

APLIKASI TEKNIK NUKLIR DALAM MASALAH PENCEMARAN LINGKUNGAN

Made Sumatra



ID0000119

Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, BATAN

ABSTRAK

APLIKASI TEKNIK NUKLIR DALAM MASALAH PENCEMARAN LINGKUNGAN. Radioanalisis dan teknik perunut merupakan dua metode teknik nuklir yang dapat digunakan dalam masalah pencemaran lingkungan. Dua jenis metode radioanalisis yang sering digunakan adalah analisis aktivasi netron (AAN) dan spektrometri fluoresensi sinar-X. Kedua metode ini digunakan untuk analisis logam. Teknik perunut dengan senyawa bertanda radioaktif digunakan untuk mempelajari nasib suatu bahan pencemar dalam suatu sistem lingkungan. Validasi dari setiap metode analisis yang baru dikembangkan sangat penting mengingat masalah pencemaran lingkungan berkaitan erat dengan masalah pelaksanaan hukum.

ABSTRACT

APPLICATION OF NUCLEAR TECHNIQUES ON ENVIRONMENTAL POLLUTION PROBLEMS. Radioanalysis and tracer technique are the nuclear techniques that can be used on environmental pollution problems. Neutron activation analysis (NAA) and X-ray fluorescence (XRF) spectrometry are the two methods that are used frequently on such problems. These methods are used for metal analysis. Tracer technique with radioactive labelled compounds are used to study the fate of the pollution substances in environmental systems. It is very important to validate every new developed analysis method, due to the environmental pollution problem closely related to the low enforcement.

PENDAHULUAN

Definisi: Lingkungan hidup adalah kesatuan ruang dengan semua benda, daya, keadaan, dan makhluk hidup, termasuk manusia dan perilakunya, yang mempengaruhi kelangsungan perikehidupan dan kesejahteraan manusia serta makhluk hidup lain.

Pasal 1, UU No 23 Th. 1997 tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup (1).

Masalah pencemaran lingkungan dewasa ini sudah menjadi permasalahan global dan sudah tidak mengenal batas-batas negara. Penggunaan batubara sebagai sumber energi di Inggris dapat menimbulkan hujan asam di negara-negara Skandinavia. Kebakaran hutan di Kalimantan dan Sumatera asapnya selain mencemari udara di lokasi kebakaran, juga menimbulkan masalah di negara-negara tetangga kita di Malaysia, Singapura dan bahkan sampai ke Thailand bagian selatan. Masalah yang paling hangat dewasa ini adalah pemanasan global dan penipisan lapisan ozon di atmosfer. Pemanasan global terutama disebabkan oleh peningkatan kadar CO₂ di udara, sebagai hasil pembakaran bahan bakar fosil (batubara, minyak bumi dan gas alam), yang mengakibatkan efek rumah kaca. Penipisan lapisan ozon disebabkan oleh penggunaan gas-gas yang bersifat sangat stabil secara besar-besaran dalam industri seperti penggunaan gas kloro-fluorokarbon (freon) dan metil bromida. Gas-gas ini naik ke lapisan atas atmosfer bumi sampai mencapai lapisan ozon yang akhirnya bereaksi dengan molekul ozon. Para ahli iklim dan kesehatan mengkhawatirkan, jika emisi gas CO₂ dan gas freon makin

meningkat, dikhawatirkan akan menimbulkan perubahan iklim dengan berbagai konsekuensinya dan peningkatan kejadian kanker kulit karena radiasi sinar UV yang sampai ke permukaan bumi makin meningkat. Masalah pemanasan global dan penipisan lapisan ozon merupakan isu-isu lingkungan global. Di tingkat regional dan lokal isu-isu lingkungan lainnya tidak kalah pentingnya karena secara nyata dirasakan akibatnya oleh penghuni wilayah yang bersangkutan. Berbagai aktivitas manusia di bidang industri, perdagangan, transportasi, pertanian dsb. pasti menghasilkan limbah yang pada akhirnya akan terbuang ke lingkungan dan secara langsung maupun tidak langsung mempengaruhi kualitas lingkungan hidup. Hal ini telah lama disadari oleh hampir semua pemerintah dan masyarakat di semua negara, baik di negara maju maupun di negara sedang berkembang. Maka di banyak negara dibentuk badan-badan atau lembaga-lembaga perlindungan lingkungan, misalnya Environmental Protection Agency di Amerika Serikat. Untuk Indonesia, Pemerintah menugasi Menteri Negara Lingkungan Hidup untuk mengelola lingkungan hidup di Indonesia. Telah banyak usaha dan kegiatan yang dilakukan oleh Kantor Menteri Negara Lingkungan Hidup. Di bidang peraturan dan perundang-undangan telah diterbitkan Undang-undang Nomor 4 Tahun 1982 tentang Ketentuan-ketentuan Pokok Lingkungan Hidup yang kemudian diperbarui menjadi Undang-undang Nomor 23 Tahun 1997 tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup (UU No 23/1997) (1). Selain itu telah pula dikeluarkan Peraturan Pemerintah Nomor 20 Tahun 1990 tentang Pengendalian Pencemaran Air (PP. No. 20/1990), Peraturan Pemerintah Nomor 51 Tahun 1993 tentang

Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (PP. No. 51/1993) dan Keputusan Menteri Kependudukan dan Lingkungan Hidup Nomor KEP-03/Men.KLH/VI/1993 tentang Baku Mutu Limbah Cair (2,3,4).

Dalam lampiran PP. No. 20/90 ditetapkan Kadar Maksimum berbagai parameter lingkungan: fisika, kimia, mikrobiologik dan radioaktivitas untuk air golongan A (air minum), golongan B (air baku air minum), golongan C (air untuk perikanan dan peternakan) dan golongan D (untuk pertanian, perkotaan, industri, pembangkit listrik tenaga air).

Untuk melaksanakan ketentuan dalam lampiran PP. No. 20/1990 tentang kadar maksimum berbagai parameter, dibutuhkan suatu laboratorium yang mampu melaksanakan analisis parameter-parameter lingkungan yang dimaksud. Prosedur analisis yang diperlukan dapat diadopsi dari prosedur-prosedur yang telah dipakai secara baku di negara-negara maju. Namun dalam jangka panjang alangkah baiknya kalau kita dapat menetapkan metode analisis sendiri sesuai dengan kondisi di Indonesia. Setiap metode baru yang dikembangkan harus diuji validitasnya sehingga memenuhi standar internasional. Hal ini memerlukan penelitian dan studi yang dilaksanakan dengan kesungguhan hati.

Pencemaran lingkungan oleh bahan kimia, terutama bahan kimia organik, dalam perjalanannya dipengaruhi oleh berbagai pengaruh alami (udara, sinar matahari, suhu, mikroorganisme) akan berubah menjadi senyawa baru. Senyawa baru yang terbentuk boleh jadi kurang beracun atau lebih beracun dibandingkan senyawa asal/induknya. Seringkali mekanisme perubahan struktur kimia yang terjadi sangat kompleks, sehingga dari satu senyawa induk terbentuk lebih dari satu senyawa turunannya. Telah banyak studi yang dilakukan di luar negeri dan hasil-hasilnya dapat kita pelajari dari literatur. Namun perlu disadari bahwa kondisi lingkungan di luar negeri tempat studi-studi tersebut dilakukan, sangat berbeda dengan kondisi lingkungan di Indonesia. Hal ini menyebabkan perbedaan proses peruraian dan metabolisme sehingga memberikan hasil yang berbeda. Karena itu studi serupa perlu dilakukan di Indonesia. Tujuan uraian dalam makalah ini ialah untuk menjelaskan tentang potensi aplikasi teknik nuklir dalam masalah pencemaran lingkungan, sebagai teknik yang saling melengkapi (*complementary*) dengan teknik-teknik analisis konvensional.

PENCEMARAN LINGKUNGAN

Menurut Pasal 1 butir 12 dari UU. No. 23/1997, pencemaran lingkungan hidup adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat energi dan /atau komponen lain ke dalam lingkungan hidup oleh kegiatan manusia, sehingga kualitasnya turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan lingkungan hidup tidak dapat berfungsi sesuai dengan peruntukannya.

Hampir tidak ada kegiatan manusia yang tidak menghasilkan limbah dalam berbagai bentuknya (padat, cair, gas). Apabila tidak dikelola dengan baik, sebagian besar limbah tersebut akan masuk mencemari lingkungan

yang dapat menimbulkan berbagai konsekuensi antara lain gangguan kesehatan, dan kerugian ekonomi.

Dasar acuan untuk menentukan suatu komponen lingkungan tercemar atau tidak tercemar adalah baku mutu lingkungan yang ditetapkan melalui Peraturan Pemerintah. Pada saat ini Indonesia baru memiliki baku mutu air yang ditetapkan melalui PP. No. 20/1990. Dalam PP tersebut dijelaskan bahwa yang dimaksud dengan baku mutu air adalah batas atau kadar makhluk hidup, zat, energi atau komponen lain yang ada atau harus ada dan/atau unsur pencemar yang ditenggang adanya dalam air pada sumber air tertentu sesuai dengan peruntukannya. Makhluk hidup, zat, energi dan komponen lainnya dinamakan parameter-parameter yang bila kadar maksimumnya dilampaui berarti air yang mengandungnya dinyatakan tercemar. Parameter-parameter yang dimaksud terdiri dari:

1. Parameter fisika yang meliputi: bau, jumlah zat padat terlarut, kekeruhan, rasa dan warna.
2. Parameter kimia yang meliputi: pH, logam-logam, anion anorganik, dan senyawa organik.
3. Parameter mikrobiologik yang meliputi: koliform tinja dan total koliform.
4. Parameter radioaktivitas yang meliputi: aktivitas alpha dan aktivitas beta.

Dalam Pasal 9 dari PP. No. 20/1990 disebutkan bahwa: Metode analisis untuk setiap baku mutu air dan baku mutu limbah cair ditetapkan oleh Menteri, yang dalam hal ini adalah Menteri yang ditugasi mengelola lingkungan hidup. Karena sampai saat ini metode yang dimaksud belum ditetapkan oleh Menteri Lingkungan Hidup, sedangkan kebutuhan analisis yang berkaitan dengan pelaksanaan AMDAL dan sengketa lingkungan perlu dilakukan, maka laboratorium pelaksana menggunakan metode yang disesuaikan dengan kondisi dan peralatan yang mereka miliki. Ada beberapa buku acuan (5, 6, 7) yang secara internasional dijadikan pegangan untuk analisis air dan air limbah. Metode-metode analisis dalam buku-buku tersebut semuanya merupakan metode konvensional, dalam arti tidak menggunakan teknik nuklir, kecuali untuk analisis radioaktivitas. Analisis logam dilakukan dengan spektrometri serapan atom (SSA) sedang senyawa organik dianalisis dengan teknik kromatografi gas (KG) dan kromatografi cair kinerja tinggi (KCKT).

Seperti telah disebutkan dalam uraian sebelumnya bahwa, senyawa-senyawa organik dapat termetabolisme dan terurai menjadi senyawa lain karena pengaruh keadaan lingkungan. Sebagai contoh: DDT, suatu insektisida organoklorin mengalami metabolisme dan peruraian seperti pada gambar 1 (8).

Struktur kimia hasil peruraiannya ditentukan berdasarkan metode-metode spektrometri, NMR-proton dan C-13, Infra Merah (IR) Ultra Violet (UV) dan Spektrometri Massa. Pemurnian dari hasil-hasil peruraian dilakukan dengan cara-cara kromatografi.

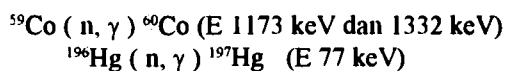
TEKNIK NUKLIR

Teknik Nuklir yang dapat diaplikasikan untuk menangani masalah lingkungan dapat dibagi menjadi dua

yaitu Teknik Radioanalisis dan Teknik Perunut (*Tracer Technique*) (9).

1. Radioanalisis didefinisikan sebagai aplikasi peristiwa-peristiwa radioaktivitas dalam kimia analitik (9). Salah satu radioanalisis yang banyak digunakan dalam analisis sampel yang berasal dari lingkungan adalah analisis aktivasi neutron (*AAN*). Pelaksanaan AAN terdiri dari dua langkah pokok yaitu pertama aktivasi sampel dengan cara penembakan berkas neutron terhadap sampel dan kedua, studi terhadap sampel yang telah menjadi radioaktif. Prinsip reaksi aktivasi dalam AAN adalah reaksi (n, γ) , inti atom unsur yang ditembak menangkap satu neutron, menjadi unsur radioaktif memancarkan sinar γ .

Misalnya:



Identifikasi unsur didasarkan pada energi sinar γ yang dipancarkan sampel. Neutron yang digunakan dalam NAA adalah neutron termal yang berasal dari reaktor atom. Neutron termal merupakan neutron yang mudah ditangkap oleh hampir semua inti atom, terutama inti atom logam-logam berat. Maka NAA terutama digunakan untuk analisis pencemaran logam-logam berat. Selain reaktor atom, neutron dapat pula dihasilkan dari generator neutron 14 MeV. Dalam hal ini neutron yang dihasilkan adalah neutron cepat. Generator neutron terutama digunakan untuk AAN radionuklida berumur pendek.

Seperti telah disebutkan di atas, langkah ke dua dalam AAN setelah sampel menjadi radioaktif adalah melakukan studi terhadap zat radioaktif tersebut. Hal ini dilakukan menggunakan analiser saluran ganda (*Multi Channel Analyzer*) dengan detektor NaI (TI) tipe lubang atau detektor Ge (Li). Detektor NaI (TI) memiliki efisiensi pencacahan yang lebih tinggi dibandingkan dengan detektor Ge (Li), namun Ge (Li) memiliki resolusi yang lebih baik. Hal ini diperlihatkan dalam ilustrasi yang diberikan oleh Westermark (10) dalam pengukuran NAA sampel hati *Phocana phocana Lin.* menggunakan detektor NaI (TI) dan Ge (Li) (Gambar 2 dan 3).

Pada Gambar 2 (detektor NaI [TI]) terlihat puncak pada 70 keV yang berasal dari ^{197}Hg . Dengan menggunakan detektor Ge (Li) (Gambar 3) puncak pada 70 keV terpisah menjadi puncak 68 keV yang berasal dari sinar-X ^{197}Au dan puncak 77 keV yang berasal dari sinar γ ^{197}Hg .

Puncak 68 keV berasal dari kontaminasi unsur Au pada sampel, dan setelah ditelusuri, Westermark menyimpulkan kontaminasi tersebut berasal dari gunting yang dipakai untuk mempersiapkan sampel. Dari kasus ini dapat ditarik pelajaran betapa pentingnya kehati-hatian dan kecermatan dalam mempersiapkan sampel. Teknik sampling, alat untuk sampling dan wadah sampel dan alat-alat untuk menangani sampel perlu benar-benar bebas dari kontaminasi mengingat kepekaan

teknik AAN. Prosedur sampling perlu diikuti dengan cermat.

Kepekaan AAN setara dengan SSA untuk hampir semua unsur. Disamping itu, AAN mempunyai beberapa keunggulan yaitu (11):

- Dapat dipakai untuk menentukan secara serentak beberapa unsur dalam satu sampel.
- Aktivasi dilakukan langsung terhadap sampel tanpa perlu terlebih dahulu perlakuan dengan reaksi kimia sehingga terhindar dari kontaminasi yang disebabkan oleh pereaksi yang terkontaminasi. Hal ini berlaku untuk semua jenis matriks sampel seperti tanah, air, jaringan hewan, dan tanaman.
- Perlakuan kimia setelah aktivasi (pasca iradiasi), misalnya untuk pemisahan unsur-unsur sangat dipermudah dengan kebebasan menggunakan teknik pengemban (*carrier technique*).

Disamping keunggulan yang telah disebutkan, perlu juga dikemukakan beberapa keterbatasannya yaitu:

- Mengingat AAN berdasarkan sifat-sifat inti atom, teknik ini tidak memberikan informasi tentang struktur kimianya. Misalnya merkuri (Hg) sebagai pencemar lingkungan dapat berupa Hg^{++} , $^+\text{Hg}-\text{CH}_3$, $\text{CH}_3-\text{Hg}-\text{CH}_3$, $\text{C}_6\text{H}_5-\text{Hg}-\text{C}_6\text{H}_5$ dsb. Struktur-struktur tersebut tidak dapat diungkapkan dengan AAN. Untuk menentukan strukturnya diperlukan teknik-teknik kromatografi dan spektrometri massa.
- Makin rendah kadarnya dalam sampel, berarti makin rendah cacah yang dihasilkannya, yang mengakibatkan simpangan baku (*standard deviation*) semakin tinggi.

Indonesia memiliki tiga reaktor atom yang dapat digunakan untuk AAN, masing-masing berlokasi di Serpong, di Bandung dan di Yogyakarta.

Radioanalisis lain yang semakin banyak digunakan untuk analisis unsur adalah spektrometri fluoresensi sinar-X (*X-Ray Fluoresence, XRF*). Teknik ini tidak memerlukan reaktor atom. Sinar X yang dibutuhkan dapat berasal dari tabung sinar X atau dari sumber radioaktif seperti ^{109}Cd , ^{55}Fe dan ^{241}Am . Sampel yang dianalisis disinari dengan sinar-X, sehingga terjadi eksitasi elektron. Elektron yang tereksitasi akan kembali ke keadaan dasar (*ground state*) sambil memancarkan fluoresensi sinar-X. Identifikasi unsur dilakukan berdasarkan energi fluoresensi yang dipancarkan dan kadarnya (kuantitatif) diukur dengan pencacahan.

2. Teknik Perunut

Teknik perunut adalah cara untuk mengikuti perjalanan nasib (*fate*) suatu senyawa kimia bertanda radioaktif termasuk metabolit dan hasil degradasinya dalam suatu sistem/lingkungan. Dalam masalah lingkungan, teknik ini terutama digunakan untuk mempelajari tingkah laku suatu bahan kimia beracun yang digunakan untuk tujuan tertentu sehingga langsung maupun tidak langsung berakibat pada pencemaran lingkungan. Contoh yang jelas adalah aplikasi pestisida untuk mengendalikan hama tanaman, vektor penyebab penyakit dan serangan perusak bangunan. Hanya

sebagian kecil pestisida yang diaplikasikan (misalnya dengan penyemprotan atau penebaran), yang mengenai tanaman maupun hama sasaran. Sebagian akan diterbangkan angin ke tempat lain, atau masuk ke dalam air dan tanah. Bagaimana nasib selanjutnya dari pestisida tersebut? Teknik perunut dengan senyawa bertanda radioaktif merupakan satu-satunya cara untuk mempelajarinya.

Kita kembali pada contoh pestisida. Pestisida yang secara harfiah diterjemahkan sebagai zat pembunuh hama adalah senyawa kimia (sebagian besar senyawa organik) yang umumnya dibuat secara sintetis. Jenis bahan aktif pestisida yang telah terdaftar di Komisi Pestisida dan diizinkan untuk digunakan di Indonesia sangat banyak (± 300 jenis).

Semuanya pasti telah dipelajari tingkah lakunya di lingkungan yang dalam hal ini di lingkungan negara-negara produsennya yang beriklim dingin. Keadaan lingkungan di Eropa maupun di Amerika Serikat tentu sangat berbeda dengan di Indonesia. Ambil misalnya contoh daerah gambut yang dibuka untuk pertanian. Tidak satupun negara di dunia yang secara mendalam telah mempelajari sifat-sifat fisiko-kimia dan mikrobiologis daerah gambut. Pembukaan lahan pertanian pasti akan disusul dengan pemakaian pestisida. Kita ambil contoh herbisida 2,4-D, salah satu jenis herbisida yang banyak digunakan di Indonesia. Menurut literatur (12) 2,4-D terurai di lingkungan menjadi berbagai senyawa seperti terlihat pada Gambar 4.

Pertanyaannya : Bagaimana sifatnya di daerah gambut? Apakah tidak terjadi pelindian yang menyebabkan pencemaran air tanah/air sumur? Hal ini dapat dipelajari dengan teknik perunut, menggunakan 2,4-D bertanda C-14 radioaktif. Penandaan dapat dilakukan pada gugus aromatis atau gugus asamnya tergantung kebutuhan studi. Perlu juga disadari pada saat ini senyawa bertanda ini perlu diimport dari luar negeri yang harganya cukup mahal. Rata-rata harganya 10 US dolar per mikrocurie senyawa bertanda, tergantung sukar tidaknya cara sintesis yang diperlukan. Sintesis 2,4-D dilakukan menurut reaksi kimia (13) (Gambar 5).

Kalau kita inginkan 2,4-D bertanda digugus aromatiknya, maka kita menggunakan bahan 2,4 diklorofenol yang bertanda C-14 pada cincin benzena. Kalau kita ingin 2,4-D yang bertanda di gugus asamnya kita menggunakan asam kloroasetat yang bertanda C-14 pada atom karbon gugus -CH₂-
 Harga bahan dasar senyawa bertanda tentu lebih murah dari harga hasil sintesisnya.

Studi tentang 2,4-D hanya salah satu contoh dari penerapan teknik perunut dalam masalah lingkungan. Penerapan teknik ini tentu dapat dilakukan untuk senyawa-senyawa lain tergantung pada permasalahan yang hendak dipecahkan. Perlu diingat bahwa teknik perunut hanya merunut perjalanan senyawa bertanda dan hasil degradasi/metabolitnya yang masih mengandung bagian molekul yang radioaktif. Struktur

kimia hasil degradasi/metabolitnya ditentukan dengan teknik kromatografi dan teknik spektrometri.

Salah satu tugas Pusat Produksi Radioisotop (PPR) Batan di Serpong adalah mensintesis senyawa-senyawa bertanda. Pada saat ini PPR baru mensintesis sediaan radiofarmaka untuk keperluan rumah-rumah sakit kedokteran nuklir (14). Seyogianya di masa yang akan datang PPR juga dapat mensintesis senyawa-senyawa bertanda lain untuk keperluan penelitian.

KESIMPULAN

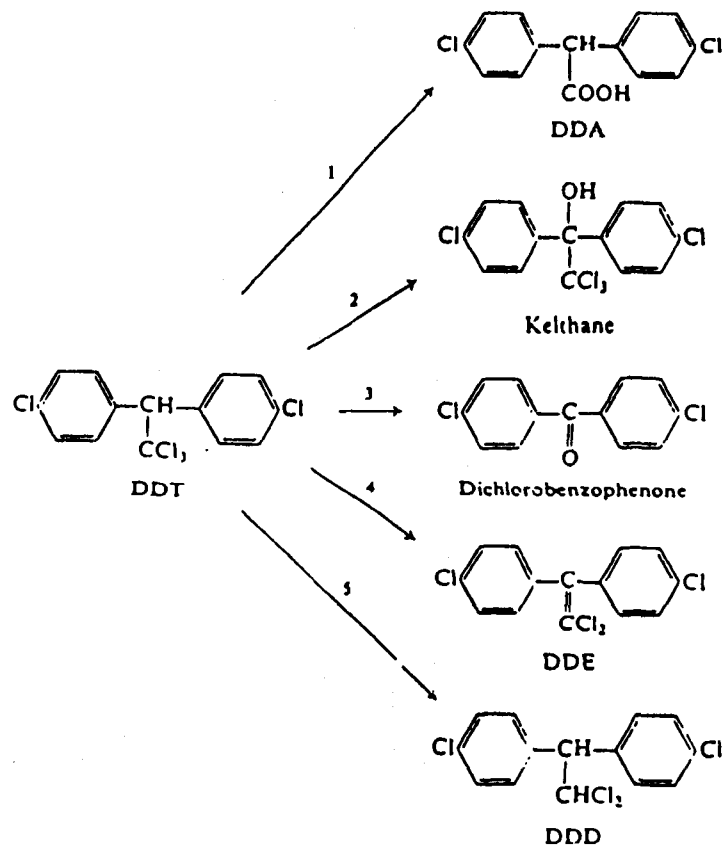
Dari uraian yang telah dilakukan dapat disampaikan kesimpulan :

1. Aplikasi teknik nuklir dalam masalah lingkungan meliputi dua bidang pokok yaitu bidang radioanalisis dan teknik perunut dengan senyawa bertanda radioaktif. Radioanalisis meliputi AAN dan XRF.
2. Penggunaan teknik nuklir bersifat saling melengkapi (*complementary*) dengan teknik-teknik konvensional seperti SSA dan teknis spektrometri.
3. Kecermatan dan ketelitian dalam mempersiapkan sampel parameter lingkungan sangat diperlukan untuk mencegah kontaminasi mengingat tingkat kepekaan teknik nuklir sangat tinggi.
4. Masalah pencemaran lingkungan berkaitan erat dengan masalah hukum. Hasil analisis yang *bias* akibat kontaminasi sampel akan membawa konsekuensi hukum.

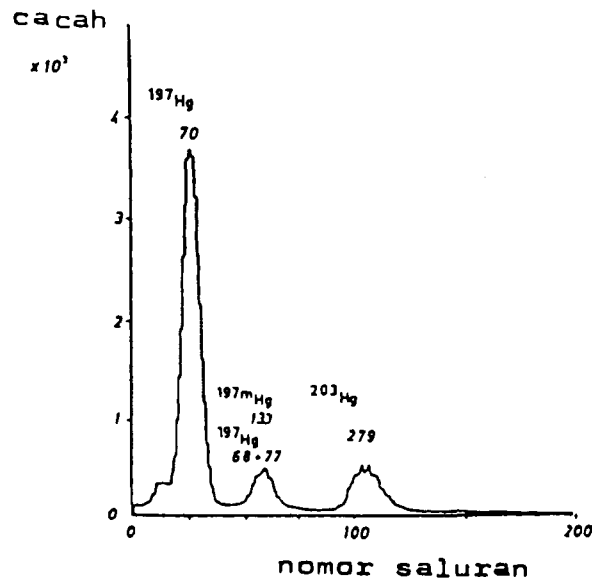
DAFTAR PUSTAKA

1. ANONIMOUS :Undang-undang Republik Indonesia Nomor 23 Tahun 1997 tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup.
2. ANONIMOUS Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 20 Tahun 1990 tentang Pengendalian Pencemaran air.
3. ANONIMOUS Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 51 Tahun 1993 tentang Analisis Mengenai Dampak Lingkungan.
4. ANONIMOUS Keputusan Menteri Kependudukan dan Lingkungan Hidup Nomor KEP-03/Men.KLH/VI/1993 tentang Baku Mutu Limbah Cair.
5. RODIER, J., Analysis of Water, John Willey & Sons, New York (1975).
6. GREENBERG, A.E., TRUSSEL, R.R., CLESCERI, L.S., eds., Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 6th ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, Washington (1985).

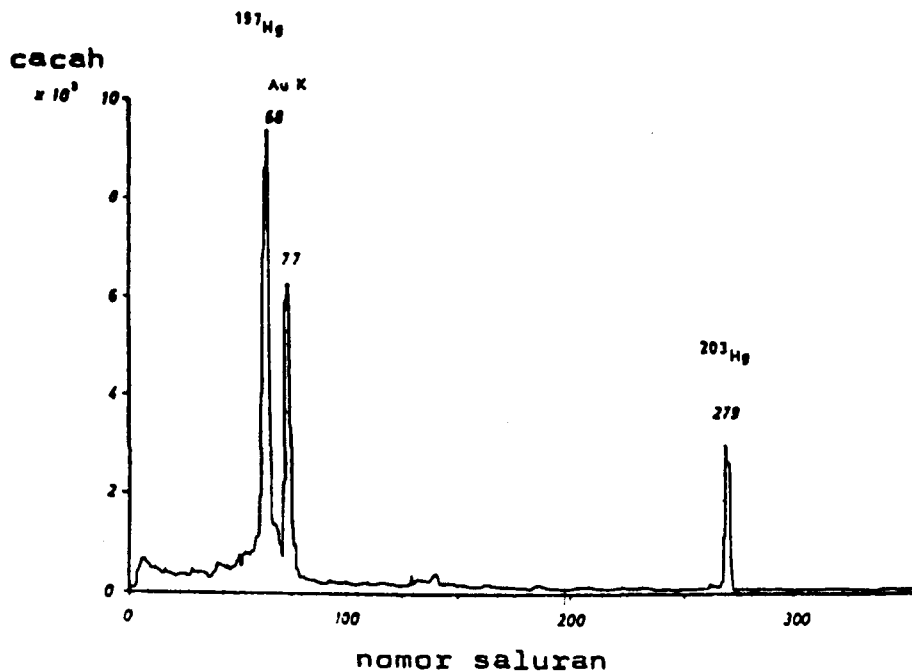
7. EATON, A.D., CLESCERI, L.S., GREENBERG, A.E., eds., *Standard Method for the Examination of Water and Wastewater*, 19th ed., American Public Health Association, Washington (1995).
8. O'BRIEN, R.D., *Insecticides, Action and Metabolism*, Academic Press New York (1967). 67.
9. DAS, H.A., FAANHOF, A., VANDERSLOOT, H.A., *Environmental Radioanalysis*, Elsevier, Amsterdam (1983) 7.
10. WESTERMARK, T., **Activation Analysis of Mercury in Environmental Studies**. *Edvance in Activation Analysis* (LENIHAN, J. M., THOMSON, S. J., and GUINN, V. P. eds) Vol. 2, Academic Press, London (1972) 60.
11. SCHULZE, W., **Activation Analysis: Some Basic Principles**. *Edvance in Activation Analysis*, (LENIHAN, J. M. A., THOMSON, S. J. eds) Vol. 1, Academic Press, London (1969) 3.
12. AIZAWA, H., *Metabolic Maps of Pesticides*, Academic Press, New York (1982) 91.
13. SITTIG, M., ed., *Pesticide Manufacturing and Toxic Materials Control Encyclopedia*, Noyes Data Corporation, New Jersey (1980) 229.
14. WANGSAATMADJA, A. H. R., Peran Iptek nuklir di bidang formasi sebagai unsur pendukung pemenuhan kebutuhan dasar manusia, Pidato Pengukuhan Ahli Peneliti Utama Bidang Farmasi, Pusat Produksi Radioisotop, Batan, Serpong, 30 Desember 1997.



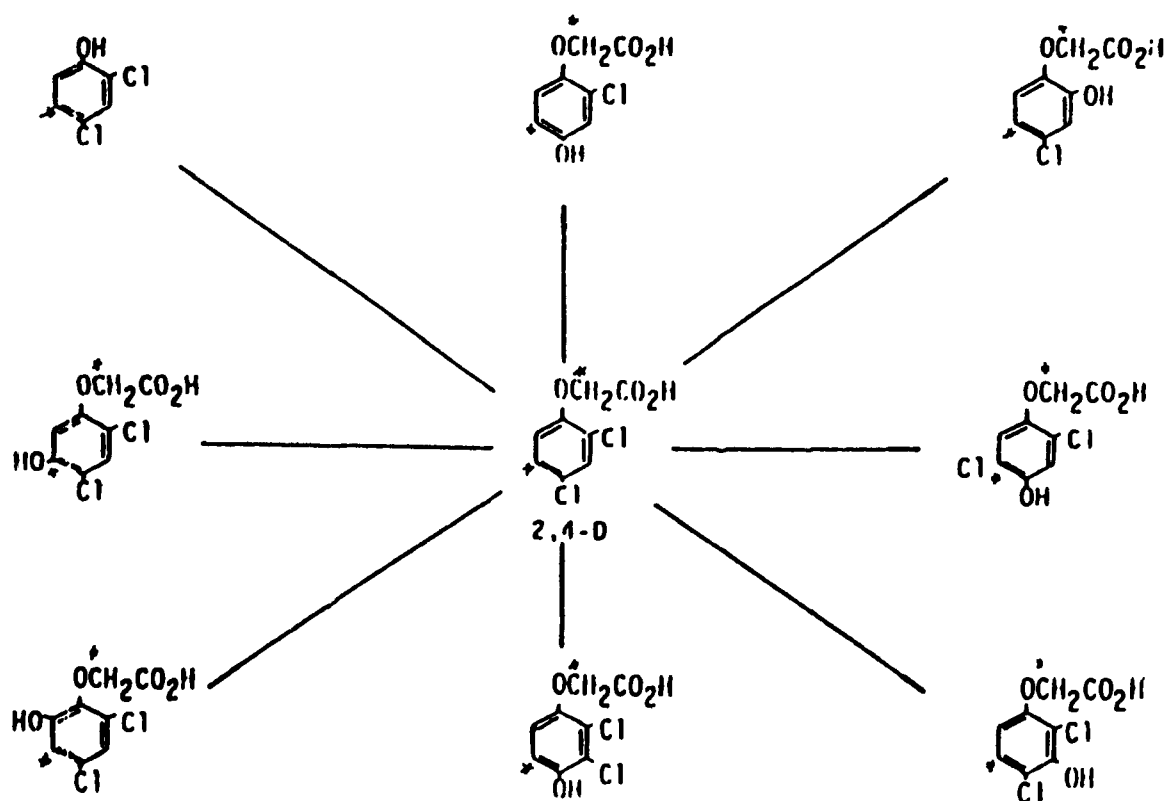
Gambar 1. Alur metabolisme DDT (8).



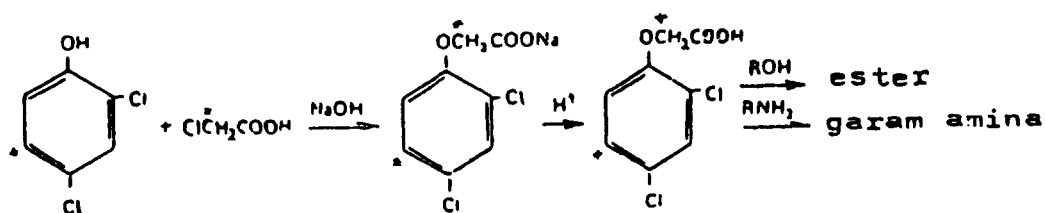
Gambar 2. Sepktrum gamma Hg dari 0,26 g hati *Phocana phocana* Lin. Iradiasi dengan fluks netron $4 \times 10^{12} \text{ n cm}^{-2} \text{ dt}^{-1}$ selama kurang lebih 25 jam di reaktor nuklir Norwegia JEEP II. Pencacahan dilakukan dengan detektor NaI (TI) tipe lubang selama 5 menit. Cacah pada 70 keV 250000 cacah. Kadar Hg yang ditemukan dalam sampel : 1570 ng Hg per g sampel.



Gambar 3. Sampel yang sama seperti pada Gambar 2. Dicapah dengan detektor Ge (Li) selama 5 menit. Puncak 70 keV dari gambar 2 terpisah menjadi puncak 68 keV (sinar-X dari ^{197}Au) sebanyak 33000 cacah dan puncak 77 keV (^{197}Hg) sebanyak 17000 cacah. Cacah total menjadi 50000 cacah, sama dengan seperlima cacah yang diperoleh dengan detektor NaI (TI).



Gambar 4. Alur metabolisme 2,4-D.
 *. Alternatif lokasi penandaan C-14 pada mekulur 2,4-D.



Gambar 5. Reaksi sintesis 2,4-D
 *. Alternatif lokasi penandaan C-14 pada pereaksi pembuatan 2,4-D bertanda Reaksi dapat diteruskan sampai pembentukan ester atau garam amina yaitu bentuk-bentuk kimia 2,4-D yang digunakan dalam formuli.