

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Reaksi kimia yang diterapkan dalam industri kimia dapat melibatkan bahan baku yang berbeda wujudnya, baik berupa padatan, gas, maupun cairan. Oleh karena itu, reaksi kimia dalam suatu industri dapat terjadi dalam fase tunggal (homogen) maupun fase ganda (heterogen), misalnya biner atau bahkan tersier (Coulson, 1996). Sebelum reaksi kimia berlangsung, salah satu atau lebih bahan baku (reaktan) akan berpindah dari aliran utamanya menuju ke lapisan antarfase/batas atau menuju aliran utama bahan baku yang lain yang berada di fase yang berbeda.

Absorpsi gas-cair merupakan proses heterogen yang melibatkan perpindahan komponen gas yang dapat larut menuju penyerap yang biasanya berupa cairan yang tidak mudah menguap (Franks, 1967). Reaksi kimia dalam proses absorpsi dapat terjadi di lapisan gas, lapisan antarfase, lapisan cairan, atau bahkan badan utama cairan, tergantung pada konsentrasi dan reaktivitas bahan-bahan yang direaksikan. Untuk memfasilitasi berlangsungnya tahapan-tahapan proses tersebut, biasanya proses absorpsi dijalankan dalam reaktor tangki berpengaduk bersparger (penyembur aliran massa), kolom gelembung (*bubble column*), atau kolom yang berisi tumpukan partikel *inert* (*packed bed column*). Proses absorpsi gas-cair dapat diterapkan pada pemurnian gas sintesis yang masih bermanfaat dalam gas buang atau bahkan pada industri yang melibatkan pelarutan gas dalam cairan, seperti H_2SO_4 , HCl , HNO_3 , formaldehid, dan lain-lain (Coulson, 1996). Absorpsi gas CO_2 dengan larutan hidroksid yang kuat merupakan proses absorpsi yang disertai dengan reaksi kimia order 2 antara CO_2 dan ion OH^- membentuk ion CO_3^{2-} dan H_2O . Sedangkan reaksi antara CO_2 dengan CO_3^{2-} membentuk ion HCO_3^- biasanya diabaikan (Danckwerts, 1970; Juvekar & Sharma, 1972). Namun, menurut Rehm *et al.* (1963) proses ini juga biasa dianggap mengikuti reaksi order 1 jika konsentrasi larutan NaOH cukup rendah (encer).

Perancangan reaktor kimia dilakukan berdasarkan pada pemodelan hidrodinamika reaktor dan reaksi kimia yang terjadi di dalamnya. Suatu model matematika merupakan bentuk penyederhanaan dari proses sesungguhnya di dalam sebuah reaktor yang biasanya sangat rumit (Levenspiel, 1972). Reaksi kimia biasanya dikaji dalam suatu proses *batch* berskala laboratorium dengan

mempertimbangkan kebutuhan reaktan, kemudahan pengendalian reaksi, peralatan, kemudahan menjalankan reaksi dan analisis, serta ketelitian.

1.2 Perumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh variabel operasi terhadap jumlah mol CO_2 yang terserap pada berbagai waktu reaksi?
2. Bagaimana pengaruh variabel operasi terhadap nilai tetapan perpindahan massa CO_2 fase gas (k_{GA})?
3. Bagaimana pengaruh variabel operasi terhadap nilai tetapan perpindahan massa CO_2 fase cair (k_{LA})?
4. Bagaimana pengaruh variabel operasi terhadap nilai tetapan perpindahan massa keseluruhan antara CO_2 dan H_2O (K_{OG})?

1.3 Tujuan Percobaan

Setelah melakukan percobaan ini mahasiswa mampu melakukan dan/atau menjelaskan mengenai beberapa hal berikut :

1. Menyiapkan dan mengoperasikan sistem absorpsi, menganalisis sampel dan mengolah data percobaan.
2. Pengaruh variabel terhadap jumlah mol CO_2 yang terserap pada berbagai waktu reaksi.
3. Pengaruh variabel terhadap nilai tetapan perpindahan massa CO_2 pada fase gas (k_{GA}).
4. Pengaruh variabel terhadap nilai tetapan perpindahan massa CO_2 pada fase cair (k_{LA}).
5. Pengaruh variabel terhadap nilai tetapan perpindahan massa keseluruhan antara CO_2 dengan H_2O (K_{OG}).

1.4 Manfaat Percobaan

(Praktikan harus mencari sendiri informasi mengenai manfaat percobaan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Absorpsi

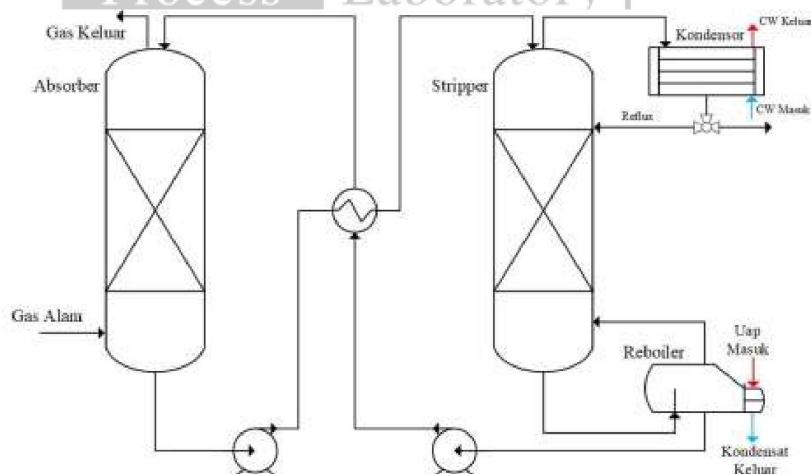
Absorpsi merupakan salah satu proses separasi dalam industri kimia dimana suatu campuran gas dikontakkan dengan suatu cairan penyerap sehingga satu atau lebih komponen gas tersebut larut dalam cairan. Absorpsi dapat terjadi melalui dua mekanisme, yaitu absorpsi fisik dan absorpsi kimia.

2.1.1 Absorpsi Fisik

Absorpsi fisik merupakan suatu proses yang melibatkan peristiwa pelarutan gas dalam larutan penyerap, namun tidak disertai dengan reaksi kimia. Contoh proses ini adalah absorpsi gas H_2S dengan air, metanol, dan propilen karbonat. Penyerapan terjadi karena adanya interaksi fisik antara gas dengan cairan. Mekanisme proses absorpsi fisik dapat dijelaskan dengan beberapa model yaitu: teori dua lapisan (*two films theory*) oleh Whitman (1923), teori penetrasi oleh Dankcwerths, dan teori permukaan terbaharui.

2.1.2 Absorpsi Kimia

Absorpsi kimia merupakan suatu proses yang melibatkan peristiwa pelarutan gas dalam larutan penyerap yang disertai dengan reaksi kimia. Contoh peristiwa ini adalah absorpsi gas CO_2 dengan larutan MEA (Mono Etanol Amin), NaOH , K_2CO_3 (Kalium Karbonat) dan sebagainya. Aplikasi dari absorpsi kimia dapat dijumpai pada proses penyerapan gas CO_2 pada pabrik amonia seperti yang terlihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Proses absorpsi dan desorpsi CO_2 dengan pelarut MEA di pabrik amonia

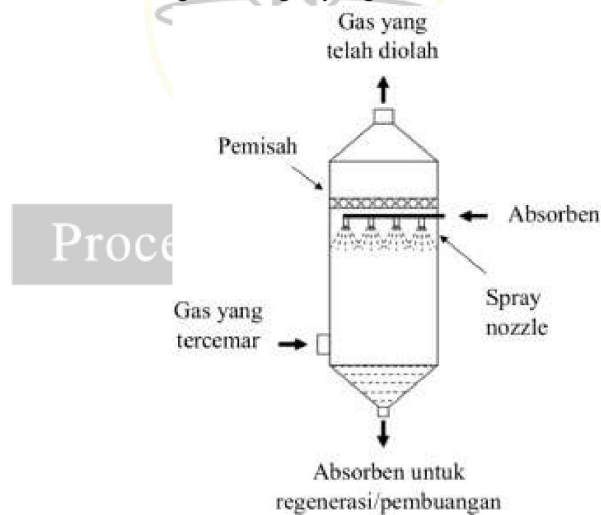
Proses absorpsi dapat dilakukan dalam tangki berpengaduk yang dilengkapi dengan *sparger*, kolom gelembung (*bubble column*), kolom yang berisi *packing* yang *inert* (*packed column*), atau piringan (*tray column*). Pemilihan peralatan proses absorpsi biasanya didasarkan pada reaktivitas reaktan (gas dan cairan), korosifitas bahan yang diserap dan penyerap, suhu, tekanan, kapasitas, dan ekonomi.

2.2 Kolom Absorpsi

Kolom absorpsi adalah suatu kolom atau tabung tempat terjadinya proses absorpsi (penyerapan) dari zat yang dilewatkan di kolom/tabung tersebut. Secara umum ada empat jenis kolom absorpsi yaitu: menara sembur (*spray column*), menara gelembung (*bubble column*), menara *plate* (*tray column*), dan menara *packing* (*packed bed column*).

2.2.1 Menara Sembur (*spray column*)

Dalam menara *spray* (Gambar 2.2) fasa gas mengalir naik melalui sebuah ruang terbuka berukuran besar dan fasa cairnya dimasukkan dengan menggunakan *nozzle* atau dengan alat-alat penyemprot lainnya. Cairan yang diumpangkan dalam wujud tetes tetes halus, jatuh dengan arus yang berlawanan arah dengan arus gas yang naik ke atas.

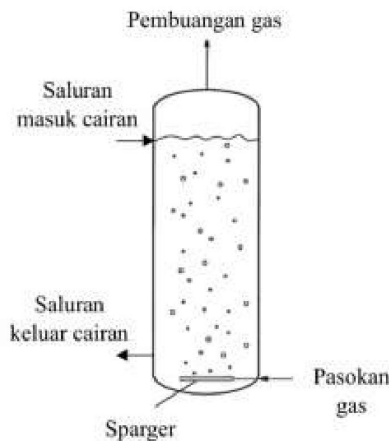


Gambar 2.2 Menara sembur

2.2.2 Menara Gelembung (*bubble column*)

Menara gelembung (Gambar 2.3) terdiri dari ruang-ruang terbuka berukuran besar yang dilalui oleh fasa cair yang mengalir kedalam ruang-ruang ini, dan gasakan disebarkan ke dalam fasa cair melalui *sparger* yang berada pada bagian bawah kolom dalam bentuk gelembung-gelembung halus. Gelembung-gelembung gas kecil akan memberikan luas kontak yang

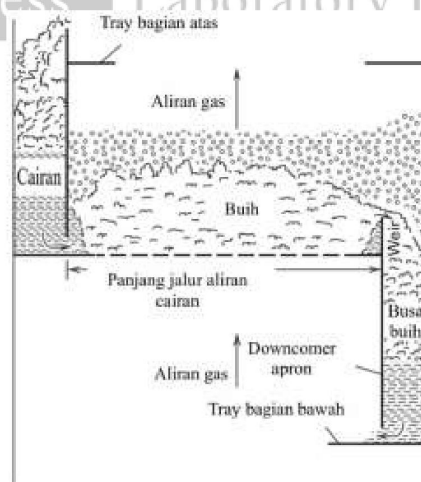
diinginkan, dan gelembung-gelembung yang naik akan menimbulkan aksi pencampuran di dalam fasa cair, sehingga mengurangi resistensi fasa cair tersebut terhadap transfer massa. Menara gelembung digunakan dengan sistem dimana fasa cair biasanya mengontrol laju transfer massa.



Gambar 2.3 Menara gelembung

2.2.3 Menara *Plate* (tray column)

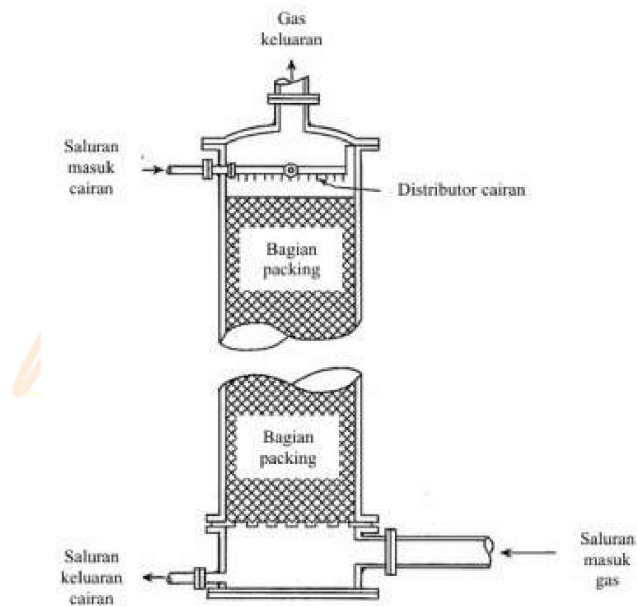
Menara *Plate* atau *tray column* (Gambar 2.4) adalah menara yang secara luas telah digunakan dalam industri. Menara ini terdiri dari beberapa tipe, yaitu: *Sieve Tray*, *Valve Tray*, dan *Bubble Cup Tray*. Pada menara *plate*, cairan akan mengalir melintasi setiap *tray*, melewati bendungan keluar atau *weir*, dan masuk ke *downcomer*, yang akan membawa cairan ke *tray* di bawahnya secara gravitasi. Gas akan mengalir ke atas melalui lubang-lubang pada setiap *tray* dan membentuk gelembung saat melewati cairan di *tray* sehingga menghasilkan busa buih (Seader *et al.*, 1997).



Gambar 2.4 Menara *plate*

2.2.4 Menara *Packing* (*packed bed column*)

Menara *packing* (Gambar 2.5) adalah menara yang diisi dengan bahan pengisi. Adapun fungsi bahan pengisi ialah untuk memperluas bidang kontak antara kedua fase. Di dalam menara ini, cairan akan mengalir ke bawah melalui permukaan bawah pengisi, sedangkan gas akan mengalir ke atas secara arus berlawanan, melalui ruang kosong yang ada diantara bahan pengisi. Pada menara *packing* terdapat dua jenis bahan pengisi, yaitu pengisi acak (*random packing*) dan pengisi terstruktur (*structured packing*).



Gambar 2.5 Menara *packing*

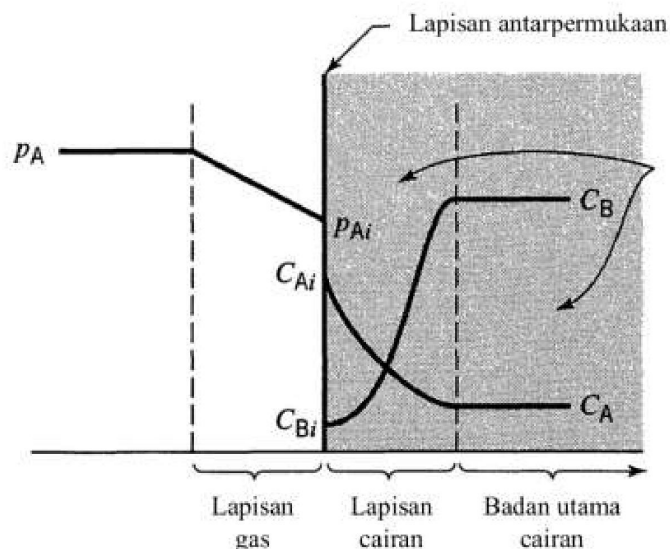
Pada pengisi acak, bahan pengisi akan mengambil posisi acak di dalam kolom. Pengisi acak tersedia dalam berbagai material, yaitu keramik, logam, plastik, dan karbon. Pemilihan material pada bahan pengisi acak didasarkan pada sifat cairan dan suhu operasi. Material keramik umumnya digunakan untuk cairan yang bersifat korosif, namun tidak sesuai apabila digunakan dengan alkali yang kuat. Material plastik umumnya rentan terhadap beberapa pelarut organik dan hanya dapat digunakan pada suhu sedang (Towler & Sinnott, 2008). Sementara itu, material logam lebih disarankan untuk penggunaan pada kondisi operasi yang cenderung tidak stabil seperti adanya perubahan tekanan, aliran, dan suhu secara drastis, karena material keramik dan plastik cenderung mengalami kerusakan di bawah kondisi ini (Ludwig, 1997; Towler & Sinnott, 2008).

Sedangkan pada pengisi terstruktur, posisi bahan pengisi sudah pasti dan tersusun rapih di dalam kolom. Bahan pengisi pada pengisi terstruktur terbuat dari jaring kawat atau lembaran logam berlubang. Bahan tersebut dilipat dan disusun dengan geometri yang teratur untuk memberikan luas area permukaan yang tinggi. Material pada pengisi terstruktur tersedia dalam logam, plastik, dan keramik. Biaya pengisi terstruktur umumnya jauh lebih tinggi daripada pengisi acak, namun memiliki efisiensi yang lebih tinggi (Towler & Sinnott, 2008).

Menara *packing* yang dioperasikan pada kecepatan gas yang tinggi akan menyebabkan terjadinya pencampuran balik atau *back mixing*, dan apabila kecepatan gas yang digunakan terlalu tinggi akan menyebabkan terjadinya banjir atau *flooding* pada kolom. Sementara itu, pada kecepatan gas yang rendah akan menyebabkan terjadinya pengurangan laju perpindahan massa karena bahan pengisi tidak akan terkena kontak dengan cairan secara merata (Silia, 2003).

2.3 Analisis Perpindahan Massa dan Reaksi dalam Proses Absorpsi Gas Oleh Cairan

Secara umum, proses absorpsi gas CO_2 ke dalam larutan NaOH yang disertai reaksi kimia berlangsung melalui empat tahap, yaitu perpindahan massa CO_2 melalui lapisan gas menuju lapisan antarfase gas-cairan, kesetimbangan antara CO_2 dalam fase gas dan dalam fase larutan, perpindahan massa CO_2 dari lapisan gas ke badan utama larutan NaOH, dan reaksi antara CO_2 terlarut dengan gugus hidroksil (OH^-). Skema proses tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Mekanisme absorpsi gas CO_2 dalam larutan NaOH

Laju perpindahan massa CO₂ melalui lapisan gas:

$$R_a = k_{GA} (p_A - p_{Ai}) \quad (2.1)$$

Kesetimbangan antara CO₂ dalam fase gas dan dalam fase larutan:

$$p_{Ai} = H \times C_{Ai} \quad (2.2)$$

p_{Ai} = Tekanan parsial gas A di *interface* gas-cair (atm)

p_A = Tekanan parsial gas A di fase gas (atm)

k_{GA} = Koefisien perpindahan masa di fase gas (mol/atm.menit)

H = Tetapan kesetimbangan gas A (atm/L.mol)

C_{Ai} = Konsentrasi A di fase cair pada interfase gas-cair

dengan H pada suhu 30°C = $2,88 \times 10^{-5}$ g.mol/cm³. atm.

Laju perpindahan massa CO₂ dari lapisan gas ke badan utama larutan NaOH dan reaksi antara CO₂ terlarut dengan gugus hidroksil:

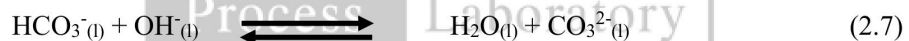
$$R_a = [A^*] a \sqrt{D_A k_A [OH^-]} \quad (2.3)$$

Keadaan batas :

$$(a). \frac{\sqrt{D_A \cdot k_2 \cdot [OH^-]}}{k_L} \gg 1$$

$$(b). \frac{\sqrt{D_A \cdot k_2 \cdot [OH^-]}}{k_L} \ll \frac{[OH^-]}{z \cdot A^*} \sqrt{\frac{D_A}{D_B}}$$

dengan z adalah koefisien reaksi kimia antara CO₂ dan [OH⁻], yaitu = 2. Di fase cair, reaksi antara CO₂ dengan larutan NaOH terjadi melalui beberapa tahapan proses:



Langkah d dan e biasanya berlangsung dengan sangat cepat karena merupakan reaksi ionik, sehingga proses absorpsi biasanya dikendalikan oleh peristiwa pelarutan CO₂ ke dalam larutan NaOH terutama jika CO₂ diumpungkan dalam bentuk campuran dengan gas lain atau dikendalikan bersama-sama dengan reaksi kimia pada langkah c (Juvekar & Sharma, 1973).

Eliminasi A^* dari persamaan 2.1, 2.2, dan 2.3 menghasilkan:

$$R_a = \frac{a \cdot H \cdot p_A \cdot \sqrt{D_A \cdot k_2 \cdot [OH^-]}}{1 + \frac{a \cdot H \cdot \sqrt{D_A \cdot k_2 \cdot [OH^-]}}{k_{GA}}} \quad (2.9)$$

Jika nilai k_L sangat besar, maka: $\frac{\sqrt{D_A \cdot k_2 \cdot [OH^-]}}{k_L} \approx 1$ sehingga persamaan diatas menjadi:

$$R_a = \frac{a.H.pA.\sqrt{D_A.k_2.[OH^-]+k_L^2}}{1 + \frac{a.H.\sqrt{D_A.k_2.[OH^-]+k_L^2}}{k_{GA}}} \quad (2.10)$$

Jika keadaan batas (b) tidak dipenuhi, berarti terjadi pelucutan $[OH^-]$ dalam larutan. Hal ini berakibat:

$$\frac{\sqrt{D_A.k_2.[OH^-]}}{k_L} \approx \frac{[OH^-]}{z.A*} \sqrt{\frac{D_A}{D_B}} \quad (2.11)$$

Dengan demikian, maka laju absorpsi gas CO_2 ke dalam larutan NaOH akan mengikuti persamaan:

$$R_a = \frac{a.H.pA.\phi k_L}{1 + \frac{a.H.\phi k_L}{k_{GA}}} \quad (2.12)$$

Dengan ϕ adalah *enhancement* faktor yang merupakan rasio antara koefisien transfer massa CO_2 pada fase cair jika absorpsi disertai reaksi kimia dan tidak disertai reaksi kimia seperti dirumuskan oleh Juvekar dan Sharma (1973):

$$\phi = \frac{\sqrt{D_A.k_2.[OH^-]}}{k_L} \cdot \left[\frac{1 + \frac{[OH^-]D_B}{z.A* D_A}}{\frac{[OH^-]D_B}{z.A* D_A}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

Nilai difusivitas efektif (D_A) CO_2 dalam larutan NaOH pada suhu $30^\circ C$ adalah $2,1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{det}$ (Juvekar & Sharma, 1973).

Nilai k_{GA} dapat dihitung berdasarkan pada absorpsi fisik dengan meninjau perpindahan massa keseluruhan CO_2 ke dalam larutan NaOH yang terjadi pada selang waktu tertentu di dalam alat absorpsi. Dalam bentuk bilangan tak berdimensi, k_{GA} dapat dihitung menurut persamaan (Kumoro & Hadiyanto, 2000):

$$Sh = a \times Re^b \times Sc^c \quad (2.14)$$

$$\frac{k_{GA}.dp^2}{D_{AB}} = 4,007 \times \left(\frac{\rho_{CO_2}.v.dp}{\mu_{CO_2}} \right)^{1,4003} \times \left(\frac{\mu_{CO_2}}{\rho_{CO_2}.D_{AB}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.15)$$

$$\frac{k_{GA}.dp^2}{D_{AB}} = 4,007 \times \left(\frac{\rho_{CO_2}.Q.dp}{A.\mu_{CO_2}} \right)^{1,4003} \times \left(\frac{\mu_{CO_2}}{\rho_{CO_2}.D_{AB}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.16)$$

$$\text{Dengan } A = \frac{\pi.D^2}{4}$$

Secara teoritik, nilai k_{GA} harus memenuhi persamaan:

$$k_{GA} = \frac{\text{mol}(CO_2, \text{liq})}{A.Z.\epsilon P_{lm}} = \frac{\text{mol}(CO_3^{2-})}{A.Z.\epsilon P_{lm}} \quad (2.17)$$

Jika tekanan operasi cukup rendah, maka P_{lm} dapat didekati dengan:

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (2.18)$$

Sedangkan nilai k_{LA} dapat dihitung secara empirik dengan persamaan (Zheng & Xu, 1992) :

$$\frac{k_{LA} \cdot dp}{D_A} = 0,2558 \times \left(\frac{\rho_{NaOH} \cdot Q_{NaOH}}{\mu_{NaOH} \cdot a} \right) \times \left(\frac{\mu_{NaOH}}{\rho \cdot D_A} \right)^{0,5} \quad (2.17)$$

Dengan $a = \frac{6-(1-\epsilon)}{dp}$ dan $\epsilon = \frac{V_{void}}{V_T}$

Jika laju reaksi pembentukan Na_2CO_3 jauh lebih besar dibandingkan dengan laju difusi CO_2 ke dalam larutan $NaOH$, maka konsentrasi CO_2 pada batas film cairan dengan badan cairan adalah nol. Hal ini disebabkan oleh konsumsi CO_2 yang sangat cepat selama reaksi sepanjang film. Dengan demikian tebal film (δ) dapat ditentukan persamaan :

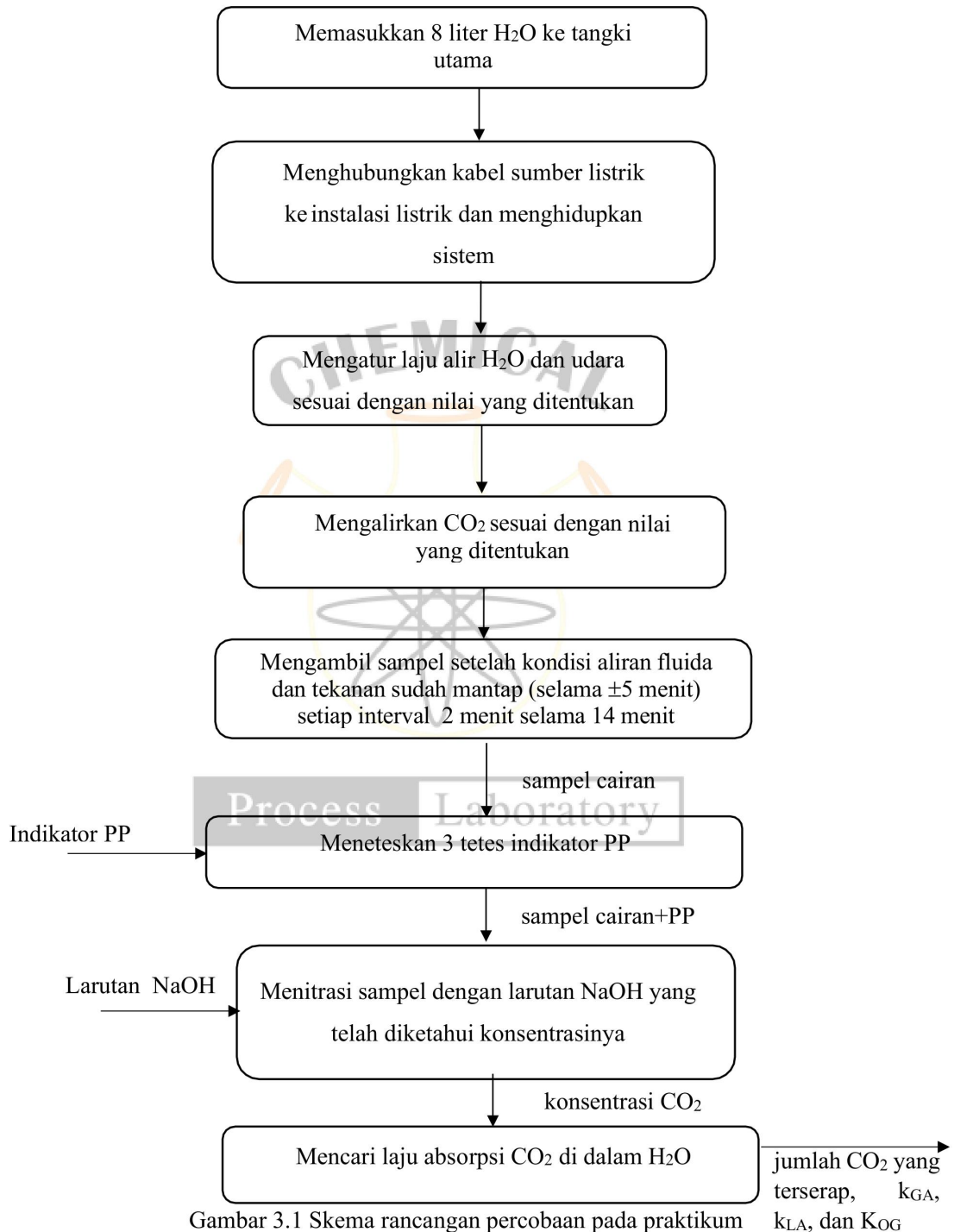
$$\delta = \frac{D_A(P_{in}-P_{out})}{\text{mol}(CO_3^{2-}) \cdot R.T} \quad (2.18)$$



BAB III

METODE PRAKTIKUM

3.1 Rancangan Percobaan



Gambar 3.1 Skema rancangan percobaan pada praktikum

3.1.1 Penetapan Variabel

- A. Variabel tetap:
- B. Variabel berubah:

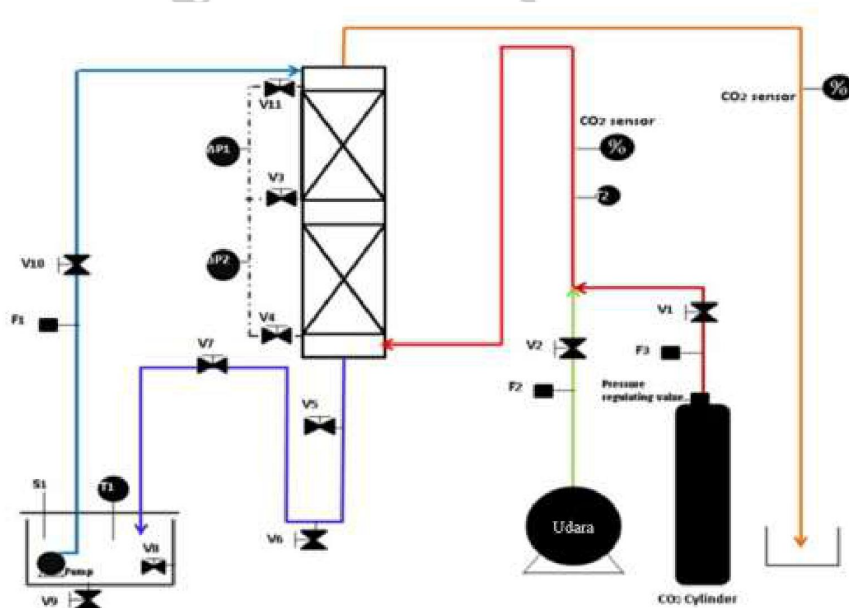
3.2 Bahan dan Alat yang Digunakan

1. Bahan yang digunakan

- 1. Kristal natrium hidroksida (NaOH) dengan kemurnian 98% b/b
- 2. Karbondioksida (CO₂) dalam fase cair yang disimpan di tabung bertekanan
- 3. Udara
- 4. Akuades (H₂O)
- 5. Indikator *phenolphthalein* (PP)

2. Alat yang digunakan

Rangkaian alat praktikum absorpsi terlihat pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Rangkaian alat utama

3.3 Respon Uji Hasil

Konsentrasi ion CO₃²⁻ dalam larutan sampel dan CO₂ yang terserap

3.4 Prosedur Praktikum

A. Persiapan alat

Pertama-tama kabel power pada sumber listrik ditancapkan dilanjutkan tombol ON/OFF diputar dan monitor alat akan menyala. Suplai air utama ke tangki bak dinyalakan dan biarkan tangki terisi. Memastikan saluran keluar air dari kolom dipasang ke pipa yang mengembalikan air

ke tangki. Dengan *valve* aliran gas V1 dan V2 tertutup, pompa cairan dihidupkan. Lalu, aliran air melalui kolom pada *flowmeter* F1 disesuaikan menggunakan katup V10. Kompresor dinyalakan dan *valve* V2 disesuaikan untuk memberikan aliran udara. *Valve* pengatur tekanan pada silinder CO₂ dibuka, dan katup V1 disesuaikan untuk memberi nilai pada pengukur aliran F3. Setelah 5 menit (kondisi aliran fluida dan tekanan sudah mantap), sebanyak 25 mL sampel cairan diambil melalui kran outlet pada bagian bawah kolom absorber dengan interval 2 menit selama 14 menit, dan catat perbedaan tekanan yang tersedia pada display. Sampel cairan dianalisis kadar karbon dioksida terlarut sebagai ion karbonat sesuai dengan prosedur pada tahap B.

B. Penentuan CO₂ terlarut

Sebanyak 2-3 tetes indikator PP ditambahkan ke dalam sampel cairan. Jika terbentuk warna merah dengan segera, maka tidak ada CO₂ bebas pada sampel. Selanjutnya, sampel dititrasi dengan larutan NaOH standar sesuai variabel sampai terbentuk warna merah muda yang tidak hilang 30 detik. Volume titran yang dibutuhkan pada langkah titrasi dicatat dan digunakan untuk menghitung jumlah karbon dioksida yang terlarut di dalam sampel.

Jumlah CO₂ yang terlarut dalam sampel air dihitung dari:

$$\text{gmol/liter CO}_2 = \frac{V \text{ titran} \times N \text{ titran}}{\text{volume sampel}} = C_d$$

3.5 Lembar Pengamatan

3.5.1 Variabel Operasi

- Variabel tetap:
- Variabel berubah:

3.5.2 Data

Tabel 3.1 Data pada variabel 1

| Waktu (menit) | Va out (mL) | ΔP_1 | ΔP_2 |
|---------------|-------------|--------------|--------------|
| | | | |
| | | | |

Tabel 3.2 Data pada variabel 2

| Waktu (menit) | Va out (mL) | ΔP_1 | ΔP_2 |
|---------------|-------------|--------------|--------------|
| | | | |
| | | | |

Tabel 3.3 Data pada variabel 3

| Waktu (menit) | Va out (mL) | ΔP_1 | ΔP_2 |
|---------------|-------------|--------------|--------------|
|---------------|-------------|--------------|--------------|



DAFTAR PUSTAKA

- Coulson, J. M.. & Richardson. J. F. (1996). *Chemical Engineering: Volume 1: Fluid flow heat transfer and mass transfer* (5th ed.). London: Butterworth Heinemann, 32.
- Danckwerts, P. V. (1970). *Gas Liquid Reactions* (5th ed.). New York: McGraw- Hill Book Company. Inc, 45.
- Danckwerts, P. V.. & Kennedy. B. E. (1954). Kinetics of liquid-film process in gas absorption. Part I: Models of the absorption process. *Transaction of the Institution of Chemical Engineers*, 32, S49–S52.
- Doran, P.M. (2013). *Bioprocess Engineering Principle* (2nd ed.). Elsevier.
- Franks, R. G. E. (1967). *Mathematical modeling in chemical engineering*. New York: John Wiley and Sons. Inc, 55.
- Juvekar, V. A. dan Sharma, M. (1972). Absorption of CO₂ in suspension of lime. *Chemical Engineering Science*, 28, 825–837.
- Kumoro, A. C. dan Hadiyanto. (2000). Absorpsi gas karbondioksida dengan larutan soda api dalam unggun tetap, *Forum Teknik*, 24(2). 186–195.
- Levenspiel, O. (1972). *Chemical Reaction Engineering. Chemical Engineering Science* (2nd ed.. Vol. 19). New York: John Wiley and Sons. Inc, 44.
- Ludwig, E. E. (1997). *Applied Process Design For Chemical And Petrochemical Plant* (2nd. ed.. Vol.2). Gulf Professional Publishing.
- McCabe, W.L., Smith, J.C., & Harriott, P. (1993). *Unit Operation of Chemical Engineering* (5th ed.). McGraw-Hill.Inc.
- Rehm, T. R., Moll, A. J. dan Babb, A. L. (1963). Unsteady state absorption of carbon dioxide by dilute sodium hydroxide solutions. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 9(5). 760–765.
- Seader, J.D., Henley, E.J., & Roper, D.K. (1997). *Separation Process Principles With Application Using Process Simulator* (2nd ed.). Wiley.
- Silia, H. (2003). *Chemical Process Engineering Design and Economics*. New York : Marcell Dekker. Inc.
- Towler, G., & Sinnott, R. (2008). *Chemical Engineering Design Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*. Elsevier.
- Wysocka, I., Gębicki, J., & Namieśnik, J. (2019). Technologies for deodorization of malodorous gases. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 9409-9434.

Zheng, Y. and Xu, X. (1992). Study on catalytic distillation processes. Part I. Mass transfer characteristics in catalyst bed within the column. *Transaction of the Institution of Chemical Engineers*, (Part A) 70. 459–464.

