

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Reaktor merupakan alat utama pada industri yang digunakan untuk proses kimia yaitu untuk mengubah bahan baku menjadi produk. Reaktor dapat diklasifikasikan atas dasar cara operasi, geometrinya, dan fase reaksinya. Berdasarkan cara operasinya dikenal reaktor *batch*, *semi-batch*, dan kontinu. Jika ditinjau dari geometrinya dibedakan menjadi reaktor tangki berpengaduk, reaktor kolom, dan reaktor fluidisasi. Sedangkan, bila ditinjau berdasarkan fase reaksi yang terjadi di dalamnya, reaktor diklasifikasikan menjadi reaktor homogen dan reaktor heterogen.

Reaktor heterogen adalah reaktor yang digunakan untuk mereaksikan komponen yang terdiri dari minimal dua fase, seperti fase gas-cair. Reaktor yang digunakan untuk kontak fase gas-cair, di antaranya dikenal reaktor kolom gelembung (*bubble column reactor*) dan *air-lift reactor*. Reaktor jenis ini banyak digunakan pada proses industri kimia dengan reaksi yang sangat lambat, proses produksi yang menggunakan mikroba (bioreaktor) dan juga pada unit pengolahan limbah secara biologis menggunakan lumpur aktif.

Pada perancangan reaktor, pengetahuan kinetika reaksi harus dipelajari secara komprehensif dengan peristiwa-peristiwa perpindahan massa, panas, dan momentum untuk mengoptimalkan kinerja reaktor. Fenomena hidrodinamika yang meliputi *hold-up gas* dan cairan serta laju sirkulasi merupakan faktor penting yang berkaitan dengan laju perpindahan massa. Pada percobaan ini akan mempelajari hidrodinamika pada *air-lift reactor*, terutama berkaitan dengan pengaruh laju alir udara, viskositas, dan densitas terhadap *hold-up gas*, laju sirkulasi, dan koefisien perpindahan massa volumetrik gas-cair pada sistem *sequential batch*.

1.2 Rumusan Masalah

(Dibuat oleh praktikan)

1.3 Tujuan Praktikum

Setelah melakukan percobaan ini, mahasiswa diharapkan dapat

1. Menentukan pengaruh variabel kondisi operasi terhadap *hold-up gas* (ϵ).

Process

Laboratory

2. Menentukan pengaruh variabel kondisi operasi terhadap laju sirkulasi (U_L).
3. Menentukan pengaruh variabel kondisi operasi terhadap koefisien perpindahan massa volumetrik gas-cair (K_{La}).
4. Menentukan pengaruh waktu tinggal Na_2SO_3 terhadap koefisien perpindahan massa volumetrik gas-cair (K_{La}).

1.4 Manfaat Praktikum

1. Mahasiswa dapat menentukan pengaruh variabel kondisi operasi terhadap *hold-up gas* (ϵ).
2. Mahasiswa dapat menentukan pengaruh variabel kondisi operasi terhadap laju sirkulasi (U_L).
3. Mahasiswa dapat menentukan pengaruh variabel kondisi operasi terhadap koefisien perpindahan massa volumetrik gas-cair (K_{La}).
4. Mahasiswa dapat menentukan pengaruh waktu tinggal Na_2SO_3 terhadap koefisien perpindahan massa volumetrik gas-cair (K_{La}).

Process

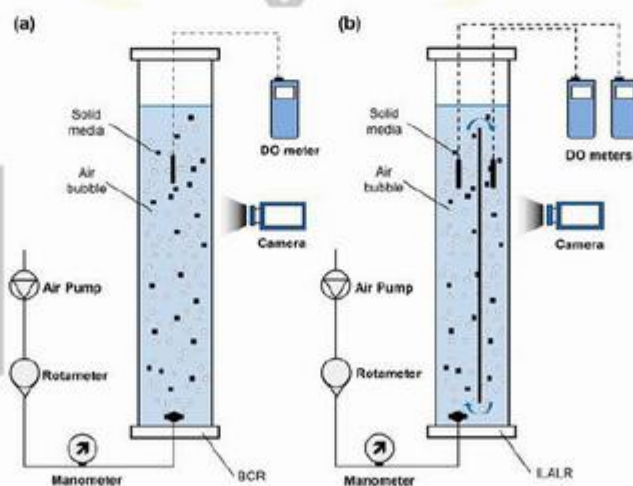
Laboratory

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Reaktor Kolom Gelembung dan *Air-Lift*

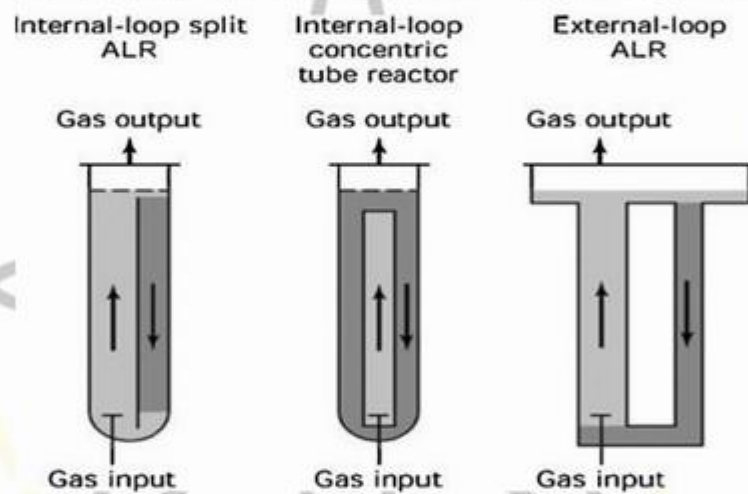
Reaktor adalah suatu alat tempat terjadinya suatu reaksi kimia untuk mengubah suatu bahan menjadi bahan lain yang mempunyai nilai ekonomis lebih tinggi. Reaktor kolom gelembung merupakan reaktor heterogen yang mereaksikan dua zat dengan fase yang berbeda, yaitu fase cair-gas. *Air-lift reactor* adalah jenis spesifik dari reaktor kolom gelembung yang memiliki sirkulasi cairan akibat dari aliran udara yang masuk ke dalam reaktor tersebut (Im *et al.*, 2019). Reaktor kolom gelembung memiliki desain yang sangat sederhana terdiri dari satu zona dengan *sparger* yang dipasang di bagian bawah reaktor. Keberadaan *sparger* ini menghasilkan gelembung gas halus yang memungkinkan pencampuran dan aerasi. Desain yang sederhana dari reaktor kolom gelembung menjadikan reaktor kolom gelembung memiliki keunggulan dari segi biaya yang lebih murah. Berbeda dengan reaktor kolom gelembung, *air-lift reactor* terdiri dari dua zona yang saling terhubung. Dua zona ini terdiri dari *riser* yang terdapat *sparger* dimana campuran gas disebarkan dan memiliki aliran ke atas. Sedangkan zona yang satunya disebut *downcomer* yang tidak menerima gas dan memiliki aliran ke bawah. Adanya sirkulasi dari *air-lift reactor* memiliki kelebihan dalam efisiensi pencampuran tanpa adanya agitasi fisik (Uyar *et al.*, 2023). Pada zona *downcomer* atau *riser* memungkinkan terdapat *plate* penyaringan pada dinding, terdapat satu atau dua buah *baffle*. Jadi banyak sekali kemungkinan bentuk reaktor dengan keuntungan penggunaan dan tujuan yang berbeda-beda (Widayat, 2004).



Gambar 2.1 Reaktor kolom gelembung dan *air-lift reactor*

Secara umum, *air-lift reactor* dikelompokkan menjadi 2, yaitu *air-lift reactor* dengan *internal loop* dan *external loop* (Christi, 1989; Williams, 2002). *Air-lift reactor* dengan *internal loop* merupakan kolom bergelembung yang dibagi menjadi 2 bagian, yaitu *riser* dan *downcomer* dengan *internal baffle* dimana bagian atas dan bawah *riser* dan *downcomer* terhubung. *Air-lift reactor* dengan *external loop* merupakan kolom bergelembung dimana *riser* dan *downcomer* merupakan 2 tabung yang terpisah dan dihubungkan secara horizontal antara bagian atas dan bawah reaktor. Selain itu, *air-lift reactor* juga dikelompokkan berdasarkan *sparger* yang dipakai, yaitu statis dan dinamis. Pada *air-lift reactor* dengan *sparger* dinamis, *sparger* ditempatkan pada *riser* dan/atau *downcomer* yang dapat diubah-ubah letaknya (Christi, 1989; Williams, 2002).

Secara teoritis, *air-lift reactor* digunakan untuk beberapa proses kontak gas cairan atau *slurry*. Reaktor ini sering digunakan untuk beberapa fermentasi aerob, pengolahan limbah, dan operasi-operasi sejenis.



Gambar 2.2 Tipe *air-lift reactor*

Keuntungan penggunaan *air-lift reactor* dibanding reaktor konvensional lainnya, diantaranya:

1. Memiliki desain yang sederhana karena tidak menggunakan komponen mekanik yang bergerak.

Air-lift reactor memiliki konstruksi yang relatif sederhana karena tidak dilengkapi dengan pengaduk mekanik seperti *impeller* maupun poros pengaduk. Sirkulasi fluida di dalam reaktor dihasilkan oleh perbedaan densitas antara daerah *riser* dan *downcomer* akibat injeksi gas. Desain yang sederhana ini menyebabkan biaya perawatan lebih rendah, meminimalkan risiko kerusakan mekanik, serta meningkatkan keandalan operasi terutama untuk proses yang berlangsung secara kontinu (Li *et al.*, 2022).

2. Sirkulasi fluida dan pencampuran mudah dikendalikan melalui pengaturan laju alir gas.

Proses pencampuran pada *air-lift reactor* terjadi akibat aliran sirkulasi alami yang dihasilkan oleh gelembung gas. Intensitas sirkulasi dapat diatur dengan mengubah laju alir udara yang masuk ke dalam reaktor, sehingga tingkat pencampuran dan distribusi fluida dapat disesuaikan dengan kebutuhan proses. Sistem ini menghasilkan pencampuran yang baik tanpa memerlukan agitasi mekanik sehingga konsumsi energi relatif lebih rendah dibandingkan reaktor berpengaduk (Li *et al.*, 2022).

3. Memiliki distribusi waktu tinggal yang relatif lebih seragam.

Air-lift reactor memiliki pola sirkulasi fluida yang dapat menghasilkan distribusi waktu tinggal (*residence time distribution*) fase cair yang relatif lebih seragam. Kondisi ini memungkinkan fluida di dalam reaktor mengalami waktu tinggal yang lebih merata sehingga proses yang berlangsung di dalam reaktor dapat berlangsung secara lebih konsisten (Ham *et al.*, 2021).

4. Memiliki luas bidang kontak gas-cair yang tinggi dengan kebutuhan energi yang relatif rendah.

Udara yang dialirkan melalui *sparger* akan membentuk gelembung-gelembung kecil yang meningkatkan luas permukaan kontak antara fase gas dan fase cair. Luas kontak yang besar mempercepat perpindahan oksigen maupun komponen gas lainnya ke dalam cairan. Karena pencampuran diperoleh dari aerasi tanpa menggunakan pengaduk mekanik, kebutuhan energi untuk menghasilkan kontak gas-cair relatif lebih rendah (Li *et al.*, 2022).

5. Memiliki efisiensi perpindahan massa gas-cair yang tinggi.

Sirkulasi fluida yang baik serta luas permukaan kontak gas-cair yang besar menyebabkan koefisien perpindahan massa volumetrik gas-cair (K_{La}) pada *air-lift reactor* relatif tinggi. Kondisi ini meningkatkan laju perpindahan oksigen ke dalam cairan sehingga sangat sesuai untuk proses yang membutuhkan suplai oksigen tinggi, seperti fermentasi aerob maupun pengolahan limbah biologis (Li *et al.*, 2022).

6. Memungkinkan penggunaan reaktor berkapasitas besar untuk meningkatkan jumlah produk.

Air-lift reactor memiliki konstruksi yang sederhana dan tidak menggunakan komponen pengaduk mekanik yang bergerak, sehingga

memiliki potensi untuk dikembangkan pada kapasitas reaktor yang lebih besar. Peningkatan kapasitas reaktor memungkinkan volume bahan yang diproses menjadi lebih besar sehingga jumlah produk yang dihasilkan dapat meningkat. Namun, proses *scale-up* tetap perlu mempertimbangkan karakteristik hidrodinamika dan perpindahan massa agar kinerja reaktor dapat dipertahankan pada skala yang lebih besar (Li *et al.*, 2022).

Kelemahan *air-lift reactor* antara lain:

1. Biaya investasi dapat meningkat pada kapasitas reaktor yang besar.

Meskipun konstruksinya sederhana, pembuatan *air-lift reactor* berukuran besar memerlukan material dan sistem distribusi udara yang lebih kompleks sehingga biaya investasi awal dapat meningkat. Selain itu, kebutuhan peralatan pendukung seperti blower dan sistem distribusi gas juga turut memengaruhi biaya pembangunan reaktor (Li *et al.*, 2022).

2. Membutuhkan tekanan udara yang lebih tinggi pada reaktor berukuran besar.

Semakin tinggi kolom cairan di dalam reaktor, semakin besar tekanan hidrostatik yang harus diatasi oleh udara yang diinjeksikan. Oleh karena itu, pada reaktor dengan dimensi besar diperlukan tekanan udara yang lebih tinggi agar udara tetap dapat masuk dan membentuk gelembung secara efektif di dasar reaktor (Li *et al.*, 2022).

3. Kebutuhan energi aerasi meningkat pada kapasitas besar.

Pada skala industri, peningkatan volume reaktor menyebabkan kebutuhan udara juga meningkat sehingga blower harus bekerja lebih besar untuk mempertahankan laju alir gas yang diinginkan. Akibatnya, konsumsi energi pada sistem aerasi dapat menjadi salah satu komponen biaya operasi yang cukup signifikan (Li *et al.*, 2022).

4. Berpotensi mengalami pembentukan busa (*foaming*).

Pada proses tertentu, terutama yang melibatkan mikroorganisme, pembentukan busa dapat terjadi akibat aerasi yang berlangsung terus-menerus. Busa yang berlebihan dapat mengganggu pemisahan gas dan cairan, mengurangi efisiensi operasi, serta meningkatkan risiko keluarnya media dari dalam reaktor sehingga sering kali diperlukan penggunaan antifoam atau sistem pengendalian busa (Campenhausen *et al.*, 2023)

Dalam aplikasi *air-lift reactor* terdapat 2 hal yang mendasari mekanisme kerja dari reaktor tersebut, yaitu hidrodinamika dan perpindahan massa volumetrik gas-cair.

2.2 Hidrodinamika Reaktor

Di dalam perancangan bioreaktor, faktor yang sangat berpengaruh adalah hidrodinamika reaktor, perpindahan massa volumetrik, rheologi proses, dan morfologi produktifitas organisme. Hidrodinamika reaktor mempelajari perubahan dinamika cairan dalam reaktor sebagai akibat laju alir yang masuk reaktor dan karakteristik cairannya. Hidrodinamika reaktor meliputi *hold-up gas* (fraksi gas saat penghamburan) dan laju sirkulasi cairan. Kecepatan sirkulasi cairan dikontrol oleh *hold-up gas*, sedangkan *hold-up gas* dipengaruhi oleh kecepatan kenaikan gelembung. Sirkulasi juga mempengaruhi turbulensi, koefisien perpindahan massa dan panas serta tenaga yang dihasilkan.

Hold-up gas atau fraksi kekosongan gas adalah fraksi volume fase gas pada dispersi gas-cair atau *slurry*. *Hold-up gas* keseluruhan (ϵ).

$$\epsilon = \frac{V_G}{V_G + V_L} \quad (2.1)$$

dimana:

ϵ = *hold-up gas*

V_G = volume gas (cm^3)

V_L = volume cairan (cm^3)

Hold-up gas digunakan untuk menentukan waktu tinggal gas dalam cairan. *Hold-up gas* dan ukuran gelembung mempengaruhi luas permukaan gas cair yang diperlukan untuk perpindahan massa. *Hold-up gas* tergantung pada kecepatan kenaikan gelembung, luas gelembung, dan pola aliran. *Inverted manometer* adalah manometer yang digunakan untuk mengetahui beda tinggi cairan akibat aliran gas, yang selanjutnya dipakai pada perhitungan *hold-up gas* (ϵ) pada *riser* dan *downcomer*. Besarnya *hold-up gas* pada *riser* dan *downcomer* dapat dihitung dengan persamaan :

$$\epsilon = \frac{\rho_L}{\rho_L - \rho_g} \times \frac{\Delta h}{z} \quad (2.2)$$

$$\epsilon_r = \frac{\rho_L}{\rho_L - \rho_g} \times \frac{\Delta h_r}{z} \quad (2.3)$$

$$\epsilon_d = \frac{\rho_L}{\rho_L - \rho_g} \times \frac{\Delta h_d}{z} \quad (2.4)$$

dimana:

ϵ = *hold-up gas*

ϵ_r = *hold-up gas riser*

ϵ_d = *hold-up gas downcomer*

ρ_L = densitas cairan (g/cm^3)

ρ_g = densitas gas (g/cm^3)

Δh_r = perbedaan tinggi manometer *riser* (cm)

Δh_d = perbedaan tinggi manometer *downcomer* (cm)

z = perbedaan antara taps tekanan

Hold-up gas total dalam reaktor dapat dihitung dari keadaan tinggi dispersi pada saat aliran gas masuk reaktor sudah mencapai keadaan tunak (*steady state*). Persamaan untuk menghitung *hold-up gas* total adalah sebagai berikut :

$$\epsilon = \frac{h_0 - h_i}{h_0} \quad (2.5)$$

dimana:

ϵ = *hold-up gas*

h_0 = tinggi campuran gas setelah kondisi tunak (cm)

h_i = tinggi cairan mula-mula dalam reaktor (cm)

Hubungan antara *hold-up gas riser* (ϵ_r) dan *downcomer* (ϵ_d) dapat dinyatakan dengan persamaan 2.6 :

$$\epsilon = \frac{A_r \times \epsilon_r + A_d \times \epsilon_d}{A_r + A_d} \quad (2.6)$$

dimana:

A_r = luas bidang zona *riser* (cm^2)

A_d = luas bidang zona *downcomer* (cm^2)

Sirkulasi cairan dalam *air-lift reactor* disebabkan oleh perbedaan *hold-up gas riser* dan *downcomer*. Sirkulasi fluida ini dapat dilihat dari perubahan fluida, yaitu naiknya aliran fluida pada *riser* dan menurunnya aliran pada *downcomer*. Besarnya laju sirkulasi cairan pada *downcomer* (U_{Ld}) ditunjukkan oleh persamaan 2.7 dan laju sirkulasi cairan pada *riser* ditunjukkan oleh persamaan 2.8.

$$U_{Ld} = \frac{L_c}{t_c} \quad (2.7)$$

dimana:

U_{Ld} = laju sirkulasi cairan pada *downcomer* (cm/s)

L_c = panjang lintasan dalam reaktor (cm)

t_c = waktu (s)

Dikarenakan tinggi dan *volumetric* aliran *liquid* pada *riser* dan *downcomer* sama, maka hubungan antara laju aliran cairan pada *riser* dan *downcomer* yaitu:

$$U_{Lr} \times A_r = U_{Ld} \times A_d \quad (2.8)$$

dimana:

U_{Lr} = laju sirkulasi cairan *riser* (cm/s)

U_{Ld} = laju sirkulasi cairan *downcomer* (cm/s)

A_r = luas bidang zona *riser* (cm²)

A_d = luas bidang zona *downcomer* (cm²)

Waktu tinggal t_{Ld} dan t_{Lr} dari sirkulasi *liquid* pada *downcomer* dan *riser* tergantung pada *hold-up gas* seperti ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\frac{t_{Lr}}{t_{Ld}} = \frac{A_r (1 - \varepsilon_r)}{A_d (1 - \varepsilon_d)} \quad (2.9)$$

dimana:

t_{Lr} = waktu tinggal sirkulasi *liquid* pada *riser* (s)

t_{Ld} = waktu tinggal sirkulasi *liquid* pada *downcomer* (s)

A_r = luas bidang zona *riser* (cm²)

A_d = luas bidang zona *downcomer* (cm²)

ε_r = *hold-up gas riser*

ε_d = *hold-up gas downcomer*

2.3 Perpindahan Massa

Perpindahan massa antar fase gas-cair terjadi karena adanya beda konsentrasi antara kedua fase. Perpindahan massa yang terjadi yaitu oksigen dari fase gas ke fase cair. Kecepatan perpindahan massa ini dapat ditentukan dengan koefisien perpindahan massa.

Koefisien perpindahan massa volumetrik (K_{La}) adalah kecepatan spesifik dari perpindahan massa (gas terabsorpsi per unit waktu, per unit volume cairan, per beda konsentrasi). K_{La} tergantung pada sifat fisik dari sistem dan dinamika fluida. Terdapat 2 istilah tentang koefisien perpindahan massa volumetrik, yaitu:

1. Koefisien perpindahan massa fase cair (K_L), dipengaruhi oleh sifat fisik cairan dan kondisi hidrodinamika di sekitar antarmuka gas-cair.

2. Luas antarmuka gas-cair per satuan volume (a) dipengaruhi oleh ukuran dan distribusi gelembung serta *hold-up gas* di dalam reaktor.

Ketergantungan K_{La} pada energi masuk relatif kecil, dimana luas kontak merupakan fungsi dari sifat fisik, desain geometri, dan kondisi hidrodinamika. Luas kontak adalah parameter gelembung yang tidak bisa ditetapkan. Di sisi lain koefisien perpindahan massa pada kenyataannya merupakan faktor yang proporsional antara fluks massa dan substrat (atau

bahan kimia yang ditransfer), N_s , dan gradien yang mempengaruhi fenomena beda konsentrasi. Hal ini dapat dirumuskan dengan persamaan 2.10.

$$N = K_{La} (C_1 - C_2) \quad (2.10)$$

Dimana :

N = fluks massa

K_{La} = koefisien perpindahan massa volumetrik (1/detik)

C_1 = konsentrasi O_2 masuk (g/L)

C_2 = konsentrasi O_2 keluar (g/L)

Untuk perpindahan massa oksigen ke dalam cairan dapat dirumuskan sebagai kinetika proses, seperti di dalam persamaan 2.11.

$$\frac{dC}{dt} = K_{La} (C_1 - C_2) \quad (2.11)$$

Dimana :

C = konsentrasi udara (g/L)

Koefisien perpindahan massa volumetrik gas-cair merupakan fungsi dari laju alir udara atau kecepatan *superfital gas*, viskositas, dan luas area *riser*, dan *downcomer/geometric* alat.

Pengukuran koefisien perpindahan massa volumetrik gas-cair dapat dilakukan dengan metode sebagai berikut:

1. Metode OTR *Off-gas Analysis*

Metode *off-gas analysis* merupakan metode yang digunakan untuk menentukan *Oxygen Transfer Rate* (OTR) atau laju perpindahan oksigen dengan menganalisis komposisi gas buang (*off-gas*) yang keluar dari reaktor. Pada metode ini, udara dialirkan ke dalam reaktor menggunakan *flowmeter* sehingga laju alir gas dapat diketahui dan dikontrol. Selanjutnya, kandungan oksigen pada gas masuk dan gas keluar diukur menggunakan *gas analyzer* atau sensor gas. Berdasarkan prinsip neraca massa oksigen (*oxygen balance*), nilai OTR dihitung dari selisih jumlah oksigen yang masuk ke dalam reaktor dengan jumlah oksigen yang keluar bersama gas buang pada laju alir gas tertentu. Selisih tersebut menunjukkan jumlah oksigen yang telah berpindah dari fase gas ke fase cair sehingga laju perpindahan oksigen dapat diketahui. Dasar dari metode ini adalah persamaan perpindahan massa yang menyatakan bahwa laju perpindahan oksigen dari fase gas ke fase cair sebanding dengan koefisien perpindahan massa volumetrik gas-cair (K_{La}) dan gaya pendorong (*driving force*) berupa selisih antara konsentrasi oksigen jenuh di dalam cairan dengan konsentrasi oksigen

terlarut pada kondisi aktual. Hubungan tersebut dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$OTR = K_{La}(C^* - C_L) \quad (2.12)$$

dimana,

OTR = *Oxygen Transfer Rate* atau laju perpindahan oksigen dari fase gas ke fase cair (g/L.s)

K_{La} = koefisien perpindahan massa volumetrik gas-cair (1/s)

C^* = konsentrasi oksigen jenuh pada kondisi kesetimbangan antara fase gas dan fase cair (g/L)

C_L = konsentrasi oksigen terlarut aktual di dalam fase cair (g/L)

Nilai C^* dipengaruhi oleh temperatur dan tekanan. Sementara itu, nilai C_L dapat diperoleh melalui dua pendekatan. Pendekatan pertama adalah dengan mengukur konsentrasi oksigen terlarut secara langsung menggunakan *dissolved oxygen* (DO) meter selama proses berlangsung. Pendekatan kedua dilakukan dengan metode kimia, yaitu dengan menggunakan reaksi kimia yang mengonsumsi oksigen untuk menghilangkan oksigen terlarut sehingga konsentrasi oksigen terlarut dapat diasumsikan mendekati nol ($C_L \approx 0$) (Schulte *et al.*, 2025).

2. Metode Dinamik

Metode dinamik (*Dynamic Method*) merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menentukan koefisien perpindahan massa volumetrik gas-cair (K_{La}). Prinsip metode ini didasarkan pada perubahan konsentrasi oksigen terlarut (*dissolved oxygen*) di dalam fase cair terhadap waktu setelah proses aerasi dimulai. Sebelum pengukuran dilakukan, larutan terlebih dahulu dideoksigenasi hingga konsentrasi oksigen mendekati nol menggunakan gas inert seperti nitrogen atau melalui reaksi kimia yang mengonsumsi oksigen. Selanjutnya, udara dialirkan ke dalam sistem sehingga oksigen berdifusi dari fase gas ke fase cair dan konsentrasi oksigen terlarut meningkat secara bertahap hingga mencapai kondisi jenuh. Perubahan konsentrasi oksigen tersebut direkam secara kontinu menggunakan DO meter, kemudian data yang diperoleh dianalisis berdasarkan persamaan perpindahan massa untuk menentukan nilai K_{La} (Ferro & Contreras, 2026).

3. Metode Serapan Kimia

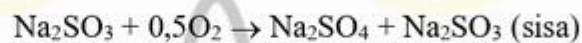
Metode serapan kimia (*Chemical Absorption Method*) merupakan metode yang digunakan untuk menentukan koefisien perpindahan massa volumetrik gas-cair (K_{La}) dengan memanfaatkan reaksi kimia

antara gas yang diabsorpsi (O_2 atau CO_2) dan larutan penyerap (Na_2SO_3 atau Na_2CO_3). Pada metode ini, gas yang berpindah dari fase gas ke fase cair akan segera bereaksi dengan larutan penyerap sehingga konsentrasi gas terlarut di dalam fase cair tetap rendah atau mendekati nol. Kondisi tersebut mempertahankan gaya pendorong (*driving force*) perpindahan massa tetap tinggi sehingga laju perpindahan massa dapat diamati dan dianalisis dengan lebih akurat. Nilai K_{La} kemudian ditentukan berdasarkan laju absorpsi gas, perubahan konsentrasi larutan akibat reaksi kimia, serta karakteristik sistem perpindahan massa (Wang *et al.*, 2024).

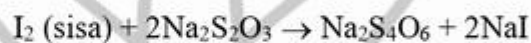
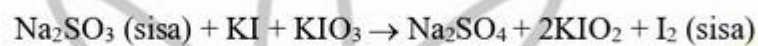
4. Metode Sulfit

Metode ini berdasarkan pada reaksi reduksi natrium sulfit. Mekanisme reaksi yang terjadi:

Reaksi dalam reaktor:



Reaksi saat Analisa:



Mol Na_2SO_3 awal (a)

$$= \frac{N \text{ } Na_2SO_3}{eq} \times V \text{ reaktor} \quad (2.13)$$

Mol I_2 excess (b)

$$= \frac{N \text{ } KI}{eq} \times V \text{ } KI \quad (2.14)$$

Mol Na_2SO_3 sisa (c)

$$= b - \frac{1}{2} \left(\frac{N \text{ } Na_2S_2O_3}{eq} \times V \text{ } Na_2S_2O_3 \right) \quad (2.15)$$

Mol O_2 yang bereaksi (d)

$$= \frac{1}{2} \times (a - c) \quad (2.16)$$

O_2 yang masuk reaktor (e)

$$= \frac{d \times BM \text{ } O_2}{t \times 60 \times \text{volume reaktor}} \quad (2.17)$$

Koefisien perpindahan massa volumetrik gas-cair (K_{La})

$$= \frac{e}{0,00843} \quad (2.18)$$

Nilai konstanta 0,00843 pada persamaan K_{La} diperoleh dari persamaan *volumetric O_2 transfer coefficient* sebagai berikut:

$$K_{La} = \frac{nO_2}{\Delta C} \quad (2.19)$$

dimana:

nO_2 = Fluks perpindahan massa O_2

ΔC = *Concentration driving force* kedua fase

Pada metode oksidasi sulfit, oksigen yang berpindah ke dalam fase cair akan segera dikonsumsi melalui reaksi oksidasi sulfit. Oleh karena itu, konsentrasi oksigen terlarut dalam cairan dapat dianggap mendekati nol ($C_L \approx 0$). Dengan demikian, *concentration driving force* dapat dinyatakan sebagai:

$$\Delta C = C^* - C_L \quad (2.20)$$

karena $C_L \approx 0$, maka:

$$\Delta C \approx C^* \quad (2.21)$$

Konsentrasi oksigen jenuh dalam air (C^*) pada temperatur $25^\circ C$ dan tekanan 1 atm adalah sebesar 8,43 mg/L (Merkel & Planer-Friedrich, 2008).

$$C^* = 8,43 \text{ mg/L} \quad (2.22)$$

Sehingga:

$$\Delta C = 8,43 \text{ mg/L} = 0,00843 \text{ g/L} \quad (2.23)$$

Jadi, nilai K_{La} adalah:

$$K_{La} = \frac{nO_2}{\Delta C} = \frac{e}{0,00843} \quad (2.24)$$

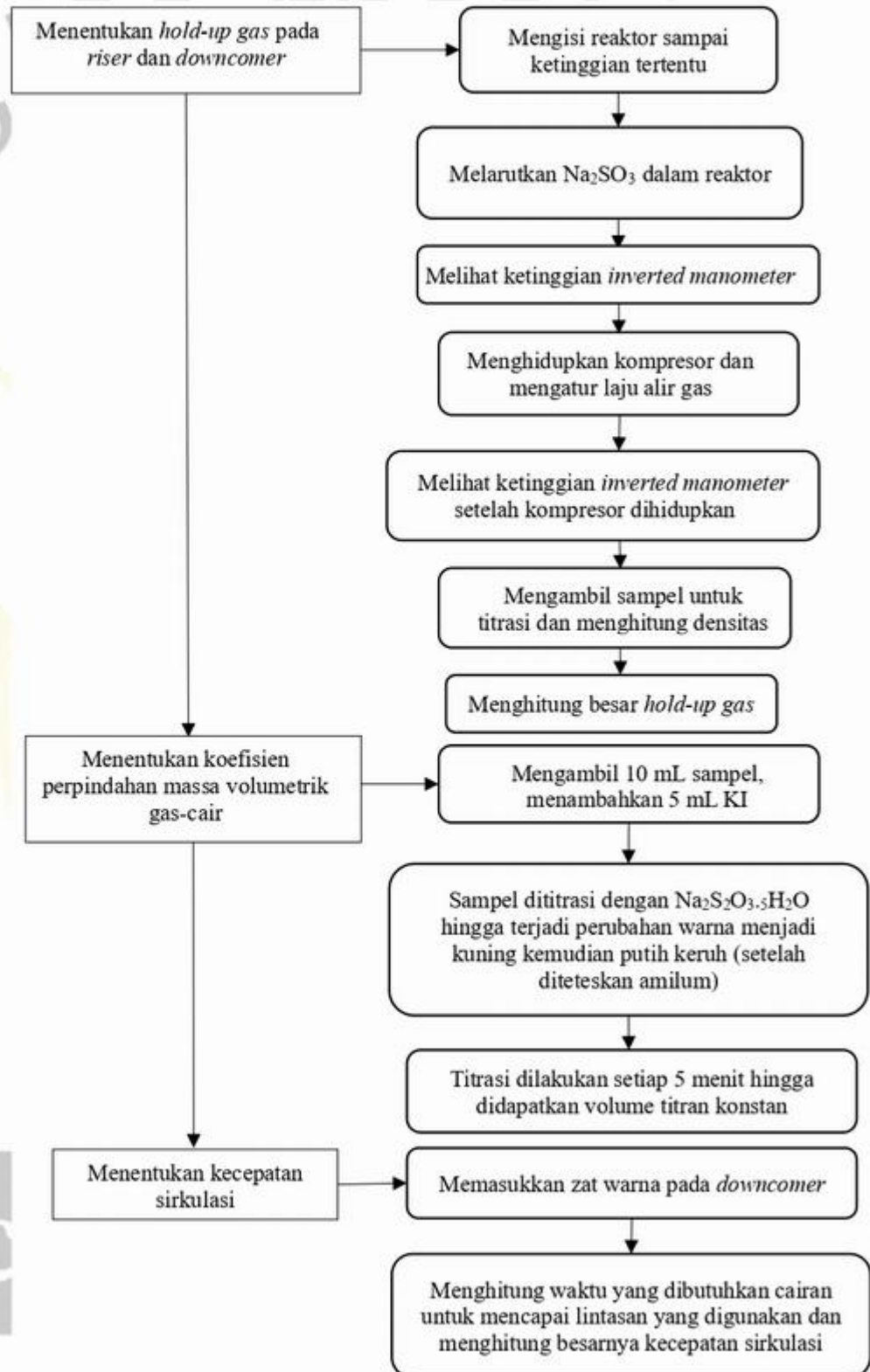
Process

Laboratory

BAB III
METODE PRAKTIKUM

3.1 Rancangan Percobaan

3.1.1 Rancangan Praktikum



Gambar 3.1 Skema rancangan praktikum

3.1.2 Penetapan Variabel

- a. Variabel tetap :
- b. Variabel berubah :

3.2 Bahan dan Alat yang Digunakan

3.2.1 Bahan yang digunakan

1. $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
2. KI
3. Na_2SO_3
4. Larutan amilum
5. Zat warna
6. *Aquadest*

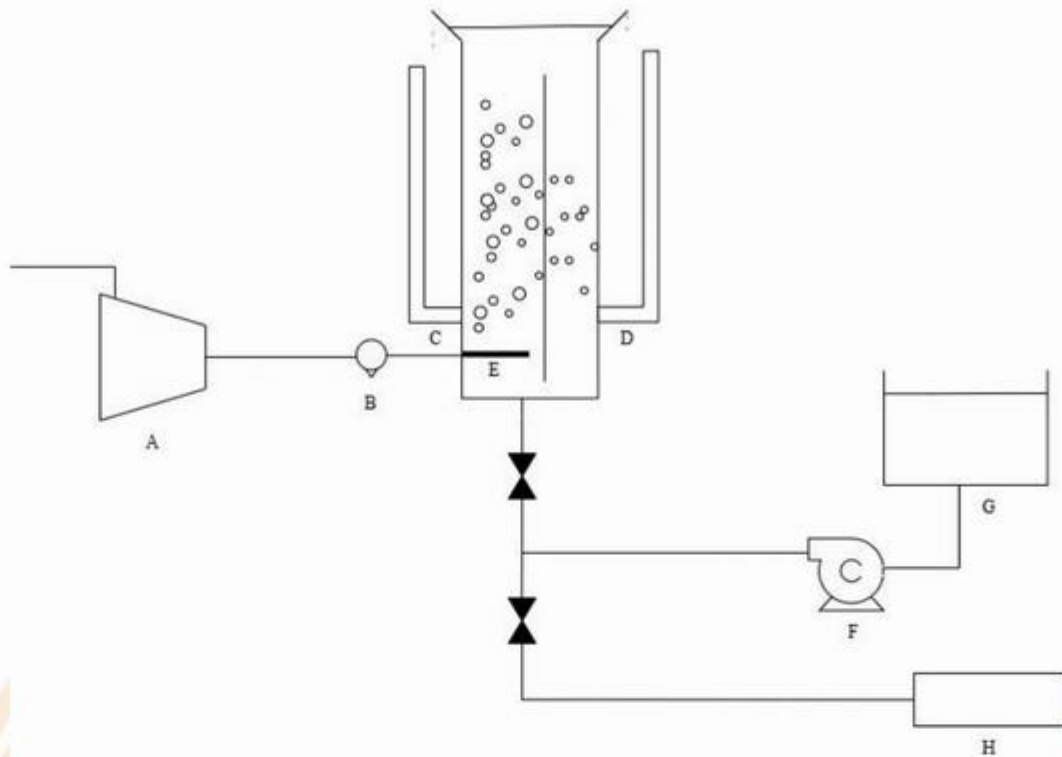
3.2.2 Alat yang Digunakan

1. Buret, statif, klem
2. Gelas arloji
3. *Beaker glass*
4. Rotameter
5. Erlenmeyer
6. *Inverted manometer*
7. Gelas ukur
8. *Sparger*
9. Pipet tetes
10. Tangki cairan
11. Kompresor
12. Reaktor
13. Sendok reagen
14. Piknometer

Process

Laboratory

3.2.3 Gambar Alat



Gambar 3.2 Rangkaian alat hidrodinamika reaktor

Keterangan:

- A. Kompresor
- B. *Flowmeter*
- C. *Inverted manometer area riser*
- D. *Inverted manometer area downcomer*
- E. *Sparger*
- F. Pompa
- G. Tangki penampung
- H. Pembuangan limbah reaktor

3.2.4 Prosedur Praktikum

1. Menentukan *hold-up gas* pada *riser* dan *downcomer*
 - a. Mengisi reaktor dengan air dan menghidupkan pompa, setelah reaktor terisi air dengan ketinggian ... cm maka pompa dimatikan.
 - b. Menambahkan Na_2SO_3 ... N ke dalam reaktor, ditunggu 5 menit agar larutan Na_2SO_3 larut dalam air.
 - c. Melihat ketinggian *inverted manometer*.
 - d. Hidupkan kompresor kemudian melihat ketinggian *inverted manometer* setelah kompresor dihidupkan.
 - e. Ambil sampel untuk titrasi dan menghitung densitasnya.

- f. Menghitung besarnya *hold-up gas*.
 - g. Mengulangi langkah-langkah tersebut untuk variabel operasi lainnya.
2. Menentukan koefisien perpindahan massa volumetrik gas-cair
- a. Mengambil sampel sebanyak 10 mL.
 - b. Menambahkan KI sebanyak 5 mL ke dalam sampel.
 - c. Menitrasi dengan $\text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$... N sampai terjadi perubahan warna dari coklat tua menjadi kuning jernih.
 - d. Menambahkan 3 tetes amilum.
 - e. Menitrasi sampel kembali dengan larutan $\text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$... N.
 - f. TAT didapat setelah warna putih keruh.
 - g. Mencatat kebutuhan titran.
 - h. Ulangi sampai volume titran tiap 5 menit dan diakhiri setelah titrasi tiga kali konstan.
 - i. Mengulangi langkah-langkah tersebut untuk variabel operasi lainnya.
3. Menentukan kecepatan sirkulasi
- a. Merangkai alat yang digunakan.
 - b. Mengisi reaktor dengan air dan Na_2SO_3 ... N.
 - c. Menghidupkan kompresor.
 - d. Memasukkan zat warna secukupnya pada reaktor *downcomer*.
 - e. Mengukur waktu yang dibutuhkan oleh cairan dengan indikator zat warna tertentu untuk mencapai lintasan yang telah digunakan.
 - f. Menghitung besarnya kecepatan sirkulasi.
 - g. Mengulangi langkah-langkah tersebut untuk variabel operasi lainnya.

Process

Laboratory

DAFTAR PUSTAKA

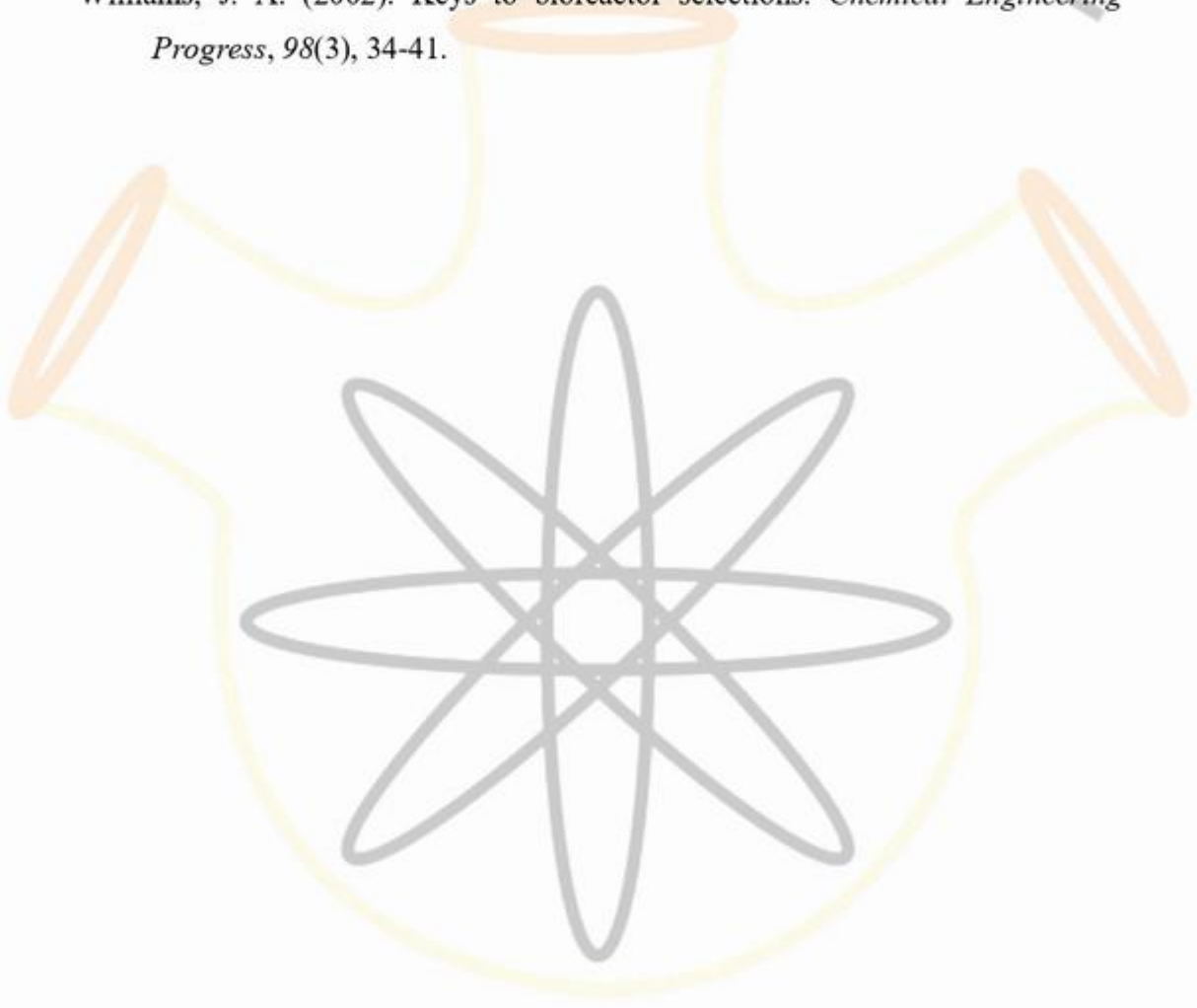
- Chisti, Y., Wenge, F., & Moo-Young, M. (1995). Relationship between riser and downcomer gas hold-up in internal-loop airlift reactors without gas-liquid separators. *The Chemical Engineering Journal and The Biochemical Engineering Journal*, 57(1), B7-B13.
- Christi, M. Y. (1989). *Air-lift Bioreactor*. El Sevier Applied Science: London.
- Ferro Orozco, A. M., & Contreras, E. M. (2026). Development of an automated dynamic method for kLa determination and its application to pollutant-influenced oxygen transfer. *Environmental Technology*, 47(4), 575-584.
- Ham, P., Bun, S., Painmanakul, P., & Wongwailikhit, K. (2021). Effective analysis of different gas diffusers on bubble hydrodynamics in bubble column and airlift reactors towards mass transfer enhancement. *Processes*, 9(10), 1765.
- Haryani, K. (2011). Studi kinetika pertumbuhan *Aspergillus niger* pada fermentasi asam sitrat dari kulit nanas dalam reaktor air-lift external loop. *Momentum*, 7(1), 48-52.4
- Im, H., Park, J., & Lee, J. W. (2019). Modeling and experiment of gas desorption of bubble column with an external loop in the heterogeneous flow regime. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 36(10), 1680-1687.
- Li, L., Xu, X., Wang, W., Lau, R., & Wang, C. H. (2022). Hydrodynamics and mass transfer of concentric-tube internal loop airlift reactors: A review. *Bioresour technology*, 359, 127451.
- Merkel, B. J., & Planer-Friedrich, B. (2008). *Groundwater geochemistry: a practical guide to modeling of natural and contaminated aquatic systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Popovic, M. K., & Robinson, C. W. (1989). Mass transfer studies of external-loop bubble column. *AIChE journal*. 35(3), 393-405. airlifts and <https://doi.org/10.1002/aic.690350307>.
- Schulte, A., Brockmann, J., Müller, N., Anderlei, T., & Büchs, J. (2025). A new approach to off-gas analysis for shaken bioreactors showing high CTR and RQ accuracy. *Journal of biological engineering*, 19(1), 11.
- Uyar, B., Ali, M. D., & Uyar, G.E. O. (2024) Design parameters comparison of bubble column, airlift and stirred tank photobioreactors for microalgae production. *Bioprocess and Biosystems Engineering* <https://doi.org/10.1007/s00449-023-02952-8> 47(2), 195-209.
- von Campenhausen, M., Demling, P., Bongartz, P., Scheele, A., Tiso, T., Wessling, M., ... & Jupke, A. (2023). Novel multiphase loop reactor with improved

aeration prevents excessive foaming in Rhamnolipid production by *Pseudomonas putida*. *Discover Chemical Engineering*, 3(1), 2.

Wang, H., Zhang, R., Ren, Y., & Zhang, L. (2024). A convenient method for measuring gas-liquid volumetric mass transfer coefficient in micro reactors. *Chinese Chemical Letters*, 35(4), 108833.

Widayat. (2004). Pengaruh laju alir dan viskositas terhadap perpindahan massa gas-cair fluida non Newtonian dalam reaktor air lift rectangular. *Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses*, I-9-1–I-9-4.

Williams, J. A. (2002). Keys to bioreactor selections. *Chemical Engineering Progress*, 98(3), 34-41.



Process

Laboratory

CHEMICAL

IDENTIFIKASI BAHAYA DAN ANALISA RESIKO

MATERI : HIDRODINAMIKA REAKTOR

IDENTIFIKASI BAHAYA (IB)

A Mekanik		D Lingkungan		E Bahan kimia		G Bahaya lainnya	
A1 Penanganan Manual	√	D1 Kebisingan	√	E1 Racun	√	G1 Gas terkompresi	√
A2 Bagian yang bergerak	√	D2 Getaran	√	E2 Iritan	√	G2 Radiasi pengion	
A3 Bagian yang berputar	√	D3 Penerangan		E3 Korosif	√	G3 Radiasi UV	
A4 Pemotongan		D4 Kelembaban		E4 Karsinogenik		G4 Kelelahan	
B Biologi		D5 Temperatur		E5 Mudah terbakar		G5 Ruang sempit	
B1 Bakteri		D6 Bahaya perjalanan		E6 Mudah meledak		G6 Penuh sesak	
B2 Virus		D7 Permukaan yang licin	√	E7 Cryogenics		G7 Termometer	
B3 Jamur		D8 Limbah padat		F Peralatan			
C Listrik		D9 Kualitas udara		F1 Bejana tekan			
C1 Voltase tinggi		D10 Pekerjaan soliter		F2 Peralatan panas			
C2 Listrik statis	√	D11 Percikan/tetes/banjir	√	F3 Laser			

Process

Laboratory

CHEMICAL

DETAIL RESIKO

IB	Resiko (setelah tindakan pengendalian)				Identifikasi Resiko	Tindakan Pengendalian Untuk Meminimalisir Resiko	Tindakan Pertolongan Pertama
	Tinggi	Sedang	Rendah	Minimal			
1. PREPARASI / TAHAP AWAL							
	√				- Reagen tumpah saat sedang menimbang - Reagen tumpah saat memasukkan titran ke dalam buret - Reagen tumpah saat sedang mengukur densitas dengan piknometer - Terkena paparan reagen	Menggunakan alat pelindung diri (APD) lengkap seperti jas lab, sarung tangan lateks, kacamata pelindung, masker dan menggunakan sepatu.	- Menghentikan sumber tumpahan - Menjauh dari tumpahan reagen - Membersihkan tumpahan reagen - Apabila terhirup, pergi ke tempat dengan udara segar - Apabila terkena kulit dan mata, bilaslah dengan air yang banyak - Apabila tertelan, minum air putih sebanyak 2 gelas - Melepaskan pakaian yang terkontaminasi reagen
	√				- Air tumpah pada saat pengisian ke ember penampungan sehingga dapat menyebabkan terpeleset - Air tumpah pada saat pengisian ke reaktor sehingga dapat menyebabkan terpeleset	- Melakukan pengisian air dengan hati – hati - Membuka keran secara perlahan agar air mengalir dengan kecepatan rendah	- Menjauh dari tumpahan air - Membersihkan tumpahan air - Apabila terluka, bersihkan dan obati dengan P3K

Process

Laboratory

CHEMICAL

√	- Terjatuh pada saat memasukkan reagen - Terjatuh pada saat pengambilan sampel	- Menaiki kursi dengan hati – hati - Memastikan kursi yang akan digunakan kokoh dan tidak rapuh - Meminta bantuan orang lain untuk memegang kursi	Apabila terluka, bersihkan dan obati dengan P3K
√	- Saat menyalakan pompa terdapat resiko tersengat listrik atau pompa terbakar	- Memastikan kabel dan colokan sumber listrik tidak basah ataupun terkelupas - Memakai APD lengkap	- Mematikan sumber arus listrik - Dorong tubuh korban dengan benda isolator - Cari pertolongan medis jika terdapat luka bakar - Gunakan APAR apabila terjadi kebakaran pada pompa
2. PERCOBAAN UTAMA			
√	- Saat menyalakan kompresor terdapat resiko tersengat listrik/korslet atau kompresor terbakar - Saat menyalakan kompor terdapat resiko tersengat listrik	- Memastikan kabel dan colokan sumber listrik tidak basah ataupun terkelupas - Memakai APD lengkap - Menggunakan <i>ear plug</i>	- Mematikan sumber arus listrik - Dorong tubuh korban dengan benda isolator - Cari pertolongan medis jika terdapat luka bakar - Gunakan APAR apabila terjadi kebakaran pada pompa - Mematikan sumber kebisingan

CHEMICAL

	- Kebisingan akibat suara kompresor	- Mengistirahatkan telinga
√	- Terjatuh pada saat memasukkan zat warna - Terjatuh pada saat pengambilan sampel	- Menaiki kursi dengan hati – hati - Memastikan kursi yang akan digunakan kokoh dan tidak rapuh - Meminta bantuan orang lain untuk memegang kursi Apabila terluka, bersihkan dan obati dengan P3K
3. ANALISA / TAHAP AKHIR		
√	- Terkena tetesan titran saat melakukan titrasi	Menggunakan alat pelindung diri (APD) lengkap seperti jas lab, sarung tangan lateks, kacamata pelindung, masker dan menggunakan sepatu. - Apabila terkena kulit dan mata, bilaslah dengan air yang banyak - Apabila tertelan, minum air putih sebanyak 2 gelas
√	- Terjadi tumpahan air pada saat proses drainase yang	Melakukan pembukaan valve sesuai prosedur agar air yang - Menjauh dari tumpahan air - Membersihkan tumpahan air

Process

Laboratory

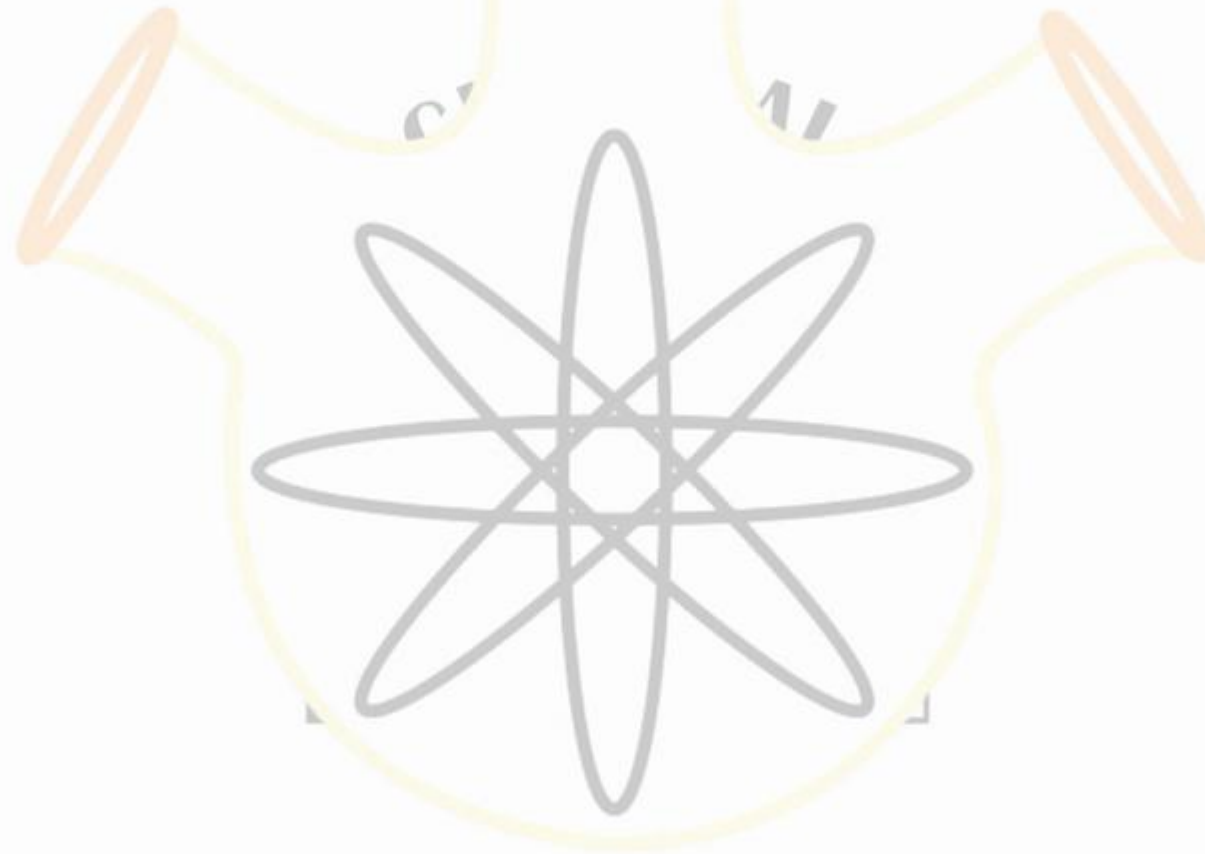
CHEMICAL

dapat
terpeleset

mengakibatkan

keluar maksimal dan langsung -
ke tempat pembuangan

- Apabila terluka, bersihkan dan
obati dengan P3K



Process

Laboratory