

Fungsi Hubungan Sifat Kimia Tanah dan Penggunaan Pestisida dengan Kandungan Kadmium Pada Lahan Sawah

Oviyanti Mulyani^{1*}, Yuliati Machfud¹, dan Muhammad Amir solihin²

¹Laboratorium Kimia Tanah dan Nutrisi Tanaman, Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran

²Laboratorium Fisika Tanah, Konservasi Tanah dan Air, Genesis dan Klasifikasi Tanah, Evaluasi Lahan, Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran

*oviyanti.mulyani@unpad.ac.id

INFO ARTIKEL

Diterima: 09-04-2023

Direvisi: 13-08-2023

Dipublikasi: 14-08-2023

Keywords:
Heavy metals,
Pollutants, Regression,
Relationship

Kata Kunci:
Hubungan, Logam
berat, Polutan, Regresi

ABSTRACT/ABSTRAK

The Relationship Function of Soil Chemical Properties and Pesticide Usage toward Cadmium Content in Paddy Field

Agricultural pollution by heavy metal is one of the big challenges in sustainable agriculture. However, the input of heavy metals is often unavoidable. The study aimed (1) to determine which relationship function was most beneficial for the chemical properties of the soil and the application of pesticides toward the Cd content in the soil; and (2) to find out the type of relationship provided by the chemical properties of the soil and the use of pesticides toward the Cd content in the soil. The research method employed qualitative and quantitative methods to measure the organic C, pH, *Cation Exchange Capacity* (CEC), and Cd content in the rice fields of Batu Karut Ciparay Village, which were tested on 6 different linear and non-linear models. The T and F tests were used in hypothesis testing to determine the effect of pesticide use and soil chemical characteristics on Cd in the soil. When compared to the other models, the results showed that the mixed model was the best at preserving the relationship between pesticide use and some soil characteristics. According to the mixed model, pesticide variables, as well as soil pH, CEC, and Cd variables, had positive relationships with high significance of each independent variable on soil Cd content. This study also revealed that differences in pesticide use in agricultural systems, as well as variation of pH and CEC variables in the soil can alter Cd levels.

Polusi logam berat pada tanah pertanian merupakan salah satu tantangan berat dalam budi daya pertanian berkelanjutan. Akan tetapi, seringkali penggunaannya tidak dapat dihindarkan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui (1) fungsi hubungan yang memberikan pendekatan terbaik terhadap sifat kimia tanah dan pemberian pestisida terhadap kandungan Cd di tanah; dan (2) mekanisme hubungan seperti apakah yang terjadi antara sifat kimia tanah dan penggunaan pestisida terhadap kandungan logam berat Cd di tanah. Metode penelitian mengacu kepada metode kualitatif dan kuantitatif seperti C organik, pH, Kapasitas Tukar Kation (KTK) dan kandungan Cd di tanah sawah Desa Batu Karut Ciparay yang diujikan pada 6 model yang berbeda baik linier maupun non linier. Pengujian hipotesis dilakukan menggunakan uji T dan uji F untuk melihat pengaruh penggunaan pestisida dan sifat kimia tanah terhadap Cd di tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model campuran adalah yang paling baik untuk menggambarkan hubungan antara penggunaan pestisida dan beberapa sifat tanahnya, dilihat dari faktor signifikansinya terhadap semua faktor dibandingkan model yang lainnya, Berdasarkan model

campuran tersebut, seluruh variabel pestisida dan variabel pH, KTK dan Cd tanah memiliki hubungan positif dengan signifikansi yang tinggi dari setiap variabel peubah bebasnya terhadap kandungan Cd di dalam tanah. Pada kajian ini juga memperlihatkan kandungan Cd dipengaruhi oleh variasi penggunaan pestisida pada sistem budi daya dan variabel pH dan KTK di dalam tanah.

PENDAHULUAN

Sektor pertanian sangat berperan penting di dalam penyediaan produksi pangan yang berkaitan dengan keberlangsungan hidup manusia. Namun, Indonesia masih memiliki banyak permasalahan sehingga upaya penyediaan bahan pangan menemui hambatan. Permasalahan yang dihadapi terutama berkaitan dengan peningkatan jumlah produksi hasil dan produktivitas lahan. Oleh karena itu, berbagai usaha dilakukan agar dapat meningkatkan hasil pertanian meskipun dengan sumberdaya yang semakin terbatas. Salah satu usaha yang dapat dilakukan untuk meningkatkan produksi hasil pertanian ialah perubahan pola bertani dari sistem tradisional ke sistem modern (penggunaan alat pertanian modern serta pengaplikasian berbagai bahan tambahan (output) baik kimiawi maupun hayati kepada tanah dan tanaman). Beberapa bahan tambahan (output) yang marak dipergunakan oleh petani sekarang ini dalam jumlah tak terbatas adalah pupuk dan pestisida. Di Indonesia, penggunaan pestisida dalam sistem budidaya tanaman tercatat sangat tinggi dan mengalami peningkatan setiap tahunnya (Mawaddah dkk., 2022).

Pestisida merupakan salah satu bahan kimia yang dipakai untuk mengatasi gangguan hama dan penyakit pada budidaya tanaman. Material ini banyak dipergunakan oleh para petani namun para pengguna terkadang tidak menyadari bahwa material ini mengandung zat yang berbahaya bagi lingkungan seperti logam berat kadmium (Cd). Menurut (Lin *et al.*, 2010), pencemaran logam berat Cd di Cina sudah sampai pada taraf yang sangat memprihatinkan karena penggunaan pestisida secara terus menerus. Terlepasnya logam berat ke dalam tanah selain melalui pestisida adalah karena kegiatan insutri seperti elektroplating (pelapisan logam), pertambangan, peleburan logam, dan aplikasi pupuk (Ali *et al.*, 2013).

Berbagai mekanisme di alam dapat menyebabkan terakumulasinya Cd dalam tanah. Beberapa indikator dari sifat tanah seperti bahan organik, pH, ukuran partikel dan kemampuan pertukaran ion merupakan faktor yang dapat

mempengaruhi akumulasi kadmium dalam tanah (Palar, 2008; Kabata-Pendias, 2011). Atmojo (2003) juga menyatakan bahwa pada kondisi pH rendah (masam) kadmium cenderung larut dalam air tanah sehingga penyerapannya oleh akar tanaman akan tinggi. Di sisi lain, terdapat material seperti bahan organik yang dapat berfungsi sebagai penyehat tanah juga berpengaruh terhadap ketersediaan kadmium karena membentuk khelasi dengan logam berat lain yang pada akhirnya mempengaruhi konsentrasi logam tersebut (Alloway & Ayres, 1997; Mulyani, *et al.*, 2019; Mulyani *et al.*, 2021; Mulyani *et al.*, 2022). Verloo (1993) dan Duchaufor (1982) juga menyebutkan bahwa ketersediaan logam juga dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor di antaranya adalah reaksi kesetimbangan, kapasitas pertukaran kation, reaksi ikatan secara kompleks, pH tanah dan potensial redoks tanah.

Lebih jauh, hubungan antara penggunaan pestisida, sifat tanah, dengan kandungan logam berat Cd sudah banyak diteliti, akan tetapi bagaimana bentuk hubungan tersebut masih jarang untuk dikaji. Biasanya para peneliti hanya membuat suatu fungsi linier untuk menjelaskan bagaimana hubungan antara penggunaan pestisida dan sifat tanah dengan kandungan logam berat tersebut secara langsung. Dalam kenyataannya, kemungkinan hubungan yang terjadi bisa saja tidak linier. Hal ini disebabkan karena sifat tanah yang berbeda dapat menyebabkan filtrasi tanah terhadap logam berat yang terkandung di dalam pestisida tersebut dapat berbeda-beda (Lin *et al.*, 2010). Kajian mengenai fungsi hubungan antara penggunaan pestisida, sifat tanah, dan kandungan logam berat Cd memiliki arti penting dalam menemukan suatu proses hubungan dan prediksi pencemaran Cd yang diakibatkan oleh pestisida dengan beberapa variabel dari sifat tanah tertentu. Salah satu mekanisme penyerapan logam berat masuk ke dalam jaringan tanaman dan siklus rantai makanan adalah melalui akar (Alloway, 1995). Penyerapan logam berat oleh tanaman juga dipengaruhi oleh beberapa sifat tanah itu sendiri, salah satunya adalah kandungan bahan organik yang memiliki kemampuan untuk mengikat logam. Hasil akhir proses dekomposisi bahan organik seperti humus

memiliki kontribusi dalam pertukaran anion dan kation kompleks, khelat ion logam, pH buffer, serta bersifat stabil terhadap proses biodegradasi (Joy *et.al.*, 2019). Tingkat kemasaman tanah (pH) dan kemampuan tanah di dalam menyerap dan mempertukarkan kation juga dapat berperan di dalam ketersediaan ataupun pengikatan logam oleh tanah. pH secara langsung mempengaruhi pengendapan dan ketersediaan logam berat. Selain itu, sifat kimia lainnya yang dipengaruhi oleh tingkat kemasaman tanah (pH) adalah KTK, dimana kandungan KTK yang mengandung muatan tetap dan muatan terubahkan (*variable charge*) meningkat sejalan peningkatan pH (Mautuka dkk., 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk mencari fungsi hubungan penggunaan pestisida dan beberapa sifat kimia tanah dengan kandungan logam berat Cd serta menentukan seberapa besar penggunaan pestisida dan beberapa sifat kimia tanah dapat mempengaruhi variasi kandungan logam beratnya. Melihat pemaparan di atas dapat terlihat bagaimana fungsi hubungan di antara ketiganya dapat memberikan informasi penting untuk menekan polutan yang ada di tanah agar dapat menunjang sistem budidaya pertanian yang berkelanjutan, sehingga kajian ini menjadi penting dan relevan untuk diteliti.

BAHAN DAN METODE

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini terletak di tanah sawah Desa Batu Karut Ciparay dari 30 petakan sawah dengan luas areal sekitar 1,3 hektar. Areal yang dipilih didasarkan pada wawancara yang dilakukan ke petani pemilik/penggarap sawah mengenai aplikasi penggunaan dan jenis pestisida yang dipakai. Sampel tanah yang diambil ditentukan berdasarkan metode *purposive sampling*. Untuk melengkapi data sampel tanah yang diambil, survey lapangan juga dilakukan dengan menggunakan metode wawancara untuk mendapatkan informasi dari pengguna lahan mengenai luasan lahan, jumlah pestisida yang dipergunakan di dalam tanah serta jenis pestisida yang dipergunakan (sampel lokasi yang diambil didasarkan pada penggunaan insektisida dengan merk yang sama). Analisis laboratorium dilakukan untuk mengetahui sifat kimia tanah dari beberapa sampel tanah yang diambil. Pengujian ini di antaranya adalah pH, C organik dan KTK serta logam berat Cd dalam tanah.

Dosis Penetapan Perhitungan Pestisida

Penetapan jumlah pestisida yang dipergunakan dihasilkan dari jumlah total aplikasi yang diberikan untuk satu petakan lokasi pada satu musim tanam. Dosis tersebut kemudian dikonversi berdasarkan jumlah areal yang diaplikasikan sehingga memiliki satuan $L.m^{-2}$.

Model Fungsi Hubungan

Sebanyak 30 sampel diambil dari lahan sawah yang masih aktif digunakan untuk bercocok tanam padi dan menggunakan pestisida yang masih mengandung logam berat dalam kegiatan budidayanya. Jumlah sampel yang diambil mengikuti sebaran normal berdasarkan Dajan (1995). Untuk mendapatkan data kandungan logam Cd, dilakukan analisis tanah di laboratorium. Pengujian hipotesis menggunakan uji T dan uji F untuk melihat pengaruh penggunaan pestisida terhadap kandungan logam Cd. Adapun model linier dan non linier yang diajukan ialah sebagai berikut (Gujarati,2004):

$Cd_i = f(\text{Pest}, \text{karaktersitik tanah})$

$$Cd_i = \alpha_0 + \alpha_1 \text{Pest}_i + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + e_i \quad (1)$$

$$Cd_i = \alpha_0 + \alpha_1 \text{Pest}_i + \alpha_1 \text{Pest}_i^2 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i^2 + e_i \quad (2)$$

$$\ln Cd_i = \alpha_0 + \alpha_1 \ln \text{Pest}_i + \sum_{i=1}^k \beta_i \ln X_i + e_i \quad (3)$$

$$\ln Cd_i = \alpha_0 + \alpha_1 \text{Pest}_i + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + e_i \quad (4)$$

$$Cd_i = \alpha_0 + \alpha_1 \ln \text{Pest}_i + \sum_{i=1}^k \beta_i \ln X_i + e_i \quad (5)$$

$$Cd_i = f(\text{variabel dalam bentuk fungsi gabungan}) \quad (6)$$

Di mana :

- i = lahan
- Pest = jumlah pestisida yang digunakan ($L.m^{-2}$)
- Cd = kandungan logam berat Cd ($mg.kg^{-1}.m^{-2}$)
- X_i = Sifat kimia tanah meliputi C-organik, pH dan KTK
- α_0 = konstanta
- α_1 = koefisien hubungan variabel Cd dan Pestisida
- β = koefisien hubungan variabel independen lainnya dengan Cd
- k = jumlah variabel x
- e = residual

Persamaan (1) – Persamaan (2) diuji terhadap pemenuhan asumsi regresi linier klasik di antaranya: pengujian multikolinieritas dan heteroskedastisitas. Melalui pendekatan Gujarati (2004), pengujian multikolinieritas menggunakan uji korelasi sedangkan pengujian heteroskedastisitas menggunakan metode White. Jika regresi melanggar salah satu asumsi tersebut, maka dilakukan estimasi regresi dengan pendekatan koreksi terhadap standar error. Untuk menjawab rumusan pertama digunakan nilai perbandingan *adjusted-R²* untuk menentukan fungsi hubungan yang paling mendekati hubungan antara penggunaan pestisida dan sifat tanah dengan kandungan logam berat Cd. Variasi kandungan logam Cd sebagai akibat pengaruh pestisida dan sifat tanah bisa menggunakan nilai *R²* parsial dari kontribusi hubungan antara pestisida dan sifat tanah dengan kandungan logam Cd.

Untuk mengestimasi parameter pada model (1)-(6) digunakan metode kuadrat terkecil (*least square*) yang sudah digeneralisasi sehingga terbebas dari masalah asumsi regresi linier klasik seperti permasalahan heteroskedastisitas (*generalized least square*), sebagai berikut (Gujarati, 2004):

$$\beta = (X'W^{-1}X)^{-1}X'W^{-1}y \quad (7)$$

Di mana :

β = parameter model

X = variabel independent (mengacu kepada variabel independen pada persamaan 1 sampai 6)

y = variabel dependen (variabel Cd)

W = pembobotan untuk matrik kovarians yang disesuaikan dengan karakteristik residual (error)

Model Persamaan (7) merupakan rumus standar metode *ordinary least square* (OLS) untuk estimasi persamaan regresi (Gujarati, 2006).

Metode Analisis Laboratorium

Analisis tanah untuk parameter C-organik dilakukan menurut prinsip dasar dimana karbon sebagai senyawa organik akan mereduksi Cr^{6+} yang berwarna jingga menjadi Cr^{3+} yang berwarna hijau dalam suasana asam. Intensitas warna hijau yang terbentuk setara dengan kadar karbon dan dapat diukur dengan spektrofotometer pada panjang gelombang 561 nm (Balai Penelitian Tanah, 2005). Analisis pH H₂O dan pH KCl dilakukan penimbangan 10,00 g contoh tanah sebanyak dua kali, masing-masing dimasukkan ke dalam botol kocok, ditambah 50 ml air bebas ion ke botol yang satu (pH H₂O) dan 50 ml KCl 1 M ke dalam botol lainnya (pH KCl).

Pengocokan dilakukan dengan mesin pengocok selama 30 menit. Suspensi tanah diukur dengan pH meter yang telah dikalibrasi menggunakan larutan *buffer* pH 7,0 dan pH 4,0 (Balai Penelitian Tanah, 2005). Analisis KTK dilakukan menurut prinsip dasar dimana kation-kation dapat ditukar (K-dd) (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , dan Na^+) dalam kompleks jerapan tanah ditukar dengan kation NH_4^+ dari pengestrak sehingga dapat diukur. Untuk penetapan KTK tanah, kelebihan kation penukar dicuci dengan etanol 96%. NH_4^+ yang terjerap diganti dengan kation Na^+ dari larutan NaCl, sehingga dapat diukur sebagai KTK. Kation-kation dapat ditukar (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , dan Na^+) diukur menggunakan Flamefotometer dan Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). NH_4^+ (KTK) diukur secara kolorimetri dengan metode Biru Indofenol (Balitan, 2005). Analisis kandungan logam berat Cd dalam tanah dilakukan dengan mengekstrak sampel tanah dengan cara pengabuan basah menggunakan double acid HNO₃ dan HClO₄. Kadar logam berat dalam ekstrak diukur menggunakan AAS (Balitan, 2005).

PEMBAHASAN

Data lengkap hasil pengujian berbagai karakteristik tanah yang dilakukan di laboratorium untuk 30 sampel tanah sawah dianalisis dan dievaluasi berdasarkan sebaran dan pengelompokannya. Analisis laboratorium dari beberapa parameter kimia tanah dapat terlihat pada Tabel 1. Data tersebut kemudian dikelompokkan sehingga dapat terlihat sebaran data yang dihasilkan untuk nilai rata-rata, standar deviasi, nilai maksimum serta minimumnya (Tabel 2).

Rata-rata penggunaan pestisida per meter ialah sebanyak 0,1062 L (Tabel 2) dengan banyaknya Cd dalam tanah ialah sebesar 0,0920 mg.kg⁻¹. Rata-rata C-organik dalam tanah ialah sebesar 2,351% sedangkan rata-rata nilai pH H₂O, pH KCl dan KTK ialah masing-masing sebesar 5,9567, 5,1373, dan 18,048 cmol.kg⁻¹ tanah. Analisis hasil laboratorium yang dilakukan memberikan variasi konsentrasi logam berat Cd di dalam tanah dari mulai 0,02 mg.kg⁻¹ sampai dengan 0,28 mg.kg⁻¹. Nilai ini masih berada di bawah ambang batas logam berat Cd yang diperbolehkan di dalam tanah yaitu 0,5 mg.kg⁻¹ berdasarkan (Ministry of State for Population and Enviromental of Indonesia, and Dalhousie, 1992). Logam berat dapat terakumulasi di dalam tanah secara bertahap sehingga memerlukan penanganan yang tepat agar tidak masuk ke dalam rantai

makanan. Besar kecilnya serapan logam berat Cd di dalam tanah yang berasal dari aplikasi pestisida dipengaruhi oleh beberapa hal, diantaranya adalah sifat bahan kimia, kepekatan bahan kimia dalam tanah, kandungan air tanah, dan sifat-sifat tanah lainnya seperti bahan organik dan liat (Mahendra

dkk., 2018). Serapan logam berat oleh tanaman juga merupakan faktor yang menyebabkan akumulasi logam berat pada manusia, biasanya ini terjadi akibat penggunaan media tanam yang telah tercemar.

Tabel 1. Hasil analisis sifat kimia tanah dan kandungan logam berat Cd pada tanah sawah

No	pH H ₂ O	pH KCl	C-Organik (%)	KTK (cmol.kg ⁻¹)	Logam Berat Cd (mg.kg ⁻¹)	Ukuran Lahan (m)	Banyaknya Pestisida (L)	Banyaknya aplikasi pestisida (L.m ⁻²)
1	6,23	5,41	1,75	15,03	0,16	27 x 3	3,5	0,04321
2	5,86	5,09	1,84	16,07	0,09	15 x 34,5	10	0,01932
3	6,07	5,27	2,28	16,07	0,19	9 x 6,5	10	0,17094
4	5,86	5,12	2,24	16,77	0,08	9 x 32	10	0,03472
5	5,70	4,97	2,15	16,79	0,28	27 x 3	3,5	0,04321
6	5,76	4,96	2,88	18,71	0,06	27 x 3	3,5	0,04321
7	5,92	5,19	2,10	17,67	0,12	28,8 x 6	3,5	0,02025
8	5,86	5,19	2,98	19,08	0,07	3,5 x 1,8	5,0	0,79365
9	5,83	4,93	3,13	20,08	0,12	1,5 x 97	10	0,06873
10	5,92	5,11	3,03	20,43	0,04	4,2 x 31,5	3,5	0,02646
11	6,00	5,04	1,88	15,17	0,04	13,2 x 4,5	5,0	0,08418
12	5,95	5,05	2,07	15,19	0,05	1,8 x 3,2	3,5	0,60764
13	5,84	5,15	2,22	15,46	0,04	5,1 x 12,3	3,5	0,05579
14	6,32	5,45	2,29	17,37	0,06	6,6 x 18	3,5	0,02946
15	5,95	5,12	2,14	15,41	0,05	4,5 x 18	5,5	0,06790
16	5,88	5,09	2,30	17,82	0,02	3,6 x 36	3,5	0,02701
17	6,03	5,2	2,44	21,49	0,06	3,3 x 33	3,5	0,03214
18	5,74	4,89	2,56	19,58	0,05	3,6 x 28,5	5,0	0,04873
19	5,99	5,06	2,88	21,67	0,23	1,4 x 4,8	5,0	0,74405
20	5,98	5,10	2,15	20,61	0,07	8,1 x 10,2	3,5	0,04236
21	5,83	4,86	1,98	14,79	0,03	16 x 58	3,5	0,00377
22	6,00	5,38	1,78	14,40	0,08	3,6 x 12	5,0	0,11574
23	5,91	4,94	2,11	19,75	0,05	9 x 19	5,0	0,02924
24	6,09	5,20	1,85	15,74	0,07	16 x 18	5,0	0,01736
25	5,85	4,96	1,73	14,94	0,28	14 x 92	5,0	0,00388
26	6,04	5,26	2,52	19,50	0,05	90 x 12	5,0	0,00462
27	6,00	5,25	2,63	19,02	0,09	22 x 80	5,0	0,00284
28	6,15	5,35	2,52	23,64	0,07	17 x 74	5,0	0,00397
29	6,02	5,28	3,04	22,67	0,10	36 x 95	5,0	0,00146
30	6,12	5,25	3,07	20,53	0,06	30 x 12	10	0,02778

Tabel 2. Deskripsi statistika variabel penelitian

Variabel	Cd Total (mg.kg)	C-Organik (%)	pH H ₂ O	pH KCl	KTK (cmol.kg ⁻¹)	Penggunaan Pestisida (L.m ⁻²)
Rata-rata	0,0920	2,3513	5,9567	5,1373	18,0480	0,1062
Maximum	0,2800	3,1300	6,3200	5,4500	23,6400	0,7936
Minimum	0,0200	1,7300	5,7000	4,8600	14,4000	0,0005
Std. Dev.	0,0689	0,4359	0,1405	0,1564	2,6245	0,2111
N	30	30	30	30	30	30

Analisis Model

Bentuk Fungsi dan Besaran Hubungan

Seluruh hasil estimasi model yang dihasilkan sudah melalui kaidah statistika yaitu pemenuhan asumsi regresi linier klasik yang berlaku (Gujarati, 2004). Persamaan (1) – Persamaan (6) telah diuji terhadap masalah pemenuhan asumsi regresi linier klasik yaitu multikolinearita dan heteroskedastisitas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh variabel independen dalam persamaan-persamaan tersebut tidak ada yang memiliki korelasi melebihi 0.8. Kemudian persamaan (1) sampai Persamaan (6)

memiliki masalah heteroskedastisitas pada tingkat signifikansi sebesar 5%. Oleh karena itu, estimasi persamaan-persamaan tersebut sudah memperhitungkan koreksi pada nilai standar error yang diakibatkan oleh masalah heteroskedastisitas tersebut dengan metode White. Hasil estimasi dari 6 model atau persamaan yang diujicobakan akan dipilih model dengan hasil terbaik dilihat dari nilai R² dan kriteria lainnya seperti hasil uji signifikansi dari variabel independennya. Untuk persamaan hasil akhir estimasi model linier dan non linier dapat terlihat di bawah ini :

$$C_{di} = -4.839^{***} - 0.055P_{esti} + 0.020KTK_i^{***} - 0.038KCl_i + 0.797H_2O_i^{***} + 0.032C_{organik} \quad (8)$$

$$\log(C_{di}) = -88.538^{***} - 0.115\log(P_{esti}) + 2.799\log(KTK_i)^{***} + 2.135\log(KCl_i) + 41.383\log(H_2O_i)^{***} + 0.828\log(C_{organik})^* \quad (9)$$

$$\log(C_{di}) = -46.338^{***} - 0.515P_{esti} + 0.152KTK_i^{***} + 0.299KCl_i + 6.546H_2O_i^{***} + 0.426C_{organik}^{***} \quad (10)$$

$$C_{di} = -9.745^{***} - 0.012\log(P_{esti}) + 0.366\log(KTK_i)^{***} - 0.152\log(KCl_i) + 5.045\log(H_2O_i)^{***} + 0.057\log(C_{organik}) \quad (11)$$

$$C_{di} = 41.825 + 1.320P_{esti} - 1.817P_{esti}^2 - 0.249KTK_i + 0.008KTK_i^2 + 30.584KCl_i - 2.935KCl_i^2 - 39.908H_2O_i +$$

$$3.347H_2O_i^2 - 0.539C_{organik} + 0.116C_{organik}^2 \quad (12)$$

$$C_{di} = -3.070^{***} + 0.796P_{esti}^{***} - 1.090P_{esti}^{2***} + 0.037KTK_i^{***} + 0.886\log(KCl_i)^{***} + 0.028H_2O_i^{2**} + 0.018C_{organik} \quad (13)$$

Keterangan :

* Signifikan pada tingkat signifikansi 10%

** Signifikan pada tingkat signifikansi 5%

*** Signifikan pada tingkat signifikansi 1%

Keenam model tersebut mempunyai nilai R² sebesar 0,99 yang artinya sangat baik karena mendekati 1, akan tetap mempunyai nilai F-hitung yang berbeda-beda. Untuk F-hitung model linier (1) adalah 24.135,63^{***}; model log-log (2) adalah 18.164,44^{***}; model log-lin (3) adalah 24.135,63^{***}; model lin-log (4) adalah 22.553,05^{***}; model kuadrat (5) adalah 28.129,15^{***} dan model campuran (6) adalah 34.464,21^{***}. Hasil estimasi model linier menunjukkan bahwa variabel pestisida tidak berpengaruh signifikan terhadap Cd di dalam tanah. Seluruh variabel karakteristik tanah kecuali pH KCl berpengaruh signifikan terhadap Cd di dalam tanah pada tingkat signifikansi 1% dan 10%. Hasil uji F juga menunjukkan bahwa secara bersama-sama seluruh variabel pestisida dan karakteristik tanah berpengaruh signifikan terhadap Cd dalam tanah. Untuk model log-log yang dibuat dalam bentuk logaritma menunjukkan hubungannya dalam bentuk logaritma/exponential. Sama dengan hasil pada model linier, hasil estimasi model log-log menunjukkan bahwa variabel pestisida tidak berpengaruh nyata terhadap Cd di dalam tanah. Seluruh variabel karakteristik tanah kecuali pH KCl berpengaruh

nyata terhadap peningkatann Cd di dalam tanah pada tingkat signifikansi 1% dan 10%. Hasil uji F juga menunjukkan bahwa secara bersama-sama seluruh variabel pestisida dan karakteristik tanah berpengaruh signifikan terhadap Cd dalam tanah.

Seluruh variabel di dalam model lin-log dibuat dalam bentuk logaritma kecuali variabel Cd sebagai variabel dependen. Hasil estimasi model log-lin menunjukkan bahwa variabel pestisida tidak berpengaruh nyata terhadap kandungan Cd di dalam tanah. Pada tingkat signifikansi 1% dan 10%, semua variabel karakteristik tanah kecuali pH KCl berpengaruh signifikan terhadap Cd dalam tanah. Hasil uji F juga menunjukkan bahwa secara keseluruhan, semua variabel pestisida dan karakteristik tanah berpengaruh signifikan terhadap Cd dalam tanah. Seluruh variabel di dalam model log-lin dibuat dalam bentuk linier kecuali variabel Cd sebagai variabel dependen. Berbeda dengan model sebelumnya, variabel karakteristik tanah kecuali KCl dan C-organik berpengaruh signifikan terhadap Cd di dalam tanah pada tingkat signifikansi 1%. Hasil uji F juga menunjukkan bahwa secara bersama-sama seluruh variabel pestisida dan karakteristik tanah

berpengaruh signifikan terhadap Cd dalam tanah. Seluruh variabel independen dalam model kuadratik dibuat dalam bentuk kuadratik yang nantinya dapat digunakan untuk menaksir optimalisasi nilai Cd dengan karakteristik variabel independen yang dimiliki. Hasil estimasi model kuadratik menunjukkan bahwa variabel pestisida berpengaruh signifikan terhadap Cd di dalam tanah pada tingkat signifikansi 10%. Berbeda dengan model sebelumnya, seluruh variabel karakteristik tanah tidak berpengaruh nyata terhadap Cd di dalam tanah. Hasil uji F menunjukkan bahwa secara bersama-sama seluruh variabel pestisida dan karakteristik tanah berpengaruh signifikan terhadap Cd dalam tanah.

Hasil estimasi model gabungan dibuat untuk melihat karakteristik hubungan masing-masing variabel independen terhadap Cd dalam tanah. Variabel pestisida memiliki hubungan kuadratik dengan Cd dalam tanah. Variabel KTK memiliki hubungan linier dengan Cd dalam tanah. Kemudian pH KCl memiliki hubungan lin-log dengan Cd. Lebih jauh, pH H₂O memiliki hubungan kuadratik dengan Cd dalam tanah. Terakhir, C-organik memiliki hubungan linier dengan Cd dalam tanah. Hasil estimasi model gabungan menunjukkan bahwa variabel pestisida dengan bentuk kuadratik berpengaruh signifikan terhadap Cd di dalam tanah pada tingkat signifikansi 1%. Berbeda dengan model sebelumnya, seluruh variabel karakteristik tanah kecuali variabel C-organik berpengaruh signifikan terhadap Cd di dalam tanah pada tingkat signifikansi 5% dan 1%. Hasil uji F menunjukkan bahwa secara bersama-sama seluruh variabel pestisida dan karakteristik tanah berpengaruh signifikan terhadap Cd dalam tanah.

Hasil keenam estimasi model menghasilkan hasil yang berbeda-beda untuk fungsi hubungannya. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa bentuk fungsi hubungan dapat menentukan signifikansi dari variabel dan tanda koefisien. Hampir pada seluruh model menghasilkan hubungan negatif antara penggunaan pestisida dan sifat tanah yang memberikan pengaruh yang tidak berbeda nyata dengan Cd di dalam tanah kecuali untuk model kuadratik dan model gabungan. Pada model kuadratik dan model gabungan, penggunaan pestisida berpengaruh positif dan signifikan terhadap Cd di dalam tanah. Untuk studi kasus penelitian ini, yaitu tanah sawah di daerah Ciparay, sebaran data kandungan sifat kimia secara umum untuk tingkat kemasaman tanah (pH) berkisar antara 4,6 sampai 6,15 yang masuk kedalam kriteria masam sampai

netral, sedangkan untuk kandungan C-organik yaitu 1,73% sampai 3,17% yang berarti rendah sampai tinggi, dan kapasitas tukar kation (KTK) antara 14,4 me.100g⁻¹ sampai 23,64 me.100g⁻¹.

Secara umum, keragaman Cd di dalam setiap plot dipengaruhi oleh mekanisme dari sifat tanahnya. Penyerapan logam berat Cd dipengaruhi oleh karakteristik dari sifat kimia tanah, salah satunya adalah tingkat kemasaman tanah. Hal ini juga didukung oleh hasil kajian (Sustawan *et al.*, 2016) yang menyatakan bahwa tingkat penyerapan Cd dalam tanah akan meningkat seiring penurunan pH dan berfungsi sebaliknya. Mekanisme pengikatan juga memegang peranan besar di dalam ketersediaan kandungan logam berat Cd di dalam tanah, sehingga reaksi dan fraksi tanah yang dapat mengikat ion Cd menjadi hal yang sangat penting untuk diketahui. Aktivitas ion Cd dipengaruhi oleh senyawa-senyawa seperti ligan yang dapat membentuk kompleks stabil Cd-ligan, gugus karboksil dan fenoksil yang berperan di dalam pengikatan unsur logam mikro (Alloway, 1990). Selain itu pula, kandungan bahan organik juga mempunyai peranan penting di dalam ketersediaan logam berat di dalam tanah. Apabila tanah mengandung bahan organik yang cukup tinggi, maka tanah tersebut akan dapat mengikat kation yang lebih banyak, yang disebabkan oleh kemampuan gugus karboksil di dalam bahan organik yang dapat mengikat kation-kation. sehingga mempunyai nilai KTK yang tinggi (Ariyanto dkk., 2005). Beberapa sumber organik juga dapat meningkatkan ketersediaan logam berat dan menurunkan pH tanah (Abror dkk., 2013).

Apabila melihat data hasil pembuktian beberapa model regresi yang diterapkan, maka dapat dilihat bahwa penggunaan berbagai model harus dilakukan untuk mendapatkan hasil analisis yang tepat. Walpole (1992) mendefinisikan bahwa persamaan regresi dengan fungsi hubungan antar variabel yang tepat dengan satu atau lebih variabel independen dapat meramalkan dengan baik nilai-nilai variabel dependennya. Melalui pemahaman tersebut, perbedaan antara peubah bebas (variabel independen) satu daerah dengan daerah yang lain termasuk bentuk fungsi hubungannya tentu saja akan berbeda, sehingga mempengaruhi kandungan Cd di dalam tanah. Jika berdasarkan teori sifat kimia tanah, penggunaan pestisida dan seluruh karakteristik tanah dapat berpengaruh positif maupun negatif terhadap kandungan Cd di dalam tanah. Akan tetapi, secara regresi dan korelasi harus dilihat pula signifikansinya dari setiap peubah bebas, sehingga dapat didefinisikan

hasil analisis tersebut ke dalam hubungan antara variabelnya. Oleh karena itu, untuk studi kasus penelitian ini, dari keenam model yang diujikan, model campuran lebih mendekati dengan teori ilmu tanah yang ada. Hal ini didukung hasil pemodelan yang dilakukan memperlihatkan nilai seluruh variabel berpengaruh nyata terhadap kandungan Cd di dalam tanah dibandingkan dengan model yang lain. Akan tetapi, bentuk hubungan antara kandungan Cd dengan penggunaan pestisida dan karakteristik sifat kimia tanah menghasilkan bentuk hubungan yang bervariasi (logaritma, kuadrat atau linier). Lebih jauh, hampir seluruh variabel kecuali variabel C-organik mempengaruhi secara signifikan Cd di dalam tanah. Beberapa sifat tanah seperti KTK, pH dan kandungan liat dapat menyangga kandungan Cd di dalam tanah menjadi lebih tinggi (Kunaefi dkk., 2010). Karakteristik dari logam berat Cd yang mempunyai daya afinitas tinggi, membuat kemampuan pertukaran logam berat ini di kompleks pertukaran semakin tinggi (Alloway, 1995).

Penggunaan pestisida dan sifat tanah terhadap kandungan logam Cd dapat memberikan dampak yang berbeda-beda. Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk melihat model yang terjadi akibat pengaplikasian pestisida ke dalam tanah. Bahkan terdapat kajian untuk melihat aspek secara menyeluruh mengenai konsentrasi logam berat yang berkaitan dengan aplikasi penggunaan pestisida tersebut karena melebihi batas yang diizinkan sehingga dapat berpotensi mencemari tanah (Alengebawy *et.al.*, 2021). Pada kajian yang dilakukan oleh Tariq *et al.* (2023) juga memperlihatkan bahwa terdapat residu acetamiprid dalam tanah yang berkorelasi positif kuat dengan kandungan Cu dan berkorelasi negatif dengan kandungan Cr, sementara imidacloprid dalam tanah berkorelasi negatif dengan Ni. Bahkan untuk memperkirakan kandungan logam berat secara akurat, terdapat kajian mengenai model kecerdasan buatan hibrid yang mengintegrasikan model *Integrating Least Absolute Shrinkage And Selection Operator* (LASSO), *Genetic Algorithm* (GA) and *Error Back Propagation Neural Network* (BPNN), yaitu model LASSO-GA-BPNN (Shi *et.al.*, 2023). Model non linier sederhana pernah diaplikasikan oleh (Wennergren & Stark, 2020) yang menganalisis pengaruh penggunaan pestisida terhadap perubahan populasi binatang tertentu. Selain berbagai model linier, model non linier yang sering dipergunakan yaitu model yang berbentuk *concave* dan kuadrat. Model non linier yang digunakan ternyata mampu

menjelaskan dan memprediksi dengan baik populasi hewan yang terjadi akibat adanya pencemaran pestisida.

Terkait dengan hasil penelitian ini, fungsi hubungan campuran yang menjadi model terbaik dalam penelitian ini memberikan implikasi bahwa perlu adanya pemilihan variabel pestisida dan karakteristik tanah, (kecuali kandungan C organik) yang pola perlakuannya tidak semuanya sama agar kandungan Cd tanah ini dapat dikontrol dengan baik. Besaran variabel pestisida dan karakteristik tanah dan dampaknya terhadap kandungan Cd tanah dapat ditaksir dengan menggunakan koefisien-koefisien variabel yang berbeda pola hubungannya dalam model tersebut. Hasil kajian ini memperlihatkan bahwa model campuran mampu memberikan gambaran fungsi hubungan yang dapat menjabarkan kaitan antara kandungan logam berat Cd di dalam tanah di lokasi kajian sebagai akibat aplikasi pestisida serta pengaruh sifat kimia tanah. Selain itupula, input dalam sistem budi daya pertanian menjadi faktor penting didalam akumulasi kandungan logam berat Cd di dalam tanah. Berbagai sumber yang dapat mempengaruhi akumulasi kandungan logam berat Cd harus dikurangi, serta berbagai upaya untuk dapat mengurangi akumulasi kandungan logam berat harus diaplikasikan untuk dapat mendukung sistem pertanian yang berkelanjutan.

SIMPULAN

Hasil estimasi berbagai bentuk fungsi hubungan menunjukkan bahwa model campuran ialah model yang paling baik untuk menggambarkan hubungan antara penggunaan pestisida dan parameter sifat tanahnya, dilihat dari faktor signifikansinya terhadap semua faktor dibandingkan model yang lainnya. Berdasarkan model campuran tersebut, seluruh variabel pestisida dan karakteristik tanah (kecuali kandungan C organik) memiliki hubungan yang positif dengan signifikansi yang tinggi (berbeda nyata pada taraf signifikansi 1%) dari setiap variabel peubah bebasnya terhadap kandungan Cd di dalam tanah. Kajian ini juga memperlihatkan kandungan logam berat Cd dipengaruhi oleh variasi penggunaan pestisida didalam sistem budi daya, dan beberapa sifat kimia tanah seperti pH dan KTK tanah. Fungsi hubungan ini diperoleh mengikuti kondisi aktual di lokasi kajian, yang dapat memberikan hasil yang berbeda apabila kita terapkan pada lokasi lain dengan karakteristik sifat tanah serta penggunaan pestisida yang berbeda.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya penulis ucapkan kepada DRPMI Universitas padjadjaran yang telah membiayai kajian ini dalam SKEMA HIU UNPAD Tahun 2017 serta berbagai pihak terkait yang membantu penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abror, M, T Sabrina, dan B Hidayat. 2013. Pengaruh biomassa Azolla terhadap status logam berat timbal (Pb) pada tanah. *Jurnal Agroekoteknologi Universitas Sumatera Utara*. 1(3): 2013. Doi: 10.32734/jaet.v1i3.3185.
- Ali, H, E Khan, and MA Sajad. 2013. Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications. *Chemosphere*. 91(2013): 869-881.
- Alengebawy, A, ST Abdelkhalek, SR Qureshi, and MQ Wang. 2021. Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: Ecological risks and human health implications. *Toxics*. 9(3): 42. doi: 10.3390/toxics9030042
- Alloway, BJ. 1995. *Heavy Metals in Soils*. Second Edition. Blackie Academic & Profesional.
- Alloway, BJ, and DC Ayres, 1997. *Chemical Principles of Environmental Pollution*. Blackie Academic and Profesional. London.
- Ariyanto, DP, Indrowuryanto, dan H Widijanti. 2005. Pengaruh jarak buangan air limbah industri di daerah Jaten - Karanganyar terhadap kadar chromium dalam air dan tanah permukaan Saluran Air Pungkuk. *Jurnal Caraka Tani*. 20(2): 68-73.
- Atmojo. SW. 2003. *Peranan Bahan Organik Terhadap Kesuburan Tanah dan Upaya Pengelolaannya*. Universitas Sebelas Maret Press: Surakarta. (Diakses 20 Juli 2023).
- Balai Penelitian Tanah. 2005. *Petunjuk Teknis analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air dan Pupuk*. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Departemen Pertanian.
- Dajan, A. 1995. *Pengantar Metode Statistik Jilid I*, Jakarta, Pustaka LP3ES.
- Gujarati, D. 2004. *Basic Econometrics*. Fourth Edition. McGraw-Hill, USA.
- Joy, B, R Sudirja, ET Sofyan, R Harryanto, O Mulyani, and G Herdiabsyah. 2019. Evaluation of soil fertility status for rice, corn, soybean on suboptimal land in West Java Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 393(1): 012030.
- Kabata-Pendias, A. 2011. *Trace Elements in Soils and Plants*. 4th Ed. CRC Press, USA.
- Kunaefi, TD, K Oginawati, dan N Madiati. 2010. Daya Sangga Tanah terhadap Kadmium serta Pengaruh Penambahan Sisa Tanaman terhadap Pertumbuhan dan Produksi Padi Varietas IR-64. Departemen Teknik Lingkungan. ITB. Bandung.
- Lin, D, Y Ouyang, CH Huang, and DY Huang. 2010. Characterization of heavy metals from banana farming soils. *Clean – Soil Air Water*. 38(5-6): 430-436.
- Mawaddah, RA, El Sugiarto, dan Kurniawati, E. 2022. Faktor yang Berhubungan dengan tekanan darah pada petani di Wilayah Kerja Puskesmas Paal Merah II Kota Jambi tahun 2021. *Jurnal Inovasi Penelitian*, 2(10): 3297-3302.
- Mautuka, ZA, A Maifa, dan M Karbeka. 2022. Pemanfaatan biochar tongkol jagung guna perbaikan sifat kimia tanah lahan kering. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*. 8(1): 201-208.
- Mahendra, R, IM Siaka, dan IE Suprihatin. 2018. Bioavailabilitas logam berat Pb, dan Cd dalam tanah perkebunan budi daya kubis di daerah Kintamani Bangli. *Ecotropic Jurnal Ilmu Lingkungan*. 12(1): 42-49.
- Ministry of State for Population and Enviromental of Indonesia, and Dalhousie, University Canada.1992. *Environmental Management in Indonesia. An Interim Report of Soil Quality Standards for Indonesia*.
- Mulyani, O, Y Machfud, A Setiawan, and B. Joy. 2019. Potential of local organic matters in Jatinangor West Java Indonesia as raw materials for organic fertilizer. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*. 393: 012048.
- Mulyani, O, B Joy, and D Kurnia. 2021. A case study in Cianjur West Java, Indonesia: A correlation humic and fulvic acids with mineralogical composition and physico-chemical analysis using partial least square. *Journal of Ecological Engineering*. 22 (5): 191-204.
- Mulyani, O, B Joy, and D Kurnia. 2022. The various forms of cow manure waste as adsorbents of heavy metals. *Applied Sciences*. 12(11): 5763.
- Palar, H, 2008. *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*. Penerbit Rineka Cipta. Jakarta.
- Shi, S, M Hou, Z Gu, C Jiang, W Zhang, M Hou, C Li,

- and Z Xi. 2023. Estimation of heavy metal content in soil based on machine learning models. *Lands*. 11(7): 1037. <https://doi.org/10.3390/land11071037>.
- Sustawan, G, IDK Satrawidana, and NM Wiratini. 2016. Analisis logam Pb dan Cd pada tanah perkebunan sayur di Desa Pancasari. *Jurnal Wahana Matematika dan Sains*. 9(2): 44–51.
- Tariq, SR, M Shafiq, and GA Chotana. 2023. Distribution of heavy metals in the soils associated with the commonly used pesticides in cotton fields. *Scientifica (Cairo)*. 2016: <https://doi.org/10.1155/2016/7575239>.
- Verloo, M. 1993. Chemical Aspects of Soil Pollution. In *ITC Gen Publication Series 4*. 17-46 pp.
- Walpole, RE, 1992. Pengantar Statistika. Edisi Ke-3. Terjemahan. PT. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
- Wennergren, U, and J Stark. 2020. Modeling long-term effects of pesticides on populations: Beyond just counting dead animals. *Ecological Applications*. 10(1): 295–302.