

MODEL MATEMATIS EVALUASI PARAMETER PERPINDAHAN PANAS REGENERASI KATALIS PADA REAKTOR FIXED-BED

Endah Retno Dyartanti

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik UNS

Abstract : *The main problem during the regeneration process is to limit the temperature rise due to oxidation of the deposited carbon so as to prevent sintering of the catalyst. The objective of this research is to formulate the influence of the flow rate of air to the volumetric heat transfer coefficient, effective thermal conductivity of air and effective thermal conductivity of solid cooked catalyst. The reaction oxidation of the deposit carbon in cooked catalyst was carried out in fixed bed reactor. Catalyst in bed reactor and air was introduced continuously from the bottom. The modeling gave result good agreement with the experimentally obtained temperature distribution of air at any position along reactor at any time. The correlation between of Reynolds number on the Nusselt number and ratio of effective thermal conductivity against thermal conductivity of air could be presented as follows :*

$$Nu = 1.7802 Re^{0.4197} \text{ and } k_{ef}/k_f = 23.6807 Re^{0.2498}$$

Which is valid for Reynolds number between 12.4580 – 32.4613

Keywords : Cooked Catalyst, heat transfer coefficient, effective thermal conductivity

PENDAHULUAN

Katalis adalah bahan yang digunakan untuk mempercepat berlangsungnya reaksi kimia tetapi tidak bereaksi dengan reaktannya, katalis ada yang berbentuk padat dan cair. Katalis nikel adalah katalis yang berbentuk padatan, masa aktif katalis yang berbentuk padatan terbatas karena proses deaktivasi katalis baik yang disebabkan oleh coking ataupun poisoning sehingga dapat menimbulkan limbah katalis bekas yang beracun, maka perlu pengolahan untuk dapat digunakan kembali atau sebelum dibuang. Pengolahan katalis padat bekas menjadi katalis yang dapat digunakan kembali dapat menekan biaya produksi dengan mengurangi biaya pembelian katalis baru. Katalis yang sudah mengalami proses deaktivasi karena cooking, sulfur dan carbon dapat digunakan kembali dengan reaksi regenerasi katalis menggunakan aliran udara panas, oksigen panas ataupun steam.

Di dalam reaksi regenerasi katalis dalam reaktor fixed bed, hal yang terpenting adalah memonitor distribusi suhu padatan dan fluida dalam bed reaktor selama reaksi, karena kenaikan suhu dalam reaktor yang terlalu tinggi akan menyebabkan katalis mengalami sintering, pengkerutan pori-pori dan kerusakan pada permukaan aktif katalis sehingga katalis tidak dapat digunakan kembali.

Manfaat dari penelitian ini, dapat mengetahui profil distribusi suhu di dalam

reaktor digunakan untuk merancang reaktor untuk reaksi regenerasi katalis

Beberapa model untuk mengetahui profil suhu di dalam reaktor pada proses regenerasi katalis :

- Van Deemter (1953 – 1954), menggunakan pendekatan model homogen, dilanjutkan pendekatan model matematik Massoth (1967) dari segi kinetika pada reaksi regenerasi katalis.
- Olson et al (1968) mengemukakan tentang perbedaan suhu antara padatan dan gas dikenal sebagai Model Heterogen.
- Sampath, et al (1975) mengembangkan model untuk suhu gas dengan memasukkan efek tahanan dari intra dan inter partikel serta efek dari dispersi aksial dari fluida, menggunakan penyelesaian orthogonal collocation
- Byrne et al (1985) mempelajari pengaruh distribusi coke , dimana kenaikan suhu udara pada berbagai posisi dalam bed reaktor dapat dipakai untuk memprediksikan reaksi regenerasi. Puncak kurva suhu udara merupakan puncak dimana reaksi penghilangan karbon tersebut terjadi secara sempurna dan jumlah karbon yang tersisa tinggal sedikit.

Perpindahan Panas Reaktor Fixed Bed

Perpindahan panas merupakan jumlah panas yang dipindahkan antara benda-benda

sebagai akibat adanya perbedaan suhu, panas akan mengalir dari benda yang suhunya tinggi ke benda lain yang suhunya lebih rendah.

-Perpindahan panas secara konduksi memerlukan medium dan berlangsung lambat

-Perpindahan panas secara konveksi jika molekul yang suhunya tinggi mengalir ke tempat yang suhunya lebih rendah
Perpindahan panas konveksi dibagi menjadi dua bagian yaitu:

- konveksi bebas (Natural Convection)
- konveksi paksaan (Forced Convection)

Menurut Wakao- Kaguei perpindahan panas dapat terjadi pada Steady-state dan Unsteady- State.

Perpindahan panas Steady -State

Suhu fluida dan suhu padatan identik sehingga Fixed bed dianggap sebagai fase tunggal (Pseudohomogeneous model).

Perpindahan panas Unsteady-State, ada 3 model yaitu :

1. Model Schuman.
Profil aliran sumbat (plug flow) dan tidak terjadi dispersi pada fluida.
2. Continuous Solid Phase (CS) Model.
Aliran fluida plug-flow dan terjadi dispersi secara aksial. Tahanan konduksi padatan tidak diabaikan tetapi padatan dianggap satu fase kontinyu seperti buluh yang dikelilingi gas .
3. Dispersion Concentric Model (DC-model)
Aliran fluida dianggap terdispersi secara aksial dan fase padat mempunyai profil suhu yang simetri secara radial. "

LANDASAN TEORI

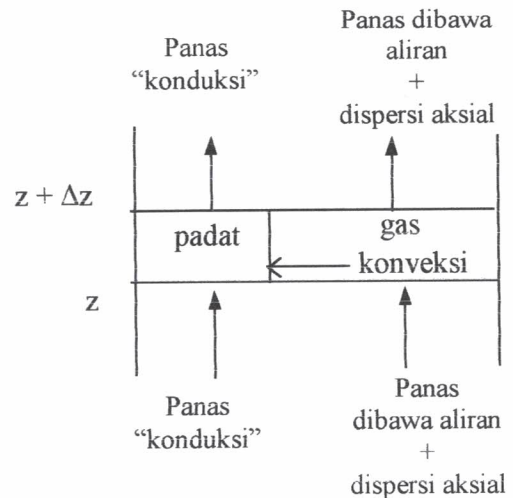
Penyusunan Model Matematik

Asumsi yang diambil dalam penyusunan model matematikanya adalah :

1. Reaktor beroperasi secara adiabatik dan Plug Flow
2. Perbedaan suhu dalam partikel katalis diabaikan.
3. Padatan berupa fase kontinyu dan terjadi perpindahan panas secara aksial dan dispersi thermal kearah radial diabaikan..
4. Sifat fisis padatan dan fluida tetap.
5. Perpindahan panas hanya terjadi antara fluida dan padatan, tidak terjadi kebocoran gas.

6. Model matematis yang digunakan untuk distribusi suhu adalah Continuous Solid Phase Model (CS model).

Mekanisme Perpindahan Panas Oksigen Pada Elemen Volum Setebal ΔZ



I. Neraca panas oksigen pada elemen volum setebal Δz fase gas :

$$R. In - [(R. Out) + (R. gen)] = R. Acc.$$

$$[A. q_z|_z + A. V_z \rho_f C_{pf} \{T_f - T_o\}|_z] - [(A. q_z|_{z+\Delta z} + A. V_z \rho_f C_{pf} \{T_f - T_o\}|_{z+\Delta z}) + (h_p a. \Delta z. A (T_f - T_s))] = A. \Delta z. \epsilon. \rho_f C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{dimana : } q_z = -k_{ef} \frac{\partial T_f}{\partial z} \quad (2)$$

Substitusi persamaan (2) ke (1) menjadi :

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{k_{ef}}{\epsilon \rho_f C_{pf}} \frac{\partial^2 T_f}{\partial z^2} - \frac{V_z}{\epsilon} \frac{\partial T_f}{\partial z} - \frac{h_p a}{\epsilon C_{pf} \rho_f} (T_f - T_s) \quad (3)$$

$$\text{I.C. } \begin{aligned} T_f(z, 0) &= T_{fo} \\ T_s(z, 0) &= T_{so} \end{aligned}$$

$$\text{B.C. } T_f(0, t) = T_{fo}$$

Dengan sistem indeks diatas maka $T_f(z, t)$ dan $T_s(z, t)$ dapat ditulis $T_f(i, j)$ dan $T_s(i, j)$.

Pendekatan finite difference untuk fase gas:

$$\frac{\partial T_f}{\partial z} = \frac{(T_f)_{i+1,j+1} - (T_f)_{i-1,j+1}}{2\Delta z} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 T_f}{\partial z^2} = \frac{(T_f)_{i+1,j+1} - 2(T_f)_{i,j+1} + (T_f)_{i-1,j+1}}{\Delta z^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{(T_f)_{i,j+1} - (T_f)_{i,j}}{\Delta t} \quad (6)$$

Persamaan differensial fase gas

Persamaan (4), (5), (6) disubstitusikan ke persamaan (3):

$$\begin{aligned} T_{f,i-1,j+1} \left[-\frac{k_{ef}}{\varepsilon \rho_f C_{pf}} \frac{1}{\Delta z^2} - \frac{V_z}{\varepsilon} \frac{1}{2\Delta z} \right] + T_{f,i,j+1} \\ \left[\frac{2k_{ef}}{\varepsilon \rho_f C_{pf}} \frac{1}{\Delta z^2} + \frac{1}{\Delta t} + \frac{h_p a}{\varepsilon C_{pf} \rho_f} \frac{1}{2\Delta z} \right] + \\ T_{f,i+1,j+1} \left[-\frac{k_{ef}}{\varepsilon \rho_f C_{pf}} \frac{1}{\Delta z^2} - \frac{V_z}{\varepsilon} \frac{1}{2\Delta z} \right] \\ = T_{f,i,j} \left[\frac{1}{\Delta t} \right] - T_{s,i,j+1} \left[\frac{h_p a}{\varepsilon C_{pf} \rho_f} \right] \quad (7) \end{aligned}$$

Substitusi :

$$\alpha = \frac{2k_{ef}}{C_{pf} \rho_f \Delta z V_z} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{2h_p a \Delta z}{C_{pf} \rho_f V_z} \quad (9)$$

$$\delta = \frac{2\Delta z \varepsilon}{\Delta t V_z} \quad (10)$$

Substitusi persamaan (8), (9), (10) ke persamaan (7)

$$\begin{aligned} (T_f)_{i-1,j+1} [\alpha + 1] + (T_f)_{i,j+1} [-2\alpha - \beta - \delta] + \\ (T_f)_{i+1,j+1} [\alpha - 1] = (T_f)_{i,j} [\delta] - T_{s,i,j+1} [\beta] \end{aligned} \quad (11)$$

Persamaan (11) berlaku untuk $i = 1, 2, 3, \dots, m-1$

Pendekatan beda hingga untuk mengganti keadaan batas udara masuk kolom $i = 0$

Neraca Panas Oksigen dengan Elemen volum setebal $\frac{\Delta z}{2}$ sekitar $i = 0$

$$(T_{fin} - T_o) - \left(\frac{T_{f0,j+1} + T_{f1,j+1}}{2} - T_o \right) \left(\frac{h_p a}{V_z \rho_f C_{pf}} \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta z}{2} (T_{f0,j+1} - T_{s0,j+1}) + \frac{k_{ef}}{V_z \rho_f C_{pf}} \frac{2}{\Delta z} (T_{f0,j+1} \\ - \frac{T_{f0,j+1} + T_{f1,j+1}}{2}) = \frac{\Delta z}{2} \cdot \frac{\varepsilon}{V_z} \end{aligned} \quad (12)$$

substitusi persamaan (8), (9) dan (10) ke persamaan (12)

$$\begin{aligned} [2T_{fin}] + T_{f0,j+1} [-1 + \alpha - \frac{\beta}{2} - \frac{\delta}{2}] + T_{f0,j+1} [-1 + \alpha] \\ = -T_{s0,j+1} [\frac{\beta}{2}] + T_{f0,j} [\frac{\delta}{2}] \end{aligned} \quad (13)$$

Persamaan (13) berlaku untuk $i=0$

Pendekatan beda hingga untuk mengganti keadaan batas udara keluar kolom $i = M$

$$\begin{aligned} [V_z \rho_f C_{pf} \left(\frac{T_{fM-1,j+1} + T_{fM,j+1}}{2} - T_o \right) - V_z \rho_f C_{pf} \\ (T_{fM,j+1} - T_o)] - (h_p a \cdot \frac{\Delta z}{2} \cdot (T_{fM,j+1} - T_{sM,j+1}) - \\ (k_{ef}) \frac{2}{\Delta z} \left(\frac{T_{fM-1,j+1} + T_{fM,j+1}}{2} - T_{fM,j+1} \right) = \frac{\Delta z}{2} \\ \cdot \varepsilon \cdot \rho_f \cdot C_{pf} \frac{(T_f)_{M,j+1} - (T_f)_{M,j}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (14)$$

substitusi persamaan (8), (9), (10) ke (14)

$$\begin{aligned} T_{fM-1,j+1} [1 - \alpha] + T_{fM,j+1} [(-1) - \frac{\beta}{2} + \alpha - \frac{\delta}{2}] = \\ T_{sM,j+1} [-\frac{\beta}{2}] - T_{fM,j} [\frac{\delta}{2}] \end{aligned} \quad (15)$$

Persamaan (15) berlaku untuk $i = M$

II. Neraca panas oksigen pada elemen volum Δz fase padat :

$$\begin{aligned} R \cdot \ln - [(R \cdot \text{Out}) + (R \cdot \text{gen})] = R \cdot \text{Acc} \\ [A \cdot q_z|_z + h_p \cdot a \cdot \Delta z \cdot A (T_f - T_s)] - \\ [A \cdot q_z|_{z+\Delta z} + (-\Delta H_f) r_v A \cdot \Delta z] = \\ A \cdot \Delta z \cdot (1-\varepsilon) \cdot \rho_s C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{dimana : } q_z = -k_{es} \frac{\partial T_s}{\partial z} \quad (17)$$

$$r_v = k C_{O_2} C_C \quad (18)$$

$$r_v = k_0 e^{-\frac{E}{R T_f}} \cdot C_{O_2} \cdot C_C \quad (19)$$

Substitusi persamaan (17), (18), (19) ke (16):

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} (1-\varepsilon) = \frac{k_e S}{\rho_s C_{ps}} \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} + \frac{h_p a}{C_{ps} \rho_s} (T_f - T_s) + \frac{(-\Delta H_r) r_v}{C_{ps} \rho_s} \quad (20)$$

Pendekatan finite difference fase padat :

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} = \frac{(T_s)_{i+1,j} - 2(T_s)_{i,j} + (T_s)_{i,j}}{\Delta z^2} \quad (21)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{(T_s)_{i,j+1} - (T_s)_{i,j}}{\Delta t} \quad (22)$$

Persamaan differensial pada fase padat

Substitusi persamaan (21), (22) ke (20) :

$$T_{s,i,j+1} = T_{s,i-1,j} \left[\frac{k_e S \Delta t}{\rho_s C_{ps} (1-\varepsilon) \Delta z^2} \right] + T_{s,i,j} \left[1 - 2 \frac{k_e S \Delta t}{\rho_s C_{ps} (1-\varepsilon) \Delta z^2} - \frac{h_p a \Delta t}{C_{ps} \rho_s (1-\varepsilon)} \right] + T_{i+1,j} \left[\frac{k_e S \Delta t}{\rho_s C_{ps} (1-\varepsilon) \Delta z^2} \right] + T_{f,i,j} \left[\frac{h_p a \Delta t}{C_{ps} \rho_s (1-\varepsilon)} \right] - \frac{(-\Delta H_r) r_v \Delta t}{C_{ps} \rho_s (1-\varepsilon)} \quad (23)$$

substitusi

$$\phi = \frac{k_e S \Delta t}{\rho_s C_{ps} (1-\varepsilon) \Delta z^2} \quad (24)$$

$$\gamma = \frac{h_p a \Delta t}{C_{ps} \rho_s (1-\varepsilon)} \quad (25)$$

$$\sigma = \frac{(-\Delta H_r) r_v \Delta t}{C_{ps} \rho_s (1-\varepsilon)} \quad (26)$$

Substitusi persamaan (24), (25), (26) ke persamaan (23)

$$T_{s,i,j+1} = T_{s,i-1,j} [\phi] + T_{s,i,j} [1 - 2\phi - \gamma] + T_{s,i+1,j} [\phi] + \gamma T_{f,i,j} - \sigma \quad (27)$$

Persamaan (27) diatas berlaku untuk $i=1,2,3,\dots,m-1$

Pendekatan beda hingga, keadaan batas di padatan tempat udara masuk kolom $i=0$

Neraca Panas Padatan dengan Elemen volum

setebal $\frac{\Delta z}{2}$ sekitar $i=0$

$$T_{s,0,j+1} = T_{s,0,j} \left[1 - \frac{h_p a \Delta t}{C_{ps} \rho_s (1-\varepsilon)} - \frac{4}{\Delta z^2} \frac{k_e S \Delta t}{\rho_s C_{ps} (1-\varepsilon) \Delta z^2} + T_{s,1,j} \left[\frac{k_e S \Delta t}{\rho_s C_{ps} (1-\varepsilon) \Delta z^2} \right] + T_{f,0,j} \left[\frac{h_p a \Delta t}{C_{ps} \rho_s (1-\varepsilon)} \right] - \frac{(-\Delta H_r) r_v \Delta t}{C_{ps} \rho_s (1-\varepsilon)} \right] \quad (28)$$

Substitusi persamaan (24), (25), (26) ke persamaan (28)

$$T_{s,0,j+1} = T_{s,0,j} [1 + \gamma + 2\phi] + T_{s,1,j} [-2\phi] + T_{f,0,j} [\gamma] - \sigma \quad (29)$$

Persamaan (29) berlaku untuk $i=0$

Pendekatan beda hingga keadaan batas di padatan tempat udara keluar kolom $i=M$

Neraca Panas Udara dengan Elemen volum

setebal $\frac{\Delta z}{2}$ sekitar $i=M$

$$T_{s,M,j+1} = T_{s,M-1,j} \left[\frac{k_e S}{\rho_s C_{ps} (1-\varepsilon)} \frac{2}{\Delta z^2} \right] + T_{s,M,j} \left[\frac{k_e S}{\rho_s C_{ps} (1-\varepsilon)} \frac{4}{\Delta z^2} \left(\frac{1}{2} - 1 \right) + \frac{h_p a \Delta t}{C_{ps} \rho_s (1-\varepsilon)} + 1 \right] + T_{f,M,j} \left[\frac{h_p a \Delta t}{C_{ps} \rho_s (1-\varepsilon)} - \frac{(-\Delta H_r) r_v \Delta t}{C_{ps} \rho_s (1-\varepsilon)} \right] \quad (30)$$

Substitusi persamaan (24), (25), (26) ke persamaan (30)

$$T_{s,M,j+1} = T_{s,M-1,j} [-2\phi] + T_{s,M,j} [2\phi + \gamma + 1] + T_{f,M,j} [\gamma] - \sigma \quad (31)$$

Persamaan (31) berlaku untuk $i=M$

METODOLOGI PENELITIAN :

Penelitian menggunakan katalis bekas reformer dari PT. KaltimMethanol Indonesia dilakukan menggunakan reaktor kolom tegak dimana permukaan luar reaktor diisolasi dengan sumbu asbes lembaran dan gulungan., pengukuran temperatur udara dalam reaktor menggunakan digital termocouple pada titik dengan ketinggian tertentu di dalam reaktor.

Analisa data dilakukan dengan mencatat laju alir udara dan temperatur udara masuk serta suhu udara keluar kolom setiap 3 menit dengan Digital Thermocouple, juga mencatat berat katalis awal sebelum dimasukkan dan sesudah proses.

Analisis Data Penelitian: suhu fluida udara (T_f) dan suhu padatan (T_s) dengan indeks j diketahui, maka harga suhu fluida udara dan suhu padatan pada indeks waktu $j+1$ dapat dihitung dengan persamaan (11), (13), (15),

(27), (29) dan (31). Suhu fluida udara dan padatan pada saat awal ($t=0$) diketahui sehingga suhu fluida udara dan suhu padatan dengan indeks $t=1$ dapat dihitung dan seterusnya

Pada setiap langkah perhitungan diperoleh matrik tridiagonal, matrik tersebut diselesaikan dengan cara eliminasi gauss dilanjutkan dengan backward substitution. Suhu gas data penelitian digunakan untuk mencari nilai parameter perpindahan panas. Nilai parameter koefisien perpindahan panas volumetris ($h_{p.a}$), konduktivitas panas efektif gas (k_{eF}) dan konduktivitas panas efektif padatan (k_{eS}) padatan, dengan menggunakan minimasi tiga variabel cara Hooke Jeeves. Harga yang cocok memberikan SSE terkecil antara suhu fluida gas data dengan Suhu fluida gas hasil simulasi (T_f simulasi) dengan algoritma seperti pada gambar 4

HASIL PENELITIAN

Pengaruh suhu udara masuk pada reaksi ini dijalankan pada kisaran 327 dan laju alir 0.1778, 0.2778 dan 0.3778 m/s. Suhu udara diamati setiap 3 menit selama 60 menit. Posisi untuk masing-masing termokopel dalam bed reaktor adalah sebagai berikut:

T1 = 0.1 m : T2 = 0.2 m : T3 = 0.3 m
T4 = 0.4 m : T5 = 0.5 m : T6 = 0.55 m

Menggunakan cara coba-coba dari persamaan (11), (13), (15), (27), (29) dan (31) persamaan kecepatan reaksi

$$r_v = k_0 e^{-\frac{E}{RT_f}} \cdot C_{O_2} \cdot C_C \quad (19)$$

Nilai konstanta Arrhenius (k_0) dan nilai Energi aktivasi (E) didapatkan hasil sebagai berikut :

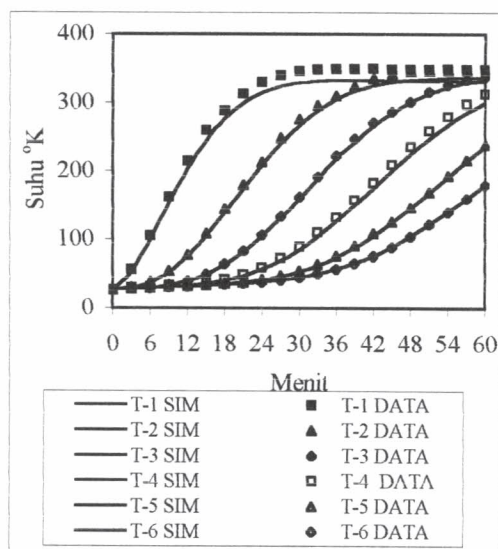
$$k = k_0 e^{-\frac{E}{RT_f}} \quad k_0 = 1.5108 \text{ E-03} ;$$

$$E = 3.3299 \text{ E+04} \quad (32)$$

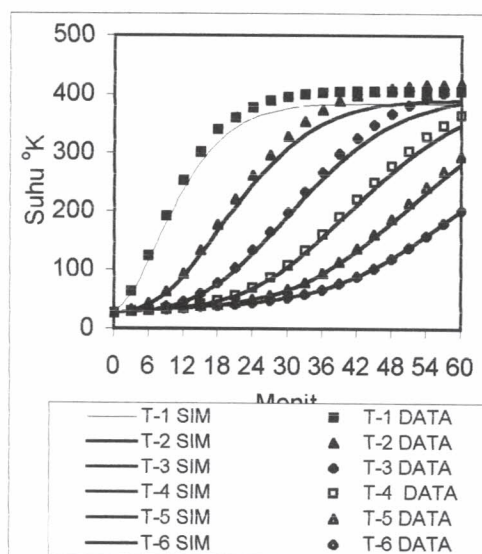
Konsentrasi carbon (C_C) merupakan jumlah rata-rata sisa carbon yang terbakar persatuan volume bed reaktor,

Konsentrasi oksigen (C_{O_2}) merupakan konsentrasi rata-rata oksigen dalam bed reaktor

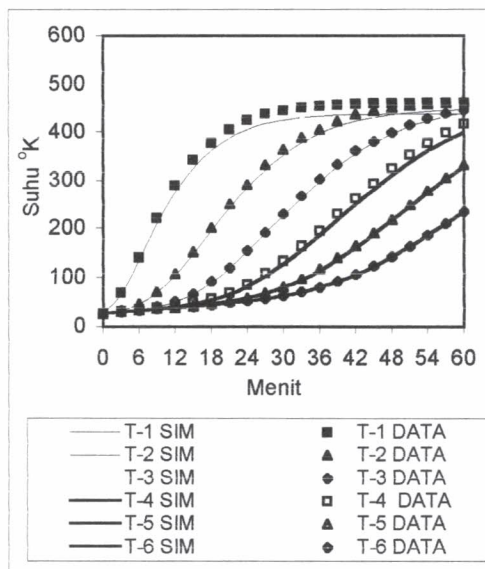
Hubungan antara suhu udara dengan waktu pada berbagai posisi termokopel dalam reaktor fixed bed disajikan pada gambar 1, 2 dan 3. Suhu udara dalam bed reaktor hasil simulasi didapatkan dari persamaan (11), (13), (15), (27), (29) dan (31),



Gambar 1. Hubungan suhu dan waktu pada berbagai posisi termokopel dalam reaktor
 $T = 600^\circ\text{K}$; $V = 0.1778 \text{ m/s}$



Gambar 2. Hubungan suhu dan waktu pada berbagai posisi termokopel dalam reaktor
 $T = 600^\circ\text{K}$; $V = 0.2778 \text{ m/s}$



Gambar3. Hubungan suhu dan waktu pada berbagai posisi termokopel dalam reaktor
 $T = 600^{\circ}\text{K}$; $V = 0.3778 \text{ m/s}$

Pada gambar 1,2 dan 3 ditunjukkan untuk waktu yang sama, suhu udara pada posisi termokopel berikutnya dalam bed reaktor akan semakin rendah, hal tersebut jumlah oksigen yang bereaksi lebih sedikit. Selanjutnya dapat dilihat pula bahwa suhu udara data dan suhu udara hasil simulasi dari model yang diajukan terdapat kecenderungan yang sama untuk berbagai posisi termokopel dalam reaktor, sehingga model yang diajukan dapat digunakan untuk mensimulasikan suhu udara dalam bed reaktor untuk variabel laju alir udara.

Tabel 1. Hasil Optimasi Nilai Parameter Perpindahan Panas

Ru	Suh $^{\circ}\text{K}$	laju m/s	hp.a $\text{W/m}^3 \text{ } ^{\circ}\text{K}$	k_{ef} W/m	k_{es} $\text{W/m } ^{\circ}\text{K}$
1	327	0.1778	5992.000	1.8000	0.3700
2		0.2778	7965.000	2.2125	0.3169
3		0.3778	9738.750	2.5375	0.3780

KESIMPULAN

Dari penelitian dapat ditarik kesimpulan :

1. Korelasi antara bilangan Reynolds dan bilangan Nusselts : $(Nu = 1.0782 Re^{0.4197})$
2. Korelasi antara bilangan Reynolds dan k_{ef} / k_f : $(k_{ef} / k_f = 23.6807 Re^{0.2498})$.
3. Model yang diajukan dapat digunakan untuk pendekatan distribusi suhu udara dan padatan untuk reaksi regenerasi katalis dalam reaktor fixed bed untuk kisaran bilangan Reynolds 12.4580 – 32.4613.

DAFTAR DAN ARTI LAMBANG

- a = luas permukaan partikel setiap satuan volum dari bed
 C_p = Kapasitas panas $\text{J / kg } ^{\circ}\text{K}$.
 D_p = Diameter partikel, m.
 D_t = Diameter dalam kolom fixed bed, m
 ε = Porositas bed
 E = Energi aktivasi, J / kmol
 f = fluida / udara
 $h_p a$ = Koefisien perp. panas volumetris dari partikel ke fluida $(\text{W. m}^{-3} . ^{\circ}\text{K}^{-1})$
 ΔH_r = Panas reaksi, kJ/kmol .
 k = Konst. kecepatan reaksi $(\text{mol}(\text{m}^3 \text{ s})^{-1})$
 k_o = Faktor frekuensi, $\text{m}^3 (\text{kmol s})^{-1}$
 k_f = Konduktivitas panas gas $(\text{Wm}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{K}^{-1})$
 k_{ef} = Konduktivitas panas efektif fase gas / satuan luas bed $(\text{Wm}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{K}^{-1})$
 k_s = Konduktivitas panas padatan $(\text{Wm}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{K}^{-1})$
 k_{es} = Konduktivitas panas efektif padatan / satuan luas bed $(\text{W. m}^{-1} . ^{\circ}\text{K}^{-1})$
 r_v = Kecepatan reaksi penghilangan karbon $(\text{mol} (\text{m}^3 \text{ s})^{-1})$
 s = padatan
 t = waktu, menit
 T = Suhu, $^{\circ}\text{K}$.
 V_z = Kecepatan aliran udara superfisial arah z, m/s

Bilangan tak berdimensi

$$\begin{aligned} Nu &= \text{Bilangan Nusselt} &= \frac{h_p D_p}{k_F} \\ Pr &= \text{Bilangan Prandtl} &= \frac{C_{p_f} \mu_f}{k_F} \\ Re &= \text{Bilangan Reynolds} &= \frac{D_p V_z \rho_f}{\mu_f} \end{aligned}$$

DAFTAR PUSTAKA

- Byrne, A., 1986, "Effect of Deposited Coke Profiles On Transient Temperatures During Regeneration Of A Fixed Bed Catalytic Reactor", Chem. Eng. Sci, 41, 773-778

- Deemter, J.J. Van, 1953, "Heat and Mass Transport in Fixed Bed Catalyst Bed During Regeneration", *Ind. and Eng. Chem*, 45, 6, 1227 - 1232.
- Deemter, J.J. Van, 1954, "Heat and Mass Transport in Fixed Bed Catalyst Bed During Regeneration", *Ind. and Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, 46, 11.
- Froment, G.F. and Bischof, K.B., 1979, "Chemical Reactor Analysis and design", John Wiley & Sons, New York.
- N. Wakao and S. Kaguei, 1982, "Heat and Mass Transfer in Packed Beds", Gordon and Breach Science Publisher, London.
- Rahman S., 1996, Model Matematis dan Evaluasi Parameter Perpindahan Panas Unsteady-State di Fixed Bed", Fakultas Teknik Universitas Gajah Mada
- Sediawan, W. B., dan Prasetya A., 1997, "Pemodelan Matematis Dan Penyelesaian Numeris Dalam Teknik Kimia Dengan Pemrograman Bahasa Basic Dan Fortran", edisi pertama, Andi, Yogyakarta.