

BAB II

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE (IUCN) DAN PROLIFERASI PENCEMARAN TERSEMBUNYI BANGKAI KAPAL PERANG V1302

Konsepsi kepengurusan atau kepemilikan mandat perlindungan terhadap perlindungan laut sejauh ini sejatinya masih berpolarisasi pada *International Union for Conservation of Nature* (IUCN). Sebagaimana adanya identifikasi ribuan bangkai kapal di dunia yang kini sudah mulai mencemari lautan dan biotanya dengan berbagai macam polutan, membuat dorongan mandat IUCN merambat pada intensitas kapal dan penanggulangan yang harus diambil serta melaksanakan berbagai hubungan kerjasama dengan berbagai spesifikasi badan terkait.

Bab II ini akan menjabarkan konstruksi mandat dan tanggung jawab IUCN dalam menanggulangi pencemaran bangkai kapal dan hubungan kerjasama dengan badan setingkat yang ada dalam naungan hukum laut internasional. Berikut pula, pada bagian bab ini akan memberikan gambaran kasus dan identitas kapal *John Mahn* atau *Voorpsteenboot 1302 (V1302)*, proliferasi yang disebabkan dan identifikasi ancaman yang akan terjadi akibat pencemaran.

2.1. *International Union for Conservation of Nature (IUCN)*

2.1.1. Sejarah dan Tujuan IUCN

2.1.1.1 Golakan Perubahan Kontruksi dan Konvergensi Organisasi

Pasca Perang Dunia II yang mengakibatkan banyaknya kerusakan alam dan lingkungan yang sangat buruk, sehingga menyita banyak perhatian para petinggi politik dan teknokrat dunia untuk menginisiasi lahirnya *International Union for the Protection of Nature* (IUPN) di Fontainebleau, Perancis pada 5 Oktober 1948 (*International Union for Conservation of Nature (IUCN)*, 2024). IUPN sendiri terbentuk atas ide penggerak utamanya Julian Huxley direktur pertama UNESCO yang berinisiasi dengan Luc Hoffmann pendiri World Wildlife Fund, serta Jean Paul Harroy penulis dan juga pakar konservasi yang menjadi Direktur Jenderal pertama IUPN setelah berganti nama menjadi *International Union for Conservation of Nature (IUCN)* pada tahun 1958.

IUCN sendiri didirikan oleh 18 negara dan didongkrak oleh berbagai organisasi internasional seperti UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*) sebagai kunci utama, lalu didukung oleh *British Nature Conservancy*, *Société Nationale de Protection de la Nature* (SNPN), dan *International Office for the Protection of Nature* (IOPN) yang merupakan organisasi internasional pertama yang mengatur dan mengkoordinasikan mandat perlindungan alam dan lingkungan sebelum Perang Dunia II. Peran organisasi dan tokoh politik utama yang gesit dalam mengemas kepentingan lingkungan membuat IUCN semakin cepat dalam memiliki mandat dan tanggung jawab yang konsisten

dalam polemik perlindungan lingkungan dan sumber daya alam (*International Union for Conservation of Nature* (IUCN), 2024).

Sebagai organisasi dengan lingkup yang luas, karena merupakan organisasi gabungan yang melibatkan lebih dari 1.400 LSM dan berbagai organisasi akademis, IUCN yang juga berperan sebagai kontributor utama dalam berbagai konvensi internasional bukanlah organisasi pelaksana lapangan, jadi basis organisasi ini adalah sebagai penyelia standar, pengumpul data dan statistik, serta konsultasi kebijakan. Sehingga konvergensi dalam IUCN ini memainkan peran anggota yang *multistakeholder*, yang berfokus pada banyak sektor dan implementasi praktikal nyata.

Perluasan konvergensi dan konsistensi sektor yang ditangani IUCN ini dimulai sejak tahun 1990-an dengan semakin banyaknya permintaan fokus lingkungan yang membutuhkan banyak standarisasi yang akhirnya melahirkan IUCN *Red List of Threatened Species* yang merupakan standarisasi dan daftar global yang menilai kepunahan spesies yang dianggap sebagai “indikator kesehatan” seluruh hayati di dunia menjadi 7 kelas utama (IUCN Red List, 2025). Tak hanya menjadi pion utama dalam pengklasifikasian hayati, IUCN juga ikut andil dalam perlindungan terestrial, iklim dan pencemaran, lautan dan termasuk bangai kapal.

2.1.1.2 Tujuan, Visi serta Misi *International Union for Conservation of Nature* (IUCN)

Aliansi yang dibentuk oleh IUCN sendiri berbasis organisasi konservasi yang tidak langsung menjalankan proyek konservasi, tetapi berperan sebagai pengumpul data, penyedia standar ilmiah dan sebagai konsultan pemerintah maupun sektor swasta yang sejalan dengan konstitusi pertama dalam pembentukan IUP yang menyatakan tujuan IUCN adalah mendorong dan merekomendasikan tindakan nasional dan internasional serta ikut serta dalam pengurusan dan pengesahan konvensi terkait perlindungan dan penyelesaian masalah lingkungan dan hayati (*History of IUCN*, 2024).

Selain itu, sesuai dengan bentuknya yang berdedikasi sebagai organisasi induk yang tidak menangani masalah lapangan secara langsung, IUCN dalam praktek konvergensinya menggabungkan prinsip penyusunan kebijakan (*policy briefing*), praktek konservasi (*conservation practice*), serta riset dan studi ilmiah (*science*). Seluruh regulasi sektor dibagi ke dalam legislasi dalam komite lembaga yang disebut *Commission on Environmental Policy, Law, and Administration* (CEPLA) yang kemudian diubah menjadi *World Commission on Environmental Law* (WCEL) yang diubah secara sah pada tahun 2013 (*History of IUCN*, 2024).

Komisi legislasi yang ada di IUCN ini seluruhnya memiliki keahlian dibidang masing-masing yang sirkular dengan tabulasi dan penerbitan buletin sejak 1985 dan sampai saat ini aktif menyediakan forum kolaborasi.

2.1.2. Inisiatif IUCN dalam Konservasi dan Penanganan Bangkai Kapal

IUCN terlibat dalam berbagai inisiatif yang membahas konservasi bangkai kapal, khususnya melalui berbagai pengembangan standar global untuk mengelola bangkai kapal. Keterlibatan ini tentunya tidak dilakukan dengan aktivitas penanggulangan secara langsung, namun bergerak sebagai penginisiasi dan pendorong kebijakan. IUCN secara sadar mengetahui bahwa kapal tenggelam termasuk kedalam “pencemaran tersembunyi” yang perlu ditangani karena mengganggu stabilitas dan keseimbangan ekosistem laut (*International Institute for Sustainable Development* (IISD), 2021).

Bangkai-bangkai kapal, terutama yang berasal dari Perang Dunia I dan II, mengandung jutaan galon minyak berat dan bahan kimia berbahaya yang berpotensi mencemari ekosistem laut. IUCN memandang isu ini sebagai ancaman tersembunyi yang harus segera ditangani demi menjaga keberlanjutan laut dan kesehatan komunitas pesisir.

Salah satu inisiatif utama IUCN adalah mendorong kerja sama internasional untuk mengatasi masalah ini secara proaktif. Pada IUCN *World Conservation Congress* 2020 atau Kongres Konservasi Dunia IUCN 2020 di Marseille, Prancis, IUCN mengeluarkan resolusi mengakui urgensi ancaman dari bangkai kapal. IUCN menganjurkan pengembangan *toolkit* untuk menilai risiko pencemaran minyak dari bangkai, serta mendorong negara-negara anggota dan badan pemerintah untuk berbagi praktik terbaik dalam penanggulangan polutan dari bangkai kapal tenggelam (IUCN, 2023).

Selain itu, IUCN mendukung program dokumentasi dan penilaian risiko seperti *Sunken Wreck Environmental Risk Assessment* (SWERA), yang membantu negara-negara seperti Estonia, Swedia dan Finlandia dalam memetakan bangkai kapal berbahaya. Langkah ini bertujuan agar respons terhadap potensi kebocoran minyak dapat dilakukan sebelum terjadi pencemaran besar (Estonian Safety Investigation Bureau, 2018).

Melalui pendekatan berbasis data, kolaborasi internasional, serta dorongan untuk tindakan preventif, IUCN berusaha mengurangi dampak negatif bangkai kapal terhadap lingkungan laut. Peran ini semakin penting di tengah perubahan iklim, yang mempercepat degradasi struktur bangkai kapal dan meningkatkan risiko kebocoran (*MARINE POLLUTION FROM SUNKEN VESSELS*, 2020).

2.2. Kapal *John Mahn* atau *Voorpostenboot 1302 (V1302)*

2.2.1. Kasus Bangkai Kapal Perang V1302

Perang Dunia II tidak hanya menyisakan trauma sejarah, tetapi juga warisan tersembunyi yang kini muncul kembali dalam bentuk ancaman lingkungan laut. Salah satu manifestasi dari warisan tersebut adalah keberadaan bangkai kapal perang yang telah tenggelam puluhan tahun lalu. Salah satu kasus yang menjadi sorotan ilmuwan dan pemerhati lingkungan adalah kapal *V1302 John Mahn*. Kapal ini bukan hanya saksi bisu sejarah peperangan di Laut Utara, namun juga menjadi ancaman ekologis karena kandungan zat berbahaya yang tersimpan di dalamnya. *V1302 John Mahn* awalnya adalah kapal penangkap ikan (*trawler*) yang dibangun oleh Reiherstieg Schiffswerfte & Maschinenfabrik di Hamburg, Jerman, pada tahun

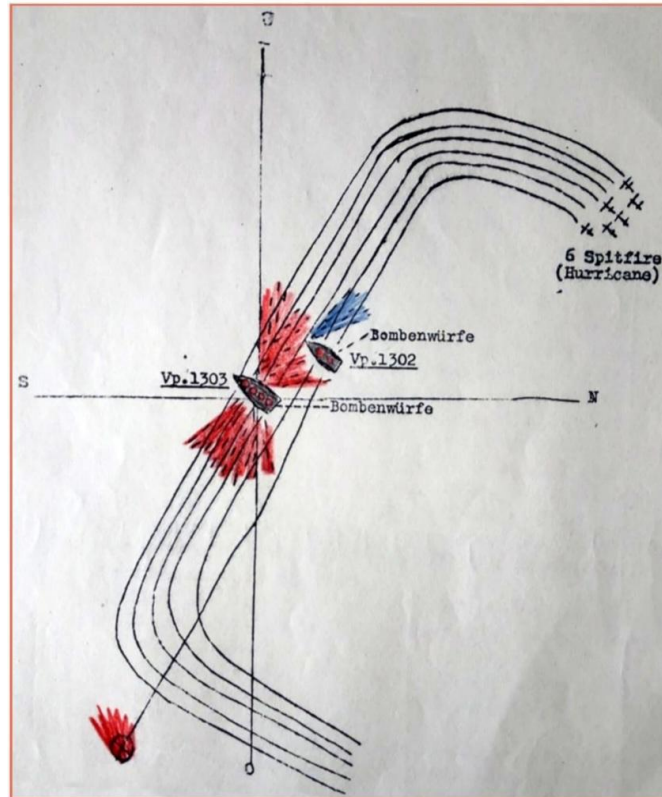
1927. Kapal ini memiliki panjang sekitar 48 meter dan bobot mati sekitar 320 ton. Pada masa damai, kapal ini digunakan oleh perusahaan Ebeling dari Bremerhaven untuk mencari ikan di perairan Atlantik Utara, dengan nomor registrasi *BX221* (Maser et al., 2023).

Namun, ketika Perang Dunia II pecah pada tahun 1939, Angkatan Laut Jerman (*Kriegsmarine*) merekuesisi banyak kapal sipil untuk keperluan militer. *John Mahn* adalah salah satunya. Pada 28 September 1939, atas tuntutan kebutuhan perang kapal ini diubah menjadi kapal patroli perang bagi Jerman (*Vorpostenboot*) dan diberi kode *V1302*, tergabung dalam *13 Vorpostenflottille* (Seidel, 2019). Transformasi ini melibatkan penambahan meriam angkatan laut, senjata anti-pesawat, muatan kedalaman, serta peningkatan daya tahan struktur kapal. Sebagai kapal patroli, *V1302 John Mahn* digunakan untuk mengawal kapal induk, mendeteksi kapal selam musuh, dan menjaga jalur pelayaran dari ancaman musuh di perairan Laut Utara (Maser et al., 2023).

Salah satu misi penting yang diikutinya adalah Operasi Cerberus (*Channel Dash*), sebuah operasi besar Jerman untuk memindahkan armada utama dari Brest ke Kiel melewati Selat Inggris yang dijaga ketat oleh Angkatan Laut dan Udara Inggris. Pada 12 Februari 1942, ketika sedang berpatroli di lepas pantai Belgia sekitar 20 mil dari Zeebrugge, kapal ini diserang oleh pesawat *Royal Air Force* (RAF) sekitar pukul 15:53, kapal ini akhirnya tenggelam. Serangan tersebut sangat dahsyat, dan *V1302 John Mahn* tenggelam yang saat itu membawa 38 awak, harus gugur bersama 11 awak kapal dan sebanyak 27 lainnya berhasil diselamatkan.

Bangkai kapal ini kemudian tenggelam dan terkubur di dasar Laut Utara (Maser et al., 2023).

Gambar 2.1. Ilustrasi serangan pertemuan pemicu tenggelamnya kapal V1302

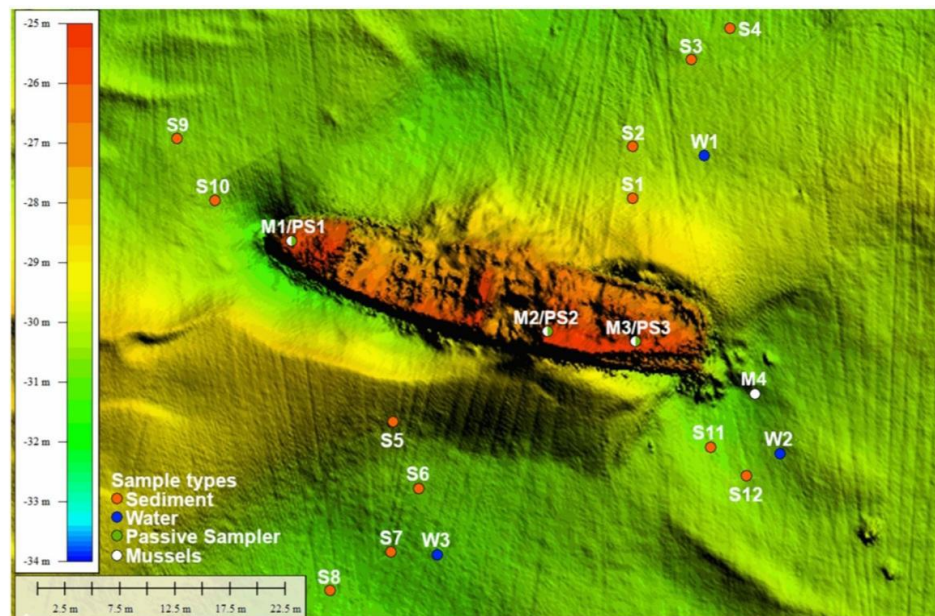


Sumber : (Maser et al., 2023)

Puluhan tahun berlalu, bangkai V1302 *John Mahn* tetap berada di dasar laut hingga akhirnya menjadi objek penelitian ilmiah. Lokasi bangkai ditemukan di kedalaman sekitar 30 meter di wilayah perairan Belgia (Maser et al., 2023). Kondisi struktur kapal masih cukup utuh, meski terjadi korosi berat dengan temuan mengejutkan bahwa kandungan bahan berbahaya yang masih tersimpan di dalamnya kini sudah merembet hingga mengancam kelangsungan hidup biota laut, bahkan mempengaruhi pH air laut secara signifikan (Maser et al., 2023).

Penelitian dari Universitas Ghent dan ilmuwan lingkungan Eropa mengungkap bahwa kapal ini mengandung senyawa peledak seperti TNT (*trinitrotoluene*), logam berat seperti timbal dan seng, serta senyawa *hidrokarbon aromatik polisiklik* (PAHs) yang bersifat karsinogenik (Landuyt et al., 2022). Selain itu, terdapat pula peluru dan amunisi aktif yang belum meledak (Maser et al., 2023). Zat-zat tersebut perlahan bocor ke dalam sedimen laut dan air sekitar, mencemari habitat organisme laut dan mengganggu keseimbangan ekosistem mikroba di area tersebut.

Gambar 2.2. Citra multibeam titik pengambilan sampel dan titik pencemaran bangkai kapal kapal V1302



Sumber : (Maser et al., 2023)

2.2.2. Definisi Proliferasi Pencemaran Tersembunyi Bangkai Kapal

2.2.2.1 Definisi Proliferasi Pencemaran Tersembunyi Bangkai Kapal

Pencemaran laut telah menjadi isu lingkungan global yang semakin kompleks, salah satu bentuk yang sering terabaikan adalah proliferasi pencemaran tersembunyi dari bangkai kapal. Istilah ini merujuk pada peningkatan jumlah dan dampak dari pencemaran lingkungan laut yang berasal dari bangkai kapal tenggelam, yang tidak terdeteksi atau tidak terpantau secara menyeluruh oleh otoritas lingkungan atau maritim (Dijk, 2023).

Fenomena ini mencakup berbagai aspek seperti kebocoran bahan bakar, peluruhan material logam berat, serta ancaman biologis dari zat-zat kimia beracun yang tersimpan dalam kapal tua. Seiring dengan meningkatnya aktivitas maritim dan konflik bersenjata pada abad ke-20, ribuan kapal telah tenggelam di dasar laut. Banyak di antaranya adalah kapal perang atau kapal dagang yang membawa muatan bahan bakar, senjata kimia, atau bahan berbahaya lainnya (IUCN, 2024).

Ketika kapal-kapal ini mulai mengalami korosi, substansi beracun mulai merembes ke lingkungan laut, mencemari air, sedimen, dan rantai makanan laut. Masalah utamanya adalah bahwa banyak dari bangkai kapal ini berada di lokasi terpencil dan tidak terdaftar secara formal dalam catatan lingkungan sehingga keberadaannya sulit dipantau atau dikendalikan. Salah satu contoh nyata dari pencemaran tersembunyi ini adalah bangkai kapal yang mengandung bahan bakar minyak dan bermuatan bahan kimia dan ketika kapal tenggelam, bahan bakar ini dapat bocor dan mencemari perairan.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), pencemaran minyak dapat menyebabkan kerusakan jangka panjang pada ekosistem laut, termasuk kematian ikan, kerusakan terumbu karang, dan penurunan kualitas habitat. Selain itu, pencemaran ini juga dapat mempengaruhi industri perikanan dan pariwisata, yang bergantung pada kesehatan ekosistem laut. NOAA mencatat bahwa terdapat lebih dari 20.000 bangkai kapal di perairan Amerika Serikat saja yang berpotensi menjadi sumber pencemaran (NOAA, 2021).

2.2.2.2 Proliferasi dan Ketidakterpantauan

Proliferasi pencemaran tersembunyi bangkai kapal merupakan isu lingkungan yang semakin mendesak di era modern ini. Istilah "proliferasi" merujuk pada penyebaran atau pertumbuhan yang cepat, sementara "pencemaran tersembunyi" mengacu pada kontaminasi yang tidak terlihat secara langsung namun memiliki dampak serius terhadap ekosistem. Bangkai kapal, yang sering kali ditinggalkan di perairan, dapat menjadi sumber pencemaran yang signifikan, baik secara langsung maupun tidak langsung (Spalding, n.d.).

Proliferasi dalam konteks ini berarti penambahan jumlah dan penyebaran kasus pencemaran dari bangkai kapal secara luas tanpa disadari. Karena banyak bangkai kapal tidak dipetakan secara akurat atau bahkan tidak diketahui keberadaannya, potensi kebocoran bahan berbahaya dari kapal-kapal ini tidak mendapat perhatian yang cukup. Contohnya adalah kapal perang Jepang dan

Amerika yang tenggelam di Laut Banda dan Pasifik Selatan, yang hingga kini masih menyimpan bahan bakar dan amunisi aktif (Tanaka & Rodrigues, 2019).

Ketidak terpantau ini diperparah oleh minimnya pengawasan lingkungan laut dalam dan keterbatasan teknologi pendeteksi bawah laut. Banyak negara berkembang belum memiliki sistem pemantauan kelautan yang canggih, sehingga bangkai kapal yang berada di kedalaman sulit dijangkau tidak mendapat intervensi.

2.2.3. Pencemaran dan Kandungan Karsinogenik Bangkai Kapal

Analisis kandungan karsinogenik dan potensi kerusakan lingkungan laut dari bangkai kapal *V1302* merupakan topik yang penting untuk dipahami, terutama dalam konteks perlindungan ekosistem laut dan kesehatan manusia. Bangkai kapal, seperti *V1302*, dapat mengandung berbagai bahan berbahaya yang berpotensi mencemari lingkungan dan menimbulkan risiko kesehatan. Penelitian oleh Landuyt et al. (2022) yang meneliti sedimen dan air di sekitar bangkai *V1302* menemukan bahwa kandungan PAHs di sedimen laut sekitar bangkai lebih tinggi hingga 100 kali dibanding area kontrol yang tidak tercemar.

Penelitian Landuyt et al. (2022) terkait analisis karsinogenik ini kembali diperdalam oleh sekelompok peneliti biologi yang tertuang dalam karya penelitian Maser et al. (2023) yang mengungkapkan kandungan bahan pencemar karsinogenik yang terkandung di bangkai kapal *V1302*. Salah satu temuan utama dalam penelitian terhadap kapal *V1302* adalah adanya kandungan tinggi senyawa poliaromatik hidrokarbon (PAH), logam berat, dan senyawa organoklorin seperti PCB (*polychlorinated biphenyls*). Zat-zat ini diketahui memiliki efek karsinogenik,

ditambah dengan kalkulasi temuan bahan peledak dalam lumbung bangkai kapal dengan jenis TNT, 1,3-DNB, 2,4-DNT, 4-ADNT, dan 2-ADNT (Maser et al., 2023).

Gambar 2.3. Hasil deteksi dan kuantifikasi dasar bahan pencemar yang terkandung dalam kapal V1302

Explosive	Splitless			PTV-large volume		
	LOD [fg/ μ L]	LOQ [fg/ μ L]	R ²	LOD [fg/ μ L]	LOQ [fg/ μ L]	R ²
1,3-DNB	333	1099	0.9444	32	105	0.9644
2,4-DNT	77	254	0.9968	10	33	0.9934
TNT	152	502	0.9879	47	155	0.9878
4-ADNT	95	314	0.9951	8	26	0.9959
2-ADNT	103	341	0.9943	11	37	0.9919

Gambar 2. 4. Hasil perhitungan jumlah sisa amunisi dan bahan peledak di dalam kapal V1302

Calculation of the remaining amount of ammunition left on the V 1302 wreck.			
Shell type	Rounds (- fired)	Explosive (type)	Explosive (total)
8.8 cm Flak	100	0.776 kg (FP)	77,6 kg
3.7 cm Flak	3000	0.027 kg (FP)	82,2 kg
2.0 cm Flak	20,000 (- 120)	0.006 kg (NP)	124 kg
Depth charges	10	65 kg (Schw. 18)	650 kg
Sunk with the wreck	22,990		933.1 kg

Sumber : (Maser et al., 2023, 8)

2.2.3.1. Identifikasi dan Uraian Bahan Karsinogenik

2.2.3.1.1. *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH)*

Poliaromatik hidrokarbon (PAH) adalah kelompok besar senyawa organik yang terdiri dari dua atau lebih cincin aromatik yang tersusun dari atom karbon dan

hidrogen (Humans & IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010). Senyawa ini terbentuk terutama melalui proses pembakaran tidak sempurna dari bahan organik seperti batu bara, minyak bumi, kayu, tembakau, dan bahan bakar fosil lainnya. PAH dapat dilepaskan ke lingkungan melalui aktivitas industri, kebakaran hutan, pembakaran sampah, dan dari kebocoran minyak atau bahan bakar di laut, termasuk dari bangkai kapal tua.

Secara kimia, PAH bersifat hidrofobik (tidak larut dalam air) dan memiliki kecenderungan menempel pada partikel-partikel sedimen atau masuk ke dalam jaringan lemak organisme. Senyawa ini bersifat persisten di lingkungan, artinya tidak mudah terurai secara alami, sehingga dapat bertahan dalam waktu yang lama dan menyebar secara luas. Bahaya utama PAH terletak pada sifatnya yang toksik karsinogenik dan mutagenik.

Beberapa senyawa PAH seperti benzo[a]pyrene telah diklasifikasikan oleh *International Agency for Research on Cancer* (IARC) sebagai karsinogen kelompok 1 (pasti menyebabkan kanker pada manusia). PAH dapat menyebabkan kerusakan DNA, memicu stres oksidatif, serta menimbulkan gangguan pada sistem reproduksi dan imun (Humans & IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2010).

Dalam ekosistem laut, PAH mengancam biota seperti plankton, moluska, ikan, dan burung laut. Akumulasi PAH dalam jaringan organisme dapat berpindah melalui rantai makanan (biomagnifikasi), dan pada akhirnya membahayakan kesehatan manusia melalui konsumsi seafood.

2.2.3.1.2. *Polychlorinated Biphenyls (PCB)*

Polychlorinated Biphenyls (PCB) adalah kelompok bahan kimia sintetis yang terdiri dari dua cincin benzena (bifenil) yang terhubung, di mana satu atau lebih atom hidrogen pada cincin tersebut telah digantikan oleh atom klorin (International Agency for Research on Cancer & IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2016). Terdapat 209 varian senyawa PCB, dikenal sebagai *congener* PCB, dengan berbagai tingkat toksisitas.

PCB diproduksi secara industri mulai tahun 1929 dan banyak digunakan sebagai cairan pendingin dan isolator dalam transformator dan kapasitor listrik, pelumas, serta bahan tambahan dalam cat, plastik, dan sealant (International Agency for Research on Cancer & IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2016). Produksinya telah dihentikan secara global sejak 1970-an setelah diketahui dampak lingkungan dan kesehatannya yang serius, namun senyawa ini masih banyak ditemukan di lingkungan karena sifatnya yang sangat stabil, lipofilik, dan persisten.

PCB bersifat bioakumulatif di jaringan lemak organisme dan dapat mengalami biomagnifikasi di rantai makanan. Karena tidak mudah terurai, PCB dapat bertahan di sedimen laut dan air selama beberapa dekade, menjadikannya salah satu *persistent organic pollutants* (POPs) yang diatur oleh Konvensi Stockholm (International Agency for Research on Cancer & IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2016). Menurut EPA (*Environmental Protection Agency*), dan IARC (*International Agency for Research*

on Cancer), PCB tergolong karsinogen kemungkinan (Group 2A) bagi manusia. Paparan PCB dapat menyebabkan gangguan hati, sistem imun, sistem saraf, sistem endokrin, dan reproduksi. Pada organisme laut, PCB dapat menghambat pertumbuhan larva, menurunkan kesuburan, serta menyebabkan kelainan perkembangan (Final Rule: Integrating E-Manifest With Exports and Other Manifest-Related Reports, PCB Manifest Amendments, and Technical Corrections (Third Rule) | US EPA, 2024).

2.2.3.1.3. Logam Berat Beracun : Merkuri (Hg), Kadmium (Cd), Timbal (Pb)

Logam berat seperti merkuri (Hg), kadmium (Cd), dan timbal (Pb) adalah unsur kimia yang secara alami terdapat di kerak bumi, tetapi menjadi sangat berbahaya ketika terakumulasi dalam lingkungan akibat aktivitas manusia seperti industri, pertambangan, pembakaran bahan bakar fosil, serta dari bangkai kapal yang mengandung komponen logam dan baterai (Maser et al., 2023). Ketiga logam ini termasuk toksikan lingkungan prioritas karena bersifat persisten, bioakumulatif, dan toksik kronis, bahkan dalam kadar rendah. Bahan-bahan tidak dapat terurai secara biologis dan mudah terakumulasi dalam jaringan tubuh organisme, terutama di hati, ginjal, dan sistem saraf (Landuyt et al., 2022).

Merkuri dapat berubah menjadi metil merkuri, bentuk paling toksik, yang terbentuk di lingkungan akuatik melalui aktivitas mikroorganisme. Metil merkuri bersifat neurotoksik, menyerang sistem saraf pusat dan dapat menyebabkan gangguan kognitif, tremor, hingga kerusakan permanen pada janin jika dikonsumsi ibu hamil melalui *seafood* tercemar. Merkuri terutama dilepaskan ke lingkungan

dari pembakaran batu bara, aktivitas industri, serta kebocoran limbah (WHO, 2024). Di lingkungan laut, merkuri dapat diubah oleh mikroorganisme menjadi metilmerkuri, bentuk paling beracun yang bersifat neurotoksik. Metil merkuri terakumulasi dalam tubuh ikan dan predator laut, dan bila dikonsumsi oleh manusia dapat menyebabkan kerusakan sistem saraf pusat, gangguan perkembangan otak janin, dan gangguan kognitif (WHO, 2024).

Kadmium umumnya berasal dari baterai, cat, dan logam pelapis. Logam ini dapat menyebabkan kerusakan ginjal, osteoporosis, serta bersifat karsinogenik (IARC *Group 1*). Kadmium juga mengganggu fungsi reproduksi dan pertumbuhan pada organisme laut (WHO, 2019). Timbal bersifat neurotoksik dan sangat berbahaya dan menghambat aktivitas enzim organisme air dan menurunkan laju pertumbuhan plankton serta larva ikan.

2.2.3.1.4. Bahan Kimia Eksplosif

Bahan peledak militer seperti TNT (*Trinitrotoluene*) dan turunannya-1,3-DNB (*Dinitrobenzena*), 2,4-DNT (*Dinitrotoluene*), 4-ADNT (*4-Amino-2,6-dinitrotoluene*), dan 2-ADNT (*2-Amino-4,6-dinitrotoluene*) merupakan senyawa nitro aromatik yang sangat berbahaya bagi lingkungan laut. Senyawa-senyawa ini biasa ditemukan sebagai residu dalam amunisi dan ranjau laut, termasuk di bangkai kapal Perang Dunia II seperti *V1302 Bremen* yang masih menyimpan bahan peledak aktif (Maser et al., 2023).

TNT (*Trinitrotoluene*) adalah bahan peledak yang sangat stabil namun toksik dan karsinogenik. Di laut, TNT larut sebagian dan menyebar di sekitar

sedimen. Menurut U.S. EPA (1997), TNT dapat menyebabkan kerusakan DNA, stres oksidatif, dan kelainan perkembangan pada organisme laut seperti kerang dan ikan. Paparan kronis, dapat mempengaruhi sistem imun dan reproduksi biota laut. 1,3-DNB (1,3-*Dinitrobenzene*) digunakan sebagai prekursor bahan peledak yang bersifat neurotoksik dan dapat menyebabkan kerusakan pada sistem saraf pusat serta anemia. Di lingkungan laut, ia terakumulasi di sedimen dan dapat mempengaruhi mikroorganisme serta fauna bentik. DNB merupakan senyawa nitro aromatik yang larut dalam air dan beracun terhadap organisme akuatik, menyebabkan gangguan metabolisme dan aktivitas enzimatik (ATSDR, 2014).

2,4-DNT (2,4-*Dinitrotoluene*) adalah produk samping dari pembuatan TNT dan memiliki efek hepatotoksik dan nefrotoksik pada ikan. Senyawa ini juga dapat menghambat reproduksi dan menyebabkan anemia dan perubahan histopatologis pada jaringan ikan. 4-ADNT & 2-ADNT (*Amino-dinitrotoluena*) Keduanya adalah produk biodegradasi TNT di lingkungan anaerobik, seperti dasar laut. Meskipun bersifat lebih larut daripada TNT, senyawa ADNT juga toksik dan dapat menembus membran sel organisme laut (ATSDR, 2014).

ADNT terdeteksi dalam jaringan ikan yang di *fillet* dalam penelitian Maser et al. (2023) dianggap berpotensi karsinogenik serta menyebabkan gangguan perkembangan ADNT adalah produk degradasi biologis dari TNT yang terbentuk melalui reduksi oleh mikroorganisme laut. Walaupun lebih stabil, senyawa ini tetap bersifat sitotoksik dan dapat mengganggu metabolisme sel pada ikan dan moluska. ADNT sering digunakan sebagai indikator pencemaran TNT di laut karena keberadaannya menunjukkan aktivitas mikroba terhadap TNT (Maser et al., 2023).

Gambar 2.5. Informasi tingkat toksisitas bahan kimia berbahaya di bangkai kapal

Compound	Rt SL [min]	Rt LVI [min]	Molecular mass [g × mol ⁻¹]	Transition [m/z]	CE [eV]
1,3-Dinitrobenzene	2.43	3.20	168.11	Q 122.0 > 75.0	12
				q 168.0 > 75.0	20
				q 168.0 > 122.0	8
2,4-Dinitrotoluene	2.77	3.52	182.13	Q 165.0 > 63.1	22
				q 165.0 > 90.1	16
				q 165.0 > 118.1	8
Trinitrotoluene	3.41	4.09	227.13	Q 210.0 > 164.1	6
				q 164.0 > 90.1	10
				q 108.0 > 76.1	12
¹³ C ¹⁵ N-Trinitrotoluene	3.41	4.09	237.06	Q 220.1 > 173.1	6
				q 220.1 > 203.1	8
				q 189.1 > 82.1	10
4-Amino-2,6-dinitrotoluene	4.22	4.85	197.15	Q 197.0 > 180.1	6
				q 180.0 > 163.1	8
				q 163.0 > 78.0	14
2-Amino-4,6-dinitrotoluene	4.42	5.07	197.15	Q 197.0 > 180.1	6
				q 180.0 > 133.0	6
				q 180.0 > 67.0	12

Quantitative (Q) and qualitative (q) secondary reaction monitoring transitions (m/z) of explosives and internal standard ¹³C¹⁵N-TNT are given.

Sumber : (Maser et al., 2023)