

STUDI KARAKTERISASI MIGRASI FOSFAT LUMPUR IPAL YOGYAKARTA DALAM TANAH MENGUNAKAN PERUNUT ³²P

Oleh : Anung Muharini^{*)}, Ester Wijayanti^{*)}, Donna Ardiani^{**)}

Abstract

IPAL Yogyakarta mud contains high concentration of phosphate that can pollute groundwater. To study phosphate migration with mathematical model needs the data of soil properties and phosphate migration characterization in that soil. The phosphate migration characterization is determined in laboratory scale using soil column method. The soil that are used in this research are soil at IPAL location (IPAL soil) and soil at Physics Engineering Department GMU (PE soil). The tracer that is used is ³²P radioisotope and the detector is Geiger Muller detector. For IPAL soil the soil mass is 20 g, soil length is 2,1 cm, water height is 20 cm, and the flow rate of water 0,0038 cm³/s. For PE soil the soil mass is 25 g, soil length is 2,2 cm, water height is 20 cm, and the flow rate of water are 0,0275 cm³/s and 0,0071 cm³/s.

The result shows that IPAL soil is clay class soil and PE soil is sand class soil. The IPAL soil porosity is 0,2997 and PE soil is 0,303. IPAL soil permeability is 5,6984x10⁻⁵ cm/s and the average velocity is 1,79x10⁻⁴ cm/s. On PE soil for the flow rate of 0,0275 cm³/s the soil permeability is 4,338x10⁻⁴ cm/s, average velocity is 1,2818x10⁻² cm/s, distribution coefficient is 0,88 ml/g, dispersion coefficient is 8,0971x10⁻³ cm²/s, phosphate migration velocity is 3,6429x10⁻³ cm/s, and the retardation factor is 3,5186. For the flow rate of 0,0071 cm³/s the soil permeability is 1,110x10⁻⁴ cm/s, average velocity is 3,322x10⁻³ cm/s, distribution coefficient is 1,345 ml/g, dispersion coefficient is 2,5339x10⁻³ cm²/s, phosphate migration velocity is 9,8888x10⁻⁴ cm/s, and the retardation factor is 3,3594. For the higher of flow rate the migration is higher. IPAL soil has capability to hold pollutants.

Kata kunci: lumpur IPAL, migrasi fosfat

1. PENDAHULUAN

Instalasi Pengolahan Limbah (IPAL) Yogyakarta yang terletak di Sewon, Bantul merupakan instalasi pengolahan limbah cair yang berasal dari limbah cair domestik dan industri kecil yang ada di Yogyakarta. Lumpur yang dihasilkan oleh IPAL tersebut cukup banyak yaitu 3.300 m³ tiap tahun. Karena terbatasnya kapasitas bak pengering lumpur tersebut harus dikeluarkan secara periodik⁽¹⁾. Lumpur IPAL Yogyakarta mengandung kadar fosfat yang tinggi. Kadar fosfat yang tinggi dalam lumpur IPAL dapat mencemari air tanah.

Agar pencemaran fosfat dapat dihindari perlu dipelajari migrasi fosfat dalam tanah. Untuk mempelajari migrasi fosfat

dengan model matematis diperlukan data-data tentang sifat-sifat fisik tanah dan karakteristik migrasi fosfat dalam tanah tersebut.

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan harga variabel-variabel yang diperlukan dalam model migrasi yaitu: porositas, permeabilitas, koefisien distribusi, kecepatan aliran, dispersivitas, koefisien dispersi, kecepatan migrasi, dan faktor retardasi.

Kandungan unsur dan senyawa termasuk senyawa fosfat yang tinggi dalam lumpur maupun sampah padat dapat mencemari air tanah. Lindi akan cepat mencapai air tanah pada tanah porous dan permeabel seperti tanah yang banyak mengandung pasir, tuf kasar, atau gamping.

^{*)} Staf Pengajar di Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

^{**)} Mahasiswa di Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Hasil penelitian pada air tanah di sekitar TPA Dago, Bandung diketahui bahwa air tanah telah tercemar. Pencemaran air tanah bebas pada arah aliran ke Tenggara telah mencapai jarak kira-kira sejauh 174 m dari pusat TPA. Air tanah bebas tersebut terkontaminasi senyawa amonia, nitrat, nitrit, P total, minyak, bakteri koli, dan logam-logam ⁽²⁾.

Pada umumnya ada 4 proses yang terjadi apabila bahan polutan (cair) masuk ke dalam tanah, yaitu konveksi, dispersi, sorpsi, dan biodegradasi ⁽³⁾. Konveksi merupakan proses migrasi yang paling dominan, yang disebabkan oleh gerakan media dan bahan polutan yang mengalir. Dispersi merupakan proses penyebaran bahan polutan. Proses ini terjadi karena adanya gerakan mekanis dan difusi molekuler yang terjadi secara simultan. Sorpsi meliputi adsorpsi, pertukaran ion, reaksi kimia, dan pengendapan.

Kecepatan perpindahan polutan dalam tanah bergantung pada sifat-sifat polutan tersebut, sifat-sifat tanah, terutama pada karakter kompleks sorpsi dan sifat-sifat fisik tanah seperti porositas dan permeabilitas, serta aliran air tanah ⁽⁴⁾.

Dalam beberapa aplikasi seperti kolom tanah persamaan satu dimensi dari transport polutan dapat digunakan ⁽⁵⁾.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{u}{R} \frac{\partial C}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_L}{R} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \lambda C = 0 \quad (1)$$

di mana:

- R = faktor retardasi
- C = konsentrasi
- D_L = koefisien dispersi
- u = kecepatan aliran rata-rata
- λ = konstanta peluruhan/degradasi

2. BAHAN DAN METODE

Karakteristik migrasi fosfat ditentukan dalam skala laboratorium menggunakan metode kolom tanah. Tanah yang digunakan adalah tanah di lokasi IPAL Yogyakarta (tanah IPAL) dan tanah di Jurusan Teknik Fisika UGM (tanah TF). Perunut yang digunakan adalah radioisotop ³²P dan pencacahan dilakukan dengan detektor Geiger Muller. Permeabilitas, kecepatan aliran rerata, koefisien distribusi, koefisien dispersi, kecepatan migrasi, dan faktor retardasi ditentukan berdasarkan persamaan yang ditulis pada lampiran.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Analisis Lumpur IPAL

Kandungan fosfat dalam lumpur : 731,4010 ppm (mg fosfat/kg lumpur).
Kandungan fosfat dalam larutan lumpur : 14,628 ppm (10 g lumpur/500 ml air)

3.2. Hasil Analisis Tanah

Tabel 1. Kelas tekstur tanah

Tanah	Kadar lengas 2 mm	Lempunç (%)	Debu (%)	Pasir (%)	Kelas tekstur
IPAL	9,56	58,67	8,59	32,74	Lempungan
TF	1,08	7,46	9,86	82,68	Pasir geluhan

Keterangan:

Tanah Bantul: tanah di daerah IPAL, Tanah TF: tanah di Teknik Fisika

Sampel tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah yang berasal dari lokasi IPAL Bantul dan tanah di Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik UGM. Penggunaan kedua jenis sampel tanah tersebut untuk melihat karakteristik migrasi fosfat di sekitar IPAL dengan tanah daerah lainnya. Pencemaran fosfat pada air tanah bisa juga terjadi dari lindi sampal di TPA. Di DIY banyak TPA yang sampahnya diletakkan langsung di atas tanah. Sampel tanah tersebut tidak dibagi berdasarkan ukuran butir untuk lebih mendekati kondisi di lapangan.

3.3. Porositas (f)

Tabel 2. Porositas sampel tanah

Tanah	V _{tanah} (ml)	V _{air} (ml)	V _(tanah+air) (ml)	V _{tanah basah} (ml)	V _{air yg terikat} (ml)	f
Bantul	15	25	34	18	6	0,3333
	15	25	34	19	6	0,3158
	15	25	35	20	5	0,2500
TF	10	25	32	11	3	0,2727
	10	25	31,5	10,5	3,5	0,3333

Keterangan:

$$V_{\text{air yang terikat}} = V_{\text{tanah}} + V_{\text{air}} - V_{(\text{tanah+air})}$$

Porositas rata-rata:

Tanah Bantul : 0,2997, Tanah TF : 0,3030

3.4. Data Umum Kolom Tanah

Diameter kolom (D) : 3 cm
 Luas kolom (A) : 7,0686 cm²
 Tinggi air (H) : 20 cm

3.5. Permeabilitas (K) dan kecepatan aliran rerata (V_w)

Permeabilitas tanah secara kuantitatif diartikan sebagai kecepatan Bergeraknya zat cair pada medium porous dalam keadaan jenuh. Permeabilitas dipengaruhi oleh tekstur dan struktur tanah, Tekstur dan struktur tanah

menentukan bentuk dan ukuran pori. Semakin kecil tekstur dan struktur tanah maka ukuran pori semakin kecil sehingga semakin sulit dilalui air.

Tanah daerah IPAL mengandung banyak lempung yang ukuran butirnya sangat kecil. Karena itu koefisien permeabilitasnya sangat kecil. Tanah TF adalah termasuk pasir geluhan. Karena itu untuk kondisi yang sama koefisien permeabilitasnya lebih besar. Debit aliran mempengaruhi permeabilitas. Pada jenis tanah yang sama (tanah TF) untuk debit aliran yang lebih besar permeabilitasnya lebih besar.

Tabel 3. Permeabilitas dan kecepatan aliran rerata

Tanah	Berat (g)	L (cm)	V (cm ³)	t_{rerata} (s)	Q (cm ³ /s)	q_w (cm/s)	K (cm/s)	V_w (cm/s)
IPAL	20,028	2,12	25	6625	0,0038	$5,376 \times 10^{-4}$	$5,6984 \times 10^{-5}$	0,000179
TF	25,095	2,23	4	145,7	0,0275	$3,884 \times 10^{-3}$	$4,338 \times 10^{-4}$	0,012818
	25,239	2,21	4	562,13	0,0071	$1,007 \times 10^{-3}$	$1,110 \times 10^{-4}$	0,003322

Keterangan:

t_{rerata} : dari data Tabel L.1 dan L.2 pada lampiran, rata-rata Δt sampai kondisi setimbang ($C/C_0=1$).

Kecepatan aliran rerata (V_w) atau kecepatan rembesan merupakan kecepatan aliran dipandang dari sudut mikroskopis. Kecepatan aliran rerata lebih besar dari pelepasan spesifik karena ditinjau secara mikroskopis jarak yang harus ditempuh oleh partikel air melebihi panjang kolom tanah (L). Jarak tersebut tergantung dari tekstur dan struktur zarah tanah.

Untuk ukuran butir tanah yang lebih kecil jarak yang harus ditempuh partikel air lebih panjang daripada tanah yang ukuran butirannya besar. Oleh karena itu kecepatan aliran rerata tanah IPAL sangat kecil. Untuk jenis tanah yang sama kecepatan aliran rerata sebanding dengan debit alirannya.

3.6. Koefisien distribusi (K_d), Dispersivitas (α_L), Koefisien Dispersi (D_L), Kecepatan Migrasi Rerata (V_R), dan Faktor Retardasi (R)

K_d , α_L , D_L , V_R , dan R hanya dicari dari tanah TF saja. Tanah IPAL termasuk kelas lempungan yang butirannya sangat halus.

Dari data pada Tabel 3 untuk berat tanah yang lebih sedikit pada kolom gelas dan tinggi air yang sama diperlukan waktu

yang sangat besar untuk mengalirkan air, atau debitnya sangat kecil. Jadi untuk mendapatkan data karakteristik migrasi seperti pada Tabel L.1 dan Tabel. 6 (pada Lampiran) diperlukan waktu yang sangat lama. Penelitian ini dilakukan untuk debit aliran 0,0275 cm³/s dan 0,0071 cm³/s. hal ini untuk melihat fenomena migrasi pada debit aliran yang berbeda.

Tabel 4. Data kolom tanah TF

Kolom	Berat tanah (g)	L cm	Q (cm ³ /s)	Konsen fosfat (M)	Konsen ³² P cpm/0,2 ml
1	25,095	2,23	0,0275	0,1	158,000 ± 15,896
2	25,239	2,21	0,0071	0,1	165,833 ± 17,512

Fosfat yang digunakan adalah fosfat dari senyawa kimia NaH₂PO₄.2H₂O dengan konsentrasi 0,1 M. Semula digunakan fosfat dari lumpur IPAL. Tetapi untuk penelitian ini konsentrasi fosfat dari lumpur IPAL terlalu kecil, yaitu 14,628 ppm ($1,54 \times 10^{-4}$ M) dari 10 g lumpur dilarutkan dalam 500 ml air. karena

konsentrasinya kecil maka diperlukan waktu yang sangat lama untuk mencapai kondisi seimbang. Substitusi fosfat tersebut karena secara kimia sifat fosfat sama.

Perunut yang digunakan adalah ^{32}P . Radioisotop mempunyai sifat kimia yang sama dengan isotop stabilnya. Penggunaan perunut radioaktif dilakukan untuk kemudahan dan kecepatan analisis efluen.

3.6.1. Koefisien distribusi (K_d)

Kolom tanah 1 TF, $K_d = 0,88 \text{ ml/g}$
Kolom tanah 2 TF, $K_d = 1,345 \text{ ml/g}$

Koefisien distribusi merupakan hasil perbandingan antara konsentrasi fosfat yang terikat pada media tanah dengan konsentrasi fosfat pada efluen pada keadaan seimbang. Kondisi seimbang dicapai setelah konsentrasi efluen sama dengan konsentrasi influennya.

K_d dihitung berdasarkan perbandingan cacah efluen dengan standar.

Koefisien distribusi merupakan variabel yang merangkum bermacam-macam sebab fosfat tertahan pada kolom tanah. Antara lain adsorpsi, pertukaran ion, reaksi kimia dan pengendapan, serta interaksi lainnya. Untuk debit aliran yang lebih kecil nilai K_d lebih besar karena fosfat lebih lama berinteraksi dengan media tanah.

3.6.2. Dispersivitas (α_L) dan koefisien dispersi (D_L)

Dispersi adalah proses penyebaran polutan yang terjadi karena gerakan mekanis dan difusi molekuler yang terjadi secara simultan. Untuk debit aliran yang lebih besar nilai D_L lebih besar. Koefisien dispersi dihitung berdasarkan grafik perubahan konsentrasi relatif antara efluen terhadap waktu (Gambar L.1 dan Gambar L.2 pada lampiran).

Tabel 5. Dispersivitas dan koefisien dispersi tanah TF

Kolom	$t_{0,0}$ (s)	$t_{0,5}$ (s)	$t_{1,0}$ (s)	L (cm)	α_L (cm)	V_w (cm/s)	D_L (cm ² /s)
1	91	627	1457	2,23	0,6317	0,012818	$8,0971 \times 10^{-3}$
2	523	3285	8432	2,21	0,7646	0,003322	$2,5339 \times 10^{-3}$

3.6.3. Kecepatan migrasi rerata V_R

Tabel 6. Kecepatan migrasi rerata

Kolom	V_{effluen} (cm ³)	t_R (s)	Q_R (cm/s)	V_R (cm/s)
1	4	155,3389	0,02575	$3,6429 \times 10^{-3}$
2	4	572,6297	0,00699	$9,8888 \times 10^{-4}$

Kecepatan migrasi rerata fosfat lebih besar untuk debit aliran yang lebih besar. Hal tersebut karena pada dasarnya bahan polutan mengikuti aliran air. Untuk tanah lempung V_R akan lebih kecil, karena semakin kecil ukuran butir tanah akan semakin banyak terbentuk pori-pori mikro yang akan membentuk saluran-saluran kapiler sehingga semakin sulit dilalui air.

3.6.4. Faktor Retardasi (R)

Faktor retardasi adalah perbandingan antara kecepatan aliran rerata air dengan kecepatan migrasi rerata fosfat. Faktor Retardasi lebih besar dari satu menunjukkan bahwa kecepatan migrasi fosfat lebih kecil dari kecepatan aliran air. hal ini karena

interaksi fosfat media tanah sehingga ada sebagian fosfat yang tertahan.

Banyaknya fosfat yang tertahan sebanding dengan koefisien distribusinya. Jadi seharusnya faktor retardasi pada kolom 2 lebih besar. Hal tersebut dikarenakan pengadukan tanah yang kurang merata sehingga aliran tidak teratur sehingga konsentrasi efluen naik tidak begitu teratur.

Tabel 7. Faktor retardasi

Kolom	V_w (cm/s)	V_R (cm/s)	R
1	0,012818	$3,6429 \times 10^{-3}$	3,5186
2	0,003322	$9,8888 \times 10^{-4}$	3,3594

Pada penelitian ini tidak dilakukan pada tanah daerah IPAL. Tanah IPAL banyak mengandung lempung sehingga diperlukan waktu yang sangat lama. Walaupun begitu dari data permeabilitas dan kecepatan aliran rerata, serta analisis tekstur tanah sudah dapat diketahui bahwa tanah daerah IPAL lebih sulit mentransport fosfat dibandingkan tanah yang lebih banyak mengandung pasir. Berarti lokasi IPAL memang tepat karena tanahnya relatif mampu menahan polutan.

Data-data di atas memberikan gambaran karakteristik migrasi fosfat. Tetapi data-data tersebut hanya berlaku untuk masing-masing kolom tanah dengan kondisi yang sama seperti pada saat penelitian ini. Karakteristik migrasi polutan di akifer sangat kompleks. Untuk mengaplikasikan model migrasi di lapangan perlu diteliti data karakteristik migrasi di lapangan.

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dan pembahasan dapat disimpulkan:

1. Tanah daerah IPAL termasuk kelas lempungan dan tanah TF termasuk kelas pasir geluhan.
2. Porositas tanah IPAL adalah 0,2997 dan tanah TF adalah 0,303
3. Permeabilitas pada tanah IPAL adalah $5,6984 \times 10^{-5}$ cm/s, pada tanah TF adalah $4,338 \times 10^{-4}$ dan $1,110 \times 10^{-4}$ cm/s, sedangkan kecepatan aliran rerata pada tanah IPAL adalah 0,000179 cm/s dan tanah TF adalah 0,012818 dan 0,003322 cm/s.
4. Koefisien distribusi, koefisien dispersi, kecepatan migrasi fosfat, dan faktor retardasi tanah TF untuk kolom 1 dan 2 masing-masing adalah 0,88 dan 1,345 ml/g; $8,0971 \times 10^{-3}$ dan $2,5339 \times 10^{-3}$; $3,6429 \times 10^{-3}$ dan $9,8888 \times 10^{-4}$ cm/s; 3,5186 dan 3,3594.
5. Untuk debit yang lebih besar migrasi dan penyebaran polutan akan lebih besar.
6. Tanah daerah IPAL mempunyai kemampuan menahan polutan yang relatif besar.

DAFTAR PUSTAKA

1. Setyawan, Y.A., 1999, *Penentuan Kadar Fosfat dalam Lumpur IPAL Yogyakarta dengan Metode Spektrofotometri dan Metode Pengenceran Isotop Menggunakan ^{32}P* , skripsi, Jurusan Teknik Nuklir FT-UGM, Yogyakarta.
2. Arif, F.A., 1989, *Pengaruh Sampah di Tempat Penimbunan Akhir Dago Kodya Bandung Terhadap Kualitas Air Tanah*

Bebas di Sekitarnya, tesis, Fakultas Pascasarjana UGM, Yogyakarta.

3. Hakim, H., 1996, *Karakterisasi Migrasi Cesium pada Beberapa Sampel Tanah di Pusat Penelitian Nuklir Yogyakarta*, skripsi, Jurusan Teknik Nuklir Fak. Teknik, UGM, Yogyakarta.
4. Mackay, R., and Riley, M.S., *Groundwater Modelling, An Introduction to Water Quality Modelling*, John Willey and Sons, New York, 1993. p.261-292
5. Kinzelbach, W., *Groundwater Modelling*, Elsevier, Amsterdam., 1986. p.188-207
6. Knoll, G.F., 1981, *Radiation Detection and Measurement*, John Willey & sons, New York, 1986.

RIWAYAT PENULIS

Anung Muharini lahir di Banyumas pada tanggal 1 Agustus 1969. Menamatkan pendidikan di Universitas Gadjah Mada pada Program Studi Teknik Nuklir pada tahun 1993, dan di Institut Teknologi Bandung pada Program Magister Teknik Lingkungan pada tahun 1998. Saat ini bekerja sebagai Staf Pengajar di Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, UGM.

LAMPIRAN

RUMUS-RUMUS PERHITUNGAN DASAR

1. Porositas

Dihitung berdasarkan volume air yang tertahan kolom tanah dibagi volume total kolom tanah.

$$f = \frac{V_M}{V_t} \quad (1)$$

2. Permeabilitas

$$K = \frac{QL}{AH} \quad (2)$$

3. Koefisien distribusi

Koefisien distribusi dihitung berdasarkan perbandingan antara konsentrasi radionuklida pada kolom tanah dengan konsentrasi radionuklida pada efluen pada kondisi setimbang.

$$K_d = \frac{C_s}{C_1} \quad (3)$$

4. Kecepatan aliran rerata

$$V_W = \frac{Q_W}{f \dots} \quad (4)$$

5. Dispersivitas dan koefisien dispersi

Dihitung berdasarkan analisis grafik perubahan konsentrasi efluen dengan waktu, dan koefisien dispersi dihitung berdasarkan dispersivitas dikalikan kecepatan rerata aliran air.

$$\alpha_L = \frac{3L}{16\pi} \frac{L_c}{M} \frac{h^2 P}{N} \frac{t_{1,0} - t_{0,0}}{t_{0,5}} \quad (5)$$

$$D_L = \alpha_L V_W \dots \quad (6)$$

6. Kecepatan migrasi rerata

Dihitung berdasarkan debit aliran polutan dibagi luas penampang kolom.

$$V_R = \frac{Q_R}{A \dots} \quad (7)$$

$$Q_R = \frac{V_{efluen}}{t_R \dots} \quad (8)$$

$$t_R = \frac{\sum t_i C_i}{\sum C_i} \quad (9)$$

7. Faktor retardasi

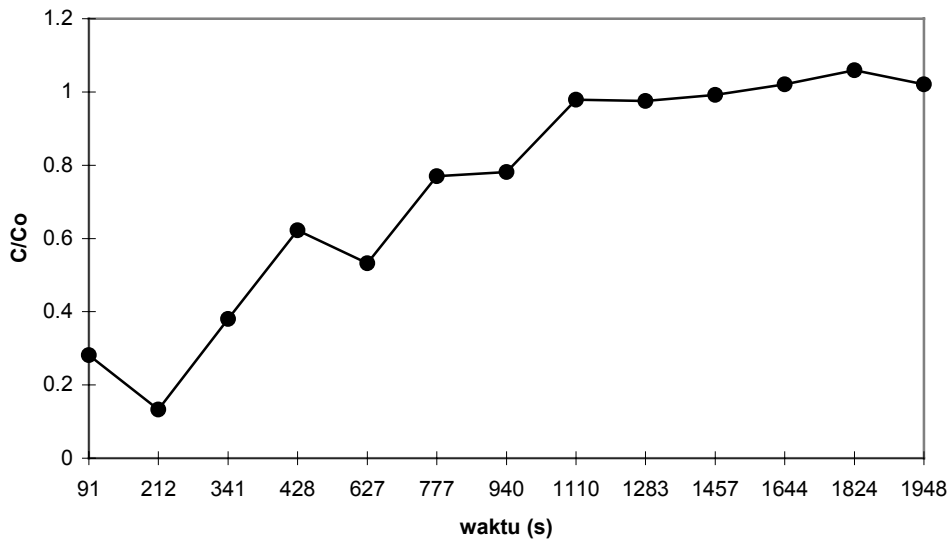
Dihitung berdasarkan perbandingan antara waktu tiba rerata radionuklida dengan waktu tiba rerata air.

$$R = \frac{t_R}{t_W} = \frac{V_W}{V_R} \quad (10)$$

DATA PENCACAHAN

Tabel L.1. Data pencacahan kolom 1 tanah TF

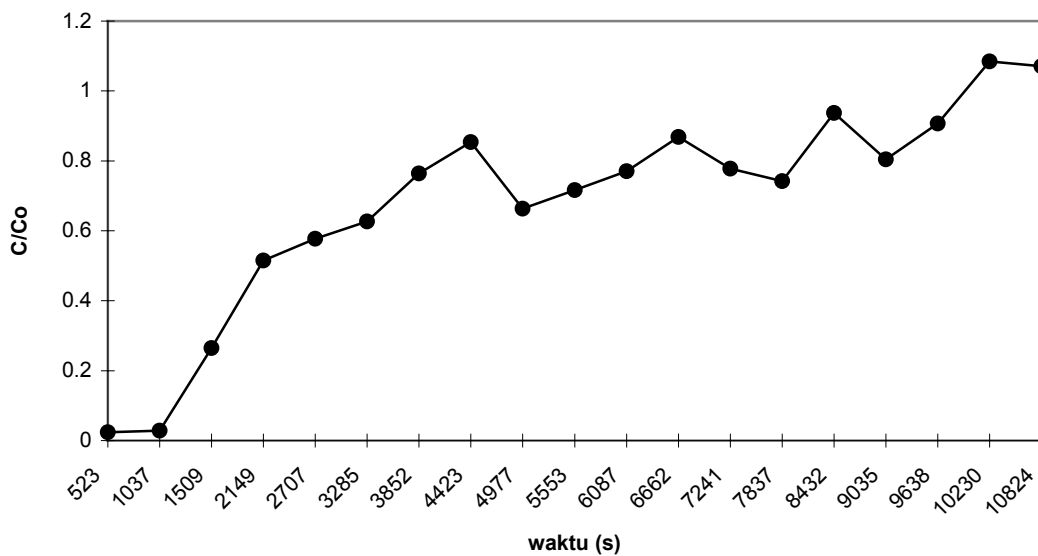
No. vial	V_{effluen} (cm ³)	Δt (s)	Cacah netto (cpm/0.2 ml)	C/C_0	$t_i \times C_i$
1	0 - 4	91	44.333 ± 3.055	0.281 ± 0.034	4034.303
2	4 - 8	121	21 ± 10.801	0.133 ± 0.07	2541
3	8 - 12	129	60 ± 8.87	0.38 ± 0.068	7740
4	12 - 16	87	98.333 ± 3.559	0.622 ± 0.067	8554.971
5	16 - 20	199	84 ± 14.549	0.532 ± 0.106	16716
6	20 - 24	150	121.667 ± 7.165	0.77 ± 0.09	18250.05
7	24 - 28	163	123.333 ± 14.445	0.781 ± 0.121	20103.279
8	28 - 32	170	154.667 ± 17.156	0.979 ± 0.147	26293.39
9	32 - 36	173	154 ± 19.816	0.975 ± 0.159	26642
10	36 - 40	174	156.667 ± 22.701	0.992 ± 0.175	27260.058
11	40 - 44	187	161.333 ± 21.135	1.021 ± 0.169	30169.271
12	44 - 48	180	167.333 ± 8.165	1.059 ± 0.118	30119.94
13	48 - 52	124	161.333 ± 13.404	1.021 ± 0.133	20005.292
14	52 - 56	241	145.667 ± 14.877	0.922 ± 0.132	35105.747
15	56 - 60	187	160 ± 17.682	1.013 ± 0.151	29920
16	60 - 64	196	140 ± 8.525	0.886 ± 0.104	27440
17	64 - 68	193	150 ± 19.201	0.949 ± 0.155	28950
18	68 - 72	199	158 ± 21.44	1 ± 0.169	31442
19	72 - 76	203	167.667 ± 11.373	1.061 ± 0.129	34036.401
20	76 - 80	203	154.333 ± 17.078	0.977 ± 0.146	31329.599
standar			158 ± 15.896		



Gambar L.1. Grafik perubahan konsentrasi terhadap waktu kolom 1 TF

Tabel L.2. Data pencacahan kolom 2 tanah TF

No. vial	$V_{effluen}$ (cm ³)	Δt (s)	Cacah Netto (cpm/0,2 ml)	C/C_0	$t_i \times C_i$
1	0 - 4	523	4 ± 8.756	0.024 ± 0.053	2092
2	4 - 8	514	4.667 ± 8.794	0.028 ± 0.053	2398.838
3	8 - 12	472	44 ± 10.614	0.265 ± 0.07	20768
4	12 - 16	640	85.333 ± 14.652	0.515 ± 0.104	54613.12
5	16 - 20	558	95.667 ± 7.572	0.577 ± 0.076	53382.186
6	20 - 24	578	104 ± 7.659	0.627 ± 0.081	60112
7	24 - 28	567	126.667 ± 8.68	0.764 ± 0.096	71820.189
8	28 - 32	571	141.667 ± 8.525	0.854 ± 0.104	80891.857
9	32 - 36	554	110 ± 8.165	0.663 ± 0.086	60940
10	36 - 40	576	118.667 ± 8.327	0.716 ± 0.091	68352.192
11	40 - 44	534	127.667 ± 8.083	0.77 ± 0.095	68174.178
12	44 - 48	575	144 ± 8.869	0.868 ± 0.106	82800
13	48 - 52	579	129 ± 8.104	0.778 ± 0.096	74691
14	52 - 56	596	123 ± 7.916	0.742 ± 0.092	73308
15	56 - 60	595	155.333 ± 8.165	0.937 ± 0.11	92423.135
16	60 - 64	603	133.333 ± 8.165	0.804 ± 0.098	80399.799
17	64 - 68	603	150.333 ± 7.789	0.907 ± 0.107	90650.799
18	68 - 72	592	180 ± 16.021	1.085 ± 0.15	106560
19	72 - 76	594	177.667 ± 8.505	1.071 ± 0.124	105534.198
20	76 - 80	611	170.667 ± 10.263	1.029 ± 0.125	104277.537
standar			165.833 ± 17.512		



Gambar L. 2. Grafik perubahan konsentrasi terhadap waktu kolom 2 TF