelembung adalah *gas hold up* (ϵ). Dengan berdasarkan kondisi ϵ yang dibuat sama di masing-masing reaktor yang volumenya berbeda, ternyata hasil pertumbuhan tidak mengalami penyimpangan jauh atau relatif sama. Kondisi ϵ yang dibuat sama pada aliran masing-masing reaktor ini dihasilkan dari sistem aerasi gas yang nilai kecepatan superfisialnya (U_G) tertentu untuk masing-masing volume. Nilai U_G ini didapatkan dari suatu grafik yang menunjukkan korelasi antara U_G dan ϵ , yaitu grafik 4.1 yang berlaku untuk 2 volume kultur, yaitu 18 L dan 40 L.

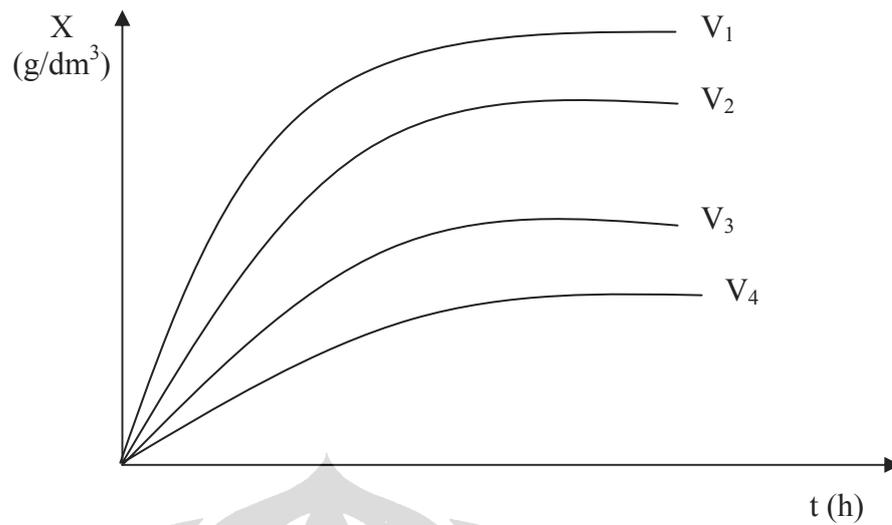
Grafik korelasi U_G dan ϵ yang dibuat untuk beberapa volume kultur, memungkinkan kita untuk menentukan U_G berdasarkan harga ϵ yang ditargetkan. Ilustrasinya bisa dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.8 Ilustrasi untuk menentukan harga U_G berdasarkan kondisi iso- ε untuk beberapa volume reaktor

Grafik di atas menunjukkan hubungan antara U_G dan ε pada masing-masing volume dimana $V_4 > V_3 > V_2 > V_1$. Pada keadaan iso- ε , $U_{G4} < U_{G3} < U_{G2} < U_{G1}$. Dari grafik diatas, kita dapat menentukan harga U_G untuk masing-masing volume reaktor berdasarkan nilai ε yang sudah ditentukan terlebih dahulu. Cara ini bisa diterapkan untuk *scale up*, namun terbatas pada volume-volume yang sudah dibuat. $U_{Gn} = f(V_n)$(4.1)

Selanjutnya jika ingin melakukan *scale up* dengan memprediksikan volume yang akan dibuat berdasarkan target hasil biomassa mikroalga yang diinginkan, maka perlu dibuat korelasi yang berbentuk persamaan empiris. Persamaan empiris didapat dari grafik hasil berat kering selama pertumbuhan (X) g/dm^3 di masing-masing volume, seperti yang diilustrasikan berikut ini.



Gambar 4.9. Ilustrasi hasil pertumbuhan mikroalga pada kondisi iso- ε untuk beberapa volume reaktor

Dari grafik di atas, hasil pertumbuhan tiap volume dibandingkan hasil pertumbuhan volume yang lain diterjemahkan dalam bentuk persamaan efisiensi (η). Untuk penurunan hasil antara V_1 dan V_2 adalah η_{21} , penurunan hasil antara V_2 dan V_3 adalah η_{32} , dst. Sehingga hasil di V_4 adalah $X_4 = \eta_{34} \cdot X_3$.

Efisiensi hasil untuk tiap volume merupakan fungsi dari volume :

$$\eta_{n,n-1} = f(V_n) \dots \dots \dots (4.2)$$