

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perpindahan massa antar fase sering dijumpai di setiap proses dalam teknik kimia, seperti humidifikasi, dehumidifikasi, ekstraksi cair-cair, *leaching*, distilasi, absorpsi, dan pengeringan (Geankoplis, 2003; Treybal, 1980). Kontak antar fase gas dan cairan dapat terjadi dalam berbagai cara, misalnya peristiwa ketika cairan mengalir melalui dinding kolom dalam bentuk lapisan tipis dan aliran gas yang mengalir dari dasar kolom. Perpindahan massa yang terjadi dapat berupa fase gas ke cair atau fase cair ke gas. Pada humidifikasi, terjadi proses perpindahan massa berupa air dari fase cair ke dalam campuran gas yang terdiri dari udara dan uap air. Pada humidifikasi, gradien konsentrasi dan proses difusi hanya terjadi pada fase gasnya (Geankoplis, 2003). Sementara pada absorpsi, perpindahan massa yang terjadi dari fase gas ke fase cair, gradien konsentrasi dan difusi terjadi pada fase gas dan cairnya.

Salah satu alat yang menggunakan dan terjadi proses perpindahan massa dari cair ke gas dan gas ke cair adalah *wetted wall column* (WWC). *Wetted wall column* dapat digunakan sebagai suatu model alat untuk mempelajari fenomena perpindahan yang terjadi pada permukaan dua fluida. Pada WWC memungkinkan kita untuk dapat mengetahui luas antarmuka fluida secara akurat, dibandingkan pada *packed column* yang lapisan cairannya tidak dapat ditentukan. Dari WWC kita dapat menentukan nilai koefisien perpindahan massa dari fase gas ke cairan (kgg) atau sebaliknya (kgl) dari suatu sistem (Mardina, 2007). *Wetted wall column* telah sering digunakan dalam proses difusi seperti absorpsi gas, humidifikasi, dan ekstraksi.

1.2 Perumusan Masalah

Praktikum *wetted wall column* (WWC) merupakan praktikum yang membahas tentang perpindahan massa antar fasa, yaitu gas dan cairan. Pada praktikum ini, dilakukan proses humidifikasi pada *wetted wall column* untuk mendapatkan besarnya koefisien perpindahan massa (kgl), kondisi operasi (temperatur, tekanan, laju alir udara, dan laju alir air) yang dapat mempengaruhi besarnya kgl dan nilai bilangan tak berdimensi, yaitu bilangan Reynold terhadap bilangan Sherwood.

1.3 Tujuan Percobaan

1. Menentukan besarnya kgl pada berbagai variabel operasi.
2. Menentukan pengaruh bilangan tak berdimensi bilangan Reynold terhadap bilangan Sherwood.

1.4 Manfaat Praktikum

1. Mengetahui kondisi operasi yang mempengaruhi kgl.
2. Mengetahui fenomena yang terjadi pada saat praktikum *wetted wall column*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Humidifikasi

Humidifikasi adalah proses penambahan uap air pada udara yang dapat terjadi ketika udara kontak dengan air sehingga terjadi penguapan air ke dalam campuran gas yang terdiri dari udara dan uap air. Humidifikasi dapat terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi atau tekanan parsial uap air antara udara dan air pada antarmuka cairan-gas (*liquid-gas interface*). Dalam prosesnya, humidifikasi bergantung pada beberapa parameter, sebagai berikut:

- *Dry Bulb Temperature*

Dry bulb temperature adalah temperatur yang terbaca pada termometer tanpa pengaruh kelembapan. Temperatur *dry bulb* disebut sebagai temperatur udara aktual sehingga tidak dapat menunjukkan adanya jumlah uap air di udara.

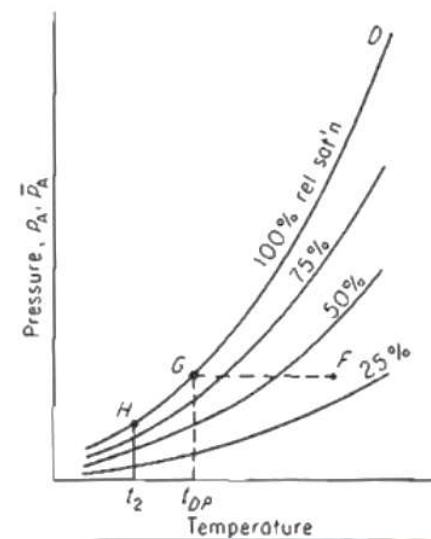
- *Wet Bulb Temperature*

Wet bulb temperature adalah temperatur yang terbaca ketika sejumlah kecil cairan yang menguap ke dalam campuran udara-uap air tidak jenuh dalam jumlah besar hingga tercapai keadaan *steady state* (laju penguapan = laju pendinginan).

Metode yang dapat digunakan untuk mengukur temperatur *wet bulb* adalah dengan menggunakan termometer yang diselubungi kapas atau kain basah kemudian dialirkan gas yang mempunyai *properties* $T_{dry\ bulb}$ dan *humidity* H . Temperatur akan menunjukkan penurunan suhu karena terjadi penguapan air ke aliran gas air. Penurunan temperatur ini pada akhirnya akan mencapai nilai yang lebih rendah dari $T_{dry\ bulb}$ dan berhenti turun saat tercapai keseimbangan. Temperatur inilah yang disebut $T_{wet\ bulb}$. Dalam penerapannya, $T_{wet\ bulb}$ digunakan untuk menentukan *humidity* dari campuran udara-uap air.

- *Dew Point*

Dew point adalah temperatur campuran udara-uap air yang menjadi jenuh ketika didinginkan pada tekanan konstan.



Gambar 2.1 Dew point pada psychometric chart

Pada gambar 2.1 dapat dilihat, ketika sebuah campuran udara-uap air F didinginkan pada tekanan konstan ($F \rightarrow G$), udara-uap air akan menjadi lebih jenuh. Campuran udara-uap air akan menjadi jenuh pada titik T_{DP} . Saat temperurnya kembali diturunkan serendah mungkin, uap air akan berubah fase menjadi cairan melalui kondensasi.

- Entalpi

Entalpi adalah banyaknya kalor (energi) yang ada dalam udara setiap satuan massa.

- Relative humidity

Relative humidity adalah perbandingan antara tekanan parsial uap air dengan tekanan uap jenuh pada suhu *dry bulb*. *Relative humidity* menunjukkan seberapa jenuh udara dengan uap air.

$$RH = \left(\frac{P_{\text{uap air}}}{P_{\text{sat}}} \right) \times 100\% \quad (2.1)$$

- Persen absolute humidity

Persen *absolute humidity* atau persen *saturation* adalah rasio massa uap air aktual terhadap massa uap air maksimum (jenuh) yang ada pada udara.

$$\% \text{ absolut humidity} = \frac{Y'}{Y_s} \times 100\% \quad (2.2)$$

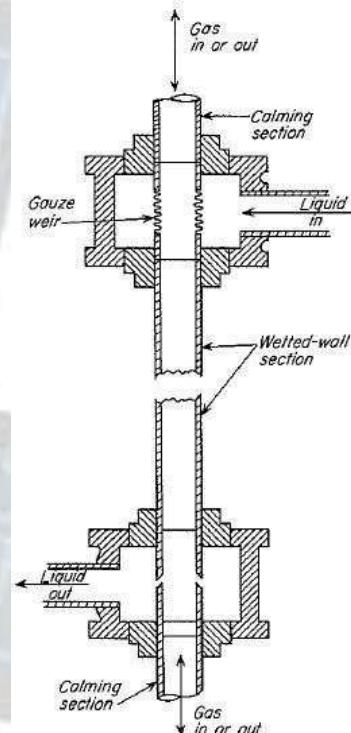
Absolute humidity dinyatakan dengan Y' yang merupakan rasio massa uap air / massa udara kering, sedangkan Y'_s merupakan *saturated absolute humidity*.

$$Y = \frac{P_A}{P_t - P_A} \quad (2.3)$$

$$Y' = Y \cdot \frac{P_A}{P_t - P_A} \frac{BM_A}{BM_A}$$

(2.4)

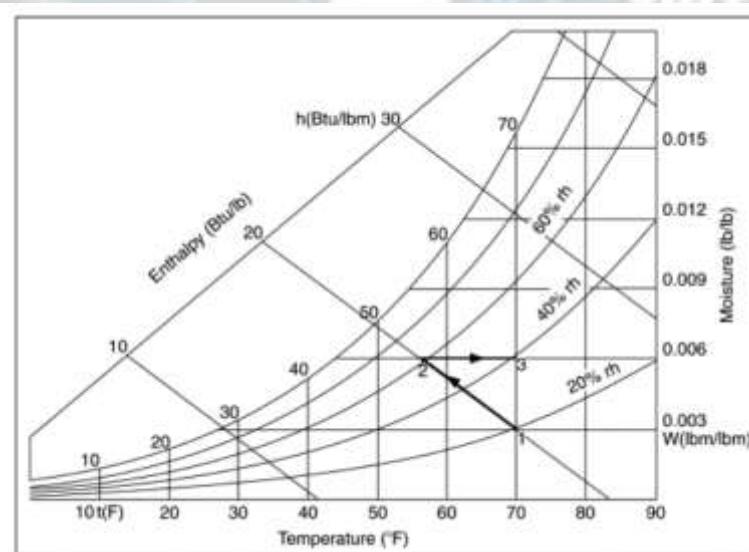
2.2 Wetted Wall Column



Gambar 2.2 Wetted wall column

Wetted wall column adalah kolom pipa vertikal yang dapat terjadi perpindahan massa dan panas antara dua fluida yang mengalir di dalam kolom. Cairan mengalir dari atas kolom kemudian membasahi dinding kolom vertikal membentuk lapisan tipis (*film*), sedangkan gas dapat mengalir secara *co-current* atau *counter current*. *Wetted wall column* dapat digunakan sebagai suatu model alat untuk mempelajari fenomena perpindahan yang terjadi pada antarmuka gas-cair (*gas-liquid interface*). Pada WWC memungkinkan kita untuk dapat mengetahui luas antarmuka fluida secara akurat, dibandingkan pada *packed column* yang lapisan cairannya tidak dapat ditentukan. Pada cairan yang mengalir ke bawah membentuk lapisan tipis (*film*) di kolom vertikal, perpindahan massa dan panas dapat terjadi pada antarmuka gas-cair atau permukaan kedua fluida. Proses perpindahan massa dapat terjadi dari gas ke cairan (*gas absorption*) dan dari cairan ke gas (*humidification/evaporation*). Humidifikasi dapat terjadi melalui proses penguapan cairan ke udara dengan menggunakan panas yang lepas dari udara, besar penurunan suhu udara merupakan panas latent penguapan.

Ketika dinding kolom dibasahi dan terisolasi dari lingkungannya, maka sistem operasi yang terjadi merupakan sistem adiabatik. Air dialirkan dari puncak kolom melalui *gauze* *weir* supaya air dapat mengalir pada permukaan dinding kolom membentuk lapisan tipis, udara mengalir dari dasar kolom ke puncak kolom akan kontak dengan air yang mengalir pada permukaan kedua fluida, sistem operasi tersebut digambarkan sebagai humidifikasi adiabatik. Dinding kolom yang dibasahi berfungsi sebagai *humidifier* adiabatik, yaitu dengan mengontrol suhu air di kolom dan penambahan air ke kolom juga dilakukan pada suhu yang terkontrol. Diasumsikan suhu air sepanjang kolom dibuat konstan. Massa dari cairan ditransfer dengan proses penguapan, air membutuhkan panas laten untuk menguap, panas dari udara akan digunakan oleh air sebagai panas laten penguapan. Suhu udara akan menurun dan terhumidifikasi. Proses tersebut terjadi tanpa adanya panas yang masuk dan keluar sistem (adiabatik) karena total energi panas (entalpi) dalam udara tetap sama. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.2, suhu udara menurun pada garis entalpi secara konstan (Montgomery & McDowall, 2008).



Gambar 2.3 Proses humidifikasi pada *psychometric chart*

2.3 Bilangan Tak Berdimensi

Terdapat beberapa faktor bilangan yang mempengaruhi koefisien perpindahan massa (kg/l) diantaranya meliputi:

- Bilangan Reynold (N_{Re})

Dalam mekanika fluida, bilangan Reynold adalah rasio antara gaya inersia (vsρ) terhadap gaya viskos (μ/L) yang menguatifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu. Bilangan ini digunakan untuk mengidentifikasi jenis aliran yang

berbeda, misalnya laminar dan turbulen. Dengan perumusan nilai bilangan sebagai berikut.

$$Re = \frac{\rho v_s L}{\mu} = \frac{v_s L}{v} = \frac{\text{Gaya inersia}}{\text{Gaya viskos}}$$

Dimana:

- v_s = kecepatan fluida
- L = panjang karakteristik
- μ = viskositas absolut fluida dinamis
- v = viskositas kinematik fluida: $v = \mu / \rho$
- ρ = kerapatan (densitas) fluida .

- Bilangan Schmidt

Bilangan Schmidt merupakan rasio dari momentum dan difusivitas massa. Bilangan ini digunakan untuk menentukan sifat aliran-aliran fluida dimana pada aliran tersebut proses konveksi-difusi momentum dan massa berlangsung secara simultan. Dengan perumusan sebagai berikut.

$$Sc = \frac{V}{D} = \frac{\mu}{\rho D} \quad (2.3)$$

Dimana:

- V = viskositas kinematis ($\frac{\mu}{\rho}$) dalam satuan unit (m^2/s)
- D = difusivitas massa (m^2/s)
- μ = viskositas dinamis dari aliran fluida ($N.s/m^2$)
- ρ = densitas dari fluida (kg/m^3)

- Bilangan Sheerwood

Bilangan Sheerwood (Nusselt) merupakan bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk mengetahui besarnya koefisien tranfer massa (kgl) dimana merupakan rasio dari koefisien konveksi transfer massa dengan difusivitas transfer massa.

$$Sh = \frac{K \cdot L}{D} \quad (2.4)$$

Dimana:

- L = panjang kolom perpindahan massa (m)
- D = difusivitas massa ($m^2.s^{-1}$)
- K = Koefisien transfer massa ($m.s^{-1}$)

2.4 Perpindahan Massa

Suatu proses dimana terjadi suatu perpindahan suatu unsur pokok dari daerah yang berkonsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah dinamakan perpindahan massa. Perpindahan massa dari daerah yang berkonsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah dapat diamati dengan kristal KMnO₄ yang dicelupkan pada *beaker glass* berisi air. Kristal KMnO₄ akan larut dalam air yang ditunjukkan dengan munculnya warna ungu pada air di sekitar kristal, pada daerah ini menunjukkan konsentrasi KMnO₄ pada air yang tinggi. Munculnya gradien konsentrasi ini, menjadikan KMnO₄ dapat berdifusi ke daerah air dengan konsentrasi rendah. Proses ini terjadi secara alami, tidak tergantung pada konveksi dalam sistem. Proses ini didefinisikan sebagai difusi molekular.

Pada persamaan perpindahan massa ditunjukkan hubungan antara *flux* dari substansi yang terdifusi dengan gradien konsentrasi.

$$J_{Ay} = -D_{AB} \frac{d\tau_A}{dy} \quad (2.5)$$

J_{Ay} merupakan *molar flux* pada arah y yang menyatakan perubahan konsentrasi. D_{AB} adalah difusivitas massa atau koefisien difusivitas komponen A yang terdifusi melalui komponen B. $d\tau_A$ adalah perubahan konsentrasi dalam sistem. dy adalah perubahan posisi ke arah y . Karena perpindahan massa atau difusi hanya terjadi dalam campuran, maka pengaruh dari tiap komponen harus diperhitungkan. Misalnya, untuk mengetahui laju difusi dari setiap komponen *relative* terhadap kecepatan campuran. Kecepatan campuran harus dihitung dari kecepatan rata-rata tiap komponen. Koefisien difusivitas tergantung pada :

1. Tekanan
2. Temperatur
3. Komposisi Sistem

Koefisien difusivitas masing-masing fase berbeda-beda. Koefisien difusivitas untuk gas lebih tinggi, yaitu antara $5 \cdot 10^{-6} - 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, untuk *liquid* $10^{-10}-10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ dan untuk *solid* $10^{-14} - 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

Perpindahan massa yang terjadi akibat pergerakan fluida yang membawa zat terlarut dapat dikatakan sebagai perpindahan massa konvektif. Gerakan fluida ini dapat berupa alami atau dipaksa (*forced*). Persamaan laju perpindahan massa konvektif dinyatakan sebagai berikut:

$$N_A = k\tau(\tau_{A0} - \tau_A) \quad (2.6)$$

N_A = perpindahan massa molar zat A

τ_{A_0}, τ_A = perbedaan konsentrasi di permukaan dengan di fluida utama

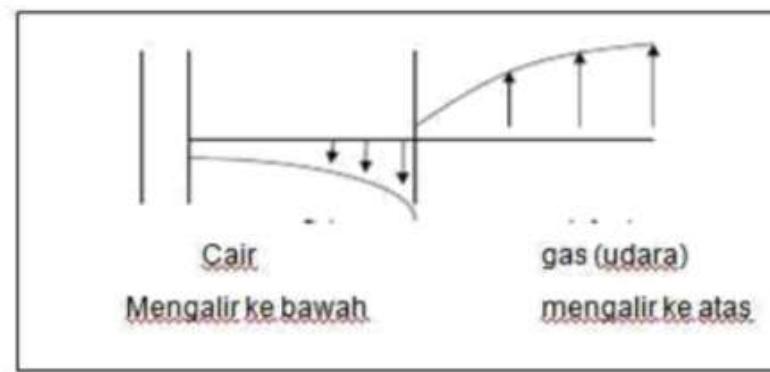
$k\tau$ = koefisien perpindahan massa konvektif

Mekanisme perpindahan massa antara permukaan dan fluida termasuk perpindahan massa molekul melalui lapisan tipis fluida stagnan dan aliran laminar.

Kebanyakan data dari transfer massa antara permukaan pipa dan aliran fluida telah ditentukan dengan menggunakan *wetted wall column*. Alasan mendasar untuk menggunakan *wetted wall column* dalam penyelidikan transfer massa adalah untuk mengontakkan luas area antara 2 fase sehingga dapat dihitung dengan tepat.

2.5 Koefisien Perpindahan Massa

Koefisien perpindahan massa merupakan besaran empiris yang diciptakan untuk memudahkan persoalan-persoalan perpindahan massa antar fase, yang akan dibahas di sini adalah koefisien perpindahan massa dari fase cair ke fase gas atau sebaliknya. Untuk memperdalam hal ini dapat diperhatikan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Pengaruh koefisien perpindahan massa dari fase gas ke fase cair atau dari fase cair ke fase gas

Koefisien perpindahan massa dipengaruhi oleh beberapa hal, diantaranya:

1. Kondisi Operasi

Kondisi operasi dapat berupa laju alir, temperatur, dan tekanan.

2. Kondisi Alat

Kondisi alat meliputi diameter dan tinggi/panjang alat.

3. Sifat Bahan

Sifat bahan dapat berupa densitas, viskositas, dan difusivitas.

Apabila terjadi perpindahan massa dari fase cair ke fase gas atau sebaliknya pada bidang *film* cair – gas yang mengalir, maka kecepatan

perpindahan massa per satuan luas permukaan perpindahan massa dalam arah y dinyatakan oleh hukum Fick ke-2 sebagai berikut :

$$N_{Ay} = J_{Ay} + X_A(N_{Ay} + N_{By}) \quad (2.9)$$

dimana :

N_{Ay} = fluks massa komponen A (dalam hal ini air) dalam arah y karena terbawa aliran fluida (gr mole / cm² det)

N_{By} = fluks massa komponen B (dalam hal ini udara) dalam arah y (gmole/cm² det)

X_A = fraksi mol A pada fase gas yang merupakan fungsi dari y dan z

J_{Ay} = fluks difusif molekuler massa komponen A dalam arah y (gmol/cm² det)

Maka persamaan (2.10) dapat ditulis kembali sebagai berikut:

$$N_{Ay} - X_A(N_{Ay} + N_{By}) = J_{Ay} \quad (2.10)$$

Menurut Treybal, (1981) menyatakan persamaan flux dasarnya adalah:

$$\text{Flux} = (\text{Coefficient}) \times (\text{Concentration difference}) \quad (2.11)$$

Sesuai dengan persamaan tersebut, maka didefinisikan koefisien perpindahan massa sebagai berikut:

$$J_{Ay} = kg_{loc} (X_{Ao} - X_A) \quad (2.12)$$

($X_{Ao} - X_A$) adalah beda konsentrasi dan dinyatakan dengan fraksi mol dalam arah y. Pendefinisian ($X_{Ao} - X_A$) ini menentukan definisi yang tepat dari kg_{loc} (tanda loc dari fase gas diganti huruf g). Pernyataan lokal dimaksudkan bahwa kg dapat berbeda-beda dari satu posisi ke posisi lain pada permukaan antarmuka gas-cair sebagai tempat perpindahan massa terjadi.

Agar lebih memudahkan penggunaan persamaan, kg rata-rata dapat dinyatakan dengan kgl sebagai berikut :

$$Kgl = \int_{s_0}^s \frac{kg_{loc} ds}{\int_{s_0}^s ds} \quad (2.13)$$

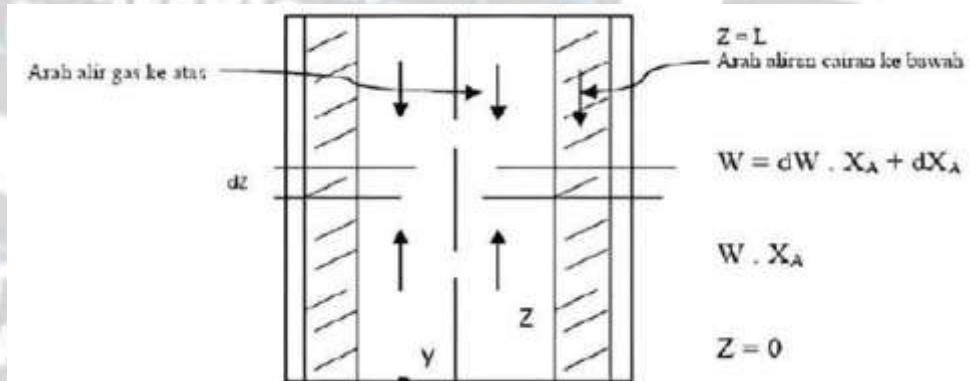
Menurut definisi di atas, maka $kgl =$ harga rata-rata kg_{loc} untuk seluruh permukaan perpindahan massa s. ($X_{Ao} - X_A$) pada umumnya didefinisikan sebagai berikut:

X_{AO} = fraksi mol komponen A pada fase gas di permukaan antarmuka

X_A = fraksi mol rata-rata komponen A di fase gas (*bulk*)

2.6 Perpindahan Massa pada *Wetted Wall Column*

Untuk menganalisis perpindahan massa dalam *wetted wall column*, perhatikan Gambar 2.3.



Gambar 2.5 Penampang membujur *wetted wall column*

Ditinjau sistem setinggi dz . Neraca material komponen A menghasilkan persamaan differensial fluks komponen A sebagai berikut:

$$\frac{d(W, X_A)}{dz} = J_{AY} \pi D \quad (2.14)$$

dimana, W = laju alir massa gas dalam arah z (gr mole/det)

Penambahan laju alir massa dalam arah z hanya dipengaruhi oleh adanya fluks massa J_{AY} maka dapat dituliskan hubungan fluks total sistem sebagai berikut:

$$\frac{d(W)}{dz} = J_{AY} \pi D \quad (2.15)$$

Persamaan (2.14) dan (2.15) akan menghasilkan hubungan :

$$W \frac{dX_A}{dz} = (1 - X_A) J_{AY} \pi D \quad (2.16)$$

Dengan menggunakan (2.12) maka persamaan (2.16) dapat diubah menjadi :

$$\frac{dX_A}{(1-X_A)(X_{A0}-X_A)} = \frac{\text{kg Loc } \pi D}{W} dz \quad (2.17)$$

Dalam menyelesaikan persamaan (2.17) maka perlu penganggapan bahwa X_A rata-rata (lihat persamaan (2.13)), maka anggapan tersebut dapat digunakan. Selanjutnya dengan mengabaikan perubahan total dari W sepanjang kolom, maka integrasi persamaan (2.17) untuk $Z=0$ sampai $Z=L$ menghasilkan:

$$\frac{\int_{Z=0}^{Z=L} \text{kg Loc } \pi D dz}{W} = \frac{\int_{Z=0}^{Z=L} dX_A}{(X_{A0}-X_A)(1-X_A)} \quad (2.18)$$

Ruas kiri adalah definisi kgl sedang ekspansi parsial, ruas kanan dapat dengan mudah diintegrasikan hingga menghasilkan:

$$kgl = \frac{W}{\pi, D, L (1-X_{A0})} \ln \frac{(X_{A0}-Z_A)_0 (1-X_A)_L}{(X_{A0}-X_A)_L (1-X_A)_0} \quad (2.19)$$

Dengan persamaan ini maka kgl dapat ditentukan dari data percobaan.

Korelasi empiris dimensi dapat diketahui bahwa kgl dipengaruhi oleh N_{Re} , N_{Sc} , dan faktor geometris kolom (L/D). Pengaruh faktor-faktor tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut

$$N_{Sh} = \frac{k g l D_x}{C D_{AB}} = f(N_{Re} \cdot N_{Sc} \cdot \frac{L}{D}) \quad (2.20)$$

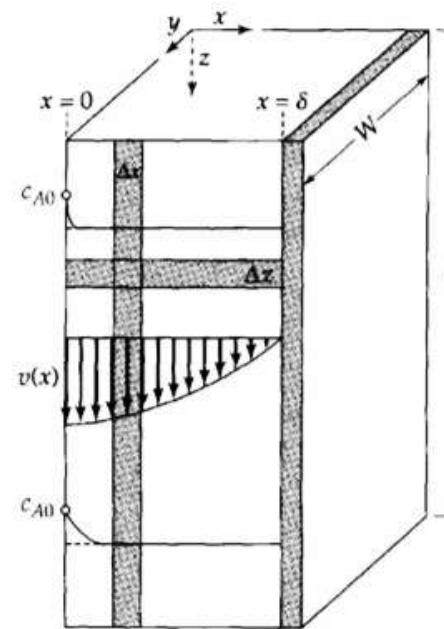
N_{Re} = bilangan Reynold untuk aliran gas

N_{Sc} = bilangan Schmidt untuk fasa gas

L/D = perbandingan panjang kolom terhadap diameter kolom

2.7 Perpindahan Massa pada *Falling Liquid Film (Gas Absorption)*

Gambar 2.6 menunjukkan cairan yang mengalir turun dengan aliran laminar, membentuk lapisan *film* tipis di sepanjang permukaan vertikal. Cairan yang mengalir ini kontak dengan gas A yang larut ke dalam cairan dengan konsentrasi A dinyatakan dengan C_A .



Gambar 2.6 Absorpsi gas A pada *falling liquid film*

Gambar 2.6 merupakan visualisasi fenomena absorpsi gas A (O_2) dalam cairan B (H_2O). Gas A memiliki kelarutan yang rendah dalam air sehingga viskositas dari cairan tidak terpengaruh secara signifikan. Dari Gambar 2.6, dapat diketahui bahwa cairan mengalir turun ke arah z dan membentuk lapisan (*film*) ke arah x. Gas A mengalir ke atas akan kontak pertama kali dengan permukaan air pada antarmuka cairan-gas ($x = 0$), lalu berdifusi ke badan air ($x = \delta$). Gas A yang larut dalam air (C_A) nilainya akan berubah dipengaruhi oleh arah x dan z sehingga proses difusi dapat dinyatakan dalam persamaan hukum Fick kedua berikut:

$$v_z \frac{\partial C_A}{\partial z} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} \quad (2.21)$$

Dengan mensubstitusi persamaan untuk distribusi kecepataan, didapatkan persamaan berikut:

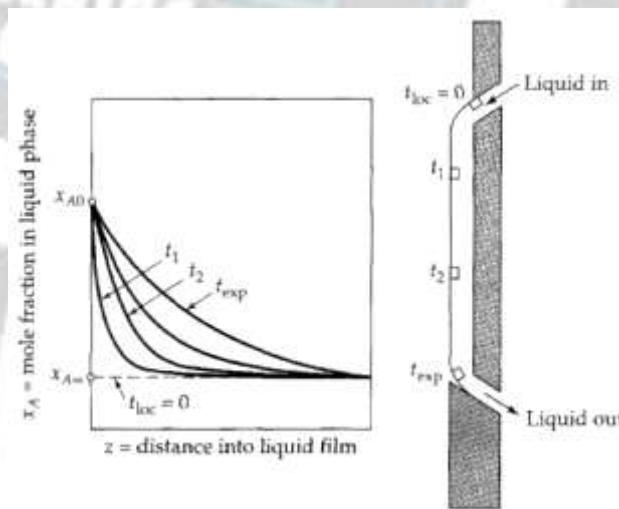
$$v_{\max} \left[1 - \left(\frac{x}{\delta} \right)^2 \right] \frac{\partial C_A}{\partial z} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} \quad (2.22)$$

Persamaan tersebut dapat diselesaikan dengan mempertimbangkan *boundary condition* berikut:

- B.C. 1: pada $z = 0, C_A = 0$
- B.C. 2: pada $x = 0, C_A = C_{A0}$
- B.C. 3: pada $x = \delta, \frac{\partial C_A}{\partial x} = 0$

Kondisi batas pertama menyatakan pada keadaan semula ($z = 0$) konsentrasi A bernilai nol karena gas A belum berdifusi ke dalam cairan. Pada kondisi batas kedua, gas A kontak pertama kali dengan permukaan cairan pada antarmuka cairan-gas ($x = 0$), gas mulai larut sehingga konsentrasi A mencapai nilai maksimum (C_{A0}) pada $x = 0$ dan difusi akan dimulai karena adanya gradien konsentrasi dari antarmuka cairan-gas ($x = 0$) ke arah $x = \delta$. Pada kondisi batas ketiga, $x = \delta$ menyatakan bahwa konsentrasi A sudah tidak lagi berubah terhadap x ($\frac{\partial C_A}{\partial x} = 0$) karena tidak ada transfer massa yang signifikan atau konsentrasi telah homogen. Hal ini juga menandakan bahwa A tidak akan berdifusi ke dalam permukaan dinding dan difusi telah berhenti.

Perlu diperhatikan juga bahwa difusi terjadi pada *film* cairan terjadi secara lambat sehingga gas A tidak berdifusi terlalu jauh ke dalam *film* cairan. Selain itu, waktu yang ditempu cairan yang mengalir dan *inlet* ke *outlet* (*exposure time*) cukup singkat sehingga waktu yang diperlukan untuk gas A berdifusi lebih dalam ke cairan juga singkat.



Gambar 2.7 Difusi pada falling liquid film

Terdapat beberapa model perhitungan untuk pepindahan massa pada antarmuka gas-cair sesuai dengan kondisi yang terjadi pada sistem itu sendiri.

1. Teori Film

Nernset (Wen *et al.*, 2020) pertama kali mengemukakan teori *film*.

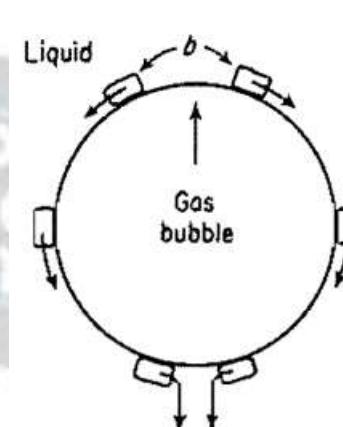
Teori ini berdasarkan pada asumsi bahwa perpindahan massa terfokus pada daerah *film* tipis antarmuka yang stagnan antara gas dan cairan. Kemudian, Whitman & Lewis mengembangkan teori ini untuk menerapkannya pada antarmuka gas-cair. Menurut teori *film* perpindahan massa dapat dihitung pada sisi cairan atau gas, melalui persamaan berikut.

$$k_l/g = \frac{D_l/g}{\delta_l/g} \quad (2.23)$$

Akan tetapi, model ini tidak dapat diterapkan jika kedua fluida pada antarmuka mengalir dan tidak diam seperti pada *falling liquid film*.

2. Teori Model Penetrasi

Higbie mengemukakan model penetrasi untuk mengatasi kelemahan dari teori *film* tersebut. Pada teori ini, waktu kontak kedua fluida untuk berdifusi singkat sehingga tidak akan tercapai keadaan *steady state*. Teori ini menjelaskan ketika kedua fluida kontak seperti pada gambar 2.8, gelembung gas mengalir ke atas di dalam cairan yang mengasorbsi gasnya.



Gambar 2.8 Teori penetrasi

Terdapat asumsi-asumsi atas dasar teori penetrasi sebagai berikut:

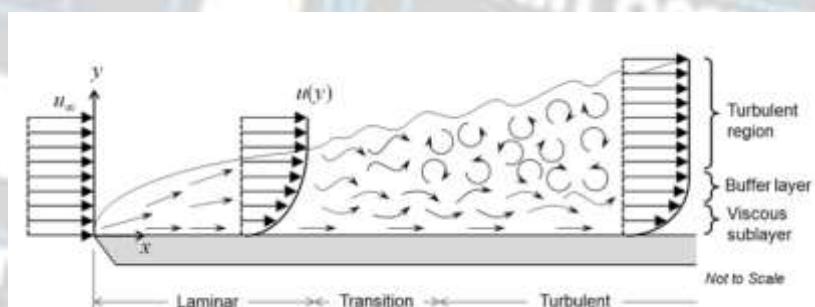
- 1) Perpindahan massa dalam keadaan *unsteady state* terjadi pada elemen cairan yang kontak dengan gelembung gas,
- 2) Ekuilibrium terjadi pada antarmuka gas-cair,
- 3) Setiap elemen cairan (*b*) kontak dengan gelembung gas dalam waktu yang sama.

Koefisien transfer massa dari teori berikut dapat dihitung dengan persamaan berikut, dalam sepanjang interval *t_c*.

$$k_{l/g} = 2 \sqrt{\frac{D_a}{\pi t_c}} \quad (2.24)$$

3. Surface Renewal Theory

Danckwerts mengembangkan teori model penetrasi Higbie, bahwa perpindahan massa yang terjadi pada permukaan gelembung dengan elemen cairan, elemen cairan akan digantikan dengan elemen cairan baru karena adanya aliran *eddy* (pusaran air) yang kontak pada permukaan gelembung.



Gambar 2.9 Pusaran arus (*eddy*) yang terjadi pada aliran turbulen

Pada teori ini, Danckwert menyatakan asumsi-asumsi berikut:

- 1) Elemen-elemen cairan pada antarmuka secara acak digantikan oleh elemen cairan baru dari badan cairan (*liquid bulk*),
- 2) Pada setiap saat, setiap elemen cairan pada antarmuka memiliki probabilitas yang sama untuk digantikan oleh elemen cairan baru,
- 3) Perpindahan massa dalam keadaan *unsteady state* terjadi pada elemen cairan selama keberadaannya pada antarmuka.

Dengan demikian, koefisien perpindahan massa dapat ditentukan melalui persamaan berikut:

$$N_{A,av} = (C_{Ai} - C_{A0}) \sqrt{s \times D_{AB}} \quad (2.25)$$

$$k_{l/g,av} = \sqrt{s \times D_{AB}} \quad (2.26)$$

s merupakan laju dari pergantian elemen baru (s^{-1}).

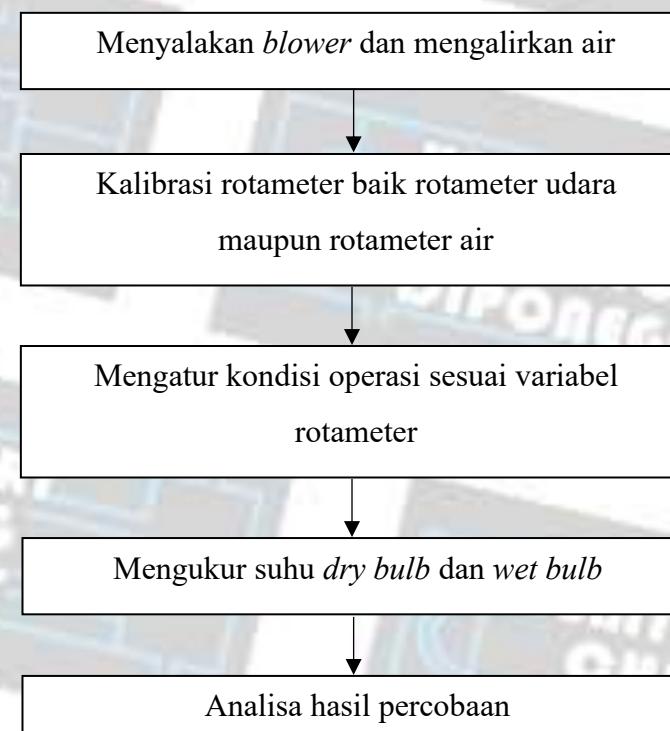
(Treybal, 1980)

BAB III

METODE PRAKTIKUM

3.1 Rancangan Praktikum

3.1.1 Rancangan Praktikum



Gambar 3.1 Skema rancangan praktikum

3.1.2 Penetapan Variabel

- Variabel Tetap :
- Variabel Berubah :

3.2 Bahan dan Alat yang Digunakan

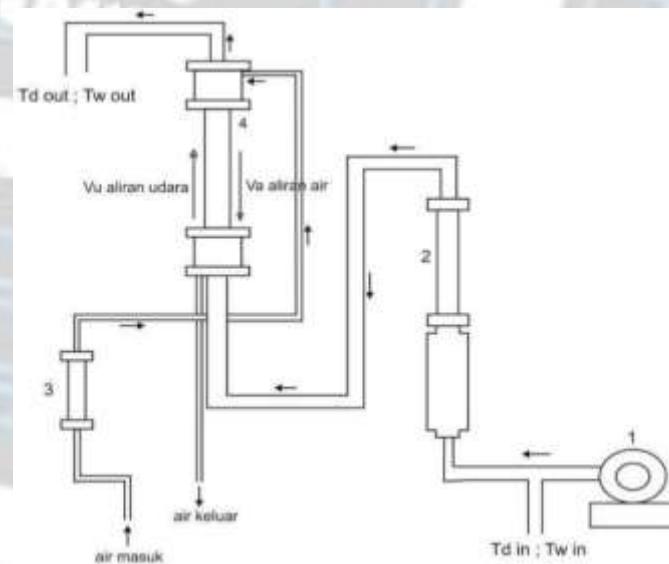
3.2.1 Bahan yang Digunakan

- Udara
- Air

3.2.2 Alat yang Digunakan

- Stopwatch*
- Thermometer*

3.3 Gambar Alat Utama



Gambar 3.2 Alat praktikum *Wetted Wall Column*

Keterangan:

1. *Blower*
2. Rotameter udara
3. Rotameter air
4. Kolom perpindahan massa

3.4 Respon

1. Kalibrasi Rotameter Udara

Waktu yang dibutuhkan (detik) untuk 1 kali putaran dengan volume *wet gas meter* 10 L.

2. Kalibrasi Rotameter Air

Volume air yang ditampung (mL) dalam waktu 10 detik pada setiap laju alir.

3. Tahap Operasi

Suhu ($^{\circ}\text{C}$) *Wet Bulb* dan *Dry Bulb* di dasar dan puncak kolom pada variabel laju alir air dan variabel laju alir udara pada waktu 10 menit.

4. Analisa Data Hasil Percobaan

Mahasiswa diharapkan dapat :

- a. Membuat kurva hubungan koefisien transfer massa (kgl) dengan laju alir dan dapat menjelaskan fenomena-fenomena yang terjadi.
- b. Mengetahui pengaruh N_{Re} terhadap N_{Sh} .
- c. Mencari konstanta a dan b dari persamaan bilangan tak berdimensi yang telah disusun.

3.5 Data yang Dibutuhkan

1. Waktu untuk 1 kali putaran jarum *wet gas meter* (sekon)
2. Volume air selama 10 detik (ml)
3. T_d dan T_w *input*
4. T_d dan T_w *output*

3.6 Prosedur Praktikum

Pelaksanaan pekerjaan dapat dibagi dalam dua tahap, yaitu tahap persiapan dan tahap operasi.

3.6.1 Tahap Persiapan

1. Kalibrasi Rotameter Udara
 - a. Menjalankan rotameter udara.
 - b. Mengisi *wet gas meter* dengan air sampai level tertentu sehingga putaran jarum konstan.
 - c. Menghubungkan *wet gas meter* dengan pipa keluaran udara.
 - d. Mengatur skala rotameter udara.
 - e. Menghitung waktu yang diperlukan untuk jarum pada *wet gas meter* melakukan satu putaran.
 - f. Mengulangi sampai 3x.
 - g. Mengulangi langkah di atas untuk skala rotameter udara yang lain.

2. Kalibrasi Rotameter Air

- a. Mengalirkan air dengan membuka kran pada jarak tertentu.
- b. Mengatur skala rotameter air.
- c. Mengalirkan air selama 10 detik dan menampung airnya untuk mengetahui volumenya.
- d. Mengukur volume air.
- e. Mengulangi sampai 3x.
- f. Mengulangi langkah di atas untuk skala rotameter air yang lain.

3.6.2 Tahap Operasi

1. Mengalirkan air dari kran air pada penunjukkan skala rotameter tertentu.
2. Mengalirkan udara pada penunjukkan skala rotameter udara tertentu.

3. Mengukur suhu *wet bulb* (ujung termometer diselubungi kapas basah) dan *dry bulb* pada puncak dan dasar kolom.
4. Membaca dan mencatat suhu pada termometer setelah 10 menit.
5. Ulangi langkah 1-4 sebanyak 4 skala lainnya.

3.7 Analisa Hasil Percobaan

Dari percobaan didapatkan data waktu untuk 1 kali putaran jarum *wet gas meter* (sekon), volume air selama 10 detik (ml), Td dan Tw pada *input*, serta Td dan Tw pada *output*.

1. Dengan menggunakan persamaan berikut :

$$Q_{uk} = \frac{Vol}{t} \quad (3.1)$$

$$Q_{um} = \frac{Vm}{V_k} \times Q_{uk} \quad (3.2)$$

$$V_m = \frac{T_d \text{ in}}{273} \times \frac{1}{P_m} \times (1 + Y_m) 22,4 \quad (3.3)$$

$$V_k = \frac{T_d \text{ out}}{273} \times \frac{1}{P_k} \times (1 + Y_k) 22,4 \quad (3.4)$$

Dalam persamaan ini :

Q_{uk} = debit air keluar (m^3/s)

Q_{um} = debit air masuk (m^3/s)

V_m = volume udara masuk (m^3)

V_k = volume udara keluar (m^3)

$T_d \text{ in}$ = suhu *dry bulb* masuk (K)

$T_d \text{ out}$ = suhu *dry bulb* keluar (K)

P_m = tekanan udara masuk (N/m^2)

P_k = tekanan udara keluar (N/m^2)

Y_m = molal *humidity* udara masuk (mol air/mol udara kering)

Y_k = molal *humidity* udara keluar (mol air/mol udara kering)

Karena pada percobaan ini $P_m = P_k = 1 \text{ atm}$ maka persamaan menjadi:

$$\frac{V_m}{V_k} = \frac{T_{di}}{T_{do}} \times \frac{(1+Y_m)}{(1+Y_k)} \quad (3.5)$$

Y_m, Y_k dapat dicari pada diagram psikometrik :

- a. T_w diplotkan pada garis 100% *humidity*, kemudian ditarik sejajar garis saturasi adiabatis ke T_d , maka diperoleh Y .
- b. $T_w \text{ in}, T_d \text{ in} \rightarrow Y_m$
- c. $T_w \text{ out}, T_d \text{ out} \rightarrow Y_k$

2. Perhitungan Bilangan Reynold

$$N_{Re} = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu} \quad (3.6)$$

$$V = \frac{Q}{A} \quad (3.7)$$

$$N_{Re} \text{ air} = \frac{4 \cdot \rho_a \cdot Q_a}{D \cdot \pi \cdot \mu_a}; D = \text{Diameter kolom} \quad (3.8)$$

3. Perhitungan Tebal Lapisan Film

$$\delta = \left[\frac{3 \cdot \mu_a \cdot Q_a}{D \cdot \pi \cdot \mu_a} \right]^{1/3}; g = \text{konstanta gravitasi} = 9,8 \text{ m/s}^2 \quad (3.9)$$

4. Perhitungan Bilangan Reynold Udara

$$N_{Re} \text{ udara} = \frac{4 \cdot \rho_u \cdot Q_{um}}{(D - 2\delta) \cdot \pi \cdot \mu_u} \quad (3.10)$$

5. Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa (Kgl)

$$Kgl = \frac{W}{\pi \cdot D \cdot L} \ln \left(\frac{X_{A1}^* - X_{A1}}{X_{A2}^* - X_{A2}} \right) \quad (3.11)$$

X_{A1}^* → plot T_w in ; $= Y_m$

X_{A2}^* → plot T_w out ; $= Y_k$

Dimana:

$$W = \frac{Q_{uk} \cdot \rho_u}{BM_u (1 + Y')} \quad (3.12)$$

BM udara = 28,97 kg/mol

$Y' = T_d$ in 100% relative humidity

6. Perhitungan Bilangan Sherwood

$$Nsh = \frac{Kgl \cdot P_m \cdot R \cdot T \cdot D}{P_t^2 \cdot D_{AB}} \quad (3.13)$$

Dimana :

Kgl = koefisien transfer massa udara ($\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$)

P_m = tekanan parsial rata-rata udara (N/m^2)

P_t = tekanan total = $1,0132 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

R = konstanta gas ideal = $8,314 \text{ Nm/kmol.K}$

T = temperatur absolut = 303 K

D_{AB} = diffusivitas air udara, interpolasi dari data yang didapat pada

Treybal table 2-1, yaitu $2,6384 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

$$Y_{A1} = X_{A1}^*$$

$$Y_{A2} = X_{A2}^*$$

$$P_m = \frac{1 - P_2}{\ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)}$$

$$P_{A1} = \frac{X_{A1}^*}{(1 + Y_{A1})} \times P_t$$

$$P_{A2} = \frac{X_{A2}^*}{(1 + Y_{A2})} \times P_t$$

$$P_1 = P_t - P_{A1}$$

$$P_2 = P_t - P_{A2}$$

7. Perhitungan Bilangan Sherwood (Persamaan)

$$N_{sh} = a(N_{Re})^b ; \text{ } a \text{ dan } b \text{ dicari dengan persamaan Least Square.}$$

8. Perhitungan Persentase Kesalahan:

$$\% \text{ kesalahan } (\%error) = \left| \frac{\frac{(N_{Sh})p - (N_{Sh})h}{(N_{Sh})p}}{n \text{ data}} \right| \times 100\%$$

DAFTAR PUSTAKA

- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (1968). *Transport Phenomena*. John Willey and Sons, Inc.
- Brown, G. G. (1950). *Unit Operations*. John Willey and Sons, Inc.
- Geankolis, C. J. (2003). *Transport processes and separation process principles* (4th ed.). Prentice Hall.
- Mardina, P. (2007). Menentukan Koefisien Transfer Massa dan Diffusivitas Efektif dari Proses Dekolorisasi Zat Warna. *Info Teknik*, 8(1).
- McCabe, W. L. and J Smith. (1985). *Unit Operation of Chemical Engineering*. Mc Graw Hill.
- Treybal, R. E. (1980). *Mass Transfer Operation*. (3rd ed.). Mc Graw Hill Book Co.
- Vivian, J. E., & Peaceman, D. W. (1956). Liquid-side Resistance in Gas Absorption. *AICHE Journal*, 2(4), 437-443. <https://doi.org/10.1002/aic.690020404>.
- Yih, S. M., & Chen, K. Y. (1982). Gas absorption into wavy and turbulent falling liquid films in a wetted-wall column. *Chemical Engineering Communications*, 17(1-6), 123-136.