

**ANALISIS KOEFISIEN DISPERSI DAN RETARDASI FOSFAT
PADA TANAH DI SEKITAR TEMPAT PEMBUANGAN AKHIR
LIMBAH DOMESTIK MENGGUNAKAN PERUNUT ³²P
(Analysis of Phosphate Dispersion and Retardation Coefficient
at Soil Around a Final Disposal Area of Domestic Waste Using ³²P Tracer)**

Ester Wijayanti¹ dan Anung Muharini²

ABSTRACT

The domestic waste of a final disposal content more of 30% of phosphate. Diluted phosphate in water can be transported, dispersed and spread into environment. Phenomenon of phosphate mass transport diluted in water especially dispersion and retardation coefficient need to be analysed to recognize the migration pattern. Dispersion and retardation coefficient can be determined experimentally in laboratory using radioactive tracer. Physical modelling was done to obtained phosphate concentration data at different times and distances. Phosphate concentration data obtained from physical model were used to verify mathematical model to obtain dispersion and retardation coefficient by Hooke Jeeves numerical optimization method according to the partial differential equation that was approximated by minimize of sum of squares of error

A Research of phosphate mass transfer phenomenon, physically and mathematically, have been done. The NaH₂PO₄·2H₂O was mixed with soil from the domestic waste a final disposal. Water fed to this soil then diluted phosphate fed to soil box that has porosity 0,3030 with flow rate 56,5 ml/min. The Phosphate level were determined on 0, 35, 70, 105 and 140 cm at 0, 30, 60, 90, 120, 150 180 and 210 minutes. Phosphate level decreased according to position. Computer program were running well and resulted 0,011 cm²/min for dispersion coefficient and 56 for retardation with 3.9114E-04 Sum of Squares of Error (SSE) or 38 % for average relative error.

Keywords : Mass Transfer, Dispersion Coefficient, Retardation Coefficient, Radioactive Tracer

PENDAHULUAN

Sampah organik yang berasal dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) mengandung fosfat lebih dari 30%. Kandungan senyawa fosfat yang tinggi dapat mencemari air tanah. Fosfat tersebut akan terlarut dalam air dan kemudian terbawa aliran. Aliran yang membawa fosfat terlarut tersebut akan terinfiltrasi ke dalam air tanah dan akan mengalami proses-proses layaknya pencemar yang lain, seperti dispersi, adsorpsi maupun desorpsi. Proses-proses tersebut di atas sangat mempengaruhi penyebaran zat pencemar di dalam tanah.

Untuk mengendalikan pergerakan air dalam tanah ini perlu diketahui karakteristik aliran antara lain berupa koefisien dispersi dan koefisien retardasi yang merupakan parameter model penyebaran zat pencemar yang melewati suatu media *porous*. Koefisien dispersi penting untuk mengetahui tingkat penyebaran pencemar pada suatu media tertentu. Sedangkan koefisien retardasi berguna untuk mengetahui perbandingan kecepatan penyebaran pencemar terhadap kecepatan air tanah yang menyertainya (Kinzelbach, 1986).

Transpor massa fosfat pernah diteliti menggunakan media pasir (Syaifulloh, 2002). Pada

penelitian tersebut air yang dialirkan merupakan air yang telah mengandung fosfat. Muharini dkk (2001) meneliti karakterisasi migrasi fosfat lumpur IPAL Yogyakarta dalam tanah menggunakan perunut ³²P. Pada penelitian ini digunakan media tanah dan ada proses pelarutan dari fosfat pada tanah sampah TPA.

Untuk mempelajari proses transpor massa fosfat dapat digunakan perunut radioaktif karena memberikan keuntungan baik secara teknik maupun ekonomi dibandingkan dengan perunut non radioaktif. Secara umum, zat-zat radioaktif mengalami proses yang sama dengan zat non radioaktif dalam tanah. Perbedaannya terletak pada proses peluruhan yang terjadi pada zat radioaktif (Gaspar and Oncescu, 1972). Dengan demikian, persamaan transfer untuk zat non radioaktif dapat didekatkan dengan proses transfer zat radioaktif dengan menambahkan suatu suku peluruhan.

Proses peruntutan langsung pada daerah sekitar TPA sangat dipengaruhi oleh kondisi lahan yang sulit dikontrol, sehingga dibuat model fisis skala laboratorium. Fenomena migrasi fosfat aktif dalam media tanah dapat pula dibuat pemodelan secara matematis yang lebih diarahkan kepada kondisi ideal mengikuti hukum-hukum transfer massa.

¹ Ir. Ester Wijayanti, MT., Dosen Jurusan Teknik Fisika, FT, UGM, Yogyakarta

² Ir. Anung Muharini, M.T., Dosen Jurusan Teknik Fisika, FT, UGM, Yogyakarta

Dengan menganalisis fenomena migrasi menggunakan kedua pendekatan tersebut, diharapkan akan diperoleh keadaan yang bisa didekatkan dengan kondisi di lapangan ataupun kondisi ideal. Dengan kata lain, akan diperoleh keadaan yang paling optimum.

Pada umumnya ada empat proses yang terjadi apabila bahan polutan masuk ke dalam tanah, yaitu *adveksi*, *dispersi*, *sorpsi*, dan *retardasi* (Syamsiah, 1993). Adveksi merupakan proses migrasi yang paling dominan, yang disebabkan oleh gerakan media dan bahan polutan yang mengalir. Dispersi adalah proses penyebaran bahan polutan. Proses ini terjadi karena adanya gerakan mekanis dan difusi molekuler yang terjadi secara simultan. Gerakan mekanis disebabkan heterogenitas medium berpori sedangkan difusi molekuler tergolong gaya kimia fisik. Dispersi dapat terjadi melalui empat mekanisme yang berbeda-beda, antara lain :

- Distribusi kecepatan aliran yang tidak seragam pada pori-pori tanah
- Kecepatan aliran yang berbeda pada masing-masing pori
- Fluktuasi aliran terhadap arah aliran rata-rata.
- Difusi molekuler yang disebabkan oleh perbedaan konsentrasi.

Kontribusi masing-masing mekanisme tersebut pada umumnya tidak mudah untuk ditentukan. Oleh karena itu koefisien dispersi-difusi diperoleh dengan cara empiris menggunakan koefisien dispersi (*D*) (Syamsiah, 1993).

Polutan yang terbawa oleh aliran air tanah sebagian akan mengalami retensi (tertahan) oleh medium tanah karena adanya sorpsi. Sorpsi terjadi melalui dua cara yaitu melalui pertukaran ion atau melalui adsorpsi.

Kecepatan dan mekanisme adsorpsi sangat dipengaruhi oleh karakteristik media pengadsorpsi (adsorben) dan bahan yang diadsorpsi (adsorbat). Pada adsorpsi fisika, sifat yang paling dominan yang mempengaruhi kapasitas adsorpsi dari adsorben adalah porositas. Adsorpsi pada makro pori terjadi secara cepat dan selalu dalam keadaan setimbang, sedangkan adsorpsi yang terjadi pada mikro pori sangat lambat (Syamsiah, 1993). Kuantifikasi sorpsi dilakukan dengan pengukuran koefisien distribusi (K_d), yaitu perbandingan konsentrasi radionuklida pada padatan (C_s) dan konsentrasi pada larutan (C_l) (Schroeder, 1970).

$$K_d = \frac{C_s}{C_l} \quad (1)$$

Kecepatan perpindahan zat radioaktif di dalam tanah tidak hanya tergantung pada sifat-sifat zat tersebut, tetapi juga tergantung pada sifat-sifat tanah. Hal tersebut terletak pada karakter kompleks sorpsi dan sifat-sifat fisik tanah seperti porositas dan permeabilitas.

Untuk aliran dalam medium *porous* faktor retardasi didefinisikan sebagai perbandingan waktu tiba rerata polutan dengan air yang membawanya (Kinzelbach, 1986).

$$R = t_R/t_w = v_w/v_R \quad (2)$$

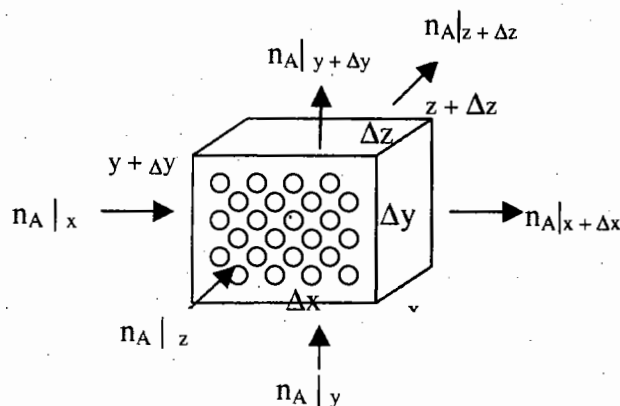
DASAR TEORI

Model matematis transpor massa fosfat aktif larut dalam air pada media pasir dapat direpresentasikan dengan elemen volume seperti Gambar 2.1.

Neraca massa A (fosfat aktif) di elemen volume Δx . Δy . Δz media porous (Ward and Ginge, 1985):

$$\begin{aligned} & \text{Rate of Input} - \text{Rate of Output} - \text{Rate of} \\ & \text{Desintegration} = \text{Rate of Accumulation} \\ & (n_A|_x \cdot \epsilon \cdot \Delta y \cdot \Delta z + n_A|_y \cdot \epsilon \cdot \Delta x \cdot \Delta z + n_A|_z \cdot \epsilon \cdot \Delta x \cdot \Delta y) - \\ & (n_A|_{x+\Delta x} \cdot \epsilon \cdot \Delta y \cdot \Delta z + \\ & n_A|_{y+\Delta y} \cdot \epsilon \cdot \Delta x \cdot \Delta z + n_A|_{z+\Delta z} \cdot \epsilon \cdot \Delta x \cdot \Delta y) - \lambda \cdot (\rho_A \\ & \epsilon \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z + S_A \rho_b \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \\ & = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_A \epsilon \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z + S_A \rho_b \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \quad (3) \end{aligned}$$

Jika persamaan (3) di atas disusun kembali menjadi :



Gambar 1 . Elemen volume pada media porous.

$$(\nabla n_A) + \lambda \left(\rho_A + \frac{S_A \rho_b}{\epsilon} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho_A + \frac{S_A \rho_b}{\epsilon} \right) = 0 \quad (4)$$

S_A adalah perbandingan berat A terserap dalam padatan maka,

$$S_A = k_d \cdot \rho_A \quad (5)$$

sehingga persamaan (4) menjadi :

$$(\nabla n_A) + \lambda \rho_A \left(1 + \frac{k_d \rho_b}{\epsilon} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \rho_A \left(1 + \frac{k_d \rho_b}{\epsilon} \right) = 0 \quad (6)$$

$$(\nabla n_A) + \lambda \cdot \rho_A \cdot R + \frac{\partial}{\partial t} \rho_A \cdot R = 0 \quad (7)$$

dimana $R = \left(1 + \frac{k_d \cdot \rho_b}{\epsilon} \right)$ disebut koefisien retardasi.

Kecepatan perpindahan fosfat yang dipengaruhi oleh difusi, konveksi dan dispersi dapat dinyatakan dalam persamaan (8) berikut:

$$n_A = \rho_A \cdot v - D^h \frac{\partial}{\partial x} \rho_A \quad (8)$$

Substitusi persamaan (8) ke persamaan (7) menjadi :

$$\nabla \left(\rho_A v - D^h \frac{\partial \rho_A}{\partial x} \right) + \lambda \rho_A \cdot R + \frac{\partial}{\partial t} (\rho_A \cdot R) = 0 \quad (9)$$

Jika diasumsikan fluida bergerak pada satu arah yaitu ke arah x dan

$$\rho_A = M_A C_A \quad (10)$$

maka persamaan (9) menjadi (11):

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \lambda C_A + \frac{1}{R} \left(v \frac{\partial C_A}{\partial x} - D^h \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} \right) = 0 \quad (11)$$

Persamaan (11) merupakan persamaan transpor zat terlarut pada suatu media tanah yang dapat diselesaikan dengan menggunakan keadaan batas yang diinginkan. Jika media yang akan dilalui tidak mengandung polutan, maka keadaan batasnya adalah :

$$C_A(x,0) = 0 \quad (12)$$

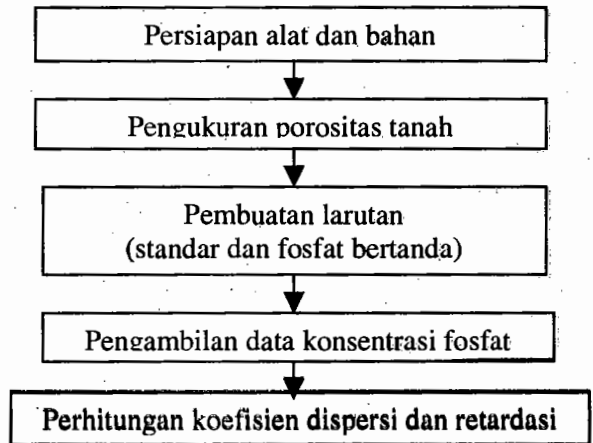
$$C_A(0,t) = C_{in} \quad (13)$$

$$C_A(L,t) = C_{out} \quad (14)$$

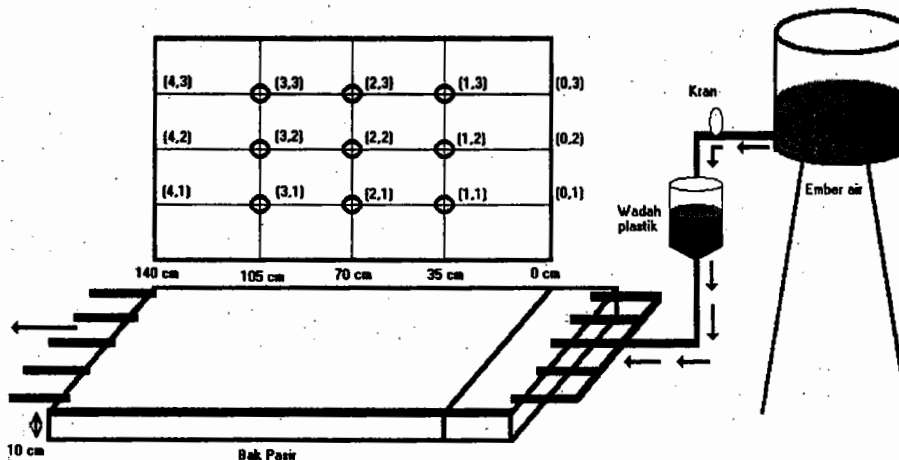
Konsentrasi fosfat yang terhitung dari persamaan (11) di atas merupakan konsentrasi fosfat aktif yang berasal dari perunut yang digunakan, sedangkan yang ingin diketahui adalah konsentrasi fosfat yang non aktif. Dikarenakan fosfat aktif mengalami peluruhan tiap waktunya, maka diperlukan koreksi sebesar $e^{-\lambda t}$ untuk menghitung konsentrasi fosfat non aktifnya.

METODOLOGI PENELITIAN

Bahan yang digunakan adalah tanah sampah TPA sebagai sumber pencemar fosfat dan perunut ^{32}P . Sumber fosfat dialiri air dengan debit 56,5 ml/menit dan dilewatkan media tanah sehingga kecepatan linearinya 0,0196 cm/dtk. Sampel diambil pada berbagai variasi jarak dan waktu. Tatalaksana penelitian seperti pada Gambar 2. dan Gambar 3.



Gambar 2. Tatalaksana Penelitian.



Gambar 3. Skema Alat Penelitian

Dalam penelitian ini dilakukan pemodelan fisis untuk memperoleh data cacah pada berbagai waktu dan jarak tertentu. Data cacah dapat dikonversi ke data konsentrasi fosfat (C_A) dengan membandingkannya dengan standar. Data konsentrasi dipakai untuk verifikasi model matematis, sehingga dapat diperoleh koefisien dispersi dan retardasi.

Verifikasi dilakukan dengan menyelesaikan C_A pada persamaan (11) secara numeris sehingga didapat C_A setiap saat dan membandingkannya dengan C_A data. Beda nilai antara keduanya diminimasi dengan menggunakan metode *Hooke-Jeeves* (Sediawan, 1997) sehingga diperoleh koefisien dispersi dan retardasi yang optimum. Verifikasi ini dilakukan dengan menggunakan bahasa program Quick Basic yang menyelesaikan persamaan (11) secara simultan dengan menggunakan *Finite Difference Approximation* sekaligus melakukan optimasi dengan menggunakan metode *Hooke-Jeeves*. Jadi yang menjadi *objective function* optimasi adalah konsentrasi fosfat hasil eksperimen dan hasil penyelesaian model matematik sedangkan variabel optimasi adalah koefisien dispersi dan retardasi.

Koefisien dispersi dan retardasi yang diambil adalah yang memiliki kesalahan (*error*) minimum. Adapun analisis kesalahan yang akan dipakai yakni cara kuadrat terkecil (*sum of squares of errors - SSE*) dan kesalahan absolut rerata.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (C_{hitung} - C_{data})^2 \quad (15)$$

$$\text{Kesalahan abs} = \frac{|C_{hitung} - C_{data}|}{C_{hitung}} \times 100\% \quad (16)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Porositas Tanah

Dari Tabel 1. terlihat bahwa tanah sampah yang berasal dari pelapukan dan penguraian berbagai jenis sampah memiliki porositas yang lebih besar jika dibandingkan dengan tanah di sekitarnya. Hal tersebut dikarenakan ukuran butir pada tanah sampah lebih kecil jika dibandingkan dengan tanah sekitar tersebut.

Tabel 1. Porositas rata-rata sampel tanah

Jenis sampel tanah	Porositas rata-rata
Tanah sampah	0,5718 ± 0,0254
Tanah sekitar Bawuran	0,4177 ± 0,0153

Porositas yang besar memungkinkan pergerakan media yang mengalir pada tanah sampah akan lebih leluasa. Namun demikian, apabila *flow rate* pada kedua jenis tanah tersebut sama sedangkan

porositasnya berbeda mengakibatkan kecepatan melalui pori pada tanah sampah akan lebih kecil. Dikarenakan kecepatan melalui pori mempengaruhi koefisien dispersi, maka besar porositas juga akan berpengaruh besar koefisien dispersi.

Data Konsentrasi Fosfat

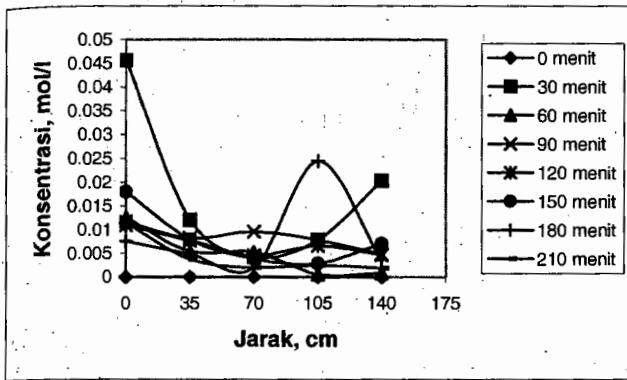
Penelitian mula-mula menggunakan tanah sekitar TPA Desa Bawuran, Kecamatan Piyungan, Kabupaten Bantul yang mempunyai kelas tekstur *geluh lempungan* (38,9% lempung, 36,14 % debu dan 24,87%). Namun ketika dilakukan penelitian, larutan fosfat sulit untuk bisa mengalir. Hal ini dikarenakan sebagian besar komposisi tanah adalah lempung yang memiliki sifat mudah menjadi liat jika terkena air. Dari fenomena ini dapat dikatakan bahwa lokasi TPA Desa Bawuran, Kecamatan Piyungan, Kabupaten Bantul sudah cukup ideal dengan mampu terisolasi secara ilmiah dari migrasi senyawa dalam bentuk larutan. Penelitian ini kemudian dilanjutkan dengan menggunakan media lain, yaitu dari tanah di sekitar Jurusan Teknik Fisika Fakultas Teknik UGM yang mempunyai kelas tekstur *pasir geluhan* (7,46% lempung, 9,86% debu dan 82,68 % pasir) porositas 0,3030. Konsentrasi fosfat diperoleh dari hasil perbandingan cacahan yang diperoleh dengan standar yang telah diketahui sebelumnya. Data cacah yang dikonversikan adalah cacah yang telah memperhitungkan efisiensi unit cacah untuk setiap berat media sampel. Hasil konsentrasi fosfat yang diperoleh pada waktu pengambilan dan jarak yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 2, Gambar 4. dan Gambar 5:

Tabel 2. Data Eksperimen Konsentrasi Fosfat

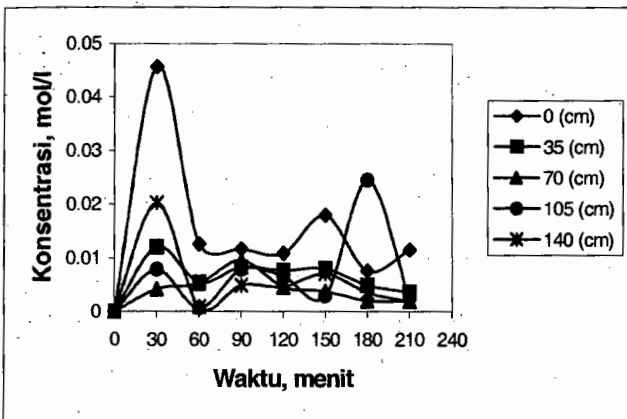
Waktu (menit)	Konsentrasi Fosfat Non Aktif (mol/L)				
	0 (cm)	35 (cm)	70 (cm)	105 (cm)	140 (cm)
0	0	0	0	0	0
30	0,0457	0,0121	0,0042	0,0079	0,0203
60	0,0126	0,0055	0,0053	0,0006	0,0009
90	0,0117	0,0083	0,0096	0,0079	0,0049
120	0,0109	0,0077	0,0046	0,0066	0,0047
150	0,0180	0,0080	0,0038	0,0029	0,0071
180	0,0076	0,0049	0,0020	0,0245	0,0036
210	0,0115	0,0037	0,0020	0,0025	0,0019

Dari Gambar 4. dapat dilihat bahwa dengan interval jarak yang tetap, diperoleh kecenderungan konsentrasi fosfat yang terus menurun dengan bertambahnya jarak. Hal ini mengindikasikan terjadinya retensi yang dilakukan oleh media tanah terhadap fosfat yang melaluinya. Selain itu, dapat

dikatakan pula kecepatan migrasi fosfat lebih lambat daripada kecepatan aliran air yang membawanya, sehingga akan bersangkutan dengan retardasi yang terjadi.



Gambar 4. Grafik Hubungan Data Ukur Konsentrasi dengan jarak



Gambar 5. Grafik Hubungan Data Ukur Konsentrasi dengan Waktu

Dari Gambar 5. terlihat kecenderungan penurunan konsentrasi pada menit-menit awal pengamatan. Namun di akhir-akhir pengamatan konsentrasi menunjukkan grafik yang makin naik. Hal ini disebabkan pelepasan fosfat yang sebelumnya terikat pada tanah membutuhkan waktu yang cukup lama dan sulit diperkirakan. Adapun kecenderungan menurun pada awal-awal pengamatan karena sebagian pengemban yang ditambahkan belum terikat kuat dengan tanah sampah, sehingga yang terukur pada awal-awal bukanlah fosfat yang terikat pada tanah tersebut. Pada selang waktu pengamatan yang cukup lama fosfat yang terdapat pada tanah sampah mulai lepas dan terbawa aliran air yang melaluinya. Setelah itu, maka kecenderungan konsentrasi fosfat akan naik karena adanya akumulasi secara terus menerus hingga keseluruhan fosfat terlepas. Penurunan konsentrasi fosfat pada setiap titik pengamatan baru akan terjadi setelah semua fosfat terlepas dari tanah dikarenakan

tidak terjadi lagi penambahan fosfat dari tanah sedangkan aliran air yang kontinyu.

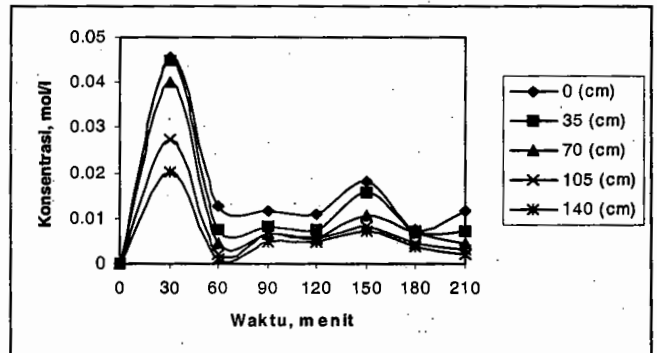
Tabel 3. Hasil eksekusi program dengan variasi masukan ROP dan DOP

(Coba awal D)	(Coba awal R)	D	R	SSE
0,01	0,1			$1,3125 \cdot 10^{-03}$
0,01	1			$1,3135 \cdot 10^{-03}$
1	0,1			$1,4128 \cdot 10^{-03}$
0,001	0,1	0,001	0,1	$9,7966 \cdot 10^{-04}$
0,001	1			$9,7894 \cdot 10^{-04}$
0,001	10			$9,7179 \cdot 10^{-04}$
0,001	100			$1,2831 \cdot 10^{-03}$
0,001	80			$8,9475 \cdot 10^{-04}$
0,001	60	0,011	60	$4,132 \cdot 10^{-04}$
0,001	50	0,011	50	$4,5342 \cdot 10^{-04}$
0,001	55	0,011	55	$3,9209 \cdot 10^{-04}$
0,001*	56*	0,011*	56*	$3,9114 \cdot 10^{-04}$ *
0,001	57	0,011	57	$3,9308 \cdot 10^{-04}$

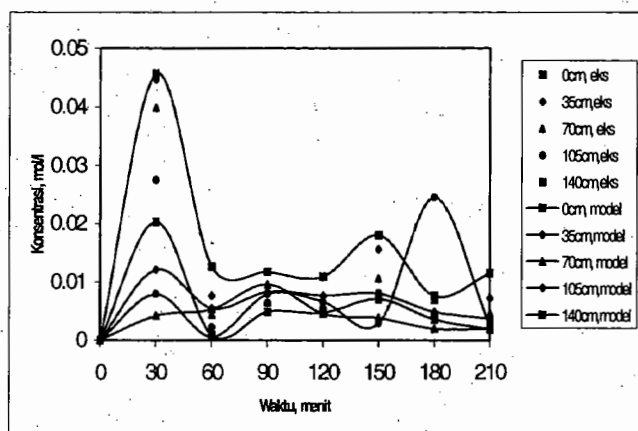
*) Kondisi Optimum

Tabel 4. Data Hitung Konsentrasi Fosfat Non Aktif (D = 0,011 cm²/menit ; R=56)

Waktu (menit)	Konsentrasi Fosfat Non Aktif (mol/L)				
	0 (cm)	35 (cm)	70 (cm)	105 (cm)	140 (cm)
0	0	0	0	0	0
30	0,0457	0,0447	0,0399	0,0275	0,0203
60	0,0126	0,0076	0,0044	0,0022	0,0009
90	0,0117	0,0081	0,0065	0,0064	0,0049
120	0,0109	0,0075	0,0058	0,0055	0,0047
150	0,0180	0,0156	0,0106	0,0081	0,0071
180	0,0076	0,0071	0,0069	0,0044	0,0036
210	0,0115	0,0072	0,0046	0,0032	0,0019



Gambar 6. Grafik Hubungan Data Hitung Konsentrasi Fosfat Terhadap Waktu (D=0,011 cm²/menit; R=56)



Gambar 7. Grafik Hubungan Data Konsentrasi Fosfat Hasil Eksperimen dan Model Terhadap Waktu ($D=0,011\text{cm}^2/\text{menit}$; $R=56$)

Verifikasi Eksperimen dan Model Matematis

Dari hasil eksekusi program tersebut memberikan hasil koefisien dispersi sebesar $0,011\text{cm}^2/\text{menit}$. Koefisien dispersi menunjukkan adanya penyebaran polutan yang terjadi karena adanya gerakan mekanis dan difusi molekuler yang terjadi secara simultan. Sedangkan koefisien retardasi yang diperoleh adalah 56. Koefisien retardasi menunjukkan perbandingan kecepatan pelarut dengan kecepatan polutan dalam pelarut. Nilai koefisien retardasi = 56 berarti kecepatan pelarut (air) 56 kali lebih cepat daripada kecepatan polutan (fosfat). Kejadian ini disebabkan adanya interaksi antara radionuklida dan media transfer, sehingga ada sebagian radionuklida yang tertahan. Banyaknya radionuklida yang tertahan pada media transfer sebanding dengan nilai koefisien distribusinya. Semakin besar nilai koefisien distribusinya maka akan semakin besar pula nilai koefisien retardasinya.

Kedua hasil di atas adalah yang memberikan ralat (SSE) yang paling kecil seperti yang terlihat pada Tabel 3. *Sum of Squares of Error* (SSE) terkecil yang diperoleh adalah sebesar $3,91110^{-04}$ dengan kesalahan relatif rerata sebesar 38 % dan merupakan kesalahan yang cukup besar. Selain sulitnya mencapai kondisi ideal, faktor-faktor yang berpengaruh terhadap migrasi suatu polutan sangat kompleks sehingga data yang diperoleh hanya tepat berlaku seperti kondisi eksperimen dan hal ini juga memberikan andil terhadap kesalahan.

Pada penelitian ini dilakukan dua kali eksekusi program untuk dua keadaan yang berbeda. Eksekusi program pertama menggunakan data aktivitas hasil cacah sampel sebagai masukan untuk selanjutnya dikonversi menjadi data konsentrasi fosfat. Dengan

demikian, hasil konsentrasi fosfat yang diperoleh merupakan konsentrasi fosfat non aktif dengan perbandingan perunut dan pengemban saat awal pemberian. Untuk eksekusi program kedua digunakan data konsentrasi fosfat hasil konversi cacah yang telah dikoreksi dengan faktor peluruhan.

Dengan kata lain, masukan program merupakan konsentrasi fosfat non aktif sehingga keluarannya pun berupa konsentrasi fosfat non aktif aktual. Apabila dibandingkan antara hasil eksekusi program pertama dan kedua ternyata nilai konsentrasi fosfat tidaklah mengalami perubahan yang sangat besar.

Faktor koreksi yang mendekati satu menjadi penyebab kecilnya perbedaan di antara keduanya. Faktor koreksi berada dalam rentang 1,0009-1,0069. Hal ini juga tidak mempengaruhi ralat kesalahan hasil verifikasi model fisis dan model matematis. Nilai SSE untuk masing-masing posisi dan waktu tidak mengalami perubahan yang signifikan, bahkan SSE minimumnya menunjukkan nilai yang sama. Nilai kesalahan relatif rerata pun tidak mengalami perubahan masih sebesar 38 %. Dari hasil ini dapat dikatakan bahwa waktu penelitian yang pendek tidak mempengaruhi konsentrasi fosfat non aktif yang mengalir pada media transfer.

Adapun data hitung konsentrasi fosfat non aktif yang diberikan hasil eksekusi kedua untuk kondisi optimum, seperti pada Tabel 4 dan Gambar 6. Gambar 6 menunjukkan keadaan yang hampir sama dengan hasil ukur yang diperoleh sebelumnya. Hal ini disebabkan syarat batas yang digunakan merupakan konsentrasi hasil eksperimen itu sendiri. Namun terlihat perbedaan yaitu adanya keteraturan konsentrasi dengan bertambahnya jarak akan semakin berkurang. Perbedaan inilah yang mengakibatkan kesalahan relatif rerata 38 % dan SSE sebesar $3,9114.10^{-04}$.

Keadaan eksperimen yang berbeda satu sama lain, walaupun menggunakan jenis tanah yang sama, dapat mempengaruhi nilai yang diperoleh pada masing-masing penelitian.

Dengan demikian dapat dikatakan nilai-nilai yang diperoleh belum dapat digunakan untuk menggambarkan secara umum kondisi di lapangan yang sebenarnya serta nilai-nilai koefisien dispersi dan retardasi yang diperoleh pada penelitian ini hanya tepat berlaku pada pemodelan fisis yang dilakukan.

Verifikasi dengan hasil penelitian lain

Freeze and Cherry (1979) melakukan penelitian koefisien dispersi pada media *sandstone*. Pada penelitian tersebut untuk kecepatan sekitar $0,02\text{cm}/\text{det}$ koefisien retardasinya $500 \times 10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$ atau $0,00833\text{cm}^2/\text{menit}$. Pada penelitian ini kecepatan

aliran adalah 0,0196 cm/det dan koefisien retardasi yang didapatkan adalah 0,011 cm²/menit.

Koefisien retardasi yang pernah ditentukan untuk berbagai media dan berbagai polutan diantaranya menggunakan CsCl (Hastawan, 1996) dan polutan organik (Ward et al, 1985) dan media tanah (Muharini dkk, 2001) pada rentang nilai antara 2,5 – 33.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Konsentrasi fosfat cenderung stabil pada awal pengumpulan namun setelah beberapa lama cenderung bertambah. Konsentrasi fosfat berkurang dengan bertambahnya jarak.
2. Hasil dari verifikasi eksperimen dan model matematis menunjukkan harga koefisien dispersi (D) = 0,011 cm²/menit, sedangkan koefisien retardasi (R) = 56 dengan beda nilai terkecil yaitu SSE sebesar 3,9114.10⁻⁴ dan kesalahan relatif rerata sebesar 38 %.

Saran

Perlu dilakukan penelitian sejenis dengan waktu pengamatan yang lebih lama sehingga data-data yang diperoleh lebih jelas sehingga dapat menunjukkan migrasi fosfat yang terjadi di lapangan. Selain itu, langkah pemberian pengemban dan penanda perlu kiranya diperhatikan sehingga dapat mewakili kadar fosfat sesungguhnya pada sampel tanah tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bp. Supriyadi, teknisi Lab.Teknologi Kimia Nuklir dan Sdr. Subhan Nurhayat yang membantu penelitian ini.

DAFTAR NOTASI

- C : Konsentrasi, mol/l³
D : Koefisien Dispersi, cm²/menit
k_d : Koefisien distribusi, tak berdimensi
M : Berat Molekul, g/mol
N : Fluks Perpindahan Massa, mol/cm²menit
R : Koefisien Retardasi, tak berdimensi

- t : Waktu, menit
v : Kecepatan aliran linier, m/menit
V : Volume, cm³
x : Jarak, cm
ε : porositas, tak berdimensi
λ : konstanta peluruhan zat radioaktif,/menit
ρ : berat jenis, g/cm³

INDEKS

- A : fosfat
h : hidrodinamika

DAFTAR PUSTAKA

- Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*, Prentice-Hall Inc., Singapore.
- Gaspar, E., and Oncescu, M., 1972, *Radioactive Tracer in Hydrology*, Elsevier Publishing Company, New York.
- Hakim, H., 1996, *Karakterisasi Migrasi Cesium pada Beberapa Sampel Tanah di Pusat Penelitian Nuklir Yogyakarta*, skripsi, Jurusan Teknik Nuklir, FT UGM
- Kinzelbach, W., 1986, *Groundwater Modelling*, Elsevier Publishing Company, Amsterdam
- Muharini, A., Wijayanti, E., Ardiani, D., 2001, *Studi Karakterisasi Migrasi Fpsfat Lumpur IPAL Yogyakarta dalam Tanah Menggunakan Perunut ³²P*, Jurnal Teknologi Lingkungan, Vol 3, Direktorat Teknologi Lingkungan, BPPT, Jakarta.
- Schroeder, M.C., 1970, *Laboratory Studies of Radioactive Contamination of Aquifers*, University of California, California
- Sediawan, W.B. dan Prasetya, A., 1997, *Pemodelan Matematis dan penyelesaian Numeris dalam Teknik Kimia*, Penerbit Andi, Yogyakarta.
- Syaifulloh, 2002, *Analisis Koefisien Dispersi dan Retardasi Transpor Massa Fosfat Terlarut dalam Air Dalam Medium Porous Menggunakan Perunut Radioaktif*, Skripsi, Jurusan Teknik Fisika, FT-UGM.
- Syamsiah, S., 1993, *Transport Polutan Organik dalam Tanah*, PAU UGM, Yogyakarta
- Ward, C.H., Ginge, W., 1985 *Groundwater Quality*, John Wiley and Son, Singapore