

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pencemaran

Pencemaran adalah masuknya secara disengaja atau tidak disengaja makhluk hidup, zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam lingkungan oleh kegiatan manusia atau proses alam sehingga kualitas lingkungan turun yang menyebabkan lingkungan menjadi kurang atau tidak dapat berfungsi lagi sesuai dengan peruntukannya (Undang-undang Nomor 32 Tahun 2009). Tanah, air, dan udara menjadi komponen penting obyek terjadinya pencemaran. Tanah (lahan pertanian) merupakan salah satu ekosistem tanah yang paling terdampak akibat pencemaran lingkungan. Penggunaan pestisida dalam praktek budidaya pertanian menjadi bagian penting penyebab terjadinya pencemaran tanah di lahan pertanian (Onder *et al.*, 2011; Khan, 2016). Dari sudut pandang pencemaran, lahan pertanian memiliki dua peranan penting yaitu sebagai sumber (*source*) dan penerima (*sink*). Lahan pertanian sebagai sumber senyawa POPs, karena lahan pertanian merupakan tempat timbunan residu penggunaan senyawa POPs dan secara alami dapat berpindah ke tempat lain. Sedangkan lahan pertanian sebagai penerima, karena lahan pertanian menerima material dari luar pertanian melalui sistem pengairan dan aliran air yang lain.

Selain itu, pencemaran lahan pertanian juga dapat diakibatkan oleh pencemaran sektor kegiatan lain seperti industri dan pertambangan melalui aliran air pengairan. Penggunaan pestisida diperkirakan menjadi penyebab pencemaran lingkungan tanah di lahan pertanian, karena penambahan bahan pencemarnya dapat berulang-ulang dalam periode waktu yang pendek (Khan, 2016).

Senyawa POPs dari insektisida merupakan bahan yang digunakan petani tempo dulu saat berlangsungnya revolusi hijau, namun karena sifat-sifatnya senyawa ini masih mudah ditemukan di lahan pertanian. Senyawa POPs termasuk jenis cemaran yang tidak mudah mengalami degradasi secara alami (*nondegradable*), dan secara umum dikenal sebagai bahan berbahaya dan beracun (B3). Limbah B3 dapat berpengaruh buruk terhadap sumberdaya alam dan lingkungan (UU.101/2014).

2.2. Pestisida

Begitu orang berbicara pestisida yang ada di benak kita adalah obat-obatan pertanian dan selalu dihubungkan dengan bahan kimia buatan. Tidak jelas, kapan pestisida ditemukan pertama kali, namun secara global tahun 1867 disebutkan sebagai penanda awal perkembangan sejarah pestisida modern di dunia. Pestisida diperkirakan masuk di Indonesia sekitar tahun 1940-an.

Pestisida adalah bahan yang digunakan untuk mengendalikan, menolak, atau membasmi organisme pengganggu (FAO, 2001). Sedangkan menurut PP.6/1995 pestisida sebagai zat atau senyawa kimia, zat pengatur tumbuh atau perangsang tumbuh, bahan lain, serta mikroorganisme atau virus yang digunakan untuk perlindungan tanaman.

Menurut Permentan 107/2014 pestisida adalah semua zat kimia dan bahan lain serta jasad renik dan virus yang dipergunakan untuk:

- a. memberantas atau mencegah hama-hama dan penyakit yang merusak tanaman, bagian-bagian tanaman atau hasil-hasil pertanian;
- b. memberantas rerumputan;
- c. mematikan daun dan mencegah pertumbuhan yang tidak diinginkan;
- d. mengatur atau merangsang pertumbuhan tanaman atau bagian-bagian tanaman tidak termasuk pupuk;
- e. memberantas atau mencegah hama-hama luar pada hewan-hewan piaraan dan ternak;
- f. memberantas atau mencegah hama-hama air;
- g. memberantas atau mencegah binatang-binatang dan jasad-jasad renik dalam rumah tangga, bangunan dan dalam alat-alat pengangkutan; dan
- h. memberantas atau mencegah binatang-binatang yang dapat menyebabkan penyakit pada manusia atau binatang yang perlu dilindungi dengan penggunaan pada tanaman, tanah, dan air.

2.2.1. Penggolongan Pestisida

Dalam perkembangannya pestisida tidak hanya digunakan untuk tanaman pertanian tetapi berkembang secara luas untuk hewan peliharaan, ikan, dan hama rumah tangga. Pestisida memiliki bahan aktif dan organaisme target yang sangat

bervariasi dan luas, oleh karena itu pestisida juga digolongkan berdasarkan secara luas dan bervariasi.

2.2.1.1. Pestisida menurut organisme target atau sasaran dibedakan menjadi :

- a. Insektisida yaitu pestisida yang digunakan untuk mengendalikan hama berupa serangga (insekta);
- b. Fungisida yaitu pestisida yang digunakan untuk mengendalikan penyakit yang disebabkan oleh jamur (fungi);
- c. Bakterisida yaitu pestisida yang digunakan untuk mengendalikan penyakit yang disebabkan oleh bakteri/mikroba;
- d. Herbisida yaitu pestisida yang digunakan untuk mengendalikan rumput-rumputan dan tumbuhan pengganggu lainnya pada tanaman pokok;
- e. Rodentisida yaitu pestisida yang digunakan untuk mengendalikan hama/hewan pengerat pada tanaman dan rumah tangga;
- f. Akarisida yaitu pestisida yang digunakan untuk mengendalikan hama yang disebabkan oleh tungau dan kutu;
- g. Moluskisida yaitu pestisida yang digunakan untuk mengendalikan siput, keong, dan semacamnya pada tanaman pertanian;
- h. Nematisida yaitu pestisida yang digunakan untuk mengendalikan hama yang disebabkan oleh nematode tanah.

2.2.1.2. **Pestisida menurut struktur bahan kimia penyusunnya.**

Berdasarkan bahan kimia penyusunnya dibedakan menjadi:

- a. Orgnoklorin (OCPs) yaitu pestisida yang mengandung unsur karbon (C), hidrogen (H) dan klor (Cl). OCPs termasuk golongan senyawa organik yang mengandung atom Cl yang terikat oleh ikatan kovalen pada struktur karbon (Shukla *et al.*, 2014). OCPs mempunyai rumus umum $C_xH_yCl_z$, dan digolongkan menjadi tiga sub golongan utama, yaitu: (1) kelompok Cyclodienes yang terdiri dari Aldrin, Klordan, Dieldrin, Heptachlor, Endrin, Toksopen, dan Mirex, (2) kelompok Hexachlorocyclohexan (Lindan), dan (3) kelompok Derivat Chlorinated-ethan (DDT).
- b. Organofosfat (OPs) yaitu pestisida yang mengandung unsur phosphate (P), hidrogen (H), dan karbon (C). OPs terdiri dari satu gugus atau lebih fosfor yang terikat pada molekul organik. OPs dibuat dari molekul organik yang

direaksikan dengan fosforilat. Selain digunakan sebagai pestisida, OPs juga banyak digunakan dalam berbagai bahan campuran produk penghambat api, pemlastis, dan aditif pada oli mesin (Van and Boer, 2012).

- c. Karbamat yaitu pestisida yang mengandung gugus karbamat (NH_2COOH) melalui proses penggantian satu atau lebih atom H dengan gugus organik lainnya. Karbamat pertama kali dibuat tahun 1967 di Amerika Serikat. Karbamat merupakan insektisida yang bersifat sistemik dan berspektrum luas sebagai nematosida dan akarisida. Insektisida karbamat mulai digunakan di Indonesia sejak dilarangnya insektisida golongan OCs. Karbamat merupakan racun kontak yang dapat menurunkan aktivitas enzim kolinesterase darah dan bekerja sebagai racun saraf. Karbamat sangat efektif terhadap serangga (insekta), memiliki toksisitas rendah terhadap hewan mamalia. Pada suhu tinggi meningkatkan efektivitas terhadap hama, dengan tingkat residu sedang. Karbamat mudah terurai secara alami terutama dalam suasana basa.
- d. Piretroid merupakan senyawa organik yang mirip dengan piretrin alami, yang diproduksi oleh bunga piretrum (krisan). Piretroid merupakan turunan dari ester keto alkohol dari asam krisan dan piretrogenik, serta lebih stabil di bawah sinar matahari. Piretroid dapat membunuh hama dan merangsang pertumbuhan, sehingga memiliki pengaruh yang nyata pada peningkatan produksi. Piretroid dikembangkan dari piretrin yang dihasilkan dari ekstrak bunga krisan. Piretrin alami sudah digunakan untuk mengusir serangga sudah sangat lama bahkan ribuan tahun yang lalu, terdaftar sebagai pestisida komersial sejak sekitar tahun 1950an (Katsuda, 2011). Piretrin dijual dalam bentuk bubuk yang dapat dibasahi, konsentrat yang dapat diemulsi, butiran, debu, aerosol, mikroenkapsulasi, flowable dan tablet (Malimbwi *et al.*, 2013).

Piretrin dapat dengan mudah terdegradasi (*degradable*) di lingkungan. Di alam, sinar UV membantu memecah senyawa piretroid menjadi senyawa yang tidak berbahaya (Maina *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2020). Piretrin lebih ramah lingkungan, dan dianggap tidak menimbulkan bahaya jika penggunaannya sesuai anjuran. Piretroid pada produk bahan pangan dapat diturunkan melalui proses pemasakan (Ahmed *et al.*, 2011).

2.2.1.3 Pestisida menurut cara kerja

Menurut cara kerjanya pestisida dibedakan menjadi:

- a. Racun perut yaitu pestisida yang dapat mempengaruhi organisme target ketika racun sudah masuk ke dalam perut. Untuk masuk ke dalam perut pestisida harus diaplikasikan ke bagian tanaman yang sering menjadi sumber makanan dari serangga target. Pestisida ini biasanya ditujukan untuk serangga hama yang melakukan gangguan pada malam hari dimana fisik hama sulit dijangkau dengan aplikasi penyemprotan.
- b. Racun kontak yaitu pestisida yang dapat mempengaruhi organisme target ketika mengalami kontak langsung dengan pestisida. Oleh karena itu sedapat mungkin aplikasinya dilakukan saat hewan target sedang melakukan aktivitas diluar tempat persembunyiannya.
- c. Racun gas atau fumigant yaitu pestisida yang dapat mempengaruhi organisme target dengan hembusan gas atau uap melalui sistem pernafasan. Pestisida ini sering juga disebut sebagai racun pernafasan. Biasanya pestisida jenis ini sering digunakann untuk mengendalikan hama gudang dan juga pengomposan hama tikus.

2.2.1.4. Pestisida menurut bentuk formulanya

Setiap pestisida memiliki formula atau bentuk produk yang berbeda, yaitu:

- a. Cairan, yaitu pestisida yang kemasannya dalam bentuk cairan dalam wadah berupa botol kaca, plastik, aluminium foil dan lainnya. Terdapat dua bentuk formula pestisida bentuk cairan yaitu *Emultion concentrate-EC* dan *Water Soluble Concentrate-WSC*.
- b. Butiran (*Granula-G*), yaitu pestisida yang kemasannya dalam bentuk butiran. Biasanya diwadahi dengan kantong plastik atau aluminium foil. Untuk membedakan dengan formula yang lain, pada setiap kemasan diberikan kode G pada setiap etiket kemasannya.
- c. Tepung, yaitu pestisida yang kemasannya dalam bentuk tepung. Terdapat dua formula produk pestisida tepung yaitu *Wettable powder-WP* dan *water-soluble powder-SP*. Kemasan untuk pemasaran produk biasanya berbentuk kantong yang berasal dari plastik, aluminium foil, dan juga kertas dengan

bagian dalam berlapisan lapisan kedap air. Pestisida dengan formula WP merupakan pestisida yang tidak dapat larut dalam air, sehingga membentuk endapan di bagian bawah larutan. Oleh karena itu dalam aplikasinya harus dilakukan pengadukan secara rutin, agar pestisida dalam kondisi tercampur dan ikut keluar dari lubang nozel. Sedangkan formula SP yaitu pestisida bentuk tepung yang dapat larut dalam air, dan tidak memerlukan pengadukan sepanjang waktu aplikasinya. Untuk membedakan keduanya adalah dengan melihat etiket pada setiap kemasan dengan kode produk WP dan SP.

- d. Debu (*dust-D*), yaitu pestisida bentuk tepung yang aplikasinya dengan cara dihembuskan dengan udara bertekanan tinggi. Pada setiap etiket produknya diberikan tanda kede D sebagai informasi bentuk formula.

2.2.2. Penggunaan insektisida senyawa POPs di Indonesia

Insektisida senyawa POPs disebut juga dengan insektisida golongan organoklorin, dan digunakan untuk mengendalikan serangga hama pada tanaman budidaya. Insektisida senyawa POPs masuk ke Indonesia sejak tahun 1940-an, dan terus berkembang pesat saat berlangsungnya revolusi hijau. Insektisida senyawa POPs menjadi salah satu komponen utama revolusi hijau pertanian di Indonesia, dan masuk dalam daftar komponen program peningkatan produksi pertanian.

Program BIMAS, INMAS, INSUS merupakan program-program peningkatan produksi beras nasional yang paketnya terdapat penggunaan insektisida senyawa POPs (Fagi *et al.*, 2019). Insektisida senyawa POPs banyak digunakan untuk mengendalikan hama penggerek batang padi dan wereng coklat dalam rangka peningkatan produksi beras nasional. Pada dekade tahun 1970-an, serangan penggerek batang padi dan wereng coklat dapat diatasi dengan penggunaan insektisida senyawa POPs, meski diikuti resistensi dan resurgensi dari kedua hama tersebut.

Insektisida senyawa POPs digunakan secara masif hingga tahun 90-an, dan mulai digeser oleh insektisida generasi kedua dari golongan organofosfat. Belakangan diketahui bahwa insektisida senyawa POPs menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, sehingga mendorong komunitas lingkungan dunia untuk memasukkan insektisida ini sebagai bahan yang dilarang digunakan. Di

Indonesia insektisida senyawa POPs dilarang digunakan untuk kegiatan pertanian sejak 2007 (Permentan 01/2007) dan untuk seluruh penggunaan berbagai bidang sejak 2009 bersama senyawa POPs lainnya (UU.19/2009).

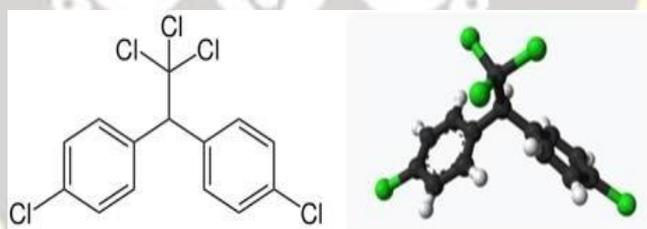
2.3. Senyawa POPs asal pestisida

2.3.1. Karakteristik senyawa POPs dari kelompok pestisida

Secara umum senyawa POPs dicirikan memiliki tekanan uap <1000 Pa sehingga mudah menguap, dengan waktu paruh >6 bulan dalam prase tanah >2 bulan dalam prase air dan >2 hari pada prase udara, mudah mengalami akumulasi dalam jaringan makhluk hidup yang ditandai dengan nilai koefisien oktanol-water (K_{ow}) ≤ 5 (Fiedler *et al.*, 2019). Ciri penting lainnya adalah berdampak buruk terhadap kesehatan makhluk hidup dan lingkungan (Yuantari, 2015; Pamungkas, 2017; Alharbi *et al.*, 2018; Fiedler *et al.*, 2019).

Berikut adalah bahan aktif insektisida senyawa POPs yang telah dilarang penggunaannya di Indonesia berdasarkan UU.19/2009 dan Permentan 01/2007.

- (1). DDT (*dichloro diphenyl trichloroethane*) (Rogers *et al.*, 1953, Patil *et al.*, 1970; Zitko, 2003)



Gambar 2. Struktur molekul DDT

Rumus Molekul	: $C_{14}H_9Cl_5$ Massa
molar	: $354,48 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
Densitas	: $0,99 \text{ g/cm}^3$
Titik Lebur	: $108,5 \text{ }^\circ\text{C}$
Titik Didih	: $260 \text{ }^\circ\text{C}$

DDT banyak digunakan untuk mengendalikan hama pada tanaman budidaya. DDT berkembang dan mendapat sambutan dari petani secara cepat di kawasan iklim tropis sekitar khatulistiwa termasuk Indonesia. Penemuan DDT telah mengantar Swiss Paul Hermann Müller mendapatkan hadiah Nobel pada tahun 1948. Penggunaan DDT banyak menimbulkan masalah lingkungan terutama menurunnya populasi burung. Di lingkungan, DDT dapat mengalami dehidroksinasi membentuk diklorodifenildikloroetilen (DDE) dengan katalis garam-garam besi, aluminium, atau kromium.

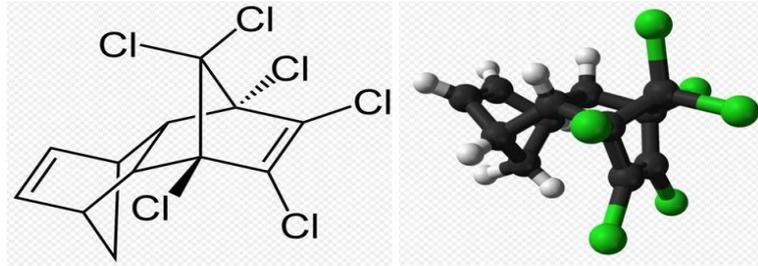
DDT dilarang digunakan di Amerika Serikat tahun 1971, Di Indonesia DDT dilarang digunakan untuk pengendali OPT tanaman pertanian sejak 2009 (UU.19/2009) dan masih digunakan secara terbatas untuk mengendalikan perkembangan nyamuk penyebab demam berdarah di sebagian besar dunia (Lusiyana, 2014; Quinones *et al.*, 2015) termasuk Indonesia.

DDT juga digunakan untuk bidang non pertanian, untuk mengendalikan vektor penyakit demam berdarah (DB), namun belakangan di informasikan telah terjadi resistensi serangga vektor penyebab DB. Di negara-negara Afrika (Reid and McKenzie, 2016), di Sudan (Abuelmaali *et al.*, 2013), di Mali (Cisse *et al.*, 2015), di Nigeria (Oduola *et al.*, 2012).

DDT dijual dengan merk dagang: Agritan, Anofex, Arkotine, Azotox, Bosan Supra, Bovidermol, Chlorophenothan, Chloropenothane, Clorophenotoxum, Citox, Clofenotane, Dedelo, Deoval, Detox, Detoxan, Dibovan, Dicophane, Didigam, Didimac, Dodat, Dykol, Estonate, Genitox, Gesafid, Gesapon, Gesarex, Gesarol, Guesapon, Gyron, Haverextra, Ivotan, Ixodex, Kopsol, Mutoxin, Neocid, Parachlorocidum, Pentachlorin, Pentech, PPzeidan, Rudseam, Santobane, Zeidane, Zerdane.

(2). Aldrin (Patil *et al.*, 1970; Jager, 1970; Zitko, 2003)

Rumus Molekul	: C ₁₂ H ₈ Cl ₆ Massa
molar	: 364.90 g·mol ⁻¹
Densitas	: 1.60 g/mL
Titik Lebur	: 104 °C



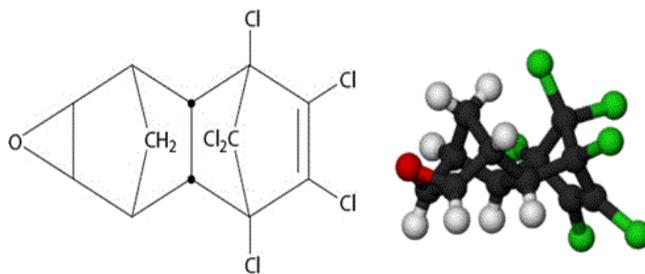
Gambar 3. Struktur molekul Aldrin

Aldrin diperkenalkan sejak perang dunia ke-2 (Perry *et al.*, 2013) dan digunakan secara luas hingga tahun 1990-an. Di beberapa negara uni eropa Aldrin dilarang sejak 1974, tetapi di beberapa negara tropis Aldrin masih digunakan secara luas untuk pertanian hingga tahun 1980 (Meire *et al.*, 2012), dan secara bertahap sejak 1987 produksi Aldrin dikurangi (Neves *et al.*, 2018). Secara global Aldrin diusulkan untuk dilarang penggunaannya dalam Konvensi Stockholm 2001 (UNEP, 2002) dan sejak 2009 di Indonesia juga diarang penggunaan pestisida ini (UU.19/2009). Aldrin disebut juga dengan heksakloro-heksahidro-dimetanonaftalena. Merk dagang Aldrin adalah Aldrec, Aldrex, Aldrex 30, Aldrite, Aldrosol, Alttox, Compound 118, Drinox, Octalene, Seedrin.

Aldrin tidak dapat terbentuk secara alami, berbentuk padatan tak berwarna dan banyak digunakan sebagai pestisida perlakuan benih dan hama tanah seperti kepinding tanah dan uret, rayap, cacing akar, kumbang air, dan belalang pada tanaman jagung dan kentang serta efektif mengendalikan rayap pada kayu (NRC. 1982).

Aldrin tidak larut dalam air, tetapi mudah larut dalam pelarut organik dan terdegradasi sangat lambat di lingkungan. Oleh makhluk hidup tertentu aldrin berubah menjadi dieldrin (Xiao *et al.*, 2011; Purnomo, 2017). Pada kondisi panas aldrin akan terurai dengan mengeluarkan fosgen dan HCl yang beracun. Aldrin bekerja sebagai racun sistematik dan dapat menimbulkan keracunan akut ataupun kronis. Aldrin juga dapat menimbulkan iritasi pada saluran pernapasan, konvulsi, depresi, dan dapat merusak hati.

(3). Dieldrin (Rogers et al., 1953; Jager, 1970; Zitko, 2003)



Gambar 4. Struktur molekul Dieldrin

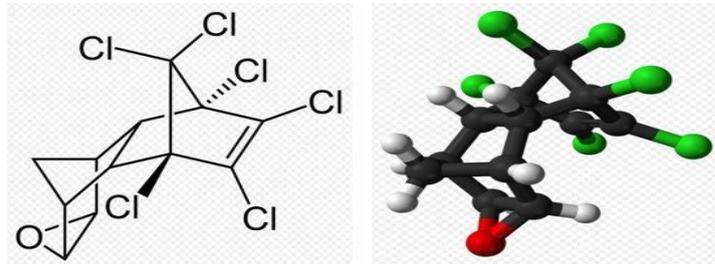
Rumus molekul	: $C_{12}H_8Cl_6O$
Massa molar	: 380,90 Dalton
Titik lebur	: 176 - 177°C
Titik didih	: Terurai

Dieldrin mulai diproduksi dan digunakan sebagai insektisida pada tahun 1948 (Jennings and Li, 2015). Dieldrin memiliki bentuk fisik berupa kristal putih atau serbuk berwarna coklat, tidak berbau, atau sedikit bau (samar). Dieldrin digunakan untuk mengendalikan hama pada tanaman, buah, dan biji, serta hama tanah. Dieldrin sangat beracun bagi organisme air dan menyebabkan perubahan enzimatis mengganggu reproduksi (Martyniuk *et al.*, 2010). Dieldrin dapat berubah menjadi uap di atmosfer dan dapat berpindah tempat sebelum jatuh dan kembali disimpan ditempat lain (Chandrashekara *et al.*, 2012)

Waktu paruh dieldrin mencapai 1400 hari (IUPAC, 2011; Saminathan *et al.*, 2011), sehingga tetap bertahan dalam tanah dalam waktu lama. Dieldrin terikat kuat dalam partikel tanah dan tidak mudah terurai (Hearon *et al.*, 2020). Dieldrin tidak larut dalam air tetapi larut dalam pelarut organik, lemak ataupun minyak. Dieldrin merupakan turunan dari aldrin yang teroksidasi secara alamiah oleh sejumlah makhluk hidup (Xiao *et al.*, 2011; Purnomo, 2017).

Penggunaan dan pembuatan Dieldrin dilarang sejak 2001 (UNEP, 2002) dan ditetapkan secara permanen dilarang sejak 2004 (UNEP, 2004). Di Indonesia dilarang secara permanen sejak 2009 (UU. 19/2009). Dieldrin diperdagangkan dengan merk dagang Alvit, Dieldrite, Dieldrix, Illoxol, Panoram D-31, Qunitox.

(4). Endrin (Patil *et al.*, 1970; Jager, 1970; WHO, 1992; Zitko, 2003)



Gambar 5. Struktur molekul Endrin

Rumus molekul	: $C_{12}H_8Cl_6O$
Massa molar	: $380.91 \text{ g mol}^{-1}$
Titik lebur	: $200 \text{ }^\circ\text{C}$
Titik didih	: 245°C
Kelarutan dalam air	: $220\text{-}260 \text{ }\mu\text{g/L}$ pada 25°C

Endrin digunakan untuk mengendalikan serangga hama tanaman pertanian (tembakau, apel, kapas, tebu, padi, sereal, dan biji-bijian) dan binatang pengerat (Wilson *et al.*, 2018). Waktu paruh endrin dalam tanah diperkirakan sekitar 4.300 hari dan sangat persisten di alam (IUPAC, 2011, Saminathan *et al.*, 2011),

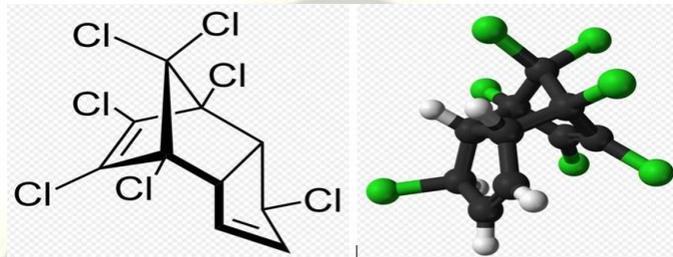
Endrin dibuat dan dikembangkan pada tahun 1950 oleh perusahaan Shell International. Endrin sangat efektif terhadap serangga target sehingga dalam waktu singkat telah digunakan secara global. Toksisitas endrin di lingkungan sangat tinggi, sehingga perusahaan menghentikan produksinya pada tahun 1982 (Dimitrov *et al.*, 2014). Penghentian penggunaan endrin secara bertahap dilakukan oleh beberapa negara seperti Taiwan tahun 1971 (Doong *et al.*, 2002). UNEP

Sekolah Pascasarjana

2002 melarang penggunaan Endrin untuk seluruh aktivitas, dan Indonesia melarang penggunaan Endrin sejak 2009 (UU.19/2009).

Produk endrin berbetuk padatan tidak berwarna dan tidak berbau, sedang produk komersial berwarna putih pucat. Endrin diperdagangkan dengan merk: Compound 269, Endrex, Hexadrin, Isodrin Epoxide, Mendrin, dan Nendrin.

(5). Heptaklor (WHO, 1984)



Gambar 6. Struktur molekul Heptaklor

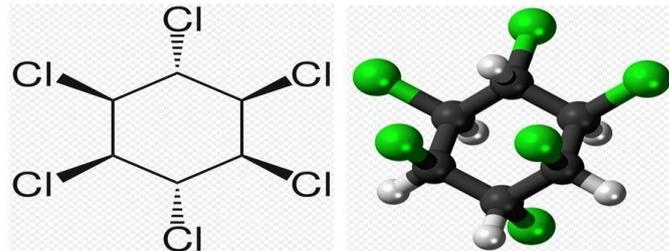
Rumus Molekul	: $C_{10}H_5Cl_7$ Massa
molar	: $373.32 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$
Densitas	: 1.58 g/cm^3
Titik Lebur	: $95-96^\circ\text{C}$
Titik Didih	: $135-145^\circ\text{C}$

Heptaklor berbentuk serbuk putih atau coklat, berfungsi sebagai insektisida. Struktur Heptaklor sangat stabil di lingkungan dan dapat bertahan dalam jangka lama. Heptaklor memiliki waktu paruh 1,3-4,2 hari (udara), 0,03-0,11 tahun (air), dan 0,11-0,34 tahun (tanah), dan 285 hari di lingkungan umum (UIPAC, 2011). Heptaklor terbentuk melalui reaksi Diels-Alder dari heksaklorosiklopentadiena dan siklopentadiena (Funel and Abele, 2013).

Heptaklor persisten di lingkungan dan dapat ditemukan di tanah setelah 14 tahun di aplikasi di lingkungan (Khan, 2016). Heptaklor mudah diserap oleh partikel tanah, tetapi pada kondisi tertentu juga mudah menguap (Hayashi *et al.*, 2013). Heptaklor diperdagangkan dalam berbagai merk dagang, yaitu: Aahepta, Agroceres, Baskalor, Drinox, Drinox H-34, Heptachlorane, Heptagan,

Heptagranox, Heptamak, Heptamul, Heptasol, Heptox, Soleptax, Rhodiachlor, Veliscol 104, Veliscol Heptachlor

(6). Lindan (Girish and Kunhi, 2013)



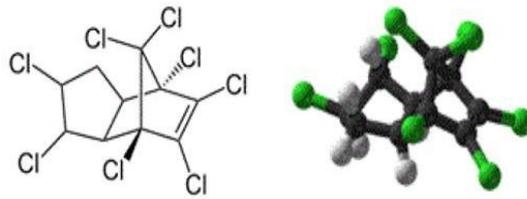
Gambar 7. Struktur molekul Lindan

Rumus Molekul	: $C_6H_6Cl_6$
Massa molar	: $290.81 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
Densitas	: $1,87 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Titik Lebur	: $113 \text{ }^\circ\text{C}$
Titik Didih	: $323 \text{ }^\circ\text{C}$

Lindan disebut sebagai gamma-hexachlorocyclohexane (γ -HCH) (Zhang *et al.*, 2020). Lindan dilarang penggunaannya di Indonesia sejak tahun 2009 (UU.19/2009), tetapi masih digunakan secara terbatas untuk kepentingan medis sebagai obat kutu dan kudis (Ali *et al.*, 2013). Di Indonesia obat kutu dijual dengan merk dagang PEDITOX (Zahrotul, 2014). Lindan memiliki waktu paruh sekitar 121 hari, dengan persistensi di alam tingkat sedang, tetapi toksisitas tinggi (IUPAC, 2011). Lindan diperdagangkan dengan berbagai merk, yaitu: Amaticin, Anticarie, Bunt-cure, Bunt-no-more, Co-op hexa, Granox, No bunt, Sanocide, Smutgo, Sniecoto.

Sekolah Pascasarjana

(7). Klordan (Cochrane and Greenhalgh, 1976)



Gambar 8. Struktur molekul Klordan

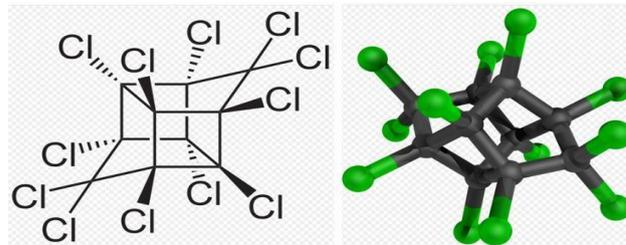
Rumus Molekul	: $C_{10}H_6Cl_8$
Massa molar	: 409,779 g/mol
Densitas	: 1,6 g/cm ³
Titik Lebur	: 106 °C
Titik Didih	: 175 °C
Kelarutan dalam air	: 5,6 g/100 ml

Klordan berbentuk padatan serbuk berwarna putih atau cairan kental dan tidak berwarna. Di Amerika Serikat, klordan digunakan secara luas sebagai insektisida pembasmi serangga tanah agar tidak merusak tanaman pangan, kebun, dan rumput. Pada tahun 1979 penggunaan klordan untuk tanaman pangan sudah dilarang (Hanedar *et al.*, 2019), namun penggunaan untuk melindungi bangunan dari serangan rayap masih diijinkan hingga tahun 1988.

Klordan mulai diproduksi tahun 1948 oleh Julius Hyman. Penggunaan klordan dikawatirkan dapat memicu kanker hati, diabetes, dan gangguan neurologis (Alharbi *et al.*, 2018). Waktu paruh klordan mencapai 365 hari dan persisten di alam sedang dengan tingkat kestabilan tinggi (UIPAC, 2011). Penggunaan klordan di Amerika Serikat setelah 32 tahun, ditemukan emisi klordan 10-15 kali lipat di udara (Shunthirasingham *et al.*, 2010). Klordan secara global dilarang sejak 2001 (UNEP 2002), sedangkan di Indonesia melarang penggunaan sejak 2009 (UU.19/2009).

Klordan diperdagangkan dengan berbagai merk, yaitu: Aspon, Belt, Chloriandin, Chlorkil, Chlordane, Corodan, Cortilan-neu, Dowchlor, HCS 3260, Kypchlor, M140, Niran, Octachlor, Octaterr, Ortho-Klor, Synklor, Tat chlor 4, Topichlor, Toxichlor, Veliscol-1068.

8. Mirek (Zitko, 2003; WHO, 2004; Sullivan and Megson, 2014)



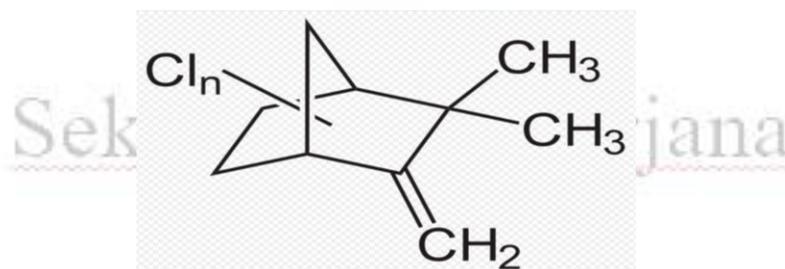
Gambar 9. Struktur molekul Mirek

Rumus Molekul : $C_{10}Cl_{12}$
 Massa molar : $545.55 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
 Titik Lebur : 485°C

Mirek dibuat pertama kali pada tahun 1946, dan disintesis dari turunan siklopentadiena (WHO, 2004; Sullivan and Megson, 2014). Mirek berbentuk padatan berwarna putih untuk pengendalian hama semut api. Mirek dilarang digunakan sejak tahun 1976 di AS, sedangkan secara global dilarang melalui usulan Konvensi Stockholm 2001 (UNEP, 2002), sementara itu di Indonesia dilarang secara permanen sejak 2009 (UU.19/2009).

Mirek dapat melakukan pembesaran biologis sebesar 219 kali pada ikan (Katagi, 2010; Adedeji and Okocha, 2012). Mirek sangat toksik pada hewan akuatik, tetapi sangat tahan terhadap degradasi mikrobiologis (Katagi, 2010). Mirek diperdagangkan sebagai Dechlorane, Ferriamicide, dan GC 1283.

(9). Toksafen (Pollock and Kilgore, 1978; Saleh, 1991)



Gambar 10. Struktur molekul Toksafen

Rumus Molekul	: $C_{10}H_{10}Cl_8$
Densitas	: $1,65 \text{ g.cm}^{3-1}$
Titik Lebur	: $65-90^{\circ}\text{C}$
Titik Didih	: 155°C

Toksafen banyak digunakan untuk mengendalikan hama tanaman kapas (Varagiya et al., 2016). Toksafen kurang persisten di lingkungan, tidak larut dalam air, terdegradasi sangat lambat (Haller, 2017; Bagiu *et al.*, 2020), dengan waktu paruh sampai 14 tahun di dalam tanah (IUPAC, 2011; Bagiu *et al.*, 2020). Toksafen banyak digunakan sebagai insektisida pada tanaman kapas. Toksafen dibuat pertama kali tahun 1947 di AS, dan negaranya sendiri toksafen dilarang digunakan sejak 1990, bahkan di Jerman toksafen telah dilarang sejak tahun 1980 (Abrol and Shankar, 2012). Toksafen dilarang digunakan di Indoensia sejak 2009 (UU.19/2009) berdasarkan Konvensi Stockholm 2001 (UNEP, 2001).

Toksafen tersebar luas dan dapat ditemukan di dalam tanah, air, udara, dan dasar perairan. Toksafen dapat berpindah tempat sangat jauh (Yadav, 2010). Toksafen dapat terdegradasi secara diklorinasi pada kondisi aerob di ekosistem daratan (Yin *et al.*, 2018). Paparan pada manusia melalui konsumsi makanan, inhalasi, dan kontak langsung dengan bahan tercemar. Toksafen diperdagangkan dengan banyak merk dagang, yaitu: Chlorinated camphene, Polychlorocamphene, Octachlorocamphene, Camphochlor, Agricide Maggot Killer, Alltex, Allotox, Crestoxo, Compound 3956, Clor chem T-590, Estonox, Fasco-Terpene, Geniphene, Hercules 3956, Chemphene M5055, Melipax, Motox, Penphene, Phenacide, Phenatox, Toxadust, Toxakil, Vertac 90%, Toxon 63, Attac 4-2, Attac 4-4, Attac 6, Attac 6-3, Attac 8, Anatox, Royal Brand Bean Tox 82, Cotton Tox MP82, Security Tox-Sol-6, Security Tox-MP cotton spray, Security Motox 63 cotton spray, Agro-Chem Torbidan 28, dan Strobane-T, Strobane T- 90, Toxon 63, Toxyphen, Vertac 90%.

2.3.2. Residu senyawa POPs

Residu senyawa POPs sektor pertanian terutama berasal dari penggunaan insektisida organoklorin (OCPs). OCPs merupakan agrokimia sektor pertanian

yang telah digunakan secara luas untuk mengendalikan sejumlah organisme pengganggu tanaman (OPT). Di Indonesia insektisida OCPs digunakan saat berlangsungnya revolusi hijau melalui program BIMAS, INMAS, dan INSUS. Selain digunakan untuk mengendalikan OPT insektisida OCPs juga digunakan secara luas untuk kegiatan non pertanian seperti; pengendalian nyamuk, rayap dan serangga rumah tangga lainnya. Dari sekian banyak senyawa POPs semuanya sudah dilarang digunakan kecuali DDT yang masih digunakan secara terbatas untuk pengendalian nyamuk penyebab demam berdarah di berbagai negara (Quinones *et al.*, 2015).

POPs adalah senyawa organik yang tahan terhadap degradasi lingkungan melalui proses kimia, biologi, dan fotolitik (Afful *et al.*, 2010; LIPI. 2017 ; Al-Mamun, 2017 ; Devi, 2020). Residu dan metabolit dari senyawa POPs sangat stabil, dengan waktu paruh yang panjang di lingkungan (El-Mekki *et al.*, 2009; El-Shahawi *et al.* 2010). Senyawa POPs yang terakumulasi di lingkungan, dapat mengalami biomagnifikasi dalam tubuh manusia dan makhluk hidup lainnya (Harrad, 2010; El-Shahawi *et al.* 2010). Di alam, senyawa POPs mengalami perjalanan (*fate*) masuk ke dalam sistem lingkungan. Senyawa POPs dapat mengalami perpindahan dari tempat yang satu ke tempat yang lain (Valsaraj and Thibodeaux, 2010; Zacharia, 2019).

Permasalahan senyawa POPs tidak terlepas dari rangkaian peristiwa dunia tentang lingkungan global. Konvensi Stockholm 2001 dan 2004 merupakan perjanjian lingkungan multilateral yang mengikat secara hukum untuk melindungi kesehatan manusia dan lingkungan dari ancaman POPs secara global. Sembilan senyawa POPs dari residu insektisida berdasar konvensi Stockholm tersaji pada Tabel 2. Indonesia, sebagai salah satu negara yang ikut meratifikasi perjanjian tersebut telah mengundang Undang-Undang Nomor 19 Tahun 2009 tentang Pengesahan Konvensi Stockholm Bahan Pencemar Organik yang Persisten (POPs).

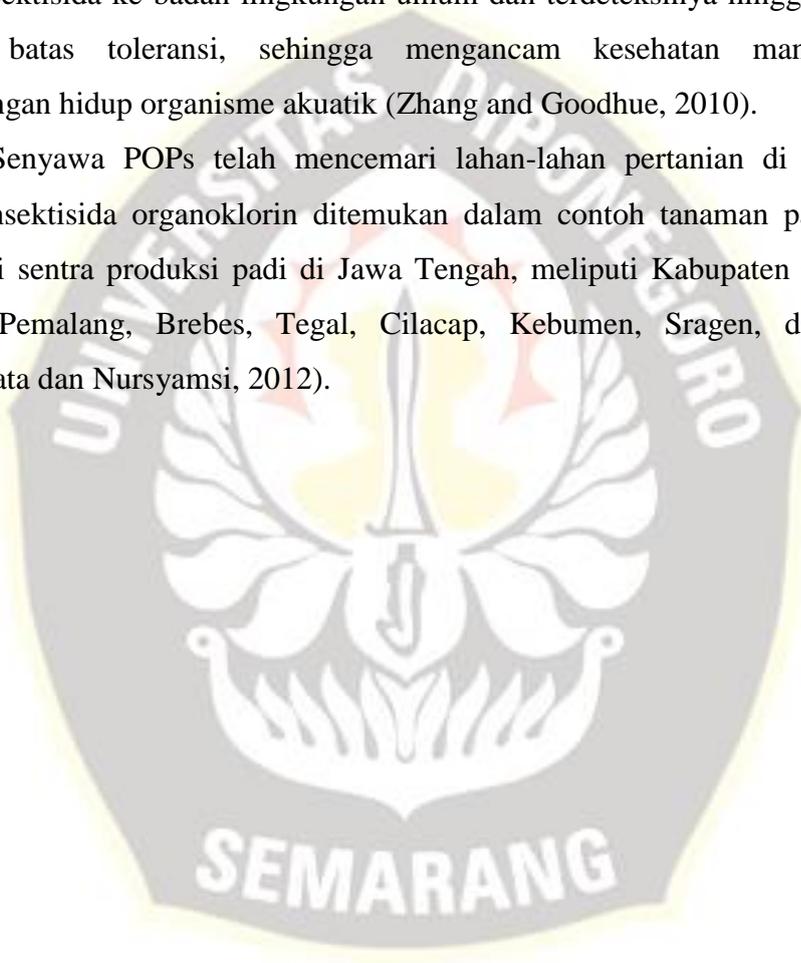
2.4. Degradasi lahan akibat senyawa POPs

Pertanian modern dicirikan dengan padat modal dan *high input energy* seperti pestisida kimia yang dapat menyebabkan terjadinya pencemaran

lingkungan. Lahan pertanian merupakan tempat yang paling menerima dampak negatif dari pencemaran di ekosistem daratan. Lahan pertanian memiliki peran ganda sebagai *source* dan juga *sink*. Residu insektisida terjerap oleh partikel tanah dan kemudian menyebabkan pencemaran lahan pertanian. Dampak lanjut dari pencemaran lingkungan adalah terjadinya degradasi lahan pertanian (Mohamed *et al.*, 2019).

Dampak yang timbul kemudian adalah pergerakan ataupun pergeseran residu insektisida ke badan lingkungan umum dan terdeteksinya hingga melebihi ambang batas toleransi, sehingga mengancam kesehatan manusia dan kelangsungan hidup organisme akuatik (Zhang and Goodhue, 2010).

Senyawa POPs telah mencemari lahan-lahan pertanian di Indonesia. Residu insektisida organoklorin ditemukan dalam contoh tanaman padi, tanah, dan air di sentra produksi padi di Jawa Tengah, meliputi Kabupaten Grobogan, Demak, Pemalang, Brebes, Tegal, Cilacap, Kebumen, Sragen, dan Klaten (Ardiwinata dan Nursyamsi, 2012).



Sekolah Pascasarjana

Tabel 2. Senyawa POPs dari insektisida berdasarkan konvensi Stockholm 2001 (*sumber*: UNEP, 2009; UU. 19/2009)

Macam Senyawa POPs	Lampiran	Nama kimia	Merk dagang
DDT	B	1,1'-(2,2,2-Trichloroethylidene)bis(4-chlorobenzene)	Agritan, Anofex, Arkotine, Azotox, Bosan Supra, Bovidermol, Chlorophenothan, Chloropenothane, Clorophenotoxum, Citox, Clofenotane, Dedelo, Deoval, Detox, Detoxan, Dibovan, Dicophane, Didigam, Didimac, Dodat, Dykol, Estonate, Genitox, Gesafid, Gesapon, Gesarex, Gesarol, Guesapon, Gyron, Haverextra, Ivotan, Ixodex, Kopsol, Mutoxin, Neocid, Parachlorocidum, Pentachlorin, Pentech, PPzeidan, Rudseam, Santobane, Zeidane, Zerdane
Aldrin	A	1,2,3,4,10,10-Hexachloro-1,4,4a,5,8,8a-hexahydro-1,4:5,8-dimethanonaphthalene	Aldrec, Aldrex, Aldrex 30, Aldrite, Aldrosol, Alttox, Compound 118, Drinox, Octalene, Seedrin
Dieldrin	A	3,4,5,6,9,9-Hexachloro-1a,2,2a,3,6,6a,7,7a-octahydro-2,7:3,6-dimethanonaph[2,3b]oxirene	Alvit, Dieldrite, Dieldrix, Illoxol, Panoram D-31, Quintox
Endrin	A	3,4,5,6,9,9-Hexachloro-1a,2,2a,3,6,6a,7,7a-octahydro-2,7:3,6-dimethanonaph[2,3b] oxirene	Compound 269, Endrex, Hexadrin, Isodrin Epoxide, Mendrin, Nendrin

Macam Senyawa POPs	Lampiran	Nama kimia	Merk dagang
Heptaklor	A	1,4,5,6,7,8,8-Heptachloro- 3a,4,7,7a-tetrahydro-4,7- methanol-1H-indene	Aahepta, Agroceres, Baskalor, Drinox, Drinox H-34, Heptachlorane, Heptagran, Heptagranox, Heptamak, Heptamul, Heptasol, Heptox, Soleptax, Rhodiachlor, Veliscol 104, Veliscol Heptachlor
Lindan	A, C	Hexachlorobenzene	Amaticin, Anticarie, Bunt-cure, Bunt-no-more, Co-op hexa, Granox, No bunt, Sanocide, Smutgo, Sniecoto
Klordan	A	1,2,4,5,6,7,8,8-Octachloro- 2,3,3a,4,7,7a-hexahydro-4,7- methano-1H-indene	Aspon, Belt, Chlориandin, Chlorkil, Chlordane, Corodan, Cortilan-neu, Dowchlor, HCS 3260, Kypchlor, M140, Niran, Octachlor, Octaterr, Ortho-Klor, Synklor, Tat chlor 4, Topichlor, Toxichlor, Veliscol-1068
Mirex	A	1,1a,2,2,3,3a,4,5,5a,5b,6-Dodecachloroacta-hydro- 1,3,4-metheno-1Hcyclobuta[cd]pentalene	Dechlorane, Ferriamicide, GC 1283
Toxaphene	A	Toxaphene	Alltex, Alltox, Attac 4-2, Attac 4-4, Attac 6, Attac 6-3, Attac 8, Camphechlor, Camphochlor, Camphoclor, Chemphene M5055, chlorinated camphene, Chloro-camphene, Clor chem T-590, Compound 3956, Huilex, Kamfochlor, Melipax, Motox,

Macam Senyawa POPs	Lampiran	Nama kimia	Merk dagang
			Octachlorocamphene, Penphene, Phenacide, Phenatox, Phenphane, Polychlorocamphene, Strobane-T, Strobane T- 90, Texadust, Toxakil, Toxon 63, Toxyphen, Vertac 90%

Annex A: Parties must take measures to eliminate the production and use of the chemicals listed under

Annex A. Specific exemptions for use or production are listed in the Annex and apply only to Parties that register for them.

Annex B: Parties must take measures to restrict the production and use of the chemicals listed under

Annex B. in light of any applicable acceptable purposes and/or specific exemptions listed in the Annex.

2.5. Permodelan Sistem Informasi Geografis (SIG)

Setidaknya terdapat dua alasan penting untuk dilakukan permodelan SIG spasial senyawa POPs di lahan pertanian. Alasan pertama, dalam era industri 4.0 informasi menjadi sangat penting dimana setiap konsumen berhak memperoleh informasi atas produk yang akan diperolehnya. Alasan kedua, bahwa perdagangan bebas (AFTA, WTO) diperlukan informasi bahwa produk yang dihasilkan berasal dari tanah yang bersih dari cemaran, sehingga memenuhi kaidah *Good Agriculture Practice-GAP*)

SIG dapat didefinisikan sebagai sistem informasi khusus yang mengelola data yang memiliki informasi spasial (ruang). SIG adalah sistem kerja komputer yang memiliki kemampuan untuk membangun, menyimpan, mengelola dan menampilkan informasi data tata ruang secara geografis. Dalam perkembangannya SIG, digunakan untuk berbagai kepentingan termasuk di dalamnya untuk memetakan kondisi lingkungan.

Upaya antisipasi kerusakan lingkungan pertanian yang makin parah ke depan perlu diterapkan kriteria kondisi lingkungan sebagai sistem peringatan dini (*early warning system*), melalui pemantauan lingkungan dengan menilai peringkat kerusakan/kadar cemaran. Informasi mengenai perubahan dinamis wilayah terutama tempat-tempat terjadinya dampak kerusakan/kadar cemaran di permukaan bumi, posisi dari suatu objek, sementara kegiatan manusia terkonsentrasi di daratan, maka pemantauan secara keruangan (*spatial*) untuk areal yang luas menjadi sangat penting. Objek-objek dan fenomena-fenomena dari lokasi geografis pada areal yang luas itu penting dianalisis dalam perencanaan regional serta dalam pengambilan keputusan terbaik atau mencari solusi untuk masalah-masalah tertentu.

2.5. Dampak senyawa POPs

2.5.1. Dampak senyawa POPs terhadap kesehatan manusia

Senyawa POPs dikenal bersifat karsinogenik, persistent, bioakumulatif dan mengganggu endokrin (UNEP 2009; Vijgen *et al.*, 2011). Manusia dapat terpapar (*exposure*) insektisida senyawa POPs dalam dosis yang sangat kecil, dan

akan meningkat lebih besar apabila pestisida tersebut bersifat persisten melalui perbesaran biologi (*biomagnifikasi*). Keracunan pestisida dapat terjadi melalui paparan langsung, atau karena mengonsumsi bahan makanan yang tercemar pestisida melebihi batas maksimal yang ditetapkan *Maximum Residue Limits-MRLs*, dan *Acceptable Daily Intake-ADI* menurut badan dunia WHO dan FAO (WHO, 2000; Li, 2018; Weber *et al.*, 2019).

Secara ekologi tiap-tiap racun yang masuk ke lingkungan akan kembali ke penggunaannya (Freedman, 2013). Dampak negatif yang ditimbulkan oleh bahan agrokimia terhadap manusia, yaitu keracunan, termasuk keracunan akut dan kronis seperti karsinogenik, teratogenik, dan perbesaran biologi (Yuniatri, 2011; Hermandes *et al.*, 2013, Nicolopoulou-Stamati *et al.*, 2016). Darah petani dari sentra produksi sayuran (Pati, Magelang, dan Brebes) terdeteksi mengandung insektisida senyawa POPs (Indratin *et al.*, 2009). Residu insektisida dapat mencemari air susu ibu (ASI), di Brebes dari 16 orang sukarelawan, 4 orang sukarelawan ASI-nya mengandung p'pDDE (turunan dari DDT) dengan konsentrasi 0,018-0,082 mg/kg. Sedangkan 11 orang sukarelawan lainnya mengandung Dieldrin 0,001-0,007 mg/kg (Cahyaningrum *et al.*, 2018).

Dampak negatif yang dapat ditimbulkan oleh residu insektisida terhadap kesehatan manusia antara lain: kanker (*carcinogenic*) (Ennour-Idrissi, 2019), cacat lahir (*teratogenic*) (Kalra *et al.*, 2016), kerusakan syaraf (*neurotoxic*) (Berghuis *et al.*, 2015), mutasi genetik (*mutagenic*), gangguan sistem kekebalan, perusakan sistem reproduksi dan *Endocrine Disrupting Pesticides-Eds* (Sajid *et al.*, 2016; Yilmaz *et al.*, 2020). Potensi bahaya paparan oleh berbagai bahan aktif residu insektisida disajikan pada Tabel 3.

Badan Penelitian Kanker Internasional (*International Agency for Research on Cancer-IARC*) dan Badan Perlindungan Lingkungan Amerika (*Environmental Protection Agency-EPA*) mengategorikan pestisida dan logam berat ke dalam dua kelas utama, yaitu kimia penyebab karsinogen dan senyawa kimia non karsinogen, seperti disajikan oleh Tabel 4.

Pencemar residu insektisida dapat menyebabkan kasus kanker otak, leukemia dan cacat pada anak-anak (Suk *et al.*, 2003; Roberts and Karr, 2012; Singh *et al.*, 2016). Cemaran insektisida masuk ke dalam tubuh secara lambat

(Thompson and Darwish, 2019) dan setelah beberapa tahun kemudian menyebabkan kanker, gangguan sistem kekebalan, gangguan hormonal dan sistem reproduksi serta mempengaruhi perkembangan janin (Singh *et al.*, 2016).

Tabel 3. Potensi bahan aktif insektisida terhadap gangguan kesehatan

Potensi bahaya paparan	Nama bahan aktif
Penyebab kanker (<i>carcinogenic</i>), cacat lahir (<i>teratogenic</i>)	DDT, benomil, lindan, permetrin, BHC, dieldrin, fenvalerat, metidation, paration, dieldrin, dibenzoiksina.
Perubahan genetic (<i>mutagenic</i>)	Karbaril
Kerusakan syaraf (<i>neurologic</i>)	asefat, amitrol, klorpirifos, dimetoat, disulfoton, etion, diazinon, paration, metamidofos, metidation
Gangguan endokrin (<i>Endocrine Disrupting Chemicals</i>)	2,4-D, benomil, endosulfan, metoksiklor, lindan, dieldrin, BHC, dicopol, fenvalerat, etil-paration, karbofuran, karbaril, malation, mancozeb, trifluralin, metribuzin

Sumber: Riza dan Gayatri (1994)

Paparan lindan dapat menyebabkan penyakit pada darah, kelainan bawaan, dan kanker payudara (Claap *et al.*, 2007; Giulivo *et al.*, 2016; Cohn *et al.*, 2019). Insektisida senyawa POPs dapat merusak spermatozoa, mengubah sel sertoli atau fungsi sel *leydig*, atau mengganggu fungsi endokrin pada setiap tahapan regulasi hormonal (sintesis hormon, pelepasan, penyimpanan, transportasi, fungsi tiroid; dan sistem saraf pusat) (Florea *et al.*, 2017). Sedangkan pada kaum perempuan paparan DDT dapat menyebabkan kanker payudara (Claap *et al.*, 2007; Cohn *et al.*, 2019). Suhartono (2014) melaporkan adanya prevalensi penggunaan pestisida terhadap gangguan kesehatan berupa gangguan kelenjar teroid, stunting, dan gondok di Kabupaten Brebes dan Kota Batu.

Tabel 4. Klasifikasi kimia sistem EPA, yang diklasifikasikan sebagai senyawa penyebab karsinogen dan non karsinogen

Klasifikasi	Klasifikasi sitem EPA	Nama pestisida dan logam berat
Kimia sebagai penyebab karsinogen	Karsinogen manusia (A) (<i>Direct human carcinogen</i>)	Arsen, beryllium, kadmium, krom heksavalen,
	Mungkin karsinogen pada manusia (B) (<i>Probable or suspected human carcinogen</i>)	Alaklor, aldrin, klorthalonil, dieldrin, folpet, karbofuran, heptaklor, heptaklor epoxide, o-phenylphenol, propoxur, timball inorganik, Fe-dekstran,
	Boleh jadi karsinogen manusia (C) (<i>Possible human carcinogen</i>)	Acephate, amitraz, benomyl, bifenthrin, cypermethrin, dichlobenil, dichlorvos, diclofop methyl, dicofol, dimethipin, linuron, methidathion, methomyl, metolachlor, norflurazon, oryzalin, oxadixyl, oxadiazon, oxyfluorfen, parathion ethyl, permethrin, phosmet, phosphamidon, procymidone, propiconazole, simazine, terbutryn, thiodicarb, thiophanate methyl, triadimenol, trifluralin, nikel, kobal dan senyawa kobal,
Kimia sebagai penyebab non karsinogen	Tidak diklasifikasikan sebagai karsinogen pada manusia (D) (<i>Not classifiable as to human carcinogenic</i>)	Aldicarb, endrin, logam krom dan krom trivalen ^a , timbal organik
	Bukti tidak karsinogen pada manusia (E) (<i>Evidence of non-carcinogenic for human</i>)	kaptafol, karbofuran, klopifos, diazinon, EPN, lindane

Sumber: Chun dan Kang (2003); Ke *et al.* (2007)

2.5.2. Dampak senyawa POPs terhadap lingkungan dan produk pertanian

Konsentrasi senyawa POPs terdeteksi pada kisaran 0-0,119 mg/m³ untuk fase partikulat dan 0-0,183 mg/m³ untuk fase gas, dan Endrin melebihi baku mutu (Rahardian dan Oginawati, 2016). Kozanah (2010) melaporkan adanya konsentrasi senyawa POPs dalam air laut antara 0,329-28,513 ppb, dan dalam sedimen berkisar antara 0,096–50,002 ppb. Di segoro anakan Cilacap ditemukan residu DDT pada air sebesar 0,0062 ppb dan pada sedimen sebesar 1,373 µg/kg (Hadi *et al.*, 2014). Dalam air laut wilayah perairan paling barat Semarang ditemukan organoklorin seperti Heptaklor, Aldrin, Endosulfan, Endrin, dan DDT (Suryono, 2016).

Di India residu senyawa POPs ditemukan di air, udara dan tanah (Mishra *et al.*, 2012; Yadav *et al.*, 2015). Di Cina ditemukan residu POPs di lahan pertanian wilayah Guangzhou (Maosheng *et al.*, 2011) di Wuhan (Qu *et al.*, 2015). Di Afrika residu senyawa POPs ditemukan di sepadan sungai di Kenya (Abong'o, 2015), di lahan pertanian Kakao di Ondo Nigeria (Aiyesanmi and Idowu, 2012). Residu POPs juga ditemukan di kawaan hutan tropis di Brasil (Quinete *et al.*, 2011).

Residu insektisida selain ditemukan di dalam tanah juga ditemukan di dalam produk pertanian. Residu ensosulfan ditemukan di dalam kentang mencapai kisaran 21,717-41,767 mg/kg (Suparta *et al.*, 2014, Poniman dan Indratin, 2014). Rahmawati *et al.* (2020) memberikan ilustrasi analisis risiko pada kentang terhadap efek kanker menunjukkan berada di atas resiko yang disarankan oleh EPA (10⁻⁶). Di Gana ditemukan cemaran senyawa POPs (β-BHC, DDT, dan aldrin) pada sayuran kubis, dimana aldrin konsentrasinya melebihi batas *Acceptable Daily Intake*-ADI (Bolor *et al.*, 2018). Di Sinegal ditemukan residu insektisida pada produk kubis, selada, dan tomat (Diop *et al.*, 2016).