

**ANALISIS KUANTITATIF
PERILAKU PESTISIDA DI TANAH**

Dr. Ir. Edia Rahayuningsih, M.S.
Jurusan Teknik Kimia
Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada

Gadjah Mada University Press

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR LAMBANG	xxv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
BAB 2. TANAH	9
2.1. Larutan Tanah	10
2.2. Koloid Tanah	10
2.3. Komponen Organik	11
2.4. Komponen Anorganik	12
2.5. Tanah Jenuh Air dan Tanah Tidak Jenuh Air	13
2.6. Parameter Sifat Tanah yang Berpengaruh Terhadap Perilaku Pestisida	16
2.7. Tanah Sawah dari Desa Donoharjo	20
2.8. Tanah Sawah dari Desa Sukoharjo	23
2.9. Tanah Sawah dari Desa Sidoarum	24
BAB 3. PESTISIDA	28
3.1. Pengertian Pestisida	28
3.2. Ruang Lingkup Penggunaan Pestisida	30
3.3. Pengelompokan Pestisida	31
3.4. Pestisida Organofosforus	31

3.5. Perkembangan Jumlah Bahan Aktif dan Formulasi	35
3.6. Perkembangan Kelompok Pestisida	36
BAB 4. PERILAKU PESTISIDA DI TANAH	38
BAB 5. PERPINDAHAN MASSA SECARA DIFUSI, ADVEKSI, DAN DISPERSI	47
5.1. Perpindahan Massa Secara Difusi	47
5.2. Perpindahan Massa Secara Adveksi	49
5.3. Perpindahan Massa Secara Dispersi	50
BAB 6. SORPSI PESTISIDA OLEH TANAH	65
6.1. Model Sorpsi Kesetimbangan (<i>Equilibrium Sorption Model</i>)	68
6.2. Model Sorpsi Tidak Setimbang (<i>Nonequilibrium Sorption Model</i>)	71
6.3. Model Kimia	72
6.4. Model-Model Fisis	72
6.5. Model Dispersi Efektif	73
6.6. Model Perpindahan Massa Fisis	73
6.7. Model Difusi Fisis	74
6.8. Model Difusi dalam Padatan	77
6.9. Koefisien Partisi Polutan Organik dalam Tanah ..	78
BAB 7. PERURAIAN PESTISIDA DALAM TANAH	83
7.1. Transformasi Secara Abiotik	83
7.1.1. Reaksi Hidrolisis	83
7.1.2. Reaksi Fotolisis	89
7.2. Transformasi Secara Biotik	93
7.3. Tetapan Reaksi Biotik dan Abiotik Pestisida Fenitrothion pada Tanah Sawah	97

7.4. Tetapan Reaksi Biotik dan Abiotik Herbisida Glifosat pada Tanah Tidak Jenuh Air	99
7.5. Tetapan Reaksi Biotik dan Abiotik Herbsida Glifosat pada Tanah Sawah	102
7.6. Tetapan Reaksi Biotik dan Abiotik Detergen (LAS) dalam Tanah Jenuh Air	104
BAB 8. PERPINDAHAN MASSA POLUTAN ANTAR- FASE	109
8.1. Penentuan Parameter Koefisien Perpindahan Massa Antarfase Pestisida Organofosforus pada Tanah Jenuh Air	113
8.2. Penentuan Parameter Koefisien Perpindahan Massa Antarfase Pestisida Organofosforus pada Tanah Tidak Jenuh Air atau Tanah Tegalan.	116
BAB 9. MODEL MATEMATIS PERILAKU PESTISIDA DALAM TANAH	122
9.1. Pemilihan Model Matematis	122
9.2. Model Matematis dalam Tanah Tergenang Air	124
9.3. Penyelesaian Persamaan Diferensial	141
9.3.1. Penyelesaian persamaan diferensial pada larutan tanah	142
9.3.2. Penyelesaian persamaan diferensial pada fase padatan tanah	150
a. Model matematis 1	150
b. Model matematis 2	151
c. Model matematis 3	152
c.1. Cara eksplisit	152
c.2. Cara implisit	153
c.3. Cara Crank Nicolson	155
d. Model matematis 4	156
e. Model matematis 5	156
f. Model matematis 6	159

9.4. Modeling Proses Sorpsi pada Tanah Tidak Jenuh Air	159
9.4.1. Laju sorpsi herbisida glifosat oleh permukaan tanah	160
9.4.2. Laju desorpsi herbisida glifosat dari permukaan padatan	161
9.5. Pemodelan Perpindahan Massa Antarfase Herbisida Glifosat pada Tanah Tidak Jenuh Air dan Penyelesaiannya	163
BAB 10. PENENTUAN NILAI KOEFISIEN DISPERSI EFEKTIF DAN POROSITAS EFEKTIF	170
10.1. Contoh Penentuan Nilai Koefisien Dispersi Efektif dan Porositas Efektif	175
10.1.1. Bahan	176
10.1.2. Alat	176
10.1.3. Cara Percobaan	178
10.1.4. Analisis Data	179
10.1.5. Hasil	179
10.1.6. Kesimpulan	192
BAB 11. PENENTUAN TETAPAN LAJU REAKSI DAN KOEFISIEN PARTISI PESTISIDA DALAM TANAH	194
11.1. Penentuan Tetapan Laju Reaksi dan Koefisien Partisi Pestisida Organofosforus Jenis Fenitrotion dalam Tanah Jenuh Air	195
11.2. Percobaan Laboratorium Penentuan Tetapan Laju Reaksi dan Koefisien Partisi Pestisida Organofosforus Jenis Fenitrotion dalam Tanah Jenuh Air.	203
11.2.1. Bahan	203
11.2.2. Alat	203

11.2.3. Cara Percobaan	204
11.2.4. Analisis Data	206
11.2.5. Hasil dan Pembahasan	208
11.3. Percobaan Laboratorium Penentuan Tetapan Laju Reaksi dan Koefisien Partisi Pestisida Organofosforus Jenis Glifosat dalam Tanah Jenuh Air	224
11.3.1. Bahan	224
11.3.2. Alat	225
11.3.3. Cara Penelitian	225
11.3.4. Analisis Data	226
11.3.5. Hasil Penelitian	226
BAB 12. VERIFIKASI MODEL MATEMATIS DAN PERSAMAAN EMPIRIS YANG DISUSUN PADA TANAH SEBENARNYA	246
BAB 13. ESTIMASI KUANTITATIF PERILAKU PESTI- SIDA DI TANAH SAWAH	263
DAFTAR PUSTAKA	267

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Luas lahan padi dan potensi hasilnya di Indonesia	14
Tabel 2.2.	Profil tanah sawah jenis Latosol di Bogor	15
Tabel 2.3.	Kapasitas pertukaran kation pada berbagai tekstur tanah dan koloid tanah	19
Tabel 2.4.	Sifat-sifat fisika tanah sawah dari Desa Donoharjo, Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul	21
Tabel 2.5.	Sifat-sifat kimia tanah sawah dari Desa Donoharjo, Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul	22
Tabel 2.6.	Sifat-sifat fisika tanah sawah dari Desa Sukoharjo, Kecamatan Ngaglik, Kabupaten Sleman	24
Tabel 2.7.	Sifat-sifat kimia tanah sawah dari Desa Sukoharjo, Kecamatan Ngaglik, Kabupaten Sleman	25
Tabel 2.8.	Sifat-sifat fisika tanah sawah dari Desa Sidoarum, Kecamatan Godean, Kabupaten Sleman	26
Tabel 2.9.	Sifat-sifat kimia tanah sawah dari Desa Sidoarum, Kecamatan Godean, Kabupaten Sleman	27
Tabel 5.1	Hasil penelitian nilai D_e aliran larutan tanah melalui berbagai jenis tanah dengan laju tertentu	60
Tabel 7.1.	Biodegradasi Alkilbenzena Sulfonat Linear (LAS)	106
Tabel 7.2.	Nilai k_b , deterjen LAS pada berbagai pH air	106

Tabel 10.1	Tiga contoh hasil pencocokan kurva antara distribusi konsentrasi zat perunut dalam larutan tanah yang keluar kolom sebagai fungsi waktu hasil simulasi matematis model CDE ($C_{sim.}$) dan data hasil percobaan laboratorium (C_{data})	181
Tabel 10.2.	Nilai D_e dan θ hasil perhitungan pada 4 lapisan tanah sawah dari Desa Donoharjo, Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul dan pada berbagai laju superfisial aliran zat perunut	182
Tabel 10.3.	Nilai D_e dan θ hasil perhitungan pada 4 lapisan tanah sawah dari Desa Sukoharjo, Kecamatan Ngaglik, Kabupaten Sleman dan pada berbagai laju superfisial aliran zat perunut	183
Tabel 10.4	Nilai D_e dan θ hasil perhitungan pada 4 lapisan tanah sawah dari Desa Sidoarum, Kecamatan Godean, Kabupaten Sleman dan pada berbagai laju superfisial aliran zat perunut	184
Tabel 10.5.	Perbandingan nilai D_e aliran larutan tanah melalui berbagai jenis tanah dengan laju tertentu hasil penelitian ini dengan hasil penelitian sebelumnya	188
Tabel 11.1.	Hubungan antara nilai-nilai parameter k_h , K_p , M_{uo} , K_s , k_d dan kandungan lempung dan bahan organik tanah	213
Tabel 11.2.	Nilai K_p untuk berbagai jenis tanah	233
Tabel 11.3.	Nilai k_h untuk berbagai jenis tanah	237
Tabel 11.4.	Nilai M_{uo} , Y_i , dan k_d hasil perhitungan berbagai jenis tanah	243
Tabel 12.1.	Nilai fraksi <i>channeling</i> berbagai jenis tanah	251

Tabel 12.2. Data pengamatan dan hasil verifikasi nilai konsentrasi pestisida sebagai fungsi waktu untuk tanah sawah dari Bantul (tebal tanah lapisan 1=25 cm, dan lapisan 2=25,3 cm)	252
Tabel 12.3. Data pengamatan dan hasil verifikasi nilai konsentrasi pestisida sebagai fungsi waktu untuk tanah sawah dari Sukoharjo, (tebal lapisan 1 = 18 cm, tebal lapisan 2 = 29 cm, dan tebal lapisan 3 = 23,7 cm)	254
Tabel 12.4. Data pengamatan dan hasil verifikasi nilai konsentrasi pestisida sebagai fungsi waktu untuk tanah sawah dari Godean, (tebal tanah lapisan 1=20 cm, lapisan 2=49 cm, lapisan 3=14,5 cm) ...	256
Tabel 12.5. Konsentrasi pestisida sebagai fungsi waktu hasil pengamatan laboratorium dan hasil perhitungan untuk tanah sawah dari Godean, (tebal lapisan 1=20 cm, tebal lapisan 2=49 cm, tebal lapisan 3=17 cm, tebal lapisan 4=8 cm)	258

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Skema proses yang terjadi selama pestisida berada di lingkungan	7
Gambar 3.1.	Struktur kimia golongan pestisida Organofosforus	32
Gambar 3.2.	Struktur kimia beberapa jenis pestisida organofosforus	32
Gambar 3.3.	Rumus bangun herbisida glifosat	34
Gambar 4.1	Perilaku pestisida selama di tanah sawah yang disederhanakan	39
Gambar 4.2.	Hubungan antara konsentrasi senyawa organik pada tempat pengambilan cuplikan setelah melewati tanah dan waktu	44
Gambar 5.1.	Hubungan antara $\frac{D_e}{D_{A2}}$ dan bilangan Peclet $\left(Pe = \frac{vD_{ave}}{D_{A2}} \right)$	62
Gambar 5.2.	Hubungan antara kelompok tidak berdimensi $\frac{D_e}{D_{A2}}$ dan $Pe = \frac{vD_{ave}}{D_{A2}\theta}$	62
Gambar 5.3.	Hubungan antara θ dan $Pe = \frac{vD_{ave}}{D_{A2}}$	63

Gambar 6.1.	Isoterm adsorpsi klasik	69
Gambar 7.1.	Mekanisme reaksi hidrolisis pestisida organofosforus di lingkungan	89
Gambar 7.2.	Postulasi metabolis lintasan degradasi LAS	105
Gambar 9.1.	Elemen volum aliran larutan tanah yang mengandung pestisida melalui tumpukan padatan tanah.	126
Gambar 9.2.	Elemen volum pada butir padatan tanah	130
Gambar 9.3.	Skema pori dalam tanah dan skema aliran larutan tanah	133
Gambar 9.4	Skema arah perpindahan massa pada tumpukan padatan tanah	137
Gambar 9.5.	Diskretisasi cara karakteristik pada sistem grid yang dipakai	144
Gambar 9.6.	Sistem grid di sekitar ujung aliran	147
Gambar 9.7.	Aliran udara pada elemen volum tumpukan tanah	163
Gambar 9.8.	Elemen volum pada $i = 0$	166
Gambar 9.9.	Elemen volum pada $i = N$	167
Gambar 10.1.	Rangkaian alat percobaan untuk menentukan nilai parameter koefisien dispersi efektif dan porositas efektif	177
Gambar 10.2.	Tiga contoh hasil pencocokan kurva antara konsentrasi zat perunut dalam larutan tanah sebagai fungsi waktu hasil simulasi matematis model CDE ($C_{sim.}$) dan data hasil percobaan laboratorium (C_{data})	180

Gambar 10.3. Hubungan antara $\frac{D_e}{D_{A2}}$ dan bilangan Peclet $\left(Pe = \frac{vD_{ave}}{D_{A2}} \right)$ yang didapatkan pada penelitian ini 185

Gambar 10.4. Hubungan antara kelompok tidak berdimensi $\frac{D_e}{D_{A2}}$ dan $Pe = \frac{vD_{ave}}{D_{A2}\theta}$ yang didapatkan pada penelitian tanah Bantul, Godean, dan Sukoharjo 185

Gambar 10.5. Hubungan antara θ dan $Pe = \frac{vD_{ave}}{D_{A2}}$ yang didapatkan pada penelitian ini 188

Gambar 10.6. Hasil pengukuran laboratorium yang menyatakan hubungan antara diameter butir tanah dan persen butir yang lebih kecil dari ukuran butir tanah tersebut 191

Gambar 11.1. Rangkaian alat percobaan untuk penentuan parameter tetapan laju reaksi dan tetapan keseimbangan 204

Gambar 11.2. Konsentrasi fenitrotion dalam larutan tanah sebagai fungsi waktu hasil pengamatan laboratorium pada tanah lapisan 4 dari Desa Donoharjo, Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul 208

Gambar 11.3. Konsentrasi biomassa dalam larutan tanah sebagai fungsi waktu hasil pengamatan laboratorium dalam lapisan 4 dari Desa Donoharjo, Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul 209

Gambar 11.4.	Konsentrasi pestisida dalam larutan tanah sebagai fungsi waktu data percobaan laboratorium, pencocokan kurva, dan hasil perhitungan ulang menggunakan parameter-parameter yang diperoleh pada tanah lapisan 1 dari Desa Sukoharjo, Ngaglik	209
Gambar 11.5.	Konsentrasi biomassa dalam larutan tanah sebagai fungsi waktu hasil percobaan laboratorium, pencocokan kurva, dan perhitungan ulang menggunakan parameter-parameter yang diperoleh pada tanah lapisan 1 dari Desa Sukoharjo, Ngaglik	210
Gambar 11.6.	Perbandingan nilai parameter k_h hasil pencocokan kurva dan nilai k_h hasil hitungan dengan menggunakan persamaan 11.25	214
Gambar 11.7.	Perbandingan nilai parameter K_p hasil pencocokan kurva dan nilai K_p hasil hitungan dengan menggunakan persamaan 11.26	214
Gambar 11.8.	Perbandingan nilai parameter M_{u0} hasil pencocokan kurva dan nilai M_{u0} hasil hitungan dengan menggunakan persamaan 11.27	215
Gambar 11.9.	Perbandingan nilai parameter K_s hasil pencocokan kurva dan nilai K_s hasil hitungan dengan menggunakan persamaan 11.28	215
Gambar 11.10.	Perbandingan nilai parameter k_d hasil pencocokan kurva dan nilai k_d hasil hitungan persamaan 11.29	216
Gambar 11.11.	Konsentrasi fenitrotion dalam larutan tanah sebagai fungsi waktu untuk tanah sawah yang berasal dari Desa Donoharjo, Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul	221

Gambar 11.12. Konsentrasi fenitrotion dalam larutan tanah sebagai fungsi waktu untuk tanah sawah yang berasal dari Desa Sukoharjo, Kecamatan Ngaglik, Kabupaten Sleman	222
Gambar 11.13. Konsentrasi fenitrotion dalam larutan tanah sebagai fungsi waktu untuk tanah sawah yang berasal dari Desa Sidoarum, Kecamatan Godean, Kabupaten Sleman	223
Gambar 11.14. Konsentrasi glifosat dalam larutan tanah sebagai fungsi waktu hasil pengamatan laboratorium pada 4 lapisan tanah dari Desa Donoharjo, Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul	227
Gambar 11.15. Konsentrasi glifosat dalam larutan tanah sebagai fungsi waktu hasil pengamatan laboratorium tanah lapisan 2 dari Desa Donoharjo, Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul	227
Gambar 11.16. Konsentrasi biomassa di larutan tanah (C_{bio}) sebagai fungsi waktu (t) tanah Desa Donoharjo, Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul	228
Gambar 11.17. Konsentrasi biomassa di larutan tanah (C_{bio}) sebagai fungsi waktu (t) tanah Desa Sukoharjo, Kecamatan Ngaglik, Kabupaten Sleman	228
Gambar 11.18. Konsentrasi biomassa di larutan tanah (C_{bio}) sebagai fungsi waktu (t) tanah Desa Sidoarum, Kecamatan Godean, Kabupaten Sleman	229
Gambar 11.19. Contoh hubungan antara C dan t pada waktu awal atau kisaran proses sorpsi	230

Gambar 11.20. Hubungan $\frac{K_p}{\% \text{ Lempung}}$ dan $\frac{\% B.Organik}{\% \text{ Lempung}}$	232
Gambar 11.21. Hubungan $\frac{K_p}{\% B.Organik}$ dan $\frac{\% \text{ Lempung}}{\% B.Organik}$...	232
Gambar 11.22. Hasil pencocokan kurva penentuan nilai k_h untuk lapisan 1 dan 3 tanah dari Desa Donoharjo, Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul	234
Gambar 11.23. Hasil pencocokan kurva penentuan nilai k_h untuk lapisan 2, 3, dan 4 tanah dari Desa Sukoharjo, Kecamatan Ngaglik, Kabupaten Sleman	235
Gambar 11.24. Hasil pencocokan kurva penentuan nilai k_h untuk lapisan 1, 2, dan 3 tanah dari Desa Sidoarum, Kecamatan Godean, Kabupaten Sleman	236
Gambar 11.25. Hubungan $\frac{K_h}{\% B.Organik}$ dan $\frac{\% \text{ Lempung}}{\% B.Organik}$	238
Gambar 11.26. Hubungan $\frac{K_h}{\% \text{ Lempung}}$ dan $\frac{\% B.Organik}{\% \text{ Lempung}}$	238
Gambar 11.27. Hasil pencocokan kurva penentuan nilai k_h untuk 4 lapisan tanah dari Desa Donoharjo, Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul	240
Gambar 11.28. Hasil pencocokan kurva penentuan nilai k_h untuk 4 lapisan tanah dari Desa Sukoharjo, Kecamatan Ngaglik, Kabupaten Sleman	241
Gambar 11.29. Hasil pencocokan kurva penentuan nilai k_h untuk 4 lapisan tanah dari Desa Sidoarum, Kecamatan Godean, Kabupaten Sleman	242

Gambar 11.30. Hubungan antara nilai Y_i , M_{uo} , dan k_d per % lempung dan %bahan organik per % lempung ..	243
Gambar 11.31. Hubungan antara nilai Y_i , M_{uo} , dan k_d per % bahan organik dan %lempung per % bahan organik	244
Gambar 12.1. Debit larutan tanah sebagai fungsi waktu hasil pengamatan laboratorium untuk tanah sawah dari Desa Donoharjo, Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul	253
Gambar 12.2. Konsentrasi pestisida sebagai fungsi waktu hasil pengamatan laboratorium dan hasil perhitungan untuk tanah sawah dari Desa Donoharjo, Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul	253
Gambar 12.3. Debit larutan tanah sebagai fungsi waktu hasil pengamatan laboratorium untuk tanah sawah dari Desa Sukoharjo, Kecamatan Ngaglik, Kabupaten Sleman	255
Gambar 12.4. Konsentrasi pestisida sebagai fungsi waktu hasil pengamatan laboratorium dan hasil perhitungan untuk tanah sawah dari Desa Sukoharjo, Kecamatan Ngaglik, Kabupaten Sleman	255
Gambar 12.5. Debit larutan tanah sebagai fungsi waktu hasil pengamatan laboratorium untuk tanah sawah dari Desa Sidoarum, Kecamatan Godean, Kabupaten Sleman	257
Gambar 12.6. Konsentrasi pestisida sebagai fungsi waktu hasil pengamatan laboratorium dan hasil perhitungan untuk tanah sawah dari Desa Sidoarum, Kecamatan Godean, Kabupaten Sleman	257

Gambar 12.7.	Debit larutan tanah sebagai fungsi waktu hasil pengamatan laboratorium untuk tanah sawah dari Desa ' Sidoarum, Kecamatan Godean, Kabupaten Sleman	259
Gambar 12.8.	Konsentrasi pestisida sebagai fungsi waktu hasil pengamatan laboratorium dan hasil perhitungan untuk tanah sawah dari Desa Sidoarum, Kecamatan Godean, Kabupaten Sleman	259
Gambar 13.1.	Hasil perhitungan estimasi perilaku pestisida organofosforus jenis fenitrothion pada tanah sawah dari Desa Donoharjo, Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul	265
Gambar 13.2.	Hasil perhitungan estimasi perilaku pestisida organofosforus jenis fenitrothion pada tanah sawah dari Desa Sukoharjo, Kecamatan Ngaglik, Kabupaten Sleman	265
Gambar 13.3.	Hasil perhitungan estimasi perilaku pestisida organofosforus jenis fenitrothion pada tanah sawah dari Desa Sidoarum, Kecamatan Godean, Kabupaten Sleman	266

DAFTAR ARTI LAMBANG

- A = luas total penampang aliran larutan tanah pada tumpukan tanah, (cm^2).
- a = tetapan dalam persamaan (5.8) yang mempunyai kisaran nilai $0,005 < a < 0,01$.
- b = tetapan dalam persamaan (5.8) yang mempunyai nilai sama dengan 10.
- b_1 = tetapan adsorpsi Langmuir, (l.g^{-1}).
- C = konsentrasi solut (pestisida atau zat perunut) dalam larutan tanah, (ppm atau mg.l^{-1}).
- C^* = konsentrasi pestisida dalam fase larutan tanah yang dalam keadaan berkeseimbangan dengan konsentrasi pestisida dalam fase padatan tanah, (ppm atau mg.l^{-1}).
- C^{**} = konsentrasi pestisida dalam fase larutan tanah yang dalam keadaan berkeseimbangan dengan konsentrasi pestisida dalam tumbuhan, (ppm).
- C_i = konsentrasi nutrisi pembatas ke i, (ppm atau mg.l^{-1})
- C_{im} = konsentrasi pestisida dalam larutan tanah pada fase imobil, (ppm).
- C_m = konsentrasi pestisida dalam larutan tanah pada fase mobil, (ppm).
- C_s = konsentrasi pestisida dalam larutan tanah di permukaan padatan tanah yang dalam keadaan, keseimbangan dengan konsentrasi pestisida dalam padatan tanah, (ppm)

- C_{pim} = konsentrasi pestisida dalam larutan tanah pada pori imobil, (ppm).
 C_{bio} = konsentrasi biomassa, ($mg\cdot l^{-1}$).
 C_I = konsentrasi nutrisi pembatas ke I, ($mg\cdot l^{-1}$).
 C_{II} = konsentrasi nutrisi pembatas ke II, ($mg\cdot l^{-1}$).
 C_{III} = konsentrasi nutrisi pembatas ke III, ($mg\cdot l^{-1}$).
 c_1 = tetapan persamaan empiris
 c_2 = tetapan persamaan empiris
 c_3 = tetapan persamaan empiris
 c_4 = tetapan persamaan empiris
 c_5 = tetapan persamaan empiris
 ΔC = beda konsentrasi pestisida dalam larutan tanah antara posisi z dan Δz , ($g\cdot cm^{-1}$).
 D_{A2} = difusivitas molekuler solut dalam air atau larutan tanah, ($cm^2\cdot menit^{-1}$).
 D_{ave} = diameter butir tanah rerata, (cm).
 D_{butir} = dimensi butir tanah yang pendefinisinya tergantung model yang digunakan, (cm).
 D_e = koefisien perpindahan massa gabungan antara difusi dan dispersi, dan kemudian disebut sebagai dispersi efektif, ($cm^2\cdot menit^{-1}$).
 D_{eim} = koefisien difusi efektif dalam larutan tanah yang dalam keadaan diam atau dalam daerah *stagnant*, ($cm^2\cdot menit^{-1}$).
 D_{epim} = koefisien difusi efektif pestisida dalam pori fase imobil, ($cm^2\cdot Menit^{-1}$).
 D_{ep} = koefisien difusi efektif pestisida dalam padatan, ($cm^2\cdot menit^{-1}$).

- D_{es} = koefisien difusi efektif pestisida dalam permukaan padatan, ($\text{cm}^2 \cdot \text{menit}^{-1}$).
 D_h = $\alpha |v|$ = koefisien dispersi hidrodinamis (mekanis), ($\text{cm}^2 \cdot \text{menit}^{-1}$).
 D_i = diameter butir rerata aritmatik antara butir yang lolos dan yang tertahan ayakan standar ukuran tertentu, (cm).
 D_o = koefisien difusi spesies tunggal dalam sistem media pelarut yang sangat encer dan tidak ada gangguan dengan sistem sekitar, ($\text{cm}^2 \cdot \text{menit}^{-1}$).
 D_p = diameter padatan yang berbentuk bola, (cm).
 D_s = koefisien dispersi yang menyatakan pengaruh perpindahan massa solut antara larutan tanah yang diam dan yang bergerak dalam pori tanah, ($\text{cm}^2 \cdot \text{menit}^{-1}$).
 D_π = $D_o \tau$ = koefisien difusi efektif, ($\text{cm}^2 \cdot \text{menit}^{-1}$).
 f_i = fraksi massa akumulatif untuk fraksi butir I, ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$).
 f_{ok} = fraksi kandungan bahan organik karbon dalam tanah, ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$).
 f_{ot} = fraksi kandungan bahan organik total dalam tanah, ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$).
 g = gravitasi bumi, ($\text{cm}^2 \cdot \text{menit}^{-1}$).
 Δh = beda tekanan hidrolis larutan tanah antara di puncak dan di dasar yang dinyatakan dalam satuan *head*, (cm)
 i = indeks inkremen posisi terhadap z .
 j = indeks inkremen waktu
 J_{sorpsi} = jumlah sorpsi solut dari larutan tanah ke padatan tanah, (g)
 k = indeks inkremen posisi terhadap r .
 K_1 = tetapan persamaan empiris
 K_2' = tetapan persamaan empiris
 K_3 = tetapan persamaan empiris

- K_4 = tetapan yang tergantung pada sifat media berpori yang sering disebut sebagai konduktivitas hidrolis atau koefisien permeabilitas, ($\text{cm} \cdot \text{menit}^{-1}$)
- k_c = koefisien perpindahan massa pestisida antar fase mobil dan imobil, ($\text{cm} \cdot \text{menit}^{-1}$).
- k_{cl} = koefisien perpindahan massa pestisida antar fase pada reactor *batch*, ($\text{cm} \cdot \text{menit}^{-1}$).
- $k_{c,a}$ = koefisien perpindahan massa pestisida volumetris antara fase mobil (larutan tanah) dan imobil (padatan tanah), (menit^{-1}).
- k_{plant} = koefisien perpindahan massa pestisida volumetris antara fase larutan tanah dan tanaman, (menit^{-1}).
- k_d = konstanta kecepatan kematian mikrob, (menit^{-1}).
- k_h = konstante kecepatan reaksi hidrolisis fenitroton, (menit^{-1}).
- K_{ok} = koefisien partisi pestisida dalam fase larutan tanah dan dalam bahan organik karbon tanah, ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$).
- K_{ot} = koefisien partisi pestisida dalam fase larutan tanah dan dalam bahan organik total tanah, ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$).
- K_{ow} = koefisien partisi pestisida dalam oktanol dan air, ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$).
- KPK = kapasitas pertukaran kation, ($\text{cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$).
- K_p = tetapan keseimbangan antara konsentrasi pestisida dalam larutan tanah dan dalam padatan tanah, ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$).
- K_{si} = konstante *half saturation* nutrisi pembatas ke i, ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$).
- K_{sI} = konstante *half saturation* nutrisi pembatas ke I, dalam persamaan II.33 menyatakan pestisida, ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)
- K_{sII} = konstante *half saturation* nutrisi pembatas ke II, dalam persamaan II.33 menyatakan bahan organik, ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)

- K_{sIII} = konstante *half saturation* nutrisi pembatas ke III, dalam persamaan II.33 menyatakan oksigen, (mg.l^{-1})
 L = panjang lintasan garis lurus larutan tanah atau kedalaman maksimal tanah, (cm)
 l = panjang lintasan difusi, cm.
 L_e = panjang lintasan larutan tanah yang sebenarnya, (cm)
 m = berat padatan tanah dalam larutan, (g)
 m_i = fraksi massa butir yang mempunyai ukuran D_i
 m_{pohon} = massa pohon tanaman padi, (g)
 M_u = kecepatan pertumbuhan spesifik, (menit^{-1})
 M_{uo} = kecepatan maksimal pertumbuhan spesifik, (menit^{-1})
 n = tetapan persamaan empiris yang bernilai $0 < n < 1$.
 n_b = jumlah butir tanah tiap satuan volum padatan tanah.
 P_e = bilangan Peclet, $\left(\frac{vD_{ave}}{D_{A2}} \right)$
 Q = debit aliran larutan tanah, ($\text{cm}^3 \cdot \text{menit}^{-1}$)
 R = jari-jari butir tanah, (cm).
 r = jarak tertentu dari pusat sumbu butir tanah, (cm).
 Rd_{im} = faktor retardasi pestisida pada fase imobil
 Re = bilangan Reynolds, $\left(\frac{\rho D_{ave}}{\mu} \right)$
 R_i = jari-jari butir tanah rerata untuk fraksi butir i , yang ditentukan dengan menggunakan persamaan (II.40), (cm).
 R_p = jari-jari pori tanah yang berbentuk silinder, (cm).
 R_{p1} = jari-jari luar padatan tanah yang membentuk pori berbentuk silinder dengan jari-jari pori R_{p1} , (cm).

- r_p = jarak tertentu dari pusat sumbu pori, (cm).
 S = konsentrasi pestisida di permukaan padatan tanah, ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$).
 S_{aq} = kelarutan solut dalam air, ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$).
 S_c = bilangan Schimdt, $\left(\frac{\mu}{\rho D_{A2}}\right)$.
 S_h = bilangan Sherwood, $\left(\frac{k_c a D_{ave}^2}{D_{A2}}\right)$.
 SS = nilai luas permukaan spesifik tanah, ($\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$).
 t = waktu, (menit).
 v = kecepatan superfisial ($\text{cm}\cdot\text{menit}^{-1}$).
 V = volum larutan tanah, (cm^3).
 $\frac{v}{\theta}$ = kecepatan interfisial atau kecepatan linier rerata larutan tanah dalam pori, ($\text{cm}\cdot\text{menit}^{-1}$).
 v_z = kecepatan superfisial rata-rata ke arah z, ($\text{cm}\cdot\text{menit}^{-1}$).
 $|v|$ = kecepatan aliran larutan tanah dalam pori, ($\text{cm}\cdot\text{menit}^{-1}$).
 X = konsentrasi pestisida pada padatan tanah, ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
 X_{max} = kemampuan adsorpsi maksimum padatan tanah terhadap suatu senyawa tertentu, ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
 X_s = koefisien yield bakteri, ($\text{g}_{sel}\cdot\text{g}_{pestisida}^{-1}$)
 Y_i = posisi tertentu pada arah tebal tumpukan tanah, (cm)
 z = dispersivitas aliran larutan tanah, (cm).
 α = parameter yang menyatakan dimensi panjang dan diketahui sebagai faktor
 α_z = koefisien dispersi intrinsik, (cm).
 τ = faktor tortositas media berpori yang digunakan untuk

memodifikasi koefisien D_0

- θ_v = kandungan air volumetris dalam tanah, ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)
- ω = koefisien yang ditentukan berdasarkan pengaruh muatan matriks tanah terhadap viskositas air.
- χ = koefisien yang dihitung berdasarkan pengaruh eksklusi anion.
- φ = fraksi pori yang ditempati larutan tanah yang diam, ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)
- ρ_{im} = densitas fase imobil, ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).
- ρ_p = densitas padatan tanah, ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).
- ρ_s = densitas padatan tanah, ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).
- ρ_c = densitas cairan, ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
- $\Delta\rho$ = beda densitas antara padatan dan cairan, ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).
- μ_c = viskositas cairan, ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{menit}^{-1}$).
- θ = porositas efektif, ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$).
- θ_{pim} = porositas pori pada fase imobil, ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$).
- θ_{im} = porositas pada fase imobil, ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$).
- ϕ = luas permukaan perpindahan massa total per satuan volum padatan tanah, ($\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$).
- ϕ_{im} = luas permukaan perpindahan massa pada fluida imobil per satuan volum padatan tanah, ($\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$).
- Σ_{reaksi} = total kecepatan perubahan massa pestisida karena reaksi, ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{menit}^{-1}$)
- Σ_{sorpsi} = total kecepatan sorpsi pestisida, ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{menit}^{-1}$).