



SIMULASI PERHITUNGAN KOEFISIEN PERPINDAHAN MASSA DAN DIFUSIVITAS EFEKTIF AKSIAL URANIUM PADA PEMISAHAN URANIUM DARI HASIL BELAH DENGAN CARA PERTUKARAN ION

Moch. Setyadji, Busron Masduki, Didiék Herhady, Bangun Wasito
Pusat Penelitian Nuklir Yogyakarta

ABSTRAK

SIMULASI PERHITUNGAN KOEFISIEN PERPINDAHAN MASSA DAN DIFUSIVITAS EFEKTIF AKSIAL URANIUM PADA PEMISAHAN URANIUM DARI HASIL BELAH DENGAN CARA PERTUKARAAN ION. Telah dilakukan perhitungan harga koefisien perpindahan massa ($k_L a$) dan koefisien difusivitas efektif aksial (D_e) uranium pada pemisahan uranium dari hasil belah menggunakan model kolom penukar ion. Pada proses pemisahan ini perpindahan massa uranium terjadi dalam fase cair dan fase padat. Perhitungan model matematisnya dimulai dengan penyusunan neraca massa pada elemen volum kolom penukar ion yang dapat dianggap mewakili/mendekati peristiwa tersebut di atas. Persamaan-persamaan yang didapat (berbentuk persamaan diferensial simultan) diselesaikan secara analisis numerik. Penyelesaiannya diawali dengan memprediksi harga $k_L a$ guna memperoleh harga konsentrasi uranium sebagai fungsi jarak dan waktu, $C_{A1}(x,t)$ dan $X_{A1}(x,t)$. Hasil perhitungan konsentrasi uranium dan prediksi harga $k_L a$ ini dipergunakan untuk perhitungan harga D_e dan konsentrasi uranium dalam fase cair, $C_{A2}(x,t)$ dan konsentrasi uranium dalam fase padat, $X_{A2}(x,t)$. Kemudian harga konsentrasi uranium dari perhitungan terakhir dibandingkan dengan hasil dari perhitungan sebelumnya. Harga $k_L a$ dan D_e dapat diterima apabila selisih antara konsentrasi uranium keluar kolom dari hasil kedua perhitungan di atas dalam batas toleransi yang memberikan harga *sum of squares of errors* (SSE) minimum (mendekati nol). Dari perhitungan, pada kecepatan alir superficial 20-40 cm/menit, diperoleh harga $k_L a$ berkisar antara 15,18588 - 20,48588 per menit dan D_e berkisar antara $9,14117 \cdot 10^{-4}$ - $1,11612 \cdot 10^{-3}$ cm²/menit. Harga SSE dan ralat relatif rata-rata pada kondisi di atas berkisar antara $2,25117 \cdot 10^{-9}$ - $3,98145 \cdot 10^{-9}$ dan 11,541% - 25,981%.

ABSTRACT

CALCULATION SIMULATION OF MASS TRANSFER COEFFICIENT AND AXIAL EFFECTIVE DIFFUSIVITY OF URANIUM IN THE SEPARATION OF URANIUM FROM FISSION PRODUCTS BY ION EXCHANGE METHOD. A mass transfer coefficient ($k_L a$) and an axial effective diffusivity (D_e) of U in the separation of U from fission products using ion exchange method have been calculated. In this separation process, mass transfer of uranium occurs in the liquid and solid phases. Mathematical model calculation is started by setting up mass balances on an element volume in the ion exchange column which can be assumed to have a similarity to the above process. The set up differential equations (in the form of simultaneous differential equations) are then solved using numerical analysis method. It is started by predicting the $k_L a$ value to obtain the uranium concentrations as a function of distance and time, $C_{A1}(x,t)$ and $X_{A1}(x,t)$. Both the resulted concentrations of uranium and the predicted $k_L a$ are used to calculate D_e and concentrations of uranium in the liquid, $C_{A2}(x,t)$ and solid phases, $X_{A2}(x,t)$. The resulted concentrations of uranium are then compared with the concentrations of uranium in the previous calculation. Both the $k_L a$ and D_e values can be accepted if the difference between the concentrations resulted from both the two calculations are similar or nearly equal, i.e. the concentration difference performed by sum of squares of errors (SSE) is minimum (nearly zero). For the superficial linear velocity of about 20 - 40 cm/minute the results from the calculations are $k_L a = 15,18588 - 20,48588$ per minute and $D_e = 9,14117 \cdot 10^{-4} - 1,11612 \cdot 10^{-3}$ cm²/minute. The sum of squares of errors and the average relative error on the condition above are about $2,25117 \cdot 10^{-9} - 3,98145 \cdot 10^{-9}$ and 11,541% - 25,981%.

PENDAHULUAN

Peristiwa perpindahan massa dari fase padat ke fase cair atau dari fase cair ke fase padat, merupakan salah satu masalah yang sering dijumpai, baik dalam industri kimia maupun industri nuklir. Permasalahan tersebut berkaitan dengan penentuan kondisi optimum

proses/operasi maupun perancangan alat pemisah itu sendiri. Pada industri nuklir, peristiwa perpindahan massa tersebut banyak terjadi pada proses pelarutan, ekstraksi (*leaching*) dan adsorpsi/penukar ion.^[1] Misalnya pada pengolahan limbah radioaktif cair tahap akhir, pemungutan kembali uranium dan plutonium dari bahan bakar

bekas (proses purex) dan proses-proses lainnya. Pada proses pengambilan kembali uranium dan plutonium dari bahan bakar bekas, setelah bahan bakar bekas tersebut dilarutkan dalam asam nitrat, proses berikutnya adalah proses ekstraksi dan praktisi (siklus I), dilanjutkan dengan pemurnian masing-masing elemen berat pada siklus II. Perlu dilakukan penelitian perhitungan harga koefisien perpindahan massa ($k_L a$) uranium dan koefisien difusivitas efektif aksial (De) pada proses pemisahan uranium dari hasil belah menggunakan model bahan isian didalam kolom penukar ion.^[2]

Mekanisme peristiwa pertukaran ion (adsorpsi) tersebut melalui tiga tahap, yaitu difusi pada lapisan film cairan, difusi pada butir padatan dan reaksi kimia. Difusi pada butir padatan terjadi pada pori-pori padatan tersebut, dimana uranium akan mendifusi melalui pori-pori masuk kedalam butiran resin, kemudian terjadi reaksi kimia (pertukaran ion). Difusi pada butiran padatan dan reaksi kimia berlangsung sangat cepat, sehingga secara keseluruhan, tidak mengontrol perpindahan massa. Dalam hal ini kecepatan perpindahan massa secara keseluruhan, dikontrol oleh perpindahan massa pada lapisan film cairan.^[1,3]

Dengan berhasilnya penelitian ini, maka akan diperoleh manfaat bagi ilmu pengetahuan yaitu bertambahnya data tentang model matematis pada proses pertukaran ion, harga $k_L a$ dan De uranium pada proses pemisahan uranium dari hasil belah serta pengaruh keduanya yang dapat digunakan untuk tambahan data perancangan alat pemisah dan *scale up* alat pemisah yang diperlukan dengan lebih baik.^[2]

TEORI

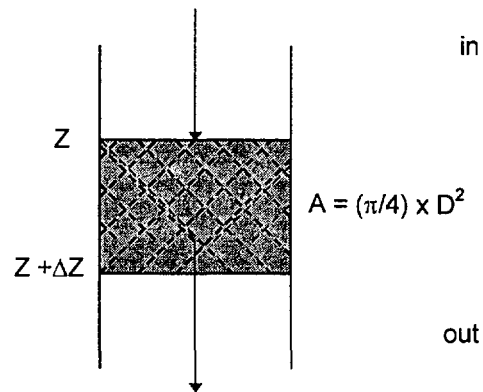
Penyusunan neraca massa uranium dalam fase cair pada elemen volum $A \cdot \Delta Z$ tanpa difusi efektif aksial.

Rate of input - Rate of out put - Rate of React = Rate of Acc.

$$A \cdot v \cdot C_A^3 - \left\{ \frac{A \cdot v \cdot C_A^3}{Z} + k_L \cdot a \cdot A \cdot \Delta Z (C_A - C_{AS}) \right\} = A \cdot \Delta Z \cdot e \cdot \frac{dC_A}{dt}$$

Persamaan dibagi $A \cdot \Delta Z$, dan diambil $\Delta Z \rightarrow 0$, maka :

$$\lim_{\Delta Z \rightarrow 0} \left[\frac{(v \cdot C_A^3 - v \cdot C_A^3) / \Delta Z}{Z + \Delta Z} + k_L \cdot a \cdot (C_A - C_{AS}) \right] = -e \frac{dC_A}{dt}$$



$$dC_A/dZ + (k_L \cdot a)/v (C_A - C_{AS}) = -e/v dC_A/dt$$

Neraca massa uranium pada fase padat :
Rate of Input - Rate of Out = Rate of Accumulation

$$A \cdot \Delta Z \cdot k_L \cdot a \cdot (C_A - C_{AS}) - 0 = A \cdot \Delta Z \cdot \rho_B \cdot \frac{dX_A}{dt}$$

$$\frac{dX_A}{dt} = \frac{k_L \cdot a}{\rho_B} (C_A - C_{AS}), \text{ karena } C_{AS} = H \cdot X_A,$$

maka diperoleh PD simultan :

$$dC_A/dZ + k_L \cdot a/v (C_A - H \cdot X_A) = -e/v dC_A/dt \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{dX_A}{dt} = \frac{k_L \cdot a}{\rho_B} (C_A - H \cdot X_A) \dots\dots\dots(2)$$

dengan keadaan batas

$$IC : t=0 ; Z^0 ; C_A=0 ; X_A=0$$

$$BC : t>0 ; Z=0 ; C_A=C_{A0} ; X_A=X_A$$

Persamaan Diferensial (PD) diatas diselesaikan secara numeris menggunakan metode *Finite Difference* cara eksplisit, sebagai berikut:^[4,5]

$$\frac{dC_A}{dZ} = \frac{(C_{i+1,j} - C_{i,j})}{(2 \cdot \Delta Z)} \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{d^2 C_A}{dZ^2} = \frac{(C_{i-1,j} - 2C_{i,j} + C_{i+1,j})}{\Delta Z^2} \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{(C_{i,j+1} - C_{i,j})}{\Delta t} \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{dX_A}{dt} = \frac{(X_{i,j+1} - X_{i,j})}{\Delta t} \dots\dots\dots(6)$$

Substitusi persamaan (3), (5) dan (6) ke persamaan (1) dan (2), diperoleh :

$$C_{i,j+1} = v \cdot \Delta t / (2 \cdot e \cdot \Delta Z) \cdot C_{i-1,j} + (1 + k_L \cdot a \cdot \Delta t / e) \cdot C_{i,j} - v \cdot \Delta t / (2 \cdot e \cdot \Delta Z) \cdot C_{i+1,j} + (k_L \cdot a \cdot \Delta t / e) \cdot H \cdot X_{i,j} \dots\dots\dots(7)$$

$$X_{i,j+1} = (k_L \cdot a \cdot \Delta t / \rho_B) \cdot C_{i,j} + (1 - k_L \cdot a \cdot \Delta t / \rho_B \cdot H) \cdot X_{i,j} \dots\dots\dots(8)$$

Jika modulus :

$$K = v \cdot \Delta t / (2 \cdot e \cdot \Delta Z) \dots\dots\dots(9)$$

$$L = k_L \cdot a \cdot \Delta t / e \dots\dots\dots(10)$$

$$M = k_L \cdot a \cdot \Delta t / \rho_B \dots\dots\dots(11)$$

persamaan (7) dan (8) menjadi :

$$C_{i,j+1} = K \cdot C_{i-1,j} + (1-L) \cdot C_{i,j} - K \cdot C_{i+1,j} + L \cdot H \cdot X_{i,j} \dots\dots\dots(12)$$

$$X_{i,j+1} = M.C_{i,j} + (1-M.H).X_{i,j} \dots\dots\dots(13)$$

Persamaan (12) berlaku untuk harga $i=1$ s/d. $i=N-1$, sedangkan persamaan (13) berlaku untuk $i=0$ s/d. $i=N$.

Untuk $i=0$, persamaan neraca massanya sebagai berikut :

$$A.v.C_{A0} - \{ A.v.(C_{0j} + C_{1j})/2 + k_L.a.A. \Delta Z/2.(C_{0j} - H.X_{0j}) \} = A. \Delta Z/2.e.(C_{0,j+1} - C_{0j})/ \Delta t$$

$$C_{0,j+1} = \{ -v. \Delta t/(\Delta Z.e) - k_L.a.\Delta t/e + 1 \}.C_{0j} - v.\Delta t/(\Delta Z.e).C_{1j} + k_L.a. \Delta t/e.H.X_{0j} + 2.v. \Delta t/(\Delta Z.e).C_{A0} \dots\dots\dots(14)$$

Substitusi persamaan (9), (10) dan (11) kedalam persamaan (14), menjadi :

$$C_{0,j+1} = (-2.K-L+1).C_{0j} - 2.K.C_{1j} + L.H.X_{0j} + 4.K.CA0 \dots\dots(15)$$

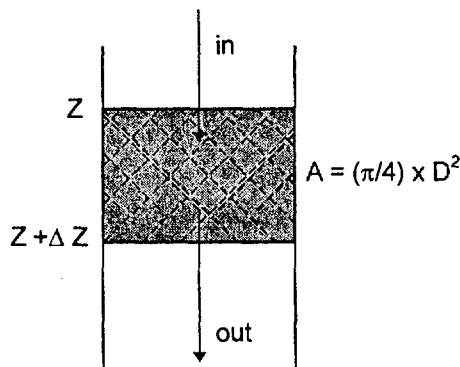
Persamaan neraca massa untuk $i=N$, sebagai berikut :

$$A.v.(C_{N-1,j} + C_{Nj})/2 - \{ A.v.(C_{Nj} + k_L.a.A.\Delta Z/2.(C_{Nj} - H.X_{Nj})) \} = A. \Delta Z/2.e.(C_{N,j+1} - C_{Nj})/\Delta t$$

$$C_{N,j+1} = 2.K.C_{N-1,j} + (1-L-2.K).C_{Nj} + L.H.X_{Nj} \dots\dots (16)$$

Jika harga-harga v , Δt , ΔZ , e dan ρ_B diketahui, maka dengan menggunakan persamaan-persamaan (12), (13), (15), dan (16), untuk harga $k_L.a$ tertentu, dapat dihitung distribusi konsentrasi uranium pada fase air (C_A) dan konsentrasi uranium pada fase padat (X_A) sebagai fungsi posisi dan waktu.

Penyusunan neraca massa uranium pada elemen volum kolom penukar ion, jika difusi kearah aksial tidak diabaikan.



Hukum Fick : $N_A = -De.dC_A/dZ$
 $C_{AS} = H.X_A$

$$A.v.C_A^3 + N_A.A^3 - \{ (A.v.C_A^3 + N_A.A^3) + k_L.a.A.\Delta Z(C_A - C_{AS}) \} = A.\Delta Z.e.dC_A/dt$$

$$\lim_{\Delta Z \rightarrow 0} [(v.C_A^3 - v.C_A^3)/\Delta Z + (N_A^3 - N_A^3)/\Delta Z] + k_L.a.(C_A - C_{AS}) = -e.dC_A/dt$$

$$v.dC_A/dZ - De.d^2C_A/dZ^2 + k_L.a.(C_A - H.X_A) = -e.dC_A/dt$$

Neraca massa uranium pada fase padat :

$$A.\Delta Z.k_L.a.(C_A - C_{AS}) - 0 = A. \Delta Z. B. dX_A/dt$$

$$dX_A/dt = k_L.a/ \rho_B (C_A - H.X_A)$$

diperoleh PD simultan :

$$dC_A/dt = v/e.dC_A/dZ - De/e.d^2C_A/dZ^2 + k_L.a/e (C_A - H.X_A) \dots\dots\dots(17)$$

$$dX_A/dt = k_L.a/\rho_B (C_A - H.X_A) \dots\dots\dots(18)$$

Apabila PD diatas diselesaikan secara numeris menggunakan metode *Finite Difference* cara eksplisit seperti pada perhitungan di atas, maka didapatkan :

$$X_{i,j+1} = O.C_{i,j} + (1 - O.H).X_{i,j} \dots\dots\dots (19)$$

$$C_{0,j+1} = (2.L - M + 2.K + 1).C_{0j} + (-2.K - 2.L).C_{1j} + M.H.X_{0j} \dots\dots (20)$$

$$C_{i,j+1} = (K + L).C_{i,j} + (K - L).C_{i+1,j} + (1 - M - 2.P).C_{ij} + M.H.X_{ij} \dots\dots (21)$$

$$C_{N,j+1} = (2.L - 2.K).C_{N-1,j} + (1 + 2.L + 2.K - M).C_{Nj} + M.H.X_{Nj} \dots\dots (22)$$

dengan $K = De.\Delta t/(e. \Delta Z^2)$
 $L = v. \Delta t/(2.e. \Delta Z)$
 $M = k_L.a. \Delta t/e$
 $O = k_L.a.\Delta t/\rho_B$

Apabila PD simultan pada persamaan (17) dan (18) diselesaikan secara numeris dengan metoda *finite difference* cara implisit, dengan pendekatan sebagai berikut :

$$dC_A/dZ = (C_{i+1,j+1} - C_{i-1,j+1})/(2. \Delta Z) \dots\dots\dots (23)$$

$$d^2C_A/dZ^2 = (C_{i-1,j+1} - 2C_{ij+1} + C_{i+1,j+1})/\Delta Z^2 \dots\dots (24)$$

$$dC_A/dt = (C_{ij+1} - C_{ij})/\Delta t \dots\dots\dots (25)$$

$$dX_A/dt = (X_{i,j+1} - X_{ij})/\Delta t \dots\dots\dots (26)$$

diperoleh :

$$X_{i,j+1} = O.C_{i,j+1} + (1 - O.H).X_{i,j+1} \dots\dots\dots (27)$$

$$(-1-L/2-K-M/2)C_{0,j+1} + (1-K)C_{1,j+1} = -(2.K.CA0 + L/2.H.X_{0,j+1} + M/2.C_{0j} \dots\dots\dots (28)$$

$$(1+K)C_{i-1,j+1} + (-2-L-M).C_{ij} + (1-K).C_{i+1,j+1} = - (L.H.X_{i,j+1} + M.C_{ij}) \dots\dots\dots (29)$$

$$(1+K).C_{N+1,j+1} + (-1-K-L/2-M/2).C_{N,j+1} = - (L/2.H.X_{N,j+1} + M/2.C_{Nj}) \dots\dots\dots(30)$$

dengan : $K = v. \Delta Z/(2.De)$
 $L = k_L.a. \Delta Z^2/De$
 $M = e. \Delta Z^2/(De.\Delta t)$
 $O = k_L.a. \Delta t/\rho_B$

Jika harga-harga v , Δt , ΔZ , e dan ρ_B diketahui, maka dengan menggunakan persamaan-persamaan (27), (28), (29), dan (30), untuk harga k_{La} dan De tertentu, dapat dihitung distribusi konsentrasi uranium pada fase air (C_A) dan konsentrasi uranium pada fase padat (X_A) sebagai fungsi posisi dan waktu. Dengan mengubah-ubah harga k_{La} dan De , maka akan diperoleh harga C_A dan X_A yang sesuai dengan harga C_A dan X_A hasil perhitungan dari persamaan (12), (13), (15) dan (16). Harga k_{La} dan De yang terbaik adalah yang memberikan sum of squares of errors (SSE) yang minimum, artinya bahwa :

$SSE = \sum [(C_A)_{hitung} - (C_A)_{data}]^2$ adalah minimum.

TATA KERJA

1. Penyusunan model matematis dengan dan tanpa pengaruh difusi efektif aksial.

Dalam penyusunan model matematis yang kiranya dapat mewakili peristiwa adsorpsi diatas, diambil beberapa anggapan sebagai berikut :

- 1.1. Butiran resin terdistribusi merata dalam kolom.
- 1.2. Aliran larutan dalam tumpukan resin mengikuti pola aliran sumbat (*plug flow*).
- 1.3. Perpindahan massa uranium berlangsung dari cairan kepadatan.
- 1.4. Proses isothermal.
- 1.5. Konsentrasi uranium dalam satu butiran resin homogen.
- 1.6. Yang mengontrol adalah perpindahan massa pada lapisan film cairan dipermukaan butir (perpindahan massa didalam butir padatan dan reaksi kimia tidak berpengaruh).
2. Penyelesaian model matematis (Persamaan Diferensial simultan) secara numeris.
3. Pembuatan program (simulasi komputasi)

HASIL DAN BAHASAN

Dari hasil penyusunan model matematis, tampak bahwa harga koefisien perpindahan massa (k_{La}) dan koefisien difusivitas efektif aksial (De) uranium pada pemisahan uranium dari hasil belah menggunakan model kolom pertukaran ion dapat ditentukan dengan cara perhitungan. Model matematis pada peristiwa di atas

berbentuk persamaan diferensial simultan, seperti ditunjukkan pada persamaan (1), (2), (17) dan (18).

Tabel 1, 2 dan 3 menunjukkan bahwa pada harga v (kecepatan linier superfisial) tertentu, semakin lama waktu operasi semakin besar konsentrasi uranium di dalam bahan isian sepanjang kolom (X_A). Hal ini dikarenakan semakin lama waktu operasi, semakin banyak uranium yang bereaksi dengan gugus fungsional di dalam bahan isian. Pengaruh waktu operasi ini juga dapat dilihat pada tabel 4, 5 dan 6. Dari data tersebut tampak bahwa dengan waktu operasi semakin lama, konsentrasi uranium keluar kolom (C_A) semakin besar. Hal ini disebabkan oleh kemampuan daya serap bahan isian yang semakin berkurang, yang akhirnya mencapai tingkat kejenuhan.

Pengaruh kecepatan alir superfisial terhadap harga k_{La} dan De dapat dilihat pada tabel 4, 5 dan 6. Makin besar harga v , semakin besar pula harga k_{La} . Hal ini disebabkan oleh turbulensi larutan yang semakin besar. Sedangkan pengaruh harga v terhadap perubahan harga De sangat kecil. Pada kebanyakan proses, pengaruh difusi efektif kearah aksial (De) sering diabaikan karena harganya relatif sangat kecil bila dibandingkan dengan harga k_{La} (koefisien perpindahan massa volumetris), terutama untuk proses yang bekerja pada daerah turbulen. Namun demikian untuk perhitungan-perhitungan yang lebih teliti, ada baiknya harga De tersebut tidak diabaikan, terutama untuk proses-proses yang bekerja pada daerah laminar.

Tabel 1. Hubungan antara waktu dan distribusi konsentrasi pada kolom isian.

Kecepatan linier superfisial = 20 cm/menit
Konsentrasi uranium dalam umpan = 0,001 g/cm³
Konsentrasi uranium keluar kolom saat awal = 0 g/cm³
Koefisien perpindahan massa = 15,5 per menit

WAKTU = 10 MENIT

Panjang (cm)	CA (g/cm ³)	XA (g Ce/g resin)
0	0,001	4,878256 x 10 ⁻²
4	6,193681 x 10 ⁻⁴	2,529139 x 10 ⁻²
8	2,891957 x 10 ⁻⁴	1,044514 x 10 ⁻²
12	1,154753 x 10 ⁻⁴	3,791446 x 10 ⁻³
16	3,992745 x 10 ⁻⁵	1,215923 x 10 ⁻³
20	1,719080 x 10 ⁻⁵	4,987977 x 10 ⁻⁴

WAKTU = 20 MENIT

Panjang (cm)	CA (g/cm ³)	XA (g Ce/g resin)
0	0,001	4,996985 x 10 ⁻²
4	8,909646 x 10 ⁻⁴	4,147264 x 10 ⁻²
8	6,152785 x 10 ⁻⁴	2,650594 x 10 ⁻²
12	3,574024 x 10 ⁻⁴	1,434157 x 10 ⁻²
16	1,725266 x 10 ⁻⁴	6,251413 x 10 ⁻³
20	9,300176 x 10 ⁻⁵	3,384704 x 10 ⁻³

WAKTU = 30 MENIT

Panjang (cm)	CA (g/cm ³)	XA (g Ce/g resin)
0	0,001	4,999927 x 10 ⁻²
4	1,019121 x 10 ⁻³	5,078781 x 10 ⁻²
8	9,842757 x 10 ⁻⁴	4,808691 x 10 ⁻²
12	9,132214 x 10 ⁻⁴	4,307753 x 10 ⁻²
16	7,410370 x 10 ⁻⁴	3,344980 x 10 ⁻²
20	5,736104 x 10 ⁻⁴	2,513143 x 10 ⁻²

WAKTU = 30 MENIT

Panjang (cm)	CA (g/cm ³)	XA (g Ce/g resin)
0	0,001	4,996985 x 10 ⁻²
4	1,002177 x 10 ⁻³	4,898066 x 10 ⁻²
8	8,590857 x 10 ⁻⁴	4,005993 x 10 ⁻²
12	6,399150 x 10 ⁻⁴	2,826652 x 10 ⁻²
16	3,917105 x 10 ⁻⁴	1,645542 x 10 ⁻²
20	2,472391 x 10 ⁻⁴	1,006005 x 10 ⁻²

WAKTU = 40 MENIT

Panjang (cm)	CA (g/cm ³)	XA (g Ce/g resin)
0	0,001	4,999927 x 10 ⁻²
4	1,014761 x 10 ⁻³	5,080203 x 10 ⁻²
8	1,006042 x 10 ⁻³	5,018667 x 10 ⁻²
12	1,003960 x 10 ⁻³	4,953429 x 10 ⁻²
16	9,437385 x 10 ⁻⁴	4,523894 x 10 ⁻²
20	8,205566 x 10 ⁻⁴	3,841370 x 10 ⁻²

WAKTU = 40 MENIT

Panjang (cm)	CA (g/cm ³)	XA (g Ce/g resin)
0	0,001	4,999877 x 10 ⁻²
4	1,025081 x 10 ⁻³	5,109226 x 10 ⁻²
8	9,799166 x 10 ⁻⁴	4,771580 x 10 ⁻²
12	8,651113 x 10 ⁻⁴	4,052270 x 10 ⁻²
16	6,377730 x 10 ⁻⁴	2,862584 x 10 ⁻²
20	4,561550 x 10 ⁻⁴	1,991135 x 10 ⁻²

WAKTU = 50 MENIT

Panjang (cm)	CA (g/cm ³)	XA (g Ce/g resin)
0	0,001	4,999927 x 10 ⁻²
4	1,008587 x 10 ⁻³	5,050821 x 10 ⁻²
8	1,007448 x 10 ⁻³	5,034520 x 10 ⁻²
12	1,006009 x 10 ⁻³	5,037643 x 10 ⁻²
16	1,014679 x 10 ⁻³	5,019200 x 10 ⁻²
20	9,551100 x 10 ⁻⁴	4,648991 x 10 ⁻²

WAKTU = 50 MENIT

Panjang (cm)	CA (g/cm ³)	XA (g Ce/g resin)
0	0,001	4,999877 x 10 ⁻²
4	1,019588 x 10 ⁻³	5,107053 x 10 ⁻²
8	1,011441 x 10 ⁻³	5,032226 x 10 ⁻²
12	9,885084 x 10 ⁻⁴	4,808112 x 10 ⁻²
16	8,433816 x 10 ⁻⁴	3,961803 x 10 ⁻²
20	6,690290 x 10 ⁻⁴	3,066890 x 10 ⁻²

Tabel 3 Hubungan antara waktu dan distribusi konsentrasi pada kolom isian

Kecepatan linier superfisial = 40 cm/menit
Konsentrasi uranium dalam umpan = 0,001 g/cm³
Konsentrasi uranium keluar kolom saat awal = 0 g/cm³
Koefisien perpindahan massa = 20,5 per menit

WAKTU = 5 MENIT

Panjang (cm)	CA (g/cm ³)	XA (g Ce/g resin)
0	0,001	4,571147 x 10 ⁻²
4	6,398470 x 10 ⁻⁴	2,396773 x 10 ⁻²
8	3,360637 x 10 ⁻⁴	1,100158 x 10 ⁻²
12	1,583286 x 10 ⁻⁴	4,669582 x 10 ⁻²
16	6,595474 x 10 ⁻⁵	1,791973 x 10 ⁻³
20	3,282810 x 10 ⁻⁵	8,474298 x 10 ⁻³

Tabel 2. Hubungan antara waktu dan distribusi konsentrasi pada kolom isian

Kecepatan linier superfisial = 30 cm/menit
Konsentrasi uranium dalam umpan = 0,001 g/cm³
Konsentrasi uranium keluar kolom saat awal = 0 g/cm³
Koefisien perpindahan massa = 17,5 per menit

WAKTU = 10 MENIT

Panjang (cm)	CA (g/cm ³)	XA (g Ce/g resin)
0	0,001	4,924716 x 10 ⁻²
4	7,776710 x 10 ⁻⁴	3,334377 x 10 ⁻²
8	4,784210 x 10 ⁻⁴	1,839909 x 10 ⁻²
12	2,565676 x 10 ⁻⁴	9,019499 x 10 ⁻³
16	1,183414 x 10 ⁻⁴	3,868835 x 10 ⁻³
20	6,265751 x 10 ⁻⁵	1,957567 x 10 ⁻³

WAKTU = 10 MENIT

Panjang (cm)	CA (g/cm ³)	XA (g Ce/g resin)
0	0,001	4,963330 x 10 ⁻²
4	8,742335 x 10 ⁻⁴	3,921208 x 10 ⁻²
8	6,280856 x 10 ⁻⁴	2,567656 x 10 ⁻²
12	3,997864 x 10 ⁻⁴	1,505137 x 10 ⁻²
16	2,183695 x 10 ⁻⁴	7,671511 x 10 ⁻³
20	1,300083 x 10 ⁻⁴	4,375200 x 10 ⁻²

WAKTU = 20 MENIT

Panjang (cm)	CA (g/cm ³)	XA (g Ce/g resin)
0	0,001	4,998851 x 10 ⁻²
4	9,860778 x 10 ⁻⁴	4,763426 x 10 ⁻²
8	8,430813 x 10 ⁻⁴	3,853684 x 10 ⁻²
12	6,454263 x 10 ⁻⁴	2,775567 x 10 ⁻²
16	4,171938 x 10 ⁻⁴	1,694928 x 10 ⁻²
20	2,761886 x 10 ⁻⁴	1,082480 x 10 ⁻²

WAKTU = 15 MENIT

Panjang (cm)	CA (g/cm ³)	XA (g Ce/g resin)
0	0,001	4,996795 x 10 ⁻²
4	9,784624 x 10 ⁻⁴	4,693274 x 10 ⁻²
8	8,356763 x 10 ⁻⁴	3,778297 x 10 ⁻²
12	6,474878 x 10 ⁻⁴	2,746881 x 10 ⁻²
16	4,290720 x 10 ⁻⁴	1,714870 x 10 ⁻²
20	2,903707 x 10 ⁻⁴	1,117697 x 10 ⁻²

WAKTU = 20 MENIT

Panjang (cm)	CA (g/cm ³)	XA (g Ce/g resin)
0	0,001	$4,999654 \times 10^{-2}$
4	$1,011962 \times 10^{-3}$	$4,995578 \times 10^{-2}$
8	$9,470663 \times 10^{-4}$	$4,522876 \times 10^{-2}$
12	$8,364180 \times 10^{-4}$	$3,815196 \times 10^{-2}$
16	$6,434402 \times 10^{-4}$	$2,789687 \times 10^{-2}$
20	$4,821571 \times 10^{-4}$	$2,021797 \times 10^{-2}$

WAKTU = 25 MENIT

Panjang (cm)	CA (g/cm ³)	XA (g Ce/g resin)
0	0,001	$4,999877 \times 10^{-2}$
4	$1,017073 \times 10^{-3}$	$5,075110 \times 10^{-2}$
8	$9,916028 \times 10^{-4}$	$4,873109 \times 10^{-2}$
12	$9,470149 \times 10^{-4}$	$4,523646 \times 10^{-2}$
16	$8,168466 \times 10^{-4}$	$3,744201 \times 10^{-2}$
20	$6,655078 \times 10^{-4}$	$2,962224 \times 10^{-2}$

Tabel 4. Hubungan antara waktu dan konsentrasi

Kecepatan linier superfisial = 20 cm/menit
Panjang bahan isian = 20 cm
Konsentrasi uranium dalam umpan = 0,001 g/cm³
Konsentrasi uranium keluar kolom saat awal = 0 g/cm³
Konstante Henry = 0,02 g bahan isian/cm³ larutan

WAKTU (MENIT)	CA-HITUNG	CA-DATA	RALAT (%)
10,0	0,0000050	0,0000172	70,83
20,0	0,0000567	0,0000930	39,00
30,0	0,0002143	0,0002472	13,31
40,0	0,0004614	0,0004561	1,16
50,0	0,0007065	0,0006690	5,61

Untuk data di atas diperoleh hasil :

Koefisien perpindahan massa, $k_L a = 15,18588$ per menit
Koefisien difusivitas efektif aksial, $De = 9,14117 \times 10^{-4}$ cm²/menit
Sum of squares of errors, $SSE = 3,98145 \times 10^{-9}$
Ralat relatif rata-rata, RREL = 25,981 %

Tabel 5. Hubungan antara waktu dan konsentrasi

Kecepatan linier superfisial = 30 cm/menit
Panjang bahan isian = 20 cm
Konsentrasi uranium dalam umpan = 0,001 g/cm³
Konsentrasi uranium keluar kolom saat awal = 0 g/cm³
Konstante Henry = 0,02 g bahan isian/cm³ larutan

WAKTU (MENIT)	CA-HITUNG	CA-DATA	RALAT (%)
10,0	0,0000361	0,0000626	42,33
20,0	0,0002506	0,0002760	9,19
30,0	0,0005904	0,0005761	2,48
40,0	0,0008465	0,0008205	3,17
50,0	0,0009602	0,0009551	0,54

Untuk data di atas diperoleh hasil :

Koefisien perpindahan massa, $k_L a = 17,61700$ per menit
Koefisien difusivitas efektif aksial, $De = 1,11412 \times 10^{-3}$ cm²/menit
Sum of squares of errors, $SSE = 2,25117 \times 10^{-9}$
Ralat relatif rata-rata, RREL = 11,541 %

Tabel 6. Hubungan antara waktu dan konsentrasi

Kecepatan linier superfisial = 40 cm/menit
Panjang bahan isian = 20 cm
Konsentrasi uranium dalam umpan = 0,001 g/cm³
Konsentrasi uranium keluar kolom saat awal = 0 g/cm³
Konstante Henry = 0,02 g bahan isian/cm³ larutan

WAKTU (MENIT)	CA-HITUNG	CA-DATA	RALAT (%)
5,0	0,0000154	0,0000328	53,08
10,0	0,0000966	0,0001300	25,67
15,0	0,0002660	0,0002903	8,36
20,0	0,0004835	0,0004821	0,29
25,0	0,0006860	0,0006655	3,09

Untuk data di atas diperoleh hasil :

Koefisien perpindahan massa, $k_L a = 20,48588$ per menit
Koefisien difusivitas efektif aksial, $De = 1,11612 \times 10^{-3}$ cm²/menit
Sum of squares of errors, $SSE = 2,71462 \times 10^{-9}$
Ralat relatif rata-rata, RREL = 18,897 %

SIMPULAN

1. Harga koefisien perpindahan massa ($k_L a$) dan koefisien difusivitas efektif aksial (De) uranium pada pemisahan uranium dari hasil belah menggunakan model kolom pertukaran ion, dapat ditentukan dengan cara simulasi komputasi. Model matematis pada peristiwa di atas berupa

persamaan diferensial simultan sebagai berikut :

$$dC_A/dZ + k_L \cdot a/v (C_A - H \cdot X_A) = -e/v dC_A/dt$$

$$dC_A/dt = v/e \cdot dC_A/dZ - De/e \cdot d^2C_A/dZ^2 + k_L \cdot a/e (C_A - H \cdot X_A)$$

$$dX_A/dt = k_L \cdot a/\rho_B (C_A - H \cdot X_A)$$

dengan keadaan batas

$$IC : t=0 ; Z^0 ; C_A=0 ; X_A=0$$

$$BC : t>0 ; Z=0 ; C_A=C_{A0} ; X_A=X_A$$

2. Dari perhitungan, pada kecepatan alir superfisial 20-40 cm/menit, diperoleh harga $k_L \cdot a$ berkisar antara 15,18588 - 20,48588 per menit dan De berkisar antara $9,14117 \cdot 10^{-4}$ - $1,11612 \cdot 10^{-3}$ cm^2 /menit.
3. Untuk perhitungan-perhitungan yang lebih teliti, ada baiknya harga De tersebut tidak diabaikan, terutama untuk proses-proses yang bekerja pada daerah laminer.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. LONG, J.T., "Engineering for Nuclear Fuel Reprocessing", pp. 685-718, American Nuclear Society, California (1978).
- [2]. BROADKEYR.S. AND HERSHEY, H.C., "Transport Phenomena" A Unified Approach, McGraw-Hill International Editions, Singapore (1988).
- [3]. PERRY, R.H., "Perry's Chemical Engineers'Hand Book", 6 ed., McGraw Hill International Editions, New York (1984).
- [4]. MICKLEY, H.S., SHERWOOD, T.S. AND REED, C.E., "Applied Matematics in Chemical Engineering", Tata McGraw Hill Publishing Company, Ltd., New Delhi (1975).
- [5]. SEDIWAN, W.B., "Model-Model Matematis Dan Simulasi Komputer Dalam Transfer Massa", PAU., Universitas Gadjah Mada (1990).
- [6]. EMELEUS, H.J., " Comprehensive Inorganic Chemistry", vol 4, p.466, Pergamon Press, New York, 1973.
- [7]. FLAGG, J.F., "Chemical Processing of Reactor Fuels", pp. 140-195, Academic Press, New York (1961).

TANYA JAWAB

1. Fathurrachman

- Tidak terlihat jelas penggunaan resinnya, apakah kation atau anion. Hal ini berpengaruh terhadap keasaman larutan yang dipakai. Dalam simulasi itu yang tampak hanya logam uraniumnya saja yang terserap, tidak ada yang lain. Bagaimana bila ada pengotor yang terikut, apakah diabaikan?

M.Setyadji

- Agar uranium dapat terpisah dari hasil belah Zr, Ru, Nb (kation), salah satu cara adalah dengan mengubah UO_2^{++} menjadi ion kompleks negatif (anion) misalnya dengan menambah pengompleks sulfat atau karbonat. Dalam hal ini berarti resinnya anion.
- Pada penelitian ini dianggap tidak ada pengotor dalam umpan karena umpan yang digunakan sudah melalui proses siklus I yang meliputi pelarutan, ekstraksi pelarut dan reekstraksi. Yang tersisa (dianggap sebagai pengotor) hanya hasil belah yang sukar dipisahkan pada siklus I (Ru, Zr dan Nb). Namun demikian untuk kondisi umpan yang lain tidak menjadi masalah, karena yang menentukan adalah besarnya harga konstanta Henry (H) yang besarnya :
 $C_{AS} = H \cdot X_A$
Kondisi setimbang antara uranium dalam larutan dan uranium dalam padatan dicari melalui penelitian pendahuluan.

2. Mainar Sjahminan

- Mohon penjelasan kenapa terjadi daerah turbulensi.
- Apakah metoda yang digunakan pada penukar ion ini (*fixed bed* atau resin berjalan)?

M.Setyadji

- Yang menentukan aliran berada pada daerah laminer atau turbulen adalah besarnya bilangan Reynolds :
 $Re = (D_p \cdot v \cdot \rho)/\mu$
(D_p = diameter partikel padatan, v = kecepatan linier superfisial)
Jika $Re < 1,0$, daerah laminer
 $Re > 1,0$, daerah turbulen

Untuk aliran dalam pipa kosong, aliran turbulen terjadi pada $Re > 2100$.

- Yang digunakan adalah *Fixed bed*.

3. Sugondo

- Simulasi tersebut berlaku untuk sampel panas atau dingin? Mohon dijelaskan pada perencanaan simulasi.

M.Setyadji

- Simulasi berlaku untuk sampel panas maupun dingin karena yang dilihat adalah konsentrasi U dalam umpan (CA_0).

4. Birsam

- Tunjukkan di mana letak SSE minimum yang mendekati nol.

M.Setyadji

- Pada tabel 4, 5 dan 6 terlihat bahwa untuk kecepatan lenier superfisial 20-40 cm/menit didapatkan harga SSE berkisar antara $2,25117 \cdot 10^{-9}$ - $3,98145 \cdot 10^{-9}$.