

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

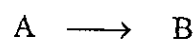
#### 2.1. Katalis

Katalis adalah suatu zat yang dapat mengubah kecepatan reaksi kimia. Sifat yang terpenting dari katalis adalah dapat mempercepat reaksi, yaitu dengan cara menurunkan energi aktivasi secara selektif. Berdasarkan fase dari reaktan dan katalis, katalis dapat digolongkan ke dalam dua macam yaitu katalis homogen dan katalis heterogen. Katalis homogen yaitu katalis dan reaktan-reaktan mempunyai fase yang sama sedangkan pada katalis heterogen fase antara reaktan dan katalis berbeda. Biasanya katalis heterogen berada pada fase padat, salah satu sifat struktur dari katalis tersebut adalah berpori dan mempunyai *internal surface* yang besar dapat mencapai 1000 m<sup>2</sup>/gram. Persyaratan utama pada sistem katalis heterogen adalah bahwa molekul-molekul reaktan fase gas atau larutan diadsorpsi ke permukaan katalis sedemikian rupa sehingga dengan proses adsorpsi tersebut menyebabkan energi aktivasi yang diperlukan oleh reaksi menjadi berkurang dengan demikian katalis tersebut dapat mempercepat reaksi (memudahkan terjadi reaksi)<sup>(3)</sup>. Secara umum tahap-tahap katalisis heterogen pada permukaan zat padat adalah :

1. Difusi reaktan ke dalam partikel katalis
2. Adsorpsi reaktan pada katalis
3. Interaksi dari reaktan pada permukaan katalis untuk membentuk produk
4. Desorpsi produk dari partikel katalis
5. Difusi produk keluar dari partikel katalis<sup>(4)</sup>.

### 2.1.1 Reaksi Katalis Heterogen<sup>(5)</sup>

Katalis merupakan sejumlah kecil materi yang ditambahkan kepada suatu reaksi kimia yang berjalan sangat lambat dengan tujuan agar reaksi tersebut dapat berjalan lebih cepat dan dicapai suatu keadaan setimbang. Katalis bekerja mempercepat reaksi dengan cara menurunkan energi aktivasi reaksi. Untuk menggambarkan keadaan ini maka dapat dimisalkan suatu reaksi sederhana:



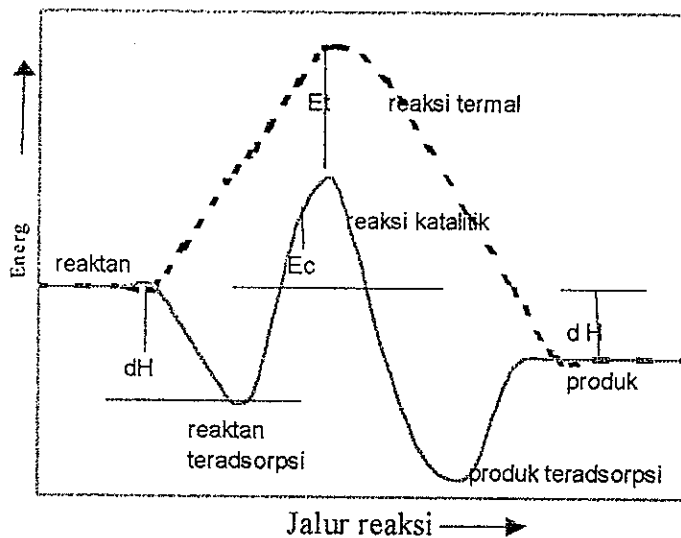
Persamaan laju untuk reaksi tersebut adalah:

$$r = k [A]^n \quad (1)$$

dengan  $r$  = laju reaksi,  $k$  = tetapan laju reaksi,  $A$  = konsentrasi reaktan dan  $n$  = orde reaksi. Terlihat dari persamaan diatas bahwa laju reaksi sebanding dengan konsentrasi reaktan, hubungan tetapan laju reaksi  $k$  dengan suhu dinyatakan seperti dalam rumusan berikut:

$$k = A e^{-E_a/RT} \quad (2)$$

dengan  $A$  = tetapan,  $E_a$  = energi aktivasi,  $R$  = tetapan gas dan  $T$  = temperatur. Bentuk eksponensial dari persamaan tersebut menunjukkan bahwa dengan penurunan energi aktivasi dalam jumlah tertentu akan memberi kenaikan yang berarti terhadap tetapan laju reaksi dengan demikian laju reaksi juga akan meningkat. Pada gambar 1 diperlihatkan bahwa energi aktivasi reaksi katalitik  $E_c$  lebih kecil daripada energi aktivasi reaksi termal  $E_t$ , artinya reaksi yang dibantu oleh katalis menjadi lebih cepat daripada reaksi termal biasa tanpa katalis. Terlihat juga dari gambar 1 bahwa reaksi katalitik merupakan suatu seri reaksi yang mencakup kemisorpsi reaktan ke permukaan katalis, reaksi permukaan dan desorpsi produk dari permukaan katalis.



Gambar. 1. Profil energi reaksi katalitik dan reaksi termal

Penurunan energi aktivasi reaksi oleh katalis terjadi sebagai akibat dari interaksi antara katalis dengan reaktan, katalis menyediakan situs aktif yang berperan dalam proses reaksi. Situs aktif ini dapat berasal dari logam-logam yang terdeposit pada penyangga atau dapat juga berasal dari penyangga itu sendiri.

### 2.1.2. Katalis Berpenyangga

Logam-logam yang aktif secara katalitik aktivitasnya tergantung pada berbagai faktor seperti luas permukaan, porositas, geometris permukaan, resistensi terhadap deaktivasi dan lain-lain. Faktor tersebut harus dioptimalkan sehingga didapatkan suatu katalis yang sesuai dengan kebutuhan yang akan digunakan. Usaha-usaha untuk mengoptimalkan faktor di atas biasanya dilakukan dengan cara mendispersikan logam-logam aktif di atas permukaan padatan tidak aktif yang disebut penyangga dan katalis yang didapatkan dari proses tersebut disebut sebagai katalis berpenyangga<sup>(6)</sup>.

Katalis berpenyangga merupakan katalis padat atau katalis heterogen dimana sejumlah kecil spesi dengan daya katalitik (umumnya logam) ditempatkan pada permukaan penyangga yang sebagian besar inert dan porous dengan bentuk tertentu seperti pelet, cincin, extrude dan granula<sup>(5)</sup>. Katalis yang melibatkan logam-logam group VI B dan group VIII B biasanya dibuat dengan cara mendistribusikan logam diatas penyangga yang mempunyai luas permukaan yang besar untuk menjamin supaya sebagian besar dari atom-atom logam dapat berinteraksi dengan reaktan<sup>(6)</sup>. Dilihat dari geometrinya penyangga mempunyai fungsi sebagai berikut:

1. Untuk menaikkan luas permukaan katalis
2. Mengoptimasi ukuran partikel dan kristal
3. Mengarahkan katalis sehingga dapat mengadsorpsi konfigurasi yang paling mendukung proses katalisis<sup>(2)</sup>.

### 2.1.3. Preparasi Katalis Berpenyangga

Karakteristik katalis ditentukan oleh komposisi kimianya, sedangkan jika komposisinya tetap maka karakteristik dari katalis tersebut tergantung pada metoda dan kondisi preparasi yang digunakan<sup>(7)</sup>.

Tujuan utama preparasi katalis berpenyangga adalah untuk mendistribusikan fase aktif pada materi yang berpori besar sehingga diperoleh aktivitas yang maksimum per satuan berat katalis. Metoda preparasi katalis berpenyangga merupakan suatu proses bertahap, yaitu:

1. Distribusi senyawa prekursor katalis, dalam hal ini garam logam pada permukaan penyangga. Jika pendistribusian logam-logam tersebut ke dalam sistem pori

penyangga cukup baik, maka akan dihasilkan katalis dengan luas permukaan yang lebih besar daripada katalis logam tanpa penyangga.

2. Pengeringan, merupakan perlakuan termal pada temperatur  $77\text{ }^{\circ}\text{C} - 227\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tujuannya untuk menghilangkan pelarut yang digunakan pada proses pendistribusian garam prekursor.
3. Kalsinasi, adalah perlakuan termal pada temperatur sedang, cukup tinggi sampai temperatur tinggi diatas  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tujuannya adalah mendekomposisi senyawa prekursor membentuk spesi oksida.
4. Aktivasi, adalah transformasi bentuk oksida menjadi bentuk yang sesuai dengan bentuk katalis yang diharapkan, biasanya dilakukan pada saat katalis akan digunakan dalam reaksi<sup>(8)</sup>.

## 2.2. Katalis Mo-Co/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Katalis yang digunakan dalam proses hidrodesulfurisasi terdiri dari  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebagai penyangga, Mo sebagai logam aktif dan Co sebagai promotor. Sistem katalis ini dikenal juga sebagai katalis kobal-molibdat. Dalam proses hidrodesulfurisasi katalis Mo-Co/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> berada dalam bentuk sulfida, sehingga sebelum katalis tersebut dipakai maka terlebih dahulu harus dilakukan proses aktivasi menjadi bentuk sulfida<sup>(9)</sup>.

Katalis berpenyangga  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> telah banyak digunakan dalam industri perminyakan dan kimia, dalam beberapa reaksinya  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mempunyai peranan dalam aktivitas katalitik tetapi dalam kasus lain  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> berfungsi sebagai substrat

inert untuk komponen aktif katalis. Pada sistem katalis Mo-Co/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> untuk hidrodesulfurisasi,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> berfungsi sebagai penyangga yang tidak aktif<sup>(10)</sup>.

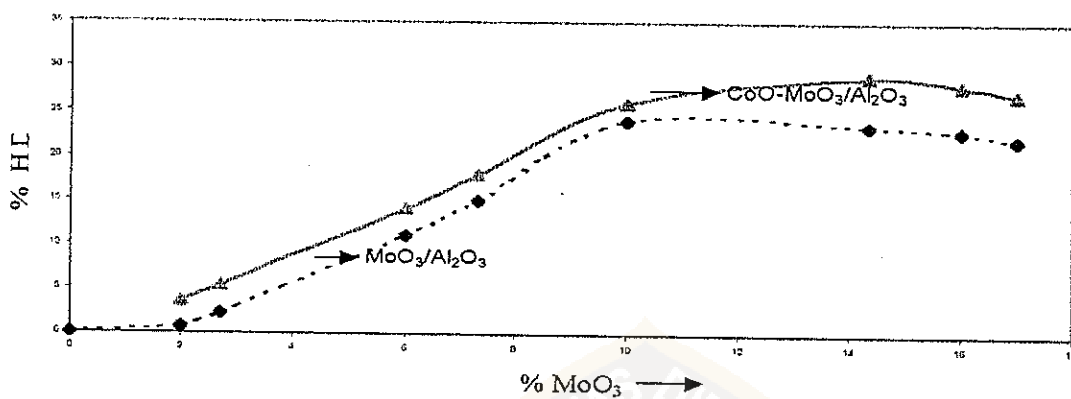
Molibdenum oksida merupakan komponen yang sangat penting dalam katalis, tetapi fase tunggal dari MoO<sub>3</sub> jarang dipakai karena aktivitasnya rendah sehingga umumnya MoO<sub>3</sub> ini dicampurkan dengan oksida lain<sup>(11)</sup>.

Aktivitas katalis sistem MoO<sub>3</sub>/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dalam hidrodesulfurisasi thiophen telah dikemukakan oleh Beer<sup>(12)</sup>, yaitu dengan bertambahnya MoO<sub>3</sub> maka persen konversi dari thiophen bertambah atau dapat dikatakan aktivitasnya meningkat. Tetapi pada titik maksimum penambahan MoO<sub>3</sub> tidak akan meningkatkan lagi aktivitas dalam hal ini persen konversi konstan dan cenderung menurun. Hal ini disebabkan terjadinya penumpukan MoO<sub>3</sub> yang dapat menyebabkan sintering dan katalis terdeaktivasi<sup>(12)</sup>. Gambar 2 memperlihatkan hubungan antara konsentrasi MoO<sub>3</sub> dan persen konversi dari thiophen.

Promotor Co dalam sistem katalis Mo-Co/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> digunakan untuk meningkatkan aktivitas katalis melalui transfer elektron kepada logam aktif sehingga secara keseluruhan sistem katalis tersebut lebih reaktif<sup>(13)</sup>. Beer<sup>(12)</sup> juga memperlihatkan sistem katalis Mo-Co/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mempunyai aktivitas yang lebih tinggi daripada sistem Mo/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Preparasi katalis Mo-Co/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> meliputi pendistribusian logam Mo sebagai fasa aktif dan Co sebagai promotor ke dalam pori-pori penyangga  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> melalui salah satu metode yaitu impregnasi, ion exchange, presipitasi dan kopresipitasi<sup>(6)</sup>. Metoda yang digunakan dalam mendistribusikan logam Mo dan Co pada permukaan penyangga  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> akan berpengaruh pada aktivitas katalis dalam reaksi

hidrodesulfurisasi. Metode sederhana yang biasa dipakai adalah metode impregnasi kering yaitu dengan cara memasukkan garam prekursor ke penyangga. Tetapi dalam metode tersebut masih sulit untuk mencapai dispersi yang tinggi karena selama kalsinasi dan/atau aktivasi akan terjadi migrasi serta sintering<sup>(2)</sup>.



Gambar.2. Persen konversi hidrodesulfurisasi thiopen dengan katalis berpenyangga  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### 2.3. Impregnasi Basah

Impregnasi basah adalah suatu metoda untuk mendispesikan logam ke dalam penyangga dengan cara perendaman. Konsentrasi garam prekursor disesuaikan dengan pori-pori penyangga yang digunakan sehingga terjadi interaksi antara larutan garam prekursor dengan penyangga. Kemudian dengan adanya gaya kapiler yang disebabkan oleh perbedaan tekanan antar lapisan permukaan, larutan akan masuk ke dalam pori-pori penyangga dan didistribusikan. Proses ini relatif cepat, tetapi lambat jika ada udara yang terdapat dalam pori-pori penyangga, umumnya pori-pori terisi dengan larutan setelah kurang lebih 10 detik<sup>(4)</sup>.

Secara teoritis konsentrasi zat terlarut sama pada semua titik di dalam pori tetapi pada kasus tertentu rendahnya kekentalan dari pelarut menyebabkan difusi pelarut tersebut lebih cepat daripada zat terlarut sehingga dibutuhkan waktu beberapa jam untuk mencapai keadaan homogen seluruhnya.

Berdasarkan teori yang dikemukakan oleh Weisz dalam Bonneviot<sup>(14)</sup>, pada saat perendaman terjadi proses sebagai berikut:

1. Perpindahan garam logam dari badan pelarut ke permukaan penyangga.
2. Difusi garam logam melalui pori-pori penyangga, dalam hal ini jika padatan penyangga kering maka larutan akan terpenetrasi ke dalam pori dengan gaya kapileritas.
3. Terdeposisinya garam logam di atas permukaan pori penyangga yang secara simultan terjadi dengan kedua langkah di atas<sup>(14)</sup>.

Katalis berpenyangga biasanya dibuat menggunakan metoda impregnasi basah, dalam hal ini penyangga direndam dalam larutan tidak jenuh yang mengandung komponen logam aktif atau promotor. Pada proses perendaman keadaan kesetimbangan akan tercapai dalam waktu yang cukup lama karena kecilnya koefisien difusi untuk fase larutan. Weisz dan Harriot<sup>(15)</sup> menentukan waktu untuk mencapai keadaan kesetimbangan dalam persamaan berikut:

$$t_d = R_o^2 (1 + P)\beta/D_1E \quad (3)$$

Sedangkan konsentrasi kesetimbangannya adalah:

$$C_o V_o = C_{eq} [V_o + (f_o + P)E] \quad (4)$$



dengan  $t_d$  = karakteristik waktu difusi,  $R_o$  = jari-jari pelet,  $P$  = parameter karakteristik interaksi antara pelet-komponen aktif,  $\beta$  = koefisien tortuositas pori.  $D_L$  = koefisien difusi untuk fase larutan,  $E$  = porositas spesifik penyangga,  $C_o$  = konsentrasi awal,  $C_{eq}$  = konsentrasi kesetimbangan,  $f_o$  = bagian volume pori yang terisi oleh pelarut <sup>(15)</sup>.

### 2.3.1 Adsorpsi <sup>(16)</sup>

Peristiwa penyerapan suatu zat pada permukaan zat lain disebut adsorpsi. Zat yang diserap disebut adsorbat sedangkan zat yang menyerap disebut adsorben. Peristiwa adsorpsi disebabkan oleh gaya tarik molekul-molekul pada permukaan adsorben. Adsorpsi dapat dijelaskan melalui tegangan permukaan dari suatu padatan. Molekul-molekul yang ada di dalam suatu zat padat mendapat gaya-gaya yang sama dari semua arah, sedangkan molekul-molekul pada permukaan zat padat mendapat gaya-gaya yang tidak sama, sehingga untuk mengimbangi gaya-gaya bagian dalam maka molekul-molekul lain biasanya gas atau cairan menjadi tertarik ke permukaan. Gaya ini relatif lemah dan disebut dengan gaya Van der Waals.

Zat dengan berat molekul yang tinggi biasanya mudah diserap, disamping itu terbentuknya konsentrasi kesetimbangan lebih cepat dan diikuti oleh difusi secara perlahan ke dalam partikel padatan. Kecepatan adsorpsi dipengaruhi oleh pH dan kesetimbangan adsorpsi berubah dengan perubahan konsentrasi dari zat terlarut yaitu adsorbat, temperatur dan pH larutan.

Ada dua macam adsorpsi yang umum dikenal, yaitu adsorpsi fisika (fisisorpsi) dan adsorpsi kimia (kimisorpsi).

#### a. Adsorpsi fisika

Adsorpsi jenis ini mekanismenya hampir sama dengan proses kondensasi. Pada adsorpsi fisik gaya yang menahan adsorpsi molekul-molekul cairan ke permukaan padatan relatif lemah dan besarnya sama dengan gaya kohesi molekul pada fasa cair (gaya Van der Waals). Panas yang dilibatkan selama proses adsorpsi ini mempunyai derajat yang sama dengan panas kondensasi dari gas menjadi cair (0,5-5 kkal/mol). Keseimbangan antara molekul-molekul gas biasanya cepat tercapai dan bersifat reversibel karena kebutuhan energinya kecil.

#### b. Adsorpsi kimia

Adsorpsi jenis ini melibatkan gaya-gaya yang jauh lebih besar daripada adsorpsi fisik. Menurut Langmuir, molekul-molekul yang teradsorpsi ditarik ke permukaan oleh gaya-gaya valensi seperti halnya yang sering terjadi antara atom-atom didalam molekul. Adsorpsi ini membentuk molekul baru dan prosesnya irreversibel. Proses adsorpsi ini dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu sifat fisik dan kimia dari adsorben dan adsorbat (seperti luas permukaan, ukuran pori-pori, komposisi kimia, ukuran molekul, polaritas molekul), sifat dari fasa cair (pH dan temperatur), konsentrasi dari adsorbat untuk fasa cair, waktu kontak antara adsorbat dengan adsorben.

### 2.3.2. Difusi

Difusi didefinisikan sebagai suatu proses dimana molekul bergerak dari suatu bagian sistem ke bagian lain berdasarkan pergerakan molekuler secara acak. Koefisien difusi ( $D$ ) merupakan karakteristik dari proses difusi.<sup>(17)</sup>

Mekanisme difusi pada proses impregnasi penyangga dalam larutan garam prekursor telah dikemukakan oleh Weisz<sup>(15)</sup> yang ditetapkan pada konsentrasi pelarut di luar pelet tetap. Dalam mekanisme tersebut disebutkan bahwa proses penyerapan dan difusi terjadi karena adanya gaya kapileritas yang berlangsung pada saat pengisian pori penyangga. Pada saat penyangga mulai direndam dalam larutan impregnasi, maka fasa larutan ini dengan pengaruh gaya kapiler akan masuk kedalam pori-pori. Tekanan yang menyebabkan adanya gaya kapiler ini disebut sebagai tekanan kapiler ( $P_{cap}$ ) yang tergantung pada tegangan permukaan dari larutan ( $\sigma_L$ ), sudut kontak antara larutan dan penyangga ( $\theta$ ) dan karakteristik ukuran pori penyangga ( $r$ ). Nilai-nilai ini dihubungkan dalam persamaan sebagai berikut<sup>(15)</sup>:

$$P_{cap} = \frac{2\sigma_L \cos \theta}{r} \quad (5)$$

Beberapa macam difusi pada benda padat memperhatikan struktur bahan yang bersangkutan, diantaranya dipengaruhi oleh ukuran dan bentuk pori. Karena kecilnya pori-pori maka difusi yang terjadi dipengaruhi oleh diameter pori-porinya. Pada difusi ini juga diperhatikan faktor yang disebut sebagai *mean free path* ( $\lambda$ ) yaitu jarak rata-rata perjalanan sebuah molekul sebelum bertumbukan dengan molekul lain. Di bawah ini terdapat tipe-tipe difusi yang terjadi pada pori-pori bahan dan dipengaruhi oleh ukuran pori dan  $\lambda$ .

#### 1. Difusi Knudsen

Molekul berdifusi melalui kapiler berdiameter  $d$ . Nilai  $d$  yang berpengaruh pada difusi ini, karena nilai  $\lambda$  sangat besar dibandingkan dengan  $d$ . Difusi molekul

yang terjadi tidak dipengaruhi oleh molekul yang lain, melainkan dipengaruhi oleh tumbukan antara molekul dan dinding bahan.

## 2. Difusi Molekuler

Berlawanan dengan difusi tipe Knudsen, pada difusi ini diameter pori sangat besar dibandingkan  $\lambda$ , sehingga nilai  $\lambda$  yang mempengaruhi proses difusi bahan.

Tumbukan antar molekul mempengaruhi difusi yang terjadi tetapi tumbukan antara molekul dan dinding bahan tidak memberi pengaruh nyata.

## 3. Difusi Transisi

Jika  $\lambda$  dan diameter  $d$  berukuran berimbang, yaitu diantara batas difusi knudsen dan molekuler, maka muncul tipe difusi transisi. Pada difusi ini kedua jenis tumbukan baik tumbukan antara molekul dan dinding bahan diperhatikan pengaruhnya<sup>(18)</sup>.

### 2.3.3. Persamaan Difusi

Salah satu metoda yang dapat digunakan untuk menghitung koefisien difusi yaitu berdasarkan hukum Fick I tentang difusi yang dijabarkan dalam persamaan berikut:

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial X} \quad (6)$$

Dengan  $F$  = Laju perpindahan massa per satuan luas (gram/jam.m<sup>2</sup>),  $C$  = Konsentrasi zat yang berdifusi (gram/m<sup>3</sup>),  $X$  = Koordinat yang diukur tegaklurus arah konsentrasi (meter),  $D$  = Koefisien difusi (m<sup>2</sup>/jam).

Dalam usaha mencapai keseimbangan massa dari bahan yang diamati pada satu dimensi, maka ditetapkan hukum Fick II sebagai berikut:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \quad (7)$$

dengan  $C$  = Konsentrasi zat yang berdifusi ( $\text{gram/m}^3$ ) dan  $t$  = lamanya difusi (jam).

Persamaan 7 menunjukkan bahwa laju perubahan konsentrasi sebanding dengan turunan kedua dari perubahan konsentrasi terhadap jarak. Jika konsentrasi berubah dengan tajam dari titik ke titik, maka konsentrasi berubah dengan cepat terhadap waktu sedangkan jika konsentrasi berkurang secara linier dengan jarak, maka konsentrasi pada setiap titik adalah konstan, karena aliran partikel ke dalam tepat diimbangi oleh aliran keluar.

Persamaan difusi merupakan persamaan turunan kedua terhadap ruang dan turunan orde pertama terhadap waktu, oleh karena itu dalam menyelesaikan persamaan difusi harus ditentukan kondisi batas ruang dan waktu terlebih dahulu. Penyelesaian persamaan difusi ini berguna dalam penentuan koefisien difusi secara eksperimen.<sup>(19)</sup>

Sejumlah model persamaan difusi telah diusulkan untuk menghitung koefisien difusi suatu bahan dalam berbagai bentuk geometri. Barrer<sup>(20)</sup> mengusulkan model persamaan difusi yang terjadi pada bahan yang dianggap sebagai suatu silinder tak terbatas tanpa perubahan dimensi, yang didasarkan pada persamaan hukum Fick II yaitu:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial^2 C}{\partial r} \right) \right] \quad (8)$$

Persamaan 8 dipecahkan melalui pemisahan variabel yang berbentuk sebagai berikut:

$$C = U e^{-D\alpha^2 t / r^2} \quad (9)$$

Sehingga dari hasil pemisahan variabel tersebut, persamaan 9 menjadi,

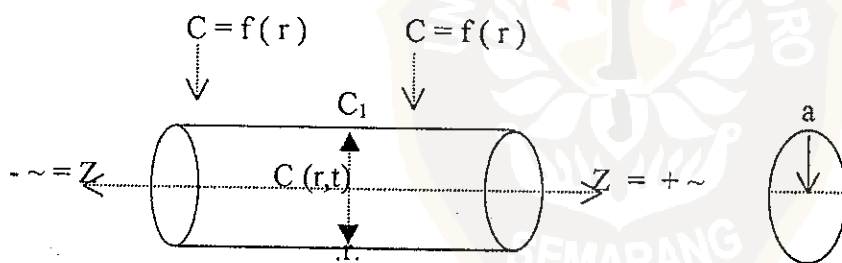
$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + U\alpha^2 = 0 \quad (10)$$

Persamaan ini identik dengan persamaan fungsi Bessel orde nol jenis pertama, dimana untuk zat terlarut yang berdifusi dalam waktu  $t$  pada medium silinder dengan jarak  $a$  dengan kondisi batas:

$$C_1 = 0 \text{ pada } r = a \text{ untuk semua nilai } t$$

$$C = f(r) \text{ untuk } a < r < 0 \text{ pada } t = 0$$

$C_1$  adalah konsentrasi zat terlarut di permukaan, yang dianggap tidak berubah selama terjadi proses difusi. Ilustrasi dari kondisi batas diatas adalah sebagai berikut:



Maka secara umum penyelesaian fungsi Bessel pada kondisi ini adalah:

$$C = \frac{2}{a^2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-D\alpha_n^2 t} \frac{\int_0^a r f(r) J_0(\alpha_n r) dr}{[J_0(\alpha_n a)]^2} J_0(\alpha_n r) \quad (11)$$

Dengan  $f(r) = C_0$ , maka persamaan (24) menjadi,

$$C = -\frac{2C_0}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_n} e^{-D\alpha_n^2 t} \frac{J_0(\alpha_n r)}{J_1(\alpha_n a)} \quad (12)$$

Konsentrasi rata-rata pada waktu  $t$  diperoleh dengan mengintegrasikan persamaan 15 dari  $r = 0$  sampai dengan  $r = a$  dibagi luas penampangnya, sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$C = \frac{4C_0}{a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_n^2} e^{-D\alpha_n^2 t} \quad (13)$$

$C$  = konsentrasi rata-rata difusan pada waktu  $t$ ,  $C_0$  = konsentrasi awal difusan,  $D$  = koefisien difusi,  $a$  = jarak yang ditempuh difusan dalam hal ini adalah jari-jari pelet,  $t$  = waktu lamanya difusi dan  $\alpha_n$  = akar positif fungsi Bessel

Penyelesaian persamaan difusi untuk silinder tak berhingga dan nilai  $\alpha_n$  dapat dilihat pada lampiran 1<sup>(20)</sup>.

