



KARAKTERISTIK **POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS**

DAN

BIOAKUMULASI HIDROKARBON AROMATIK POLISIKLIK (PAHS)

PADA SUMBERDAYA IKAN

(Kajian Empiris pada Sumber Daya Ikan
di Kota Tarakan Provinsi Kalimantan Utara)

RATNO ACHYANI

**KARAKTERISTIK
POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS
DAN *BIOAKUMULASI*
HIDROKARBON AROMATIK POLISIKLIK (PAHs)
PADA SUMBERDAYA IKAN**

**(Kajian Empiris pada Sumber Daya Ikan di Kota Tarakan
Provinsi Kalimantan Utara)**

**KARAKTERISTIK
POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS DAN
BIOAKUMULASI HIDROKARBON AROMATIK POLISIKLIK
(PAHs) PADA SUMBERDAYA IKAN**

(Kajian Empiris pada Sumber Daya Ikan di Kota Tarakan Provinsi
Kalimantan Utara)

Ratno Achyani



**KARAKTERISTIK
POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS DAN
BIOAKUMULASI HIDROKARBON AROMATIK POLISIKLIK
(PAHs) PADA SUMBERDAYA IKAN**
(Kajian Empiris pada Sumber Daya Ikan di Kota Tarakan Provinsi
Kalimantan Utara)

© Penerbit Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia (PRCI)

Penulis:
Ratno Achyani

Editor: Erik Santoso

Terbitan: Juli 2023

Cover: Tim Kreatif PRCI

Tata Letak: Tim Kreatif PRCI

Hak Cipta 2023, pada Penulis. Diterbitkan pertama kali oleh:

**Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia
ANGGOTA IKAPI JAWA BARAT**

Pondok Karisma Residence Jalan Raflesia VI D.151
Panglayungan, Cipedes Tasikmalaya – 085223186009

Website: www.rcipress.rcipublisher.org
E-mail: rumahcemerlangindonesia@gmail.com

Copyright © 2023 by Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia
All Right Reserved

- Cet. I –: Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia, 2023
Dimensi : 18,2 x 25,7 cm
ISBN: 978-623-448-561-5

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak buku ini dalam bentuk dan dengan
cara apapun tanpa izin tertulis dari penulis dan penerbit

Undang-undang No.19 Tahun 2002 Tentang
Hak Cipta Pasal 72

Undang-undang No.19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta
Pasal 72

Barang siapa dengan sengaja melanggar dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam pasal ayat (1) atau pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling sedikit 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp.1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp.5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).

Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran hak cipta terkait sebagai dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp.500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat serta karunia-Nya kepada kami sehingga kami berhasil menyelesaikan Buku dengan judul Karakteristik Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Dan Bioakumulasi Hidrokarbon Aromatik Polisiklik (PAHs) pada Sumberdaya Ikan (Kajian Empiris pada Sumber Daya Ikan di Kota Tarakan Provinsi Kalimantan Utara) sesuai yang ditargetka. Buku ini berisikan tentang bahan pencemar beracun dari kelompok hidrokarbon dan keberadaannya di lingkungan laut berbahaya bagi organisme akuatik dan manusia karena bersifat mutagenis dan karsinogenis. Kami menyadari bahwa Buku ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu kritik dan saran dari semua pihak yang bersifat membangun selalu kami harapkan demi kesempurnaan buku ini.

Akhir kata, kami sampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah berperan serta dalam penyusunan Buku ini dari awal sampai akhir. Semoga Tuhan Yang Maha Esa senantiasa meridhoi segala usaha kita. Amin.

Juni 2023

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	ii
BAB I <i>POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS</i> , APA DAN BAGAIMANA?.....	1
A. Pendahuluan	1
B. Karakteristik PAH.....	2
C. PAH di Lingkungan Perairan.....	7
D. Sumber PAH	9
E. Konsentrasi PAH.....	12
F. PAH Sebagai Indikator Sumber Pencemar	14
BAB II <i>TOKSISITAS DALAM UJI POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS</i>	18
A. Uji toksisitas (<i>Bioassay</i>).....	18
B. Toksisitas PAH.....	21
C. Dampak PAH terhadap Organisme	22
D. Jenis PAH Bersifat Racun	23
E. Karakteristik Perairan Pesisir dan Laut	26
BAB III KHASARAKTERISTIK <i>POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS</i> (PAH) DI AIR DAN SEDIMEN SERTA AKUMULASINYA PADA TUBUH IKAN NOMEI (<i>HORPODON NEHEREUS</i>) DI KOTA TARAAN.....	28
A. Kandungan PAH Di Air	28
B. Kandungan PAH Di Sedimen	30
C. Kandungan PAH di Daging dan Hati Ikan Nomei	31
D. Kandungan Lipid	38
E. Pembahasan Lanjutan.....	39
1. Sumber PAH	39
2. Tingkat Konsentrasi PAH	42
3. Status Ekotoksikologi PAH.....	44

BAB IV KONSENTRASI, POTENSI SUMBER DAN RESIKO PAHs DI AIR PERAIRAN SUNGAI DAN PESISIR KOTA TARAKAN KALIMANTAN UTARA.....	54
A. Pengantar.....	54
B. Proses Pemecahan Masalah.....	56
C. Diskusi dan Pembahasan	63
D. Penutup.....	76
BAB V KONSENTRASI, POTENSI SUMBER, DAN RESIKO PAHs DI SEDIMEN DI LINGKUNGAN PESISIR DAN SUNGAI KOTA TARAKAN KALIMANTAN UTARA.....	77
A. Pengantar.....	77
B. Proses Pemecahan Masalah.....	79
C. Diskusi dan Pembahasan	87
D. Penutup.....	105
BAB VI BIOAKUMULASI PAHs DAN EFEKNYA PADA IKAN BANDENG DAN KERANG KAPPAH.....	106
A. Pengantar.....	106
B. Proses Pemecahan Masalah.....	108
C. Diskusi dan Pembahasan	111
D. Penutup.....	123
DAFTAR PUSTAKA.....	130

BAB I

POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS, APA DAN BAGAIMANA?

A. Pendahuluan

Wilayah Kota Tarakan Propinsi Kalimantan Timur wilayahnya berupa pulau dan saat ini mengalami perkembangan yang cukup signifikan, namun kegiatan-kegiatan pembangunan yang berasal dari daratan tersebut berpotensi mempengaruhi perairan di sekitarnya. Hal ini ditunjukkan berbagai material daratan termasuk limbah yang masuk ke laut, dan diantaranya adalah limbah berupa minyak yang mampu dialirkan dengan melalui ± 20 anak sungai.

Komponen minyak sebagai sumber pencemar antara lain berasal dari buangan air balast, ceceran bahan bakar mesin-mesin kapal dan buangan oli bekas di daratan. Salah satu bahan pencemar komponen minyak yang berbahaya adalah *polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAH). PAH terdiri dari 2 atau lebih rantai karbon siklik yang memiliki stabilitas yang tinggi di lingkungan, mempunyai sifat hidrophobik yang tinggi dan struktur kimia yang stabil, sifatnya tidak mudah larut dan dapat dengan cepat terserap melalui partikel tanah, terutama pada bahan-bahan organik (Tang *et al.* 2005).

Distribusi dan *fate* PAH sebagai kontaminan organik di sedimen pada ekosistem perairan sangat perlu diperhatikan karena mempunyai efek mutagenik dan karsinogenik. Konsentrasi PAH dalam tingkat tertentu di air laut dan sedimen dapat bersifat toksik terhadap organisme laut bentik dan pelagik (Arias *et al.* 2009). Konsentrasi PAH di lingkungan 1-50 ppb dapat menyebabkan respon subletal pada

beberapa organisme yang sensitif (Neff 1979). Kandungan benzena 108 ppm, toluena 28 ppm, naftalena 3.8 ppm, dapat memberikan efek toksik pada *Cancer magister* (Dungeness crab) (Caldwell *et al.* 1977). Efek toksik PAH benzena 386 ppm dan toluena 1180 ppm juga berpengaruh pada *Gambusia affinis* (Mosquito fish) serta pada *Carassius auratus* (goldfish) yaitu toluena 22.80 ppm, xilin 16.94 ppm dan 1,3,5-trimetilbenzena 12.52 ppm (Brenniman *et al.* 1976).

Banyak kegiatan-kegiatan yang ada di Kota Tarakan berpotensi sebagai sumber polutan PAH, diantaranya kegiatan-kegiatan eksplorasi dan eksploitasi migas, kegiatan industri pengolahan kayu dan pengolahan ikan dan udang di pesisir utara, selatan dan barat, pembuangan limbah-limbah oli dari usaha bengkel yang banyak tersebar, lalu lintas aktivitas kapal serta kegiatan pembakaran sampah dengan *incenerator* di TPAS (tempat pembuangan akhir sampah). Penelitian tentang senyawa organik PAH sudah banyak dilakukan baik berupa distribusi, karakteristik dan akumulasinya pada sedimen, air dan biota laut (Tabel 1). Di wilayah Indonesia informasi saat ini hanya sebatas pada perairan laut dalam dan beberapa perairan seperti Teluk Jakarta, sehingga data tentang efek PAH di Indonesia masih sangat sedikit.

B. Karakteristik PAH

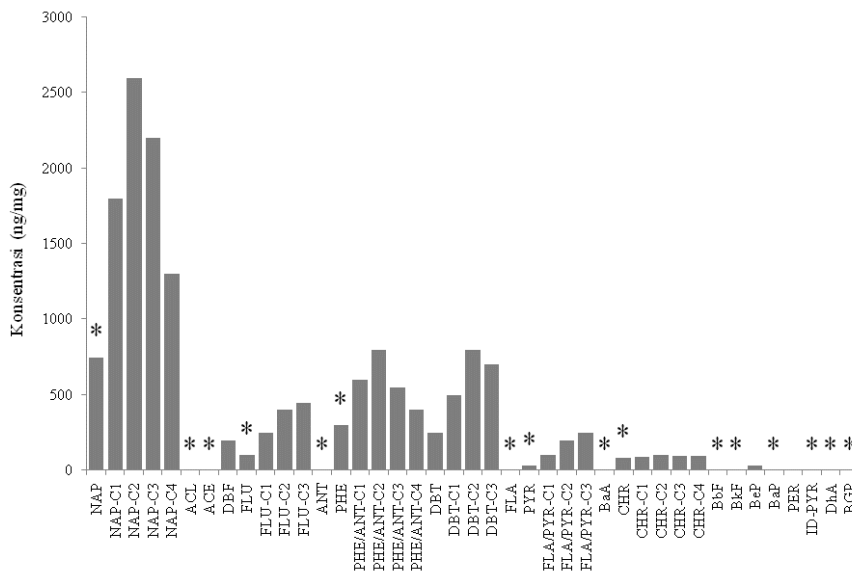
PAH adalah kelompok pencemar organik persisten (POP) khas yang terdiri dari ratusan kandungan individual. Komponen ini terdiri dari 2 atau lebih rantai benzena yang terdiri dari atom hidrogen dan karbon (Douben 2006). Secara umum terdapat 50 jenis senyawa yang sering digunakan dalam studi *environmental forensic investigations*. Namun hanya 16 senyawa yang menurut USEPA (*united states environmental protection agency*) sangat berbahaya keberadaannya di lingkungan

(Tabel 1). Beberapa senyawa tersebut adalah PAH yang tidak tersubstitusi (*parent*) dan *non-alkil* (Gambar 1 dan 2)

Tabel 1. Jenis PAH yang biasa digunakan dalam studi *environmental forensic investigations* (ΣPAH_{50}) dengan 16 jenis PAH sebagai polutan prioritas menurut USEPA (ΣPAH_{16}) (Boehm 2006).

Jenis PAH	Singkatan	Jenis PAH	Singkatan
Naftalena*	NAP	Pirena*	PYR
C1-naftalena	NAP-C1	C1-Fluorantena/pirena	FLA/PYR-C1
C2-naftalena	NAP-C2	C2-Fluorantena/pirena	FLA/PYR-C2
C3-naftalena	NAP-C3	C3-Fluorantena/pirena	FLA/PYR-C3
C4-naftalena	NAP-C4	Benz(a)antrasena*	BaA
Bifenil	BPH	Krisena*	CHR
Asenaftilena*	ACL	C1-krisena	CHR-C1
Asenaftena*	ACE	C2-krisena	CHR-C2
Dibenzofuran	DBF	C3-krisena	CHR-C3
Fluorena*	FLU	C4-krisena	CHR-C4
C1-Fluorena	FLU-C1	Benzo(a)Fluorantena	BaF
C2-Fluorena	FLU-C2	Benzo(b)Fluorantena*	BbF
C3-Fluorena	FLU-C3	Benzo(j,k)Fluorantena*	BkF
Antrasena*	ANT	Benzo(e)pirena	BeP
Fenantrena*	PHE	Benzo(a)pirena*	BaP
C1-fenantrena/antrasena	PHE-C1	Perylene	Per
C2-fenantrena/antrasena	PHE-C2	Indeno(1,2,3-c,d)pirena*	ID-PYR
C3-fenantrena/antrasena	PHE-C3	Dibenzo(a,h)antrasena*	DaA
C4-fenantrena/antrasena	PHE-C4	Benzo(g,h,i)perylene*	BgP
Dibenzotiofena	DBT	Dibenzo(a,e)pirena	DeP
C1- dibenzotiofena	DBT-C1	Dibenzo(a,h)pirena	DhP
C2- dibenzotiofena	DBT-C2	Dibenzo(a,1)pirena	D1P
C3- dibenzotiofena	DBT-C3	Dibenzo(a,i)pirena	DiP
C4- dibenzotiofena	DBT-C4	Dibenzo(a,e)Fluorantena	DeF
Fluorantena*	FLA	Anthanthren	ANTr

*16 PAH polutan prioritas USEPA

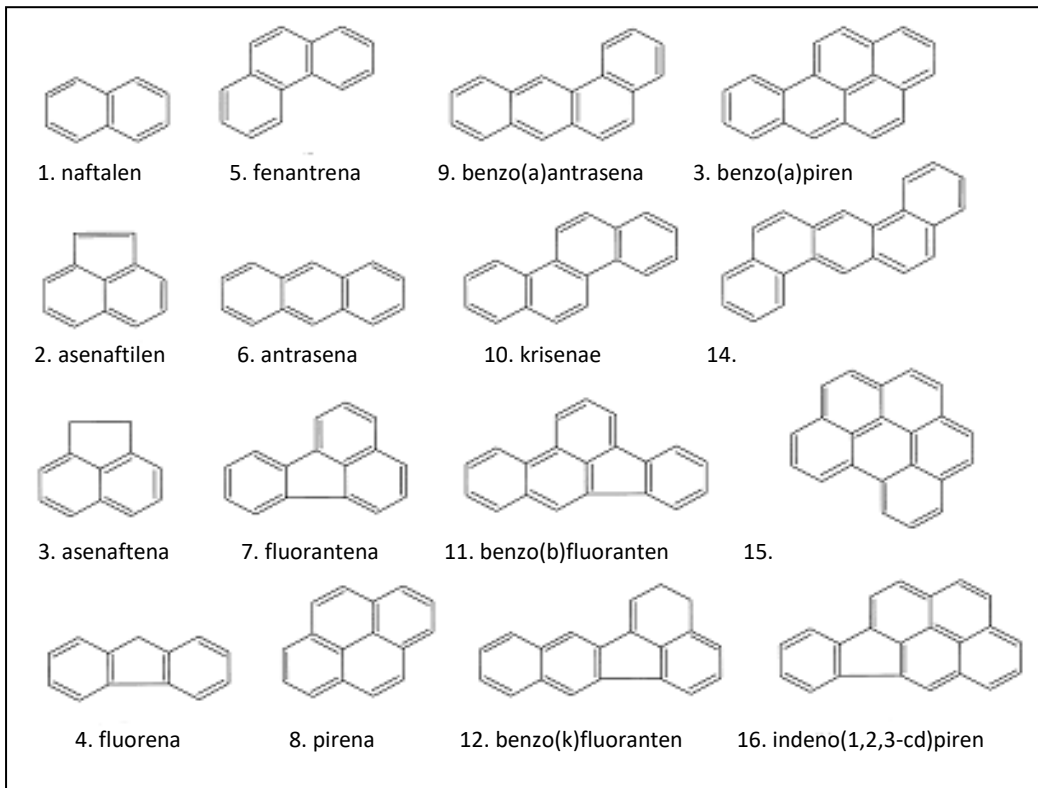


Gambar 1. Analisis PAH (Σ PAH₅₀) pada cuplikan minyak mentah (Boehm 2006). Ket : (*) Σ PAH₁₆ polutan utama menurut USEPA

PAH dihasilkan dari proses alami dan proses antropogenik. Menurut Boehm (2006) PAH secara umum dihasilkan melalui 4 proses :

1. Lambat, perubahan suhu rendah (<70°C)/diagenesis dari partikel organik sebagai bagian dari perubahan yang dialami oleh biomolekul dan hubungan organik setelah pertama kali terdeposit di sedimen;
2. Relatif cepat (hari-tahun), perubahan yang panjang, temperatur sedang (100-300°C) membentuk minyak fosil yaitu petroleum dan batu bara (contoh dari petrogenik);
3. Cepat, temperatur tinggi (>500°C), pembakaran yang tidak sempurna/tidak efisien (contohnya oksigen yang sedikit) dari biomassa bahan organik (pirolisis) seperti kebakaran hutan dan rumput serta kegiatan antropogenik seperti pembakaran bahan bakar fosil (contoh dari pirogenik);

4. Biosintesis oleh tumbuhan dan binatang dari komponen PAH individu atau gabungan yang relatif sederhana.



Gambar 2. Stuktur 16 jenis polutan utama PAH menurut *United State Environmental Protection Agency* (USEPA) (Amir *et al.* 2005).

PAH bersifat hidrofobik ($\log K_{ow}$ 3–8) dengan daya larut yang sangat rendah, sehingga konsentrasi PAH di lingkungan perairan sangat rendah (Nemr dan Aly 2003). Selain bersifat hidrofobik, PAH memiliki struktur stabil, sehingga PAH tidak mudah larut dan dapat diabsorpsi dengan cepat ke dalam tanah termasuk di lingkungan perairan seperti sedimen (Tang *et al.* 2005).

Secara umum kelarutan PAH bervariasi, yaitu tingkat kelarutan rendah ke sangat rendah dan tingkat kelarutan rendah ke moderat. Daya larut PAH bervariasi berdasarkan kondisi media, 1-2 bulan di lingkungan perairan, 2 bulan sampai 2 tahun di tanah, dan 8 bulan

sampai 6 tahun di sedimen. Log *n*-octanol/*water partition coefficients* (log K_{OWS}) dari PAH meningkat dengan peningkatan massa molekul dengan kisaran kira-kira 3.0-7.0, mengindikasikan sifat hidropobik tinggi untuk PAH dengan berat molekul tinggi (Kalf *et al.* 1996).

Antrasena, fluorena dan fenantrena adalah senyawa PAH yang memiliki 2 rantai benzena yang dikelompokkan dalam PAH dengan berat molekul rendah (BMR). Fluorantena memiliki 4 rantai benzena yang digolongkan pada PAH dengan berat molekul tinggi (BMT) (Tabel 2). Semakin besar berat molekulnya maka semakin persisten keberadaannya di lingkungan.

Tabel 2. Pengelompokan PAH berdasarkan berat molekul dan jumlah ring (USEPA).

Berat molekul rendah (BMR; <202)		Berat molekul tinggi (BMT; >202)	
2-ring	3-ring	4-ring	5-ring
Aseftilen	Antrasena	Benzo(a)antrasena	Krisena
Bifenil	Fluorena	Fluorantena	Benzo(a)pirena
Naftalena-1	Fenantrena	Pirena	Benzo(e)pirena
Metilnaftalena-1	1-Metilfenantrena		Dibenz(a,h)antrasena
Metilnaftalena-2			Pirelin
2,6-dimetilnaftalena			

Fenantrena dan fluorena memiliki sifat karsinogenik. Antrasena tidak bersifat karsinogenik namun sangat fototoksik (peningkatan sifat toksik ketika terkena cahaya, khususnya sinar UV) sehingga dapat berubah menjadi karsinogenik. Fluorantena adalah PAH tidak bersifat toksik namun berpotensi menjadi karsinogenik. Fluorena bukan PAH yang bersifat phototoksik. Antrasena, fluorantena dan fenantrena sering digunakan dalam menduga sumber dari PAH (Irwin 1997). Fenantrena lebih stabil dari pada antrasena. Ketika temperatur rendah fenantrena memproduksi fraksi molal lebih banyak dari pada antrasena (Tang *et al.* 2005).

C. PAH di Lingkungan Perairan

PAH masuk ke lingkungan secara umum melalui tiga proses; (1) pembakaran bahan organik pada saat suhu sangat tinggi; (2) tumpahan minyak; (3) proses diagenesis (perubahan bahan organik sedimen secara fisik, kimia dan biologi) (Neff 1979). Pergerakan PAH di lingkungan tergantung pada sifatnya seperti mudahnya PAH larut di air dan mudahnya PAH menguap ke atmosfer. Secara umum PAH tidak mudah larut dalam air. PAH berada di udara sebagai uap air atau terperangkap pada partikel kecil. PAH dapat berpindah dengan jarak yang jauh sebelum mereka kembali ke bumi melalui hujan atau partikel yang tersuspensi (Irwin 1997).

Nilai K_{OC} mengindikasikan besarnya potensi terikat pada organik karbon di tanah dan sedimen secara kimia (Tabel 4). PAH dengan berat molekul rendah mempunyai kisaran nilai dari 3-4 yang mengindikasikan potensi *moderate* terserap pada karbon organik di tanah dan sedimen. Potensi *medium* nilai K_{OC} adalah 4. PAH dengan berat molekul tinggi mempunyai nilai K_{OC} berkisar antara 5-6, mengindikasikan kecenderungan yang kuat terserap pada karbon organik. Penyerapan PAH di tanah dan sedimen meningkat dengan meningkatnya kandungan organik karbon dan juga tergantung pada ukuran partikel (Irwin 1997).

Tabel 3. Besaran potensi 16 bahan pencemar PAH terikat pada sedimen (K_{OC}) dan air (K_{OW}).

No	Jenis PAH	Singkatan	Nilai K_{OC}	Nilai K_{OW}	Berat molekul
1	Naftalena	NAP	3.37	-	128
2	Asenaftilena	ACL	4.07	1.40	152
3	Asenaftena	ACE	3.98	3.66	153
4	Fluorena	FLU	4.18	3.86	166
5	Antrasena	ANT	4.45	4.15	178

No	Jenis PAH	Singkatan	Nilai K_{oc}	Nilai K_{ow}	Berat molekul
6	Fenantrena	PHE	4.45	4.15	178
7	Fluorantena	FLA	4.90	4.58	202
8	Pirena	PYR	4.88	4.58	202
9	Benz(a)antrasena	BaA	5.61	5.30	228
10	Krisena	CHR	5.16	5.30	228
11	Benzo(b)Fluorantena	BbF	6.04	5.74	252
12	Benzo(j,k)Fluorantena	BkF	6.06	5.74	252
13	Benzo(a)pirena	BaP	6.06	6.74	252
14	Indeno(1,2,3-c,d)pirena	ID-PYR	6.58	6.20	276
15	Dibenzo(a,h)antrasena	DaA	6.82	6.52	278
16	Benzo(g,h,i)perylene	BgP	6.50	6.20	276

K_{ow} : Octanol: water partition coefficients

K_{oc} : Organic carbon: water in sediment partition coefficients

Kegiatan antropogenik adalah sumber utama dari PAH, besaran PAH di tanah pada daerah urban kira-kira 2-10 lebih tinggi dari daerah pedesaan (Tang *et al.* 2005). PAH terbentuk selama proses pirolisis pada semua bahan organik dan bahan kontaminan organik yang tersebar di sedimen perairan. PAH di permukaan tanah dapat disebarkan oleh aliran air permukaan dan debu. Permukaan tanah adalah salah satu sumber dari kontaminasi PAH yang berada di udara dan sedimen. Bentuk tanah dan strukturnya seperti organik karbon memainkan fungsi penting ketika PAH terabsorpsi di tanah (Tang *et al.* 2005).

Partisi dari bahan kontaminan yang hidropobik, yaitu yang tersuspensi dan terlarut mengontrol *fate* PAH di lingkungan dan *bioavailability* pada organisme akuatik. Konsentrasi PAH di air dapat dipengaruhi oleh durasi dari jumlah partikel PAH yang terabsorpsi. Kandungan karbon organik di air dan sedimen memainkan peran penting dalam distribusi PAH (Menon dan Menon 1999). PAH dengan berat molekul rendah dapat hilang dengan cepat di sedimen, sedangkan

PAH dengan berat molekul tinggi lebih *persisten* (Wilcock *et al.* 1996, diacu dalam Amir *et al.* 2005). *Fate* dari sedimen dan air yang terkontaminasi oleh PAH, konsentrasinya akan berkurang seiring dengan waktu. Hal ini disebabkan oleh adanya biodegradasi oleh bakteri atau mikroorganisme.

Biodegradasi PAH berhubungan dengan berat molekul. Rantai 2 dan 3 dari PAH (naftalena, fluorena dan fenantrena) dengan cepat terdegradasi. PAH dengan 4 rantai (fluorantena, pirena, benz(a)antrasena dan krisena) umumnya terdegradasi 50% dalam beberapa bulan. PAH dengan rantai 5 (benzo(b)fluorantena dan benzo(a)pirena) berkurang lambat selama beberapa tahun (Irwin 1997).

Sedimen di rawa mangrove yang terkontaminasi PAH dari 2135 ng/g menjadi 1196 ng/g (120 hari) (Ke *et al.* 2002). PAH dari tumpahan minyak memiliki reaktivitas yang terjadi dari komponen minyak selama biodegradasi yaitu: *n*-alkana (berat molekul rendah) > fenantrena > 3-2-metilfenantrena > *n*-alkana dengan panjang rantai intermediate > *n*-alkana dengan rantai lebih panjang > isoprenoids 9-1-metilfenantrena (Juan *et al.* 1996).

D. Sumber PAH

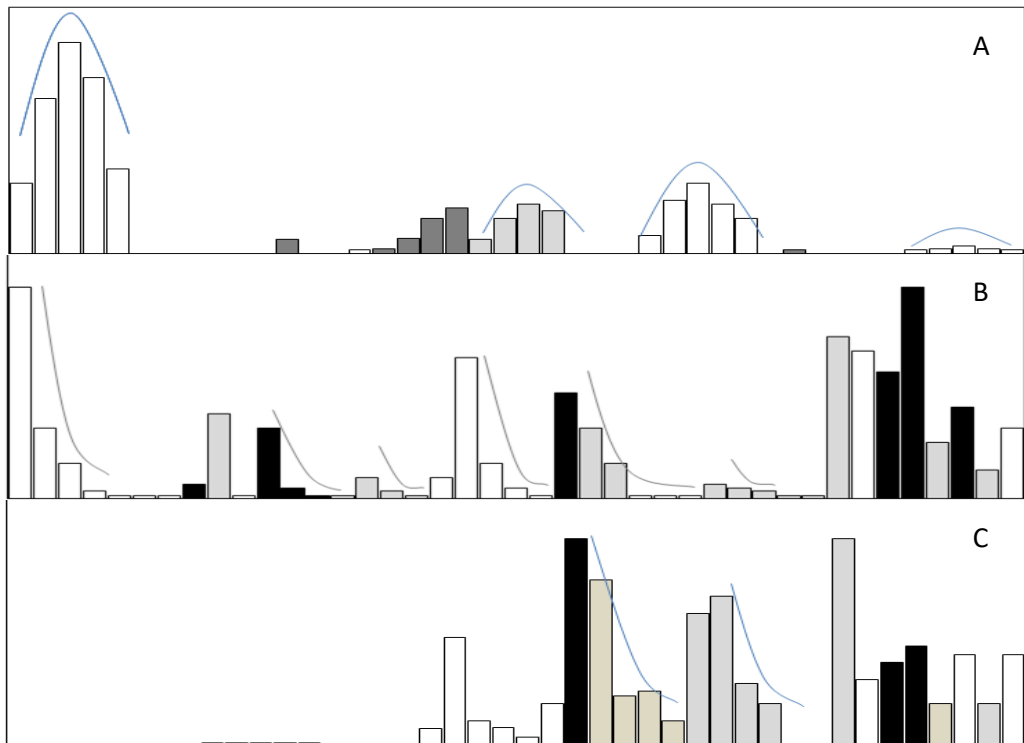
PAH masuk ke dalam air melalui berbagai sumber yang dengan cepat diabsorpsi oleh partikel organik dan anorganik. Level PAH yang terakumulasi oleh biota perairan lebih tinggi dari kandungan lingkungan. PAH dapat berpindah melalui beberapa kegiatan seperti fotooksidasi, oksidasi kimia, metabolisme mikroba dan metabolisme oleh metazoan yang lebih tinggi. Konsentrasi relatif dari PAH pada ekosistem perairan secara umum adalah lebih tinggi pada sedimen, *intermediate* di biota akuatik, dan rendah di kolom perairan (Neff 1979).

Secara umum sumber PAH yang masuk ke lingkungan perairan dapat dibedakan berdasarkan 2 sumber :

- a. Pirogenik. PAH yang terbentuk karena peningkatan suhu secara alami dan proses antropogenik. Selama proses peningkatan suhu, bahan organik tersebut lolos dari pembakaran sempurna (oksidasi menjadi karbon dioksida dan air). PAH pirogenik terbentuk selama pembakaran menggunakan kayu (kompor), dan pembakaran dari bahan bakar fosil (bensin, solar, oli mesin).
- b. Petrogenik. Minyak dan batu bara yang ada di dalam stuktur geologi dan terbentuk pada waktu yang lama menghasilkan PAH petrogenik. Batu bara terbentuk dari sisa-sisa tumbuhan yang terakumulasi. Selama terkubur jutaan tahun, bahan ini berubah menjadi batu bara, membentuk senyawa aromatik dengan struktur 3 dimensi. Jumlah rantai aromatik yang terbentuk per unit struktur batu bara bervariasi. Sebagian besar batu bara terdiri dari 3-5 rantai per unit struktur, dengan beberapa unit dapat mencapai 10 rantai aromatik.

PAH petrogenik secara umum dicirikan dengan alkil PAH lebih banyak daripada non-alkil dari PAH utama dan sebaliknya merupakan sumber pirogenik. Selain itu sumber dari petrogenik lebih banyak PAH dengan rantai 2 dan 3, dan sumber dari pirogenik lebih banyak PAH dari rantai 4-6 (Gambar 3). PAH dengan jumlah rantai karbon 4-6 merupakan berat molekul tinggi >202 seperti naftalena, fluorantena dan pirena biasanya terdeteksi sebagai sumber pirogenik seperti dari pembakaran batu bara, kayu, dan bahan bakar kendaraan. PAH dengan berat molekul rendah <202 yaitu PAH dengan jumlah rantai karbon 2-3/*alkil-substituted* PAH berasal dari sumber petrogenik seperti 2-metilnaftalena, asenaftena, fenantrena dan fluorena (Arias *et al.* 2009). PAH seperti fenantrena berasal dari sumber petrogenik dan pirogenik (*mixed sources*) (Boehm 2006). PAH dengan rantai 4 sampai 7 umumnya

berasal dari sumber pirogenik. PAH dari proses pirolitik lebih sering berasosiasi dengan sedimen dan sebagian besar resistan terhadap degradasi oleh mikroba dibandingkan dengan PAH yang berasal dari petrogenik (Mostafa *et al.* 2009).



Gambar 3. Karakteristik umum kumpulan PAH untuk sumber petrogenik dan pirogenik (Boehm 2006). (A) Ciri dari sumber petrogenik (contoh cuplikan minyak mentah): alkil $>$ *parent*, sedikit PAH dengan rantai 4-6; (B) Ciri pertama pirogenik (contoh cuplikan aspal): *parent* $>$ alkil, ring 2 dan 3 lebih tinggi konsentrasinya; (C) Ciri kedua pirogenik (contoh cuplikan urban runoff): *parent* $>$ alkil, rantai 4-6 lebih tinggi konsentrasinya.