

PENGOLAHAN SERBUK LIMBAH BESI MENJADI BESI (III): TINJAUAN KINETIKA MODEL QUASI STEADY STATE

Andi Aladin^{*}), Takdir Syarif, Lastri Wiyani dan Rismawati Rasyid

Jurusan Teknik Kimia FTI-UMI Makassar
Kampus II UMI Jl. Urip Sumoharjo Km 5 Makassar
Tlp./fax.: (0411)454534/(0411)458724, Hp: +6281355569596
^{*}Penulis korespondensi: addin@pascaumi.ac.id

Abstrak

Telah dilakukan penelitian pengolahan (oksidasi) limbah serbuk besi menjadi besi (II) dan besi (III) menggunakan katalis MnO_2 . Dipelajari beberapa variabel reaksi yaitu waktu, laju alir udara, suhu, dan massa katalis. Proses oksidasi berlangsung dalam reaktor batch labu leher tiga dilengkapi kompresor sebagai pembangkit udara (oksigen) dan kondensor sebagai pendingin balik. Analisis hasil reaksi menggunakan metode titrasi dengan larutan $KMnO_4$. Dicari regim yang menentukan kecepatan reaksi dan dirumuskan persamaan laju reaksi berdasarkan pendekatan model quasi steady state. Disimpulkan bahwa dalam proses oksidasi fero sulfat menjadi feri sulfat menggunakan katalis murni MnO_2 dapat didekati cukup baik dengan model quasi steady state (SSE $0,5 \cdot 10^{-4}$). Pada proses tersebut laju oksidasi dikendalikan oleh reaksi kimia, dengan persamaan

$$(-r_B) = 2\alpha\beta \left[\frac{1}{k_R} - \sqrt{\left(\frac{1}{k_R}\right)^2 - \frac{P_A C_B}{\alpha \beta H_A}} \right]$$

Penggunaan katalis MnO_2 dalam oksidasi cukup efektif, dapat

menghasilkan konversi maksimum 97% dengan waktu reaksi, temperatur, kecepatan pengadukan dan massa (rasio) katalis optimum berturut-turut 90 menit, $90^\circ C$, 400 rpm dan 0,3.

Kata kunci: feri, fero, katalis MnO_2 , limbah besi, model quasi steady state

Abstract

Research on the processing of iron powder waste by oxidation to produced iron (II) and iron (III) using MnO_2 as a catalyst has been conducted. Variables studied were time, air flow rate, temperature and catalyst mass. The oxidation was performed in a batch reactor of a three neck flask which was equipped with a compressor to supply air (oxygen) and a condensor. The products were analysed using a titration method with $KMnO_4$ solution. The controlling regim of the reaction rate was studied to developed a reaction rate equation based on a quasi steady state model. It was found that in the oxidation process of iron (II) sulphate to yield iron (III) sulphate, the quasi steady state model is good enough to represent the process (SSE 0.5×10^{-4}). In the process, the oxidation rate was controlled by chemical reaction with the following equation $(-r_B) = 2\alpha\beta \left[\frac{1}{k_R} - \sqrt{\left(\frac{1}{k_R}\right)^2 - \frac{P_A C_B}{\alpha \beta H_A}} \right]$ In this process, the

maximum conversion reached was 97%, at reaction time, temperature, mixing rate and catalyst ratio of 90 minutes, $90^\circ C$, 400 rpm and 0.3, respectively

Keywords: iron (II), iron (III), MnO_2 catalyst, iron waste, quasi steady-state model

PENDAHULUAN

Besi merupakan salah satu jenis limbah yang banyak dijumpai di industri-industri pengolahan logam seperti industri pembuatan paku, alat-alat rumah tangga dan alat-alat mekanik. Limbah besi ini berpotensi menimbulkan masalah pencemaran lingkungan. Salah satu alternatif mengatasinya adalah dengan mengolahnya menjadi besi (II) dalam bentuk

senyawa fero dan besi (III) dalam bentuk senyawa feri. Besi (II) ini bermanfaat untuk berbagai keperluan seperti sebagai *coagulant* dalam proses penjernihan air, sebagai pewarna permanen tinta dalam industri tinta, dan sebagai penajam dalam perwarnaan wool dalam industri tekstil.

Serbuk besi dapat dilarutkan dalam asam sulfat membentuk besi (II) berupa senyawa fero sulfat

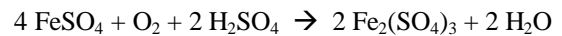
(FeSO₄). Okidasi lanjut besi (II) menjadi besi (III) dalam bentuk feri sulfat (Fe₂(SO₄)₃) dapat dilakukan dengan bantuan katalis asam fospat (Megawati, 2004) atau katalis karbon aktif (Ronnholm *et al.*, 1999). Besi (III) memiliki manfaat yang lebih luas, misalnya senyawa feri sulfat dapat dimanfaatkan sebagai *coagulant* dalam proses penjernihan air, bahkan efek koagulan feri sulfat 11 kali lebih besar dibandingkan fero sulfat (Ronnholm *et al.*, 1999). Feri sulfat juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan aditif semen pada industri beton, dan sebagai bahan pelapis pada pita video dan kaset. Novita (2001) telah menggunakan feri sulfat untuk menurunkan nilai COD (*Chemical Oxygen Demand*) limbah cair pabrik tebu yang mengandung pigmen coklat gelap (*melanoidin*). Aladin, dkk (2002) telah membuktikan bahwa reduksi sulfur anorganik (pirit) batubara memungkinkan dilakukan dengan menggunakan oksidator feri sulfat. Hanya saja dalam penelitian tersebut laju desulfurisasinya relatif lambat disebabkan dilakukan pada temperatur kamar.

Memperhatikan demikian besar dan beragam manfaat besi (III) seperti diuraikan di atas, maka menarik untuk melakukan penelitian pengolahan limbah besi (yang selama ini banyak tercecer dan berpotensi menjadi sumber pencemaran) menjadi besi (III) untuk melengkapi penelitian-penelitian sebelumnya. Dalam penelitian ini hal baru yang dipelajari adalah sumber bahan limbah serbuk besi, katalisator MnO₂ dan model kinetika oksidasi besi dalam tinjauan campuran reaksi heterogen padat-cair-gas, termasuk menentukan regim yang berpengaruh pada laju oksidasi. Dicari pula beberapa variabel reaksi optimum yang memberikan hasil konversi reaksi maksimum.

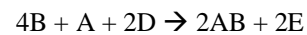
Penelitian ini bertujuan mengolah limbah serbuk besi menjadi fero sulfat dan feri sulfat,

menerapkan katalisator MnO₂ dalam oksidasi besi (II) menjadi besi (III), menentukan regim yang berpengaruh laju oksidasi dan menentukan beberapa variabel oksidasi optimum. Dari penelitian ini memberikan manfaat terhadap pemahaman mekanisme reaksi oksidasi besi dalam sistem campuran heterogen, sedangkan manfaat praktis adalah mengeliminir problem limbah besi sehingga terhindar dari dampak pencemaran lingkungan, sekaligus memberikan nilai tambah (*add value*) atau nilai ekonomi terhadap hasil olahan limbah besi tersebut.

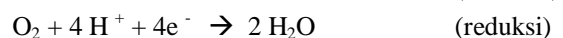
Reaksi oksidasi katalisis fero sulfat menjadi feri sulfat dengan menggunakan katalis MnO₂ merupakan reaksi heterogen gas-cair-padat dan berlangsung dalam suasana asam. Udara secara kontinyu digelembungkan dengan menggunakan *sparger*, sedangkan katalis yang berbentuk serbuk dimasukkan dalam larutan fero sulfat sehingga akan terjadi suspensi di dalam reaktor (Ronnholm *et al.*, 1999). Adapun persamaan reaksi sebagai berikut:



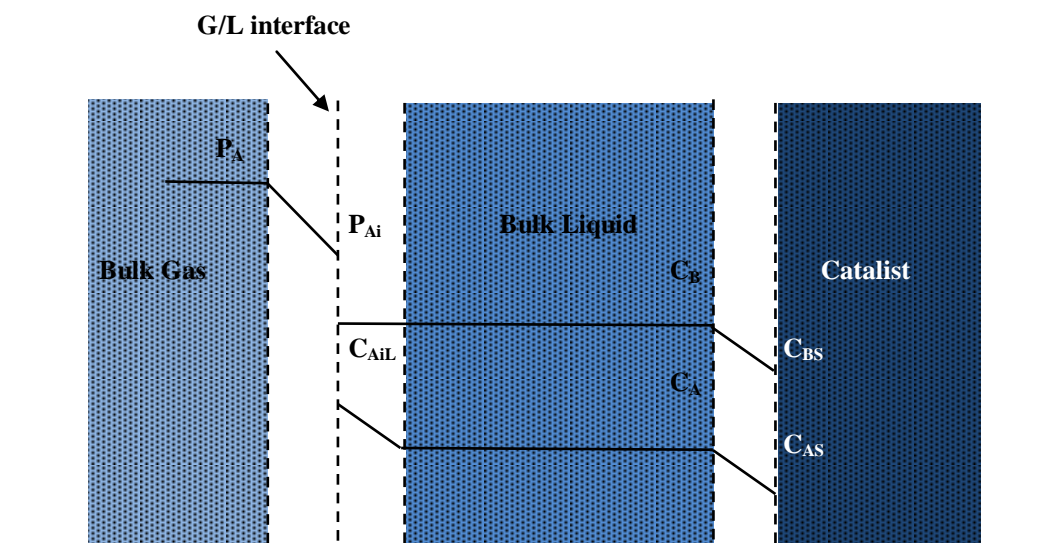
atau secara simbolik persamaan reaksi ditulis menjadi:



Persamaan reaksi kimia di atas dapat ditulis dalam bentuk reaksi ion sebagai berikut:



Sebelum terjadi reaksi, O₂ terlebih dahulu mendifusi dari badan gas ke badan cairan dan selanjutnya ke permukaan katalis. Mekanisme yang terjadi pada proses oksidasi tersebut dapat dijelaskan seperti pada Gambar 1 (Cher and Davidson, 1954; Ronnholm *et al.*, 2002).



Gambar 1. Mekanisme perpindahan massa sistem gas-cair-padat

Mekanisme :

$A_{(G)} \rightarrow A_{(IL)}$ perpindahan massa A dari bulk gas ke G/L interface (r_1)

$A_{(IL)} \rightarrow A_{(L)}$ perpindahan massa A dari G/L interface ke bulk liquid (r_2)

$A_{(L)} \rightarrow A_{(P)}$ perpindahan massa A dari bulk liquid ke permukaan katalis (r_3)

$B_{(L)} \rightarrow B_{(P)}$ perpindahan massa B dari bulk liquid ke permukaan katalis (r_4)

$A_{(P)} + 4 B_{(P)} \rightarrow 2 AB_{(P)}$ reaksi kimia di permukaan katalis (r_5)

$AB_{(P)} \rightarrow AB_{(L)}$ desorpsi dari permukaan katalis ke bulk liquid (r_6)

Laju setiap langkah tersebut (setelah beberapa penyederhanaan) adalah sebagai berikut:

$$r_1 = k_g a_g (P_A - P^*) = k_g a_g (P_A - H_{A1} C_{AIL}) = k_g a_g H_{A1} \left(\frac{P_A}{H_{A1}} - C_{AIL} \right) \quad (1)$$

$$r_2 = k_{LA} a_g (C_{AIL} - C_A) \quad (2)$$

$$r_3 = k_{Ac} a_c (C_A - C_{AS}) \quad (3)$$

$$r_4 = k_{Bc} a_c (C_B - C_{BS}) \quad (4)$$

$$r_5 = k_R C_{Bs} C_{As} \quad (5)$$

$$r_6 = k_{ABc} a_c (C_{ABS} - C_{AB}) \quad (6)$$

Pada proses oksidasi reduksi di atas terjadi perubahan pH larutan, namun dengan adanya senyawa asam dalam larutan, maka pH larutan dapat dipertahankan. Untuk menjelaskan secara baik perilaku dari proses yang ditinjau, maka dikenal beberapa model matematis, diantaranya adalah model *quasi steady state* $r_5 = r_4 = 4r_3 = 4r_2 = 4r_1 = 2r_6$

Bila persamaan 1, 2 dan 3 diatur kembali kemudian dijumlahkan maka diperoleh persamaan laju konsumsi oksigen (A) sebagai berikut :

$$-r_A = \frac{\frac{P_A}{H_A} - C_{As}}{\left(\frac{1}{k_g a_g H_{A1}} + \frac{1}{k_{LA} a_g} + \frac{1}{k_{Ac} a_c} \right)} \quad (7)$$

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{k_g a_g H_{A1}} + \frac{1}{k_{LA} a_g} + \frac{1}{k_{Ac} a_c} \quad (8)$$

$$(-r_B) = 2\alpha\beta \left[\left(\frac{P_A}{\beta H_A} + \frac{C_B}{4\alpha} + \frac{1}{k_R} \right) - \sqrt{\left(\frac{P_A}{\beta H_A} + \frac{C_B}{4\alpha} + \frac{1}{k_R} \right)^2 - \frac{P_A C_B}{\alpha \beta H_A}} \right] \quad (9)$$

Dengan asumsi $C_B \approx 0$ dan nilai α atau β cukup besar, maka diperoleh persamaan laju konsumsi B:

$$-r_B = \frac{P_A C_B}{\left(\frac{P_A}{\beta} + \frac{H_A C_B}{4\alpha} + \frac{H_A}{k_R} \right)} \quad (10)$$

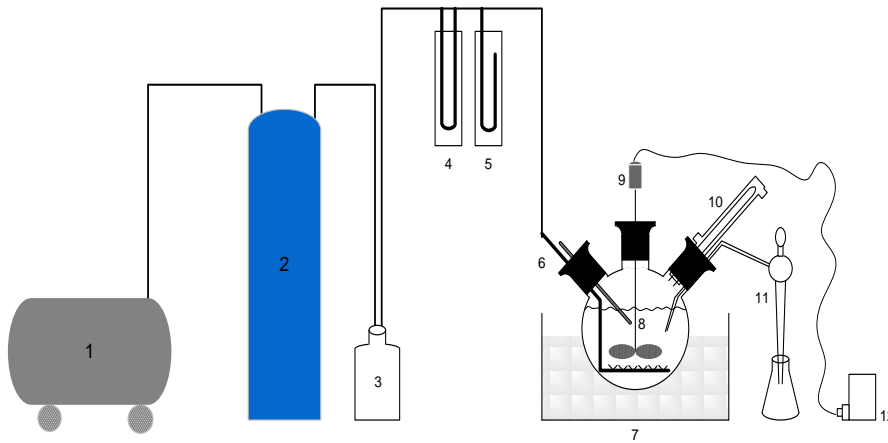
Persamaan neraca massa B (9 dan 10) di atas dapat diselesaikan secara numerik dengan metode Runge-Kutta (Aladin dan Syarif, 2002; Jenson and Jeffreys, 1977). Parameter H_A diperoleh dari Tabel 3-140 (Perry's and Green, 6th ed, p. 3-103) sedangkan parameter-parameter α , k_R , dan β dapat diperoleh dengan jalan optimasi multi variabel yang memberikan *sum of square of error* (SSE) minimum dengan metoda Hooke-Jeeves (Sediawan dan Prasetya, 1997). Untuk mengetahui mekanisme mana yang mengendalikan, maka dilakukan variasi kecepatan aliran gas, massa katalis, putaran pengaduk dan suhu. Jika kecepatan aliran gas atau massa katalis berpengaruh dominan terhadap laju reaksi, maka yang mengendalikan reaksi adalah perpindahan massa. Tetapi apabila temperatur berpengaruh dominan terhadap laju reaksi, maka yang mengendalikan adalah reaksi kimia.

METODE PENELITIAN

Bahan utama dalam penelitian ini berupa limbah serbuk besi diperoleh dari bengkel las dan bubuk, di Balai Latihan Tenaga Kerja (BLK) kota Makassar (sulawesi selatan). Bahan pereaksi asam sulfat, katalis murni MnO_2 dan $KMnO_4$ serta bahan bantu lainnya diperoleh dari laboratorium Riset jurusan Teknik Kimia FTI-UMI Makassar. Alat utama berupa reaktor labu leher tiga yang dilengkapi pengaduk mekanik, pemanas listrik, pendingin balik dan pengambil sampel serta kompresor pembangkit udara dengan susunan rangkaian alat (Gambar 2).

Serbuk besi dilarutkan dengan asam sulfat di dalam labu leher tiga pada temperatur 75°C. Larutan dibiarkan dingin, kemudian disaring dengan menggunakan kertas saring. Kandungan besi (II) dalam filtrat yang dihasilkan dianalisis dengan cara titrasi menggunakan larutan $KMnO_4$. Larutan besi (II) selanjutnya dimasukkan ke dalam labu leher 3 yang dilengkapi pemanas dan pendingin balik. Campuran larutan dipanaskan sambil diaduk hingga mencapai temperatur yang diinginkan. Setelah temperatur konstan, sebagian bahan diambil untuk menentukan konsentrasi awal fero sulfat. Katalis dengan berat tertentu dimasukkan ke dalam reaktor dan udara dialirkan dari dasar reaktor dengan kecepatan tertentu. Sampling dilakukan tiap 10 menit, masing-masing dianalisis kandungan fero tersisa dengan titrasi $KMnO_4$. Percobaan diulang untuk variasi waktu, temperatur, massa katalis dan kecepatan pengadukan.

Pengolahan data dilakukan untuk menentukan nilai dari masing-masing konstanta parameter yang ada pada tiap model. Dari hasil yang diperoleh selanjutnya dilakukan analisis untuk menentukan model. Model terbaik adalah (model yang lebih sederhana) yang memberikan ralat terkecil. Hitungan dilakukan dengan metode numeris dengan bantuan program komputer (Aladin, dan Syarif, 2002; Sediawan dan Prasetya, 1997).

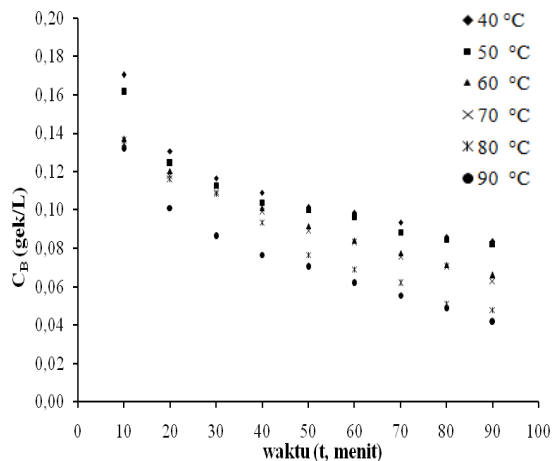


- Keterangan :**
1. Kompresor
 2. Tabung udara
 3. Botol pengaman
 4. Flow meter
 5. Manometer
 6. Sparger
 7. Pemanas mantel
 8. Reaktor
 9. Pengaduk
 10. Pendingin balik
 11. Pengambil sampel
 12. Motor pengaduk

Gambar 2. Rangkaian Alat Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN
Pengaruh Suhu

Pengaruh suhu terhadap laju reaksi dipelajari pada kisaran 40-90°C sedangkan massa katalis, laju udara dan kecepatan pengaduk dibuat tetap masing-masing 2,5 g; 40,264 mL/det dan 290 rpm. Hasil penelitian pada berbagai suhu dirangkum dalam Gambar 3, tampak waktu optimum 90 menit dan temperatur optimum 90 °C



Gambar 3. Hubungan C_B vs t pada berbagai suhu

Diperoleh hasil hitungan hubungan nilai konstanta kecepatan reaksi (k_R) sebagai fungsi suhu dalam bentuk persamaan Arrhenius :

$$k_R = 2128,77 e^{-\frac{17613209}{RT}} \quad (11)$$

Tabel 1. Kontribusi masing-masing tahanan

T	$\frac{1}{k_{ov}}$	$\frac{1}{\beta}$	$\frac{H_A C_B}{4P_A \alpha}$	$\frac{H_A}{P_A k_R}$
40	82,2326	0,0030	0,0057	82,2240
50	73,9220	0,0025	0,0052	73,9143
60	59,0422	0,0023	0,0043	59,0356
70	56,8787	0,0022	0,0042	56,8723
80	44,4619	0,0020	0,0032	44,4567
90	44,4577	0,0019	0,0024	44,4534

Untuk menentukan mekanisme yang mengendalikan reaksi adalah dengan melihat kontribusi dari masing-masing tahanan yang terlibat, yaitu :

$$k_{ov} = \frac{P_A}{\left(\frac{P_A}{\beta} + \frac{H_A C_B}{4\alpha} + \frac{H_A}{k_R} \right)} \quad (12)$$

Persamaan (12) ini dapat pula dinyatakan dalam bentuk tahanan (hambatan):

$$\frac{1}{k_{ov}} = \left(\frac{1}{\beta} + \frac{H_A C_B}{4P_A \alpha} + \frac{H_A}{P_A k_R} \right) \quad (13)$$

Berdasarkan persamaan (13) dapat diketahui kontribusi dari masing-masing tahanan yang terlibat dalam proses oksidasi katalisis fero sulfat menjadi feri sulfat. Hasil perhitungan dirangkum dalam Tabel 1.

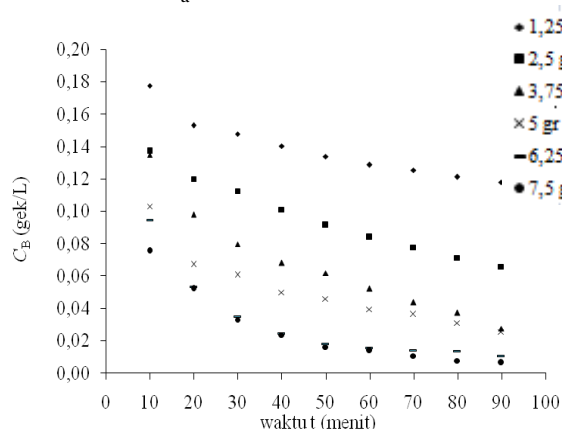
Tabel 1 menunjukkan bahwa kedua tahanan perpindahan massa memiliki nilai yang sangat kecil (mendekati nol) dibandingkan dengan tahanan reaksi kimia memiliki nilai yang paling besar. Maka dapat disimpulkan bahwa regim yang dominan terhadap laju proses oksidasi adalah reaksi kimia.

Pengaruh Massa Katalis

Pengaruh massa katalis terhadap laju reaksi disajikan data dalam Gambar 4, nampak bahwa semakin banyak katalis yang digunakan, perubahan konsentrasi fero sulfat semakin besar yang berarti kecepatan reaksi (laju pembentukan produk) juga semakin meningkat.

Semakin banyak katalis yang digunakan, konsentrasi katalis semakin tinggi dan luas permukaan bidang kontak juga akan semakin besar. Di samping itu, dengan menaikkan konsentrasi katalis, tenaga pengaktif akan semakin turun sehingga laju reaksi semakin meningkat. Pada Gambar 4 tampak bahwa massa katalis optimum 7,5 gr (tiap 25 gram bahan serbuk besi, temperatur 90°C dan waktu 90 menit). Hubungan massa katalis (m_k) terhadap energi aktivasi dapat didekati dengan persamaan berikut (koefisien korelasi 0,9467) :

$$E_a = 2421,1e^{(-0,0472mk)} \quad (14)$$



Gambar 4. Hubungan C_B vs t pada berbagai massa katalis

Kecenderungan meningkatnya laju reaksi dengan naiknya massa katalis juga telah diteliti oleh Fadjri (2003). Fadjri melakukan penelitian menggunakan katalis MnO_2 dengan variasi massa katalis 0,5 g sampai 2 g (suhu 80°C). Hasil penelitian tersebut menunjukkan konversi tertinggi yang diperoleh sebesar 39,54% untuk massa katalis 2 g.

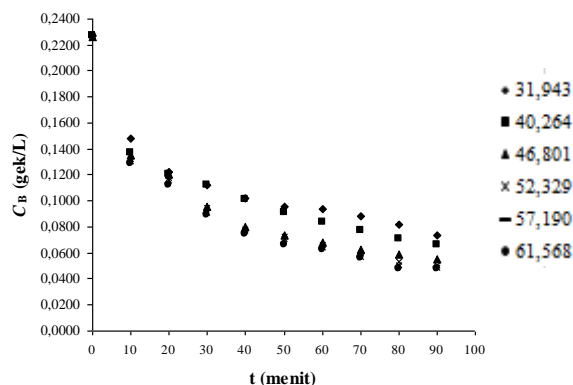
Berdasarkan persamaan (10) diperoleh besarnya kontribusi dari masing-masing tahanan yang terlibat dalam proses oksidasi katalitik fero sulfat menjadi feri sulfat (Tabel 2).

Tabel 2 menunjukkan kontribusi terbesar diberikan oleh tahanan reaksi kimia, sedangkan tahanan perpindahan massa memberikan kontribusi yang sangat kecil. Fakta ini memperkuat kesimpulan sebelumnya (seperti pada variasi suhu) bahwa

mekanisme yang paling berpengaruh terhadap laju proses adalah reaksi kimia.

Pengaruh Kecepatan Pengadukan

Pengaruh kecepatan pengadukan (v) terhadap laju reaksi disajikan dalam Gambar 5



Gambar 5. Hubungan C_B vs t pada berbagai kecepatan pengaduk

Data Gambar 5 menunjukkan bahwa semakin cepat putaran pengaduk, perubahan konsentrasi fero sulfat semakin besar, yang berarti kecepatan reaksi juga semakin meningkat. Pada Gambar 5 juga tampak kecepatan pengadukan optimum adalah 400 rpm (temperatur 90°C dan waktu 90 menit).

Naiknya kecepatan putaran pengaduk menyebabkan turbulensi didalam larutan semakin baik, sehingga pencampuran bahan dalam reaktor juga semakin baik. Dari data diatas terlihat bahwa penurunan konsentrasi fero sulfat pada kecepatan putaran 350 rpm tidak berbeda jauh dengan kecepatan putaran 370 rpm dan 400 rpm. Ronnhholm *et al.* (1999) telah melakukan penelitian dengan menaikkan kecepatan putaran sampai 1000 rpm, ternyata tidak memberikan perbedaan konsentrasi yang berarti. Pengaruh kecepatan pengaduk terhadap nilai koefisien transfer massa dapat dirumuskan sbb:

$$k_{LA} a_g = 20,56(v)^{0,66} \quad (15)$$

Berdasarkan persamaan (13) dapat diketahui kontribusi dari masing-masing tahanan yang terlibat dalam proses oksidasi katalitik fero sulfat menjadi feri sulfat (Tabel 3).

Tabel 2. Kontribusi masing-masing tahanan pada variasi massa katalis (m_k)

m_k	$\frac{1}{k_{ov}}$	$\frac{1}{\beta}$		$\frac{H_A C_B}{4P_A \alpha}$		$\frac{H_A}{P_A k_R}$	
1,25	136,4869	0,0023	0,002 %	0,0083	0,006 %	136,4764	99,992 %
2,50	59,0422	0,0023	0,004 %	0,0043	0,007 %	59,0356	99,989 %
3,75	41,4332	0,0016	0,004 %	0,0013	0,003 %	41,4303	99,993 %
5,00	31,7846	0,0015	0,005 %	0,0010	0,003 %	31,7822	99,992 %
6,25	24,6833	0,0011	0,004 %	0,0004	0,002 %	24,6819	99,994 %
7,50	19,8847	0,0010	0,005 %	0,0002	0,001 %	19,8834	99,994 %

Tabel 3. Kontribusi masing-masing tahanan pada variasi kecepatan pengadukan (v)

v	$\frac{1}{k_{ov}}$	$\frac{1}{\beta}$	$\frac{H_A C_B}{4P_A \alpha}$	$\frac{H_A}{P_A k_R}$
220	92,8135	0,0035	0,004 %	0,0061
250	77,3443	0,0028	0,004 %	0,0048
290	59,0422	0,0023	0,004 %	0,0043
350	55,2456	0,0022	0,004 %	0,0029
370	42,9695	0,0020	0,005 %	0,0027
400	40,0056	0,0016	0,004 %	0,0023

Tabel 4. Perbandingan hasil penelitian ini dengan penelitian lain

Peneliti	Megawati (2004)	Ronnholm (1999)	Penelitian ini (2009)
Oksidator	Oksigen	Oksigen	Udara
Katalisator	Asam fosfat	Karbon aktif	MnO ₂
Jenis reaktor	Autoclave yang dilengkapi pengaduk	Autoclave yang dilengkapi pengaduk	Labu leher tiga yang dilengkapi pengaduk
Suhu, °C	50 – 90	60 – 130	40 – 90
Tekanan, bar	3 – 9	4 – 10	1.1
Waktu, menit	150	300	90
Energi aktivasi, kJ/mol	22,156	12,970 (mk = 24 g)	17,613 (mk = 2,5 g)
Konversi	86,67% (T = 90°C)	98,87% (T = 100°C, Ck = 0,08 g/mL)	97,2% (T = 60°C, Ck = 0,025 g/mL)
k _{ov}	-	0,614 x 10 ⁻³ (T = 80°C, mk = 24 g)	0,05 (T = 60°C, mk = 7,5 g)

Dari Tabel 3 terbaca bahwa tahanan yang paling besar adalah tahanan reaksi kimia, maka dapat disimpulkan bahwa mekanisme yang paling berpengaruh terhadap laju proses adalah reaksi kimia.

Evaluasi model *quasi steady state*, yaitu dengan membandingkan data laboratorium dengan data simulasi (persamaan 19) diperoleh nilai ralat 5,4% dan SSE 5,2 x 10⁻⁵ yang cukup kecil sehingga model quasi tersebut dapat diterima. Perbandingan hasil penelitian ini dengan penelitian lain dirangkum dalam Tabel 4.

KESIMPULAN

Persamaan kinetika reaksi pada proses oksidasi katalisis fero sulfat dapat didekati cukup baik dengan model berbasis asumsi *quasi steady state* dengan persamaan umum:

$$(-r_B) = 2\alpha\beta \left[\left(\frac{P_A}{\beta H_A} + \frac{C_B}{4\alpha} + \frac{1}{k_R} \right) - \sqrt{\left(\frac{P_A}{\beta H_A} + \frac{C_B}{4\alpha} + \frac{1}{k_R} \right)^2 - \frac{P_A C_B}{\alpha \beta H_A}} \right]$$

Dalam proses oksidasi fero sulfat menjadi feri sulfat menggunakan katalis murni MnO₂ dikendalikan oleh reaksi kimia, sehingga diperoleh persamaan hasil penyederhanaan :

$$(-r_B) = 2\alpha\beta \left[\frac{1}{k_R} - \sqrt{\left(\frac{1}{k_R} \right)^2 - \frac{P_A C_B}{\alpha \beta H_A}} \right]$$

Penggunaan katalis murni MnO₂ dalam oksidasi fero sulfat menjadi feri sulfat cukup efektif, dapat menghasilkan konversi maksimum 97%, dengan waktu reaksi, temperatur dan kecepatan pengadukan dan massa (rasio) katalis optimum berturut-turut 90 menit, 90°C, 400 rpm dan 0,3.

DAFTAR NOTASI

- α = tahanan transfer massa untuk oksigen (m³_{liquid}/m³_{contactor}·s)
- β = tahanan transfer massa untuk fero sulfat (m³_{liquid}/m³_{contactor}·s)
- k_g a_g = tahanan pada gas film (mol/ m³_{contactor}·Pa.s)
- H_{AI} = konstanta Henry (Pa.m³_{liquid}/mol)
- k_{LA} a_g = tahanan reaktan A pada liquid film (m³_{liquid}/m³_{contactor}·s)
- k_{Ac} a_c = tahanan reaktan A pada permukaan katalis (m³_{liquid}/m³_{contactor}·s)
- k_{Bc} a_c = tahanan reaktan B pada permukaan katalis (m³_{liquid}/m³_{contactor}·s)
- k_R = konstanta kecepatan reaksi pada permukaan katalis (m³_{liquid}/mol.s)
- v = kecepatan pengaduk (putaran per menit; rpm)

DAFTAR PUSTAKA

- Aladin, A. dan Syarif, T., (2002), Penyelesaian Numeris Persamaan Diferensial Simultan dengan Metode *Runga Kutta* Berbasis Pemrograman, *Teknologi & Industri FAQIH*, Vol. 1, No.2.
- Aladin, A., Henny, A., dan Wiwin, S., (2002), Studi Kinetika Desulfurisasi Batubara Menggunakan Besi(III) Sulfat pada Temperature Kamar, *Seminar Nasional Teknologi Proses Kimia 2002*, UI-Jakarta.
- Cher, M. and Davidson, N., (1954), The Kinetics of the Oxygenation of Ferrous Iron in Phosphoric Acid Solution, *American Chemical Society*, 77, 793-798.
- Jenson, V.G. and Jeffreys, G.V., (1977), *Mathematical Methods in Chemical Engineering*, 2nd ed, Academic Press, Inc., New York.
- Levenspiel, O., (1999), *Chemical Reaction Engineering*, 3rd ed, John Wiley & Sons, New York.
- Megawati, (2002), Kinetika Reaksi Oksidasi Fero Sulfat menjadi Feri Sulfat, *Master Tesis*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Novita, E., (2001), Optimasi Proses Koagulasi Flokulasi pada Limbah Cair yang Mengandung Melanoidin, *Jurnal Ilmu Dasar*, Vol-2, No. 1, 61 – 67.
- Ronnholm, M.R., Warna, J., and Salmi, T., (2002), Two-and three-phase Oxidation od Ferrous Sulfate to Ferric Sulfate from Intrinsic Kinetics to Diffusion-affected Industrial Kinetics, *Chem. Eng. and Processing*, 41, 753 - 760.
- Ronnholm, M.R., Warna, J., Salmi, T., Turunen, I., and Luoma, M., (1999), Kinetics of Oxidation of Ferrous Sulfate with Molecular Oxygen, *Chem. Eng. Sci.*, 54, 4223 - 4232.
- Ronnholm, M.R., Warna, J., Salmi, T., Turunen, I., and Luoma, M., (1999), Oxidation Kinetics of Ferrous Sulfate over Active Carbon, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 38, 2607 - 2614.
- Sediawan W.B. and Prasetya, A., (1997), *Pemodelan Matematis dan Penyelesaian Numeris dalam Teknik Kimia*, ANDI, Yogyakarta.
- Smith, J. M., (1983), *Chemical Engineering Kinetics*, 3rd ed, pp 415 – 434, McGraw Hill International Book Company, New York.