MODELING PERILAKU PESTISIDA ORGANOFOSFOR DALAM TANAH SAWAH

Edia Rahayuningsih, Boma Wikan Tyoso, Wahyudi Budi Sediawan, Supranto
Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada,
Jl. Grafika 2, Yogyakarta 55281, Indonesia
Email : edia_rahayu@chemeng.ugm.ac.id

Bostang Radjagukguk
Jurusan Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas, Gadjah Mada,
Sekip, Yogyakarta 55281, Indonesia

Naskah diterima 12 Mei 2004, dinilai 17 Mei 2004, dan disetujui 26 Agustus 2004

Abstrak

Pencemaran lingkungan oleh pestisida dapat dikendalikan bila tersedia model matematis yang dapat menggambarkan perilaku pestisida secara kuantitatif selama berada di lingkungan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menentukan model matematis yang dapat menggambarkan perilaku pestisida organofosfor dalam tanah sawah. Penentuan model matematis dilakukan dengan menyusun beberapa model matematis yang dapat digunakan untuk menyatakan perilaku pestisida dalam tanah sawah. Persamaan diferensial yang tersusun untuk masing-masing model matematis diselesaikan secara numeris dan disusun program komputernya. Dengan melakukan simulasi, dengan bantuan program computer yang telah disusun, dapat dipilih model matematis yang optimum. Model matematis yang optimum bila dapat menyatakan dengan baik proses yang terjadi, jumlah parameter yang teribat sedikit, dan waktu yang diperlukan untuk berhitung singkat. Model matematis yang optimum adalah sebagai berikut: (1) Peristiwa perpindahan massa pestisida organofosfor antar fasa antara larutan dan padatan tanah didasarkan atas perpindahan massa volumetris. (2) Peristiwa sorpsi pestisida oleh tanah mengikuti mekanisme model dua permukaan (double layer). (3) Ukuran butir tanah dinyatakan dengan diameter rerata (D_{ave}), dan (4) Konsentrasi pestisida dalam padatan tanah seragam.

Kata Kunci: Modeling, Pestisida, Tanah Sawah.

Abstract

The environmental pollution caused by pesticide could be minimized with the availability of mathematical model which described fate of pesticide in the environment. The research aimed to determine the mathematical model of fate of pesticide in rice field. The mathematical model could be selected from mathematical models which expressed the fate of pesticide in rice field. The numerical solutions and computer programs of each mathematical model were developed. The optimum mathematical model was selected by conducting a simulation of the computer programs. The optimum mathematical model if it described fate of pesticide in the rice field accurately, a small number of parameters involved, and it required short time of computer computation. The optimum mathematical model express as follow: (1) Interphase mass transfer between solid and liquid based on volumetric mass transfer. (2) The sorption of pesticide by soil could be described by double layer model. (3) The diameter of soil particle was expressed in average diameter, and (4) Pesticide concentration in soil was uniform.

Key Words: Modeling, Pesticide, Rice Field

1. Pendahuluan

Dalam menangani masalah produksi pertanian, khususnya pangan, yang selalu dituntut adalah terjadinya peningkatan produksi seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk, yang dapat dikatakan sangat sulit dicapai bila tidak digunakan pestisida. Sudah diketahui bersama bahwa terdapat beberapa dampak negatif penggunaan pestisida, yang di antaranya : masalah keracunan, pencemaran lingkungan, perkembangan serangga menjadi lebih resisten dan toleran terhadap pestisida, terbunuhnya musuh alami serangga tersebut (predator) dan organisme bukan sasaran, dan terjadinya residu pestisida (Ahmed, 1995; Laba dkk.,1998). Banyak usaha yang telah dilakukan untuk memperkecil jumlah pestisida yang digunakan dan dampak negatif yang ditimbulkannya, misalnya diterapkannya pola pengendalian hama terpadu (Oka, 1994), dikembangkannya teknologi mikro organisme efektif (Sumarni, 1996), dikembangkannya pemanfaatan pestisida nabati (Kardinan, 1998), munculnya larangan penggunaan pestisida jenis tertentu, dan adanya kebijaksanaan pemerintah Indonesia yang mencabut subsidi terhadap pestisida (Kardinan, 1998). Pada kenyataannya para petani masih tetap menggunakan pestisida dalam jumlah yang cukup banyak, karena pengalaman yang dimiliki para petani menunjukkan bahwa keberhasilan produksi pertanian masih sangat tergantung pada penggunaan pestisida (Kardinan, 1998; Laba dkk., 1998).

Penelitian ini dimaksudkan melengkapi usaha-usaha yang telah dilakukan sebelumnya untuk meminimalkan dampak negatif dari penggunaan pestisida, yaitu dengan menyediakan informasi kuantitatif mengenai perilaku pestisida selama berada di lingkungan. Perilaku pestisida dapat dinyatakan secara kuantitatif bila tersedia model matematis, nilai parameter-parameter yang diperlukan dalam model tersebut, dan program komputer sebagai alat bantu hitung untuk menyelesaikan persamaan diferensial yang tersusun. Dengan adanya informasi ini maka dapat dilakukan langkah antisipasi dalam perencanaan penggunaan pestisida, sehingga dilema yang dihadapi dalam penggunaan pestisida dapat diminimalkan.

2. Fundamental

Perilaku pestisida di tanah sawah merupakan peristiwa yang sangat kompleks karena mencakup proses perpindahan massa (adveksi, dispersi, dan sorpsi), proses peruraian (reaksi biokimia, kimia, dan fotolisis), dan dalam sistem tanah yang komplek. Model matematis merupakan alat yang dapat digunakan untuk menyatakan perilaku pestisida dalam tanah sawah tersebut secara kuantitatif.

Bila suatu proses ingin dinyatakan dengan teliti, semua variabel yang berpengaruh terhadap proses tersebut perlu dipertimbangkan dalam penyusunan model matematis atau sedikit asumsi yang diambil. Model matematis seperti ini akan memberikan persamaan matematis yang komplek, banyak parameter proses yang diperlukan, dan perhitungan dengan komputer diperlukan waktu yang lama. Bila dalam penyusunan model matematis dapat diambil asumsi-asumsi yang dapat diterima maka persamaan matematis yang tersusun dapat sederhana, jumlah parameter proses yang dibutuhkan sedikit, dan perhitungan dengan komputer juga singkat.

Pemodelan terhadap peristiwa perpindahan dan peruraian pestisida dalam tanah dapat didasarkan atas tinjauan secara mikroskopis dan makroskopis. Tanah sawah merupakan sistem yang komplek, mempunyai derajat ketidak teraturan yang tinggi, dan variabel yang berpengaruh banyak. Pemodelan atas dasar pendekatan makroskopis lebih cocok dan parameter input dapat berupa parameter-parameter sifat fisika dan kimia tanah yang lazim digunakan di ilmu tanah (Rahayuningsih, 2001).

Pemilihan model matematis dilakukan dengan komparasi secara kualitatif dan kuantitatif terhadap beberapa model matematis yang mungkin dapat disusun untuk menyatakan perilaku pestisida dalam tanah sawah. Model matematis yang dipilih atau dikatakan sebagai model matematis yang optimum bila model tersebut dapat menggambarkan dengan baik peristiwa yang ditinjau, jumlah parameter-parameter yang diperlukan dalam model tersebut sedikit, persamaan diferensial yang tersusun sederhana, dan waktu yang diperlukan untuk perhitungan menggunakan komputer cukup singkat.

3. Metodologi

Dalam penyusunan model matematis perpindahan dan peruraian pestisida dalam tanah sawah dapat diambil asumsi-asumsi sebagai berikut (Rahayuningsih, 2001):

i. Perubahan konsentrasi pestisida dalam tanah sawah hanya terjadi ke arah tebal tumpukan (arah z).
ii. Reaksi hidrolisis pestisida yang dominan adalah di fasa tanah dan mengikuti mekanisme reaksi order satu.
iii. Reaksi biodegradasi yang dominan terjadi di fasa cair.

Berdasarkan neraca massa pestisida pada larutan tanah dapat dituliskan persamaan diferensial distribusi konsentrasi pestisida di larutan tanah sebagai fungsi posisi dan waktu dapat dituliskan sebagai berikut:

$$-\frac{v}{\theta}\frac{\partial C}{\partial Z}+\frac{D_e}{\theta}\frac{\partial^2 C}{\partial Z^2}-\frac{1}{\theta}\sum sorpsi=\frac{\partial C}{\partial t} \qquad (1)$$

Perubahan konsentrasi pestisida dalam padatan tanah sangat dipengaruhi oleh pemodelan terhadap padatan tanah tersebut. Pada penelitian ini diajukan beberapa model matematis untuk menyatakan konsentrasi pestisida pada padatan tanah sawah, antara lain:

Model matematis 1

Menggambarkan tanah sebagai tumpukan butir-butir padatan tanah yang berbentuk bola pejal. Tahanan perpindahan massa antar fasa padatan-cairan tidak dapat diabaikan pengaruhnya. Perpindahan massa antar fasa padatan-cairan didasarkan atas perpindahan massa volumetrik. Konsentrasi pestisida di padatan tanah seragam. Model matematis 1 dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$-\frac{v}{\theta}\frac{\partial C}{\partial Z}+\frac{D_e}{\theta}\frac{\partial^2 C}{\partial Z^2}-\frac{(1-\theta)}{\theta}k_c\phi(C-C^*)=\frac{\partial C}{\partial t} \qquad (2)$$

Hubungan antara C^* dan X disesuaikan dengan bentuk korelasi konsentrasi keseimbangan untuk sistem yang diamati. Keadaan batas yang dapat disusun pada model ini adalah, pada waktu awal (t=0) nilai C(z,0) = 0 dan X(z,0) = 0, pada waktu tertentu (t=t) konsentrasi pestisida pada larutan tanah pada bagian pemasukan (z=0) nilainya $C(0,t) = C_o$. Karena padatan tanah mempunyai distribusi ukuran butir yang sangat luas, maka pada model matematis ini didefinisikan diameter butir rerata yang ditentukan atas dasar luas permukaan bagian yang aktif pada aliran larutan tanah melalui tumpukan butir-butir padatan tanah sawah. Diameter butir padatan tanah rerata didefinisikan dengan persamaan sebagai berikut (Brown *et al.*, 1978):

$$D_{ave}=\sqrt{\frac{\Sigma\frac{m_i}{D_i}}{\Sigma\frac{m_i}{D_i^3}}} \qquad (3)$$

Model matematis 2 S

Sama dengan Model matematis 1 tetapi ada distribusi konsentrasi pestisida dalam butir tanah. Persamaan distribusi konsentrasi pestisida dalam larutan dapat dinyatakan dengan persamaan (2), sedangkan distribusi konsentrasi pestisida dalam padatan tanah dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{3k_c}{R\rho_s}(C-C^*)-k_hX=\frac{\partial X}{\partial t} \qquad (4)$$

Keadaan batas model matematis ini sama dengan keadaan batas Model matematis 1.

Model matematis 3

Sama dengan Model matematis 2, tetapi butir padatan tanah dinyatakan dalam 3 ukuran, yaitu fraksi lempung, debu, dan pasir. Ukuran butir rerata untuk masing-masing fraksi ditentukan dengan menggunakan persamaan (3). Oleh karena itu persamaan matematis yang terbentuk pada Model matematis 2 berlaku juga untuk masing-masing ukuran pada Model matematis 3.

Model matematis 4

Menggambarkan butir padatan tanah merupakan fasa yang tidak seragam, karena pada dasarnya dalam butir tanah terdapat pori (*intra pore*).

Model matematis 5

Menggambarkan pori-pori yang ditempati larutan tanah yang diam dianggap berbentuk saluran yang berupa silinder-silinder lurus dengan ukuran seragam dengan jari-jari R_{p1}. Model matematis ini menggambarkan geometri tanah dengan cukup rinci atau penggambaran tanah dinyatakan secara mikroskopis tetapi dibutuhkan banyak nilai parameter yang tidak dapat diukur langsung. Rahayuningsih (2001) menulis dengan cukup rinci persamaan matematis yang terbentuk untuk Model matematis 4 dan 5.

Penyelesaian persamaan diferensial yang tersusun dalam model-model tersebut dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu kelompok persamaan diferensial pada fasa larutan tanah, dan kelompok persamaan diferensial pada fasa padatan tanah. Persamaan diferensial yang tersusun pada fasa larutan tanah yang mengalir melalui padatan tanah mengandung kelompok perpindahan massa pestisida secara adveksi dan dispersi. Untuk tipe persamaan diferensial seperti ini dapat digunakan cara karakteristik dan cara numeris. Cara karakteristik ini dimaksudkan untuk memperbaiki ketidak telitian perhitungan numeris (inkremental) yang tidak memperhitungkan adanya pengaruh aliran massa dan juga pengaruh ujung aliran massa yang mengangkut pestisida (Luknanto, 1993). Persamaan diferensial

distribusi konsentrasi pestisida dalam padatan tanah diselesaikan secara numeris dengan cara eksplisit, implisit, dan Crank Nicolson (Burden, 1981)

Algoritma penyelesaian dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

Pemilihan Penyelesaian Numeris

Pemilihan cara penyelesaian numeris didasarkan atas waktu perhitungan dengan komputer dan nilai penyimpangan yang ditentukan berdasarkan persamaan neraca massa sebagai berikut:

Penyimpangan = (total pestisida yang masuk kolom) - (total pestisida yang terbawa larutan tanah keluar kolom + total pestisida yang terdapat dalam larutan +total pestisida yang terjerap dalam tanah + total pestisida yang bereaksi) (5)

Cara penyelesaian numeris yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial konsentrasi pestisida pada larutan yang mengalir melalui tumpukan tanah adalah cara karakteristik dan cara eksplisit. Sedangkan cara penyelesaian numeris yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial konsentrasi pestisida pada padatan tanah adalah cara eksplisit, cara implisit, dan cara Crank Nicolson.

Penyusunan Program Komputer

Program komputer dengan bahasa *Basic* dipergunakan untuk komputer pribadi dan dengan bahasa *Fortran* dipergunakan untuk super komputer.

Pemilihan Model Matematis

Pada tahap awal, pemilihan model matematis didasarkan atas kompleksitas persamaan diferensial yang tersusun, jumlah parameter yang telibat, dan waktu yang diperlukan dalam perhitungan dengan komputer. Tahap pemilihan model matematis selanjutnya atau saat "*fine tuning*" dilakukan dengan cara pencocokan kurva (*curved fitting*) antara nilai konsentrasi pestisida dalam larutan sebagai fungsi posisi dan waktu hasil perhitungan model matematis dengan data pengamatan. Pada tahap ini juga dapat dievaluasi nilai parameter yang terlibat dalam model matematis tersebut.

Hasil dan Pembahasan

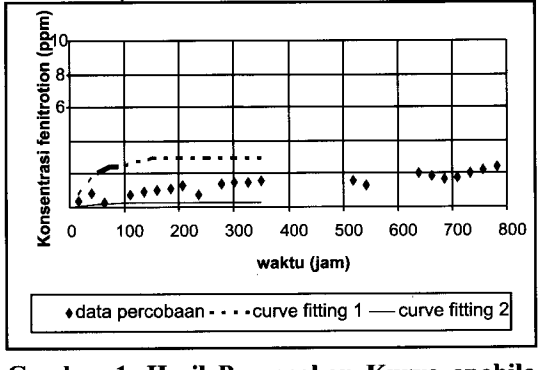
Berdasarkan identifikasi kualitatif terhadap persamaan diferensial konsentrasi pestisida di fasa larutan tanah dan di fasa padatan tanah sebagai fungsi posisi dan waktu untuk model-model matematis yang telah disusun, persamaan diferensial konsentrasi pestisida di padatan tanah untuk model matematis 3 yang pertama kali dipilih untuk diselesaikan dan disimulasikan. Dasar pertimbangannya adalah sebagai berikut: Penyusunan model matematis ini didasarkan atas tinjauan secara makroskopis, relatif teliti, tidak terlalu komplek, dan jumlah parameter yang terlibat relatif sedikit. Penyelesaian numeris yang pertama digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial konsentrasi pestisida pada fasa larutan tanah adalah cara karakteristik, dan penyelesaian numeris cara implisit digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial konsentrasi pestisida pada fasa padatan tanah.

Hasil simulasi yang telah dilakukan untuk model matematis dan cara penyelesaian numeris tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut: Pertama, perhitungan dapat berjalan dengan stabil dan tidak divergen bila nilai inkremen waktu dan inkremen tebal (Δt_r) yang diambil dalam perhitungan distribusi konsentrasi pestisida pada fasa padatan tanah ditentukan dengan memperhatikan batas nilai modulus ($M=r^2/D_{ebutir}/t$) sedangkan inkremen waktu (dan inkremen tebal (Δr) dalam perhitungan distribusi konsentrasi pestisida pada fasa larutan tanah memperhatikan batas Courant Fridrich Levy (CFL) yaitu berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, iterasi dapat berjalan dengan stabil, tidak divergen, dan nilai penyimpangan seperti yang dinyatakan pada persamaan (5) diperoleh paling kecil, bila nilai modulus (M) yang digunakan kurang dari 0,225, nilai , $\Delta t_Z < \Delta Z / 30v$ Dan nilai $t_r = t_Z/100$. Kedua, waktu berhitung dengan menggunakan komputer pribadi (PC) pentium 3, yang tersedia pada saat itu, diperlukan waktu yang sangat lama. Sebagai contoh, untuk menyatakan proses perpindahan dan peruraian massa pestisida dalam tanah sawah selama 118 jam, diperlukan waktu berhitung dengan menggunakan komputer selama 72 jam, atau waktu simulasi tidak jauh berbeda dengan waktu proses yang sebenarnya. Untuk itu, model matematis 3 dan cara penyelesaian numeris yang dipilih tersebut tidak seperti yang diharapkan. Berdasarkan hasil simulasi ini dapat dinyatakan bahwa model matematis 3, 4, dan 5 bukan merupakan model matematis yang optimum bila simulasi dilakukan dengan komputer pribadi yang tersedia. Ketiga, waktu yang diperlukan untuk mencapai konsentrasi pestisida dalam butir pasir (ukuran terbesar) seragam adalah sekitar 300 menit (6 jam). Waktu ini relatif singkat bila

dibandingkan dengan waktu proses secara keseluruhan (bulan sampai tahun). Untuk itu, anggapan bahwa tidak ada distribusi konsentrasi pestisida dalam butir tanah dapat diterima.

Dalam rangka untuk mempersingkat waktu perhitungan, dicoba pula menggunakan super komputer yang tersedia di BPPT (Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi). Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, waktu berhitung yang diperlukan menjadi lebih singkat, tetapi dalam aplikasinya super komputer tidak semudah dengan penggunaan komputer pribadi (PC) yang banyak dimiliki secara pribadi atau banyak tersedia. Kemudahan untuk mendapatkan komputer sebagai alat hitung juga merupakan salah satu pertimbangan dalam pemilihan model matematis.

Agar perhitungan menggunakan komputer pribadi (PC) menjadi lebih singkat, penyelesaian persamaan diferensial pada fasa larutan tanah digunakan cara eksplisit (*backward)*. Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, ketelitian hasil perhitungan yang didapatkan tidak jauh berbeda dengan cara karakteristik dan waktu perhitungannya jauh lebih singkat, bila nilai z yang diambil pada cara eksplisit lebih kecil dari nilai sehingga posisi ujung aliran yang membawa pestisida pada setiap saat sudah melewati titik-titik inkremennya.



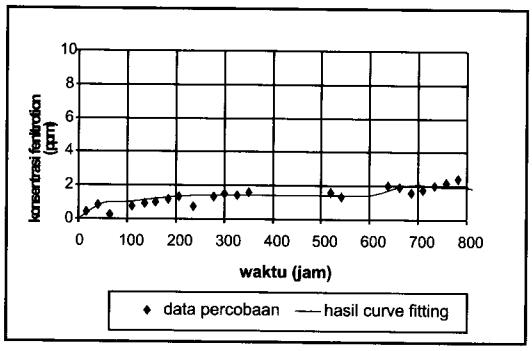
Gambar 1. Hasil Pencocokan Kurva apabila Tanah Dimodelkan dengan Kemampuan Sorpsi yang tetap.

Berdasarkan simulasi matematis yang telah dilakukan tersebut, untuk selanjutnya dapat ditentukan model matematis dan cara penyelesaian numeris secara kuantitatif. Model matematis pada fasa padatan tanah yang akan disimulasikan secara kuantitatif adalah model matematis 1, yaitu: peristiwa perpindahan massa pestisida organofosfor antar fasa antara larutan dan padatan tanah didasarkan atas perpindahan massa volumetrik, tanah mempunyai kemampuan sorpsi yang tetap ($X_{equi} = K_p C_{equi}$), ukuran butir tanah dinyatakan dengan diameter rerata (D_{ave}), dan tidak ada distribusi konsentrasi pestisida dalam butir. Penentuan model matematis secara kuantitatif dilakukan dengan cara pencocokan kurva (*curved fitting*) antara konsentrasi pestisida di larutan sebagai fungsi waktu dan posisi hasil perhitungan simulasi matematis dan data pengamatan laboratorium (simulasi fisik). Pada langkah ini selain untuk menentukan model matematis yang optimum juga dapat dievaluasi nilai parameter dari model matematis tersebut.

Berdasarkan hasil pencocokan kurva, yang dilakukan berulang-ulang, seperti yang disajikan dalam gambar 1, dapat dinyatakan bahwa bila tanah dimodelkan dengan kemampuan sorpsi yang tetap ($X_{equi} = K_p C_{equi}$) tidak memberikan hasil pencocokan yang baik. Berdasarkan analisis terhadap hasil simulasi dan data percobaan, selanjutnya permukaan tanah dimodelkan dengan kemampuan sorpsi yang tidak tetap atau model sorpsi pestisida oleh tanah mengikuti model sorpsi dua permukaan (*double layer*) masing-masing dengan kecepatan yang berbeda. Pada awal proses, tanah mempunyai kemampuan sorpsi yang besar ($X_{equi} = K_{p1} C_{equi}$) atau mempunyai nilai koefisien partisi (K_{p1}) besar. Nilai K_{p1} tersebut tetap sampai konsentrasi pestisida dalam tanah tertentu (X_{batas}), setelah itu tanah mempunyai kemampuan sorpsi yang rendah ($X_{equi} = K_{p2} C_{equi}$) atau nilai koefisien partisi (K_{p2}) lebih kecil dari nilai K_{p1}. Hasil ini sesuai hasil penelitian sorpsi solut yang berupa senyawa organik dengan tanah secara *batch*, yang menyatakan bahwa untuk mencapai sekitar 50% dari konsentrasi keseimbangan diperlukan waktu yang sangat singkat (menit sampai jam) tetapi untuk mencapai 50% daerah konsentrasi berikutnya diperlukan waktu yang sangat lama (hari sampai bulan) (Brusseau and Rao, 1989). Untuk model matematis ini nilai parameter yang harus dievaluasi ada 4 buah yaitu $k_c a$, K_{p1}, K_{p2}, dan X_{batas}.

Dengan memperhatikan data hasil percobaan laboratorium yang berupa konsentrasi fenitrotion pada posisi pengeluaran sebagai fungsi waktu, proses pencocokan kurva dapat dilakukan secara bertahap. Pada waktu awal pencocokan kurva dilakukan dengan mengubah-ubah nilai $k_c a$, X_{batas}, dan K_{p1} dan untuk tahap waktu berikutnya pencocokan kurva dilakukan dengan mengubah-ubah nilai K_{p2} dengan menggunakan nilai $k_c a$, K_{p1}, dan X_{batas} dari hasil pencocokan kurva pada langkah sebelumnya. Nilai K_{p1} diambil relatif besar dibandingkan nilai konsentarsi pestisida dalam butir sehingga daya dorong kecepatan perpindahan massa antar fasa menjadi sangat besar. Contoh hasil pencocokan kurva distribusi konsentrasi pestisida organofosfor dalam fasa

Larutan tanah pada bagian pengeluaran sebagai fungsi waktu hasil simulasi model matematis yang optimum dan hasil percobaan laboratorium disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil Pencocokan Kurvab bila Tanah Dimodelkan dengan Kemampuan Sorpsi Dua Permukaan

Pada perhitungan pencocokan kurva selain untuk menentukan model matematis yang optimum juga untuk menentukan nilai parameter-parameter $k_c a$, K_{p1}, X_{batas}, dan K_{p2}.

Kesimpulan

Dengan penelitian ini dapat disusun model matematis yang optimum, yang dapat menyatakan dengan baik perilaku pestisida organofosfor dalam tanah sawah, jumlah parameter yang terlibat dalam model tersebut sedikit, dan komputer pribadi dapat digunakan sebagai alat bantu hitung. Model matematis yang optimum tersebut adalah sebagai berikut: (1) Peristiwa perpindahan massa pestisida organofosfor antar fasa antara larutan dan padatan tanah didasarkan atas perpindahan massa volumetris. (2) Peristiwa sorpsi pestisida oleh tanah mengikuti mekanisme model dua permukaan (*double layer*). (3) Ukuran butir tanah dinyatakan dengan diameter rerata (D_{ave}). (4) Konsentrasi pestisida dalam butir tanah seragam.

Penyelesaian numeris cara eksplisit (*backward*) memberikan hasil yang teliti dan stabil.

Daftar Notasi

C = Konsentrasi pestisida dalam larutan tanah, mg/l.

C^* = konsentrasi keseimbangan pestisida dalam larutan tanah, mg/l

D_{ave} = diameter butir tanah rerata, cm.

D_e = dispersi efektif, cm^2/menit.

D_{A2} = difusivitas molekuler solut dalam air atau larutan tanah, cm^2/menit.

K_p = koefisien partisi antara konsentrasi pestisida dalam larutan tanah dan dalam padatan tanah, cm^3/g.

$k_C a$ = koefisien perpindahan massa antar fasa volumetris, $menit^{-1}$.

k_C = koefisien perpindahan massa antar fasa, cm/menit.

k_h = konstante kecepatan reaksi hidrolisis, $menit^{-1}$

R = Jari-jari butir tanah, cm

υ = waktu, menit

t = kecepatan superficial, cm/menit.

X = konsentrasi pestisida pada padatan tanah, mg/kg.

Z = posisi tertentu pada arah tebal tumpukan tanah, cm.

θ = porositas efektif, cm^3/cm^3.

ϕ = luas permukaan per satuan volum, cm^2/cm^3.

ρ_s = densitas butir tanah, g/cm^3

Daftar Pustaka

[1] Ahmed, S., 1995, "Overview of the Current Status and Future Prospects of Botanical Pesticides in Asia and the Pacific", *Report of the FAO Expert Consultation on Regional Perspectives for Use of Botanical Pesticides in Asia and the Pacific, Bangkok, 28 Oct. 1994, p. 13-17.*

[2] Brown, G.G., Foust, A.S., and Katzs, D., (1978), "*Unit Operations*", Modern Asia Editions, John Wiley, Sons, Inc, New York, Tokyo.

[3] Brusseau, M.L. and Rao, P.S.C., (1989), "Sorption Nonideality During Organic Contaminant Transport in Porous Media", *Critical Reviews in Environmental Control, 19,1.*

[4] Burden,R.L. and Faires J.D., (1981), "Numerical Analysis", 3rd ed., Prindle, Weber and Schmidt, Boston.

[5] Kardinan, A., 1998, "Prospek Penggunaan Pestisida Nabati di Indonesia", *Jurnal Litbang Pertanian, XVII (1), 1-7.*

[6] Laba,W.I., Kilin, D., dan Soetopo, D., 1998, "Dampak Penggunaan Insektisida dalam Pengendalian Hama", *Jurnal Litbang Pertanian, XVII (3), 99-107.*

[7] Oka, I.N., 1994, "Program Nasional PHT Sebagai Salah Satu Usaha Mengembangkan Sumber Daya Manusia dan Menuju Pertanian Tangguh", *Seminar Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan, Bogor, p. 23.*

[8] Luknanto, D., (1993), " Model NumerisAngkutan Limbah", *Prosiding*

*Seminar Nasional Modeling dan Metode Numeris*Angkutan Limbah", *Prosiding Seminar Nasional Modeling dan Metode Numeris pada Perpindahan Panas, Massa, dan Aliran Fluida, Pusat Antar Universitas Ilmu Teknik, Universitas Gadjah Mada, 15-16 Februari 1993, Yogyakarta.*

[9] Rahayuningsih, E., (2001), "Analisis Perpindahan Massa Pestisida Organofosfor Disertai Tinjauan Peruraiannya dalam Tanah Sawah", *Disertasi*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

[10] Sumarni, 1996, "Mengenal Teknologi EM4 dalam Pertanian Akrab Lingkungan", Balai Latihan Pegawai Pertanian, Departemen Pertanian, Ciawi, Bogor Indonesia.