



Dewan Guru Besar
Institut Pertanian Bogor



Kumpulan Naskah Orasi Ilmiah
Guru Besar Institut Pertanian Bogor

Menuju Swasembada Sumber Pangan Protein Hewani

R Iis Arifantini
Bambang Purwantara
Yuli Retnani
Panca Dewi Manu Hara
Umi Cahyaningsih
MF Rahardjo
Djamartumpal F Lumban Batu
Mulia Purba

Editor:
Djamartumpal F Lumban Batu
R Iis Arifantini

Menuju Swasembada Sumber Pangan Protein Hewani

Editor:
Djamartumpal F Lumban Batu
R Iis Arifantini



Penerbit IPB Press
IPB Science Park Taman Kencana,
Kota Bogor - Indonesia

C01/01.2017

Judul Buku:

Menuju Swasembada Sumber Pangan Protein Hewani

Penulis:

R Iis Arifiantini
Bambang Purwantara
Yuli Retnani
Panca Dewi Manu Hara
Umi Cahyaningsih
Djamartumpal F Lumban Batu
MF Rahardjo
Mulia Purba

Editor:

Djamartumpal F Lumban Batu
R Iis Arifiantini

Penyunting Bahasa:

Bayu Nugraha

Penata Isi dan Desain Sampul:

Ahmad Syahrul Fakhri

Korektor:

Dwi M Nastiti
Helda Astika Siregar

Jumlah Halaman:

308 + 22 Halaman Romawi

Edisi/Cetakan:

Cetakan Pertama, Januari 2017

PT Penerbit IPB Press

Anggota IKAPI
IPB Science Techno Park
Jl. Taman Kencana No. 3, Bogor 16128
Telp. 0251 - 8355 158 E-mail: ipbpress@ymail.com

ISBN: 978-602-440-212-9

Dicetak oleh IPB Press Printing, Bogor - Indonesia
Isi di Luar Tanggung Jawab Percetakan

© 2017, HAK CIPTA DILINDUNGI OLEH UNDANG-UNDANG

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh
isi buku tanpa izin tertulis dari penerbit

SAMBUTAN REKTOR

Dengan gembira kami menyambut penerbitan buku Kumpulan Naskah Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Pertanian Bogor (IPB) ini. Prakarsa penerbitan ini sejalan dengan upaya IPB untuk terus-menerus meningkatkan sumbangan pemikiran bagi pembangunan nasional. Naskah dalam buku ini banyak memuat temuan-temuan dari hasil penelitian ilmiah, oleh sebab itu berbagai rekomendasi nyata yang langsung bisa diimplementasikan dalam masyarakat.

Kami berharap bahwa berbagai temuan hasil riset yang disajikan dalam buku ini dapat dikembangkan lebih lanjut dalam berbagai penelitian di masa yang akan datang. Adapun hasil-hasil penelitian yang telah siap diimplementasikan, baik dalam dunia industri, rumah tangga, ataupun dalam perumusan kebijakan publik, kami harapkan dapat menyumbangkan nilai maslahat yang besar bagi masyarakat luas. Dalam konteks ini, kami sangat mendorong komunikasi dan kerja sama yang nyata antara para akademisi, pelaku bisnis, dan penyusun kebijakan publik yang dikenal sebagai segitiga ABG (*academia, business, and government*). Tanpa komunikasi dan kerja sama yang baik di antara tiga kelompok pelaku tersebut mustahil dihasilkan nilai tambah yang bermanfaat besar bagi masyarakat luas.

Dalam kesempatan ini, kami menyampaikan penghargaan setinggi-tingginya kepada Dewan Guru Besar IPB yang telah memprakarsai penerbitan buku ini. Kami yakin bahwa sinergi di antara empat pilar institusi, yakni Rektor, Majelis Wali Amanat, Senat Akademik, dan Dewan Guru Besar secara berkelanjutan dapat terus ditingkatkan sehingga terwujudlah IPB sebagaimana yang dicita-citakan oleh semua pemangku kepentingannya.

Bogor, Januari 2017

Rektor,

Prof Dr Ir Herry Suhardiyanto, MSc

NIP. 19590910 198503 1 003

KATA PENGANTAR

KETUA DEWAN GURU BESAR

Jumlah guru besar IPB dari waktu ke waktu bertambah. Dalam lima tahun terakhir ini, setiap tahun ada tambahan yang cukup bervariasi, yakni 16, 26, 16, 2, dan 5 guru besar. Pada Desember 2016, IPB mempunyai 216 guru besar aktif dan 25 guru besar emeritus. Secara relatif, jumlah tersebut cukup besar. Namun, nisbah jumlah guru besar jika dibandingkan jumlah mahasiswa di IPB masih perlu terus diperbaiki, yakni 1:120.

Kualitas karya guru besar antara lain dapat diukur berdasarkan gagasan-gagasan yang dihasilkan yang lazimnya dituangkan dalam berbagai karya tulis, baik yang bersifat ilmiah yang terbit sebagai artikel jurnal ataupun yang populer yang terbit dalam media untuk masyarakat umum. Di IPB, setiap guru besar didorong untuk menyampaikan orasi ilmiah. Naskah orasi ilmiah tersebut lazimnya memuat rangkuman gagasan-gagasan guru besar yang bersangkutan, baik yang pernah terbit ataupun yang tengah dipersiapkan.

Buku kumpulan naskah orasi ilmiah ini diterbitkan dengan maksud untuk memperluas jangkauan sidang pembacanya. Dalam Kumpulan Naskah Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Pertanian Bogor ini yang tercakup dalam spektrum ilmu hewani meliputi ilmu Kedokteran Hewan, Peternakan, dan Perikanan. Perlu dipahami bahwa naskah orasi ilmiah ini ditulis dalam rangka penyampaian Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Pertanian Bogor yang telah berlangsung sejak 30 Januari 2016 hingga 24 September 2016. Dengan demikian, para pembaca perlu menyadari bahwa konteks permasalahan untuk setiap naskah orasi dapat berbeda-beda sesuai dengan perkembangan situasi saat setiap naskah tersebut disusun.

Kepada Rektor IPB, para penulis, editor, dan pihak PT Penerbit IPB Press disampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya. Semoga penerbitan buku ini memperluas wawasan sidang pembaca dan meningkatkan kualitas wacana publik tentang berbagai tema yang berkembang dalam masyarakat.

Bogor, Januari 2017

Ketua,

Prof Dr Ir Muh Yusram Massijaya, MS
NIP. 19641124 198903 1 004

DAFTAR ISI

Sambutan Rektor	v
Kata Pengantar Ketua Dewan Guru Besar	vii
Daftar Isi	ix
Prolog <i>Djamartumpal F Lumban Batu</i>	xv
Pengembangan Teknik Produksi Semen Beku Sapi di Indonesia	
<i>R Iis Arifiantini</i>	1
Pendahuluan	3
Tuntutan dan Tantangan Produksi Semen Beku Sapi	4
Proses Produksi Semen Beku Sapi	6
Pejantan Sapi sebagai Sumber Benih	6
Kajian Produksi Semen Beku di BIB dan BIBD	10
Pentingnya Pengujian Morfologi Spermatozoa dalam Menentukan Kualitas Semen Segar	20
Jumlah dan Jenis Abnormalitas Primer Spermatozoa Berdasarkan Bangsa Sapi	22
Korelasi Tingkat Abnormalitas Primer Spermatozoa terhadap Fertilitas	26
Pengembangan Teknik Produksi Semen Beku Sapi	28
Penutup	28
Daftar Pustaka	30
Aplikasi Teknologi Reproduksi untuk Mendukung Produktivitas Ternak dan Konservasi Satwa di Indonesia	
<i>Bambang Purwantara</i>	33
Pendahuluan	35
Teknologi Reproduksi Generasi Pertama: Inseminasi Buatan	37
Teknologi Reproduksi Generasi Kedua: Benarkah Jalan di Tempat?	46

Teknologi Reproduksi Generasi Ketiga: Harapan Abad ke XXI	51
Peranan Ilmu Reproduksi dalam Konservasi: Salah Kaprah?.....	54
Hendak Menuju Kemana Teknologi Reproduksi?.....	59
Penutup.....	60
Daftar Pustaka	61
Inovasi Pengolahan Pakan untuk Meningkatkan Produktivitas Ternak di Daerah Perkotaan, Rawan Pakan, dan Bencana Yuli Retnani	69
Pendahuluan	71
Tantangan Bidang Peternakan di Indonesia	71
Kondisi Peternakan di Daerah Perkotaan	75
Kondisi Peternakan di Daerah Rawan Pakan dan Bencana	81
Inovasi Pengolahan Pakan untuk Meningkatkan Produktivitas Ternak	84
Wafer Pakan	85
Wafer Limbah Sayuran Pasar	87
Wafer Daun Lamtoro	93
Wafer Pucuk Tebu	95
Wafer Daun Kelor	95
Wafer Daun Gamal	95
Biskuit Pakan	96
Biskuit Biosuplemen Pakan	98
Penutup.....	101
Daftar Pustaka	103

Strategi Pengembangan Tanaman Pakan pada Lahan Marginal Untuk Ketahanan Pakan Nasional	
Panca Dewi Manu Hara Karti	109
Pendahuluan	111
Potensi dan Karakteristik Lahan Marginal dan Lahan Pascatambang untuk Penanaman Tanaman Pakan.....	113
Tanaman Pakan dan Sistem Budidaya	115
Permasalahan Penyediaan Hijauan Pakan pada Lahan Marginal	121
Permasalahan pada Tanah Masam	121
Permasalahan pada Lahan Kering.....	123
Permasalahan pada Lahan Salin.....	124
Permasalahan pada Pascatambang	125
Kajian Mekanisme Ketahanan Tanaman Pakan terhadap Faktor Abiotik	126
Ketahanan Tanaman Pakan pada Kondisi Tanah Masam	126
Ketahanan Tanaman Pakan pada Kondisi Kekeringan....	126
Ketahanan Tanaman Pakan pada Kondisi Salin	133
Strategi Pengembangan Tanaman Pakan pada Lahan Marginal.....	137
Seleksi Ketahanan Tanaman Pakan pada Lahan Marginal	137
Penggunaan Tanaman Pakan yang Toleran pada Lahan Marginal	141
Penggunaan Tanaman Pakan Toleran pada Lahan Pascatambang	146
Teknologi Budidaya Tanaman Pakan pada Lahan Marginal ...	152
Nilai Tambah Pemanfaatan Lahan Marginal dengan Tanaman Toleran untuk Penyediaan Hijauan Pakan	158
Penutup.....	159
Daftar Pustaka	160

Penggunaan Isolat *Eimeria* dan Tanaman Obat Asal Indonesia
 untuk Mencegah dan Mengendalikan Koksidiosis
 pada Ayam dalam Rangka Mengurangi Impor
 Bahan Dasar Vaksin dan Obat

<i>Umi Cahyaningsih</i>	167
Pendahuluan	169
Penyebaran Penyakit dan Kerugian Ekonomi	171
Biologi <i>Eimeria</i> Penyebab Koksidiosis pada Ayam	173
Pencegahan dan Pengendalian Koksidiosis, serta Permasalahannya	181
Penelitian yang Telah Dilakukan untuk Pencegahan dan Pengendalian Koksidiosis	184
Penutup	193
Daftar Pustaka	195

Biotransformasi Xenobiotik Pada Organisma Perairan Serta
 Aplikasinya Pada Keamanan Pangan Dan Biomedis

<i>Djamartumpal F Lumban Batu</i>	207
Pendahuluan	209
Cytochrome P-450, Drug Metabolizing Enzyme Activities, dan Fraksionasi Sel	211
Kemampuan Induksi Toksikan	214
Studi Aktivitas Enzim sebagai Landasan Penentuan Kualitas Lingkungan	217
Aplikasi Determinasi Residu Antibiotik pada Jaringan Tubuh Ikan	220
Pengaruh Aktivitas Enzim yang Terinduksi oleh Polychlorinated Biphenil terhadap Lama Tinggal Antibiotik	224
Metabolisme Pestisida pada Mikrosom Ikan	227
Biotransformasi Pestisida pada Udang	232

Penurunan Toksisitas Pestisida, Reduksi Biokimia Oxidative Desulfurase untuk mencegah Kematian Udang	235
Penutup	240
Daftar Pustaka	242
Keanekaragaman Hayati dan Konservasi Ikan sebagai Tumpuan Pengembangan Perikanan yang Berdaulat dan Berkelanjutan	
<i>MF Rahardjo</i>	245
Pendahuluan	247
Keanekaragaman Hayati Ikan	249
Konservasi Ikan	258
Peran Pemangku Kepentingan	266
Penutup	268
Daftar Pustaka	269
Oseanografi Fisik sebagai Landasan/Dasar Pengembangan Sumber Daya dan Jasa Lingkungan Laut	
<i>Mulia Purba</i>	277
Pendahuluan	279
Pengembangan Sumber Daya Hayati Laut	280
Pengembangan Wilayah Pesisir	284
Sebaran Sedimen	288
Energi dari Sifat dan Gerak Air Laut	290
<i>Operational Oceanography</i>	295
Penutup	300
Daftar Pustaka	302
Epilog <i>Djamartumpal F Lumban Batu</i>	307

PROLOG

Djamartumpal F Lumban Batu¹

Subsektor peternakan berkontribusi signifikan terhadap nilai pendapatan dari pembangunan pertanian nasional serta menjadi landasan penting dalam membangun kemandirian pangan. Berbagai produk ternak sebagai sumber pangan protein hewani (daging, susu, dan telur) memiliki fungsi esensial untuk menyiapkan generasi yang sedang tumbuh dan mencerdaskan bangsa Indonesia. Permintaan pangan sumber protein dunia akan bergeser dari protein nabati kepada protein hewani. Pergeseran tersebut karena bertambahnya penduduk dan generasi muda, meningkatnya kesadaran gizi, membaiknya ekonomi keluarga, serta perubahan gaya hidup. Distribusi populasi ternak secara geografis yang tidak merata di seluruh wilayah Indonesia, terutama untuk ternak ruminansia besar maupun ruminansia kecil. Hal ini menimbulkan permasalahan yang sangat kompleks seperti populasi tidak bisa berkembang dengan baik dan produktivitas tidak bisa optimal, terutama karena kendala kesulitan pakan.

Kebutuhan nutrisi dan protein yang bersumber dari ikan merupakan bahan makanan penting untuk membentuk sumber daya manusia Indonesia yang berkualitas dan cerdas. Kesadaran masyarakat mengonsumsi ikan dan produk olahan lainnya masih sangat rendah. Padahal, ikan sebagai sumber protein hewani harganya lebih murah dibandingkan daging. Porsi konsumsi ikan tetap diprioritaskan untuk memenuhi persentase terbesar dari konsumsi pangan hewani dengan besaran ideal 8,4 juta ton per tahun. Hal ini dimungkinkan bahwa pasokan ikan dinilai paling banyak dan tersebar di seluruh daerah dibandingkan dengan daging, susu, dan telur.

Mengawali kumpulan tulisan dalam buku ini, naskah orasi Iis Arifiantini yang berjudul *Pengembangan teknik produksi semen beku sapi di Indonesia* menekankan pentingnya inseminasi buatan (IB) yang merupakan teknologi reproduksi untuk meningkatkan mutu genetik dan populasi ternak. Keberhasilan program IB dipengaruhi setidaknya oleh empat faktor, yaitu 1) faktor peternak; 2) faktor inseminator; (3) faktor betina; serta 4) faktor kualitas semen yang diinseminasikan. Keempat faktor tersebut akan memberikan kontribusi terhadap keberhasilan ataupun kegagalan program IB. Beberapa masukan yang dapat

¹ Guru Besar Tetap Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan IPB

disampaikan untuk pengembangan teknik produksi semen beku sapi di Indonesia, yaitu 1) persyaratan semen segar sapi untuk diproses menjadi semen beku perlu ditambahkan parameter uji morfologi spermatozoa; 2) persyaratan mutu semen beku sapi perlu penambahan parameter Uji Viabilitas spermatozoa; 3) penggunaan faktor pengenceran semen Model II perlu ditetapkan untuk memastikan jumlah sel dalam satu straw; 4) penanda molekuler untuk menentukan kualitas spermatozoa sapi eksotik sebagai bagian dari seleksi pejantan untuk bibit perlu dikembangkan; serta 5) perlu peningkatan kapasitas SDM untuk pengujian morfologi spermatozoa. Dengan dikembangkannya beberapa teknik produksi semen baku ini, diharapkan keberhasilan program IB pada ternak sapi dapat lebih ditingkatkan.

Berikutnya adalah naskah yang ditulis oleh Bambang Purwantara yang berjudul *Applikasi teknologi reproduksi untuk mendukung produktivitas ternak dan konservasi satwa di Indonesia*. Naskah ini menjabarkan kemajuan luar biasa dalam khazanah ilmu-ilmu reproduksi, berhubungan erat dengan berbagai inovasi dan pengembangan teknologi mutakhir. Hal tersebut didorong oleh kebutuhan atas peningkatan produksi komoditas peternakan dan kesehatan reproduksi manusia. Tekanan terhadap populasi satwa yang dilindungi akibat kerusakan habitat aslinya peran teknologi reproduksi memang penting. IB sebagai generasi pertama teknologi reproduksi, memungkinkan penyebaran gen-gen dari pejantan unggul secara cepat dan luas. Transfer Embrio (TE) sebagai teknologi reproduksi generasi kedua memungkinkan lahirnya turunan dari induk unggul jauh melebihi kapasitas alamiahnya. Induk sapi yang umumnya hanya beranak 4–5 kali sepanjang hidupnya, dengan TE dapat menghasilkan banyak keturunan. Sementara generasi ketiga, yakni produksi embrio *in vitro* (PIEV), berikut manipulasinya memungkinkan pemanenan materi genetik dari limbah rumah potong. Tuntutan pemenuhan protein hewani melalui produk-produk peternakan semakin besar, seiring perkembangan ekonomi dan kesejahteraan masyarakat Indonesia. Di sisi lain, satwa yang terancam punah dan dilindungi memerlukan pula penanganan yang mendesak melalui pendekatan yang nonkonvensional. Pada kedua aspek tersebut, sejumlah teknologi reproduksi mampu menempatkan peran dan kualitasnya.

Berikutnya adalah naskah yang ditulis oleh Yuli Retnani yang berjudul *Inovasi pengolahan pakan untuk meningkatkan produktivitas ternak di daerah perkotaan, rawan pakan, dan bencana*. Naskah ini menjabarkan tentang tantangan usaha peternakan di Indonesia pada masa yang akan datang diperkirakan semakin berat karena peternakan di Indonesia masih didominasi oleh usaha skala rumah tangga, serta lokasinya terkonsentrasi di Pulau Jawa yang padat penduduk dan rawan akan penggusuran, rawan kelangkaan pakan dan bahkan rawan bencana. Sumber daya bahan baku pakan tidak selalu tersedia di semua wilayah peternakan di Indonesia, misalnya daerah rawan pakan dan bencana. Optimalisasi teknologi pengolahan pakan dapat dilakukan dengan membuat, menyimpan, dan mendistribusikan pakan ke daerah yang membutuhkan. Teknologi proses produksi pakan yang mudah dan murah diperlukan untuk membuat pakan menjadi awet, mudah disimpan, dan mudah diberikan kepada ternak. Pakan yang tersedia dapat menyelamatkan ternak di daerah rawan pakan dan bencana, serta dapat digunakan sebagai pakan bersih untuk peternakan daerah perkotaan. Inovasi pengolahan pakan bentuk wafer dan biskuit yang awet, berkualitas, mudah didapat sepanjang tahun, dan mempunyai nilai ekonomis tinggi, diharapkan dapat mengatasi masalah lingkungan dan meningkatkan ketersediaan pakan, serta meningkatkan produktivitas ternak.

Naskah selanjutnya berjudul *Strategi pengembangan tanaman pakan pada lahan marginal untuk ketahanan pakan nasional*, ditulis oleh Panca Dewi Manu Hara Karti. Penulis membahas tentang peningkatan aktivitas produksi ternak akan menyebabkan peningkatan populasi ternak ruminansia dan dituntut pula untuk peningkatan penyediaan pakan, khususnya hijauan pakan karena merupakan bahan pakan utama (>80% dari total bahan kering). Permasalahan dalam penyediaan hijauan pakan di Indonesia, yaitu 1) keterbatasan lahan; 2) rendahnya pengelolaan padang penggembalaan; serta 3) rendahnya produktivitas lahan. Salah satu cara untuk mengatasi permasalahan dalam penyediaan hijauan pakan, khususnya karena keterbatasan lahan dapat memanfaatkan lahan marginal dan lahan pascatambang sebagai lahan yang dapat digunakan untuk penanaman tanaman pakan.

Selanjutnya, dikatakan bahwa teknologi budidaya tanaman perlu diperhatikan agar pengembangan tanaman pakan pada lahan marginal dan pascatambang dapat berhasil dengan baik. Beberapa teknologi

budidaya yang dapat mendukung pengembangan tanaman pakan pada lahan marginal dan pascatambang adalah pengaturan kapasitas tampung pada padang penggembalaan, penyisipan leguminosa, penggunaan pupuk, dan pembenah tanah. Padang penggembalaan alam belum dilakukan pengelolaan dengan baik seperti pengaturan penggembalaan yang memerlukan pemagaran sehingga untuk mempertahankan rumput yang disukai ternak akan sangat sulit karena sering terjadi *over grazing* (penggembalaan lebih) atau *under grazing* (penggembalaan kurang) yang dapat memunculkan gulma seperti bunga putih (*Chromolema odorata*) di Nusa Tenggara Timur (NTT) sehingga menurunkan kapasitas tampung.

Umi Cahyaningsih mengembangkan pemikiran dalam naskah yang berjudul ***Penggunaan isolat Eimeria dan tanaman obat asal Indonesia untuk mencegah dan mengendalikan koksidiosis pada ayam dalam rangka mengurangi impor bahan dasar vaksin dan obat.*** Menurut Penulis, penyebab koksidiosis pada ayam adalah protozoa dari ordo Coccidia dan genus *Eimeria* yang menyerang saluran pencernaan, dengan gejala diare bahkan diare berdarah. Penyakit ini mudah berkembang di Indonesia karena sesuai dengan suhu optimum untuk perkembangan *Eimeria*, yaitu 21–32°C, serta kelembapan yang cukup. Sebelum melakukan pencegahan dan pengendalian, perlu mengetahui biologi *Eimeria*, yaitu mengenal habitat, melakukan koleksi, inventarisasi, dan identifikasi. *Eimeria* ini digunakan sebagai isolat *Eimeria* asal Indonesia untuk bahan baku vaksin dan Uji Tantang untuk mencegah koksidiosis. Selain itu, *Eimeria* juga digunakan untuk bahan Uji Obat untuk pengendalian koksidiosis. Dalam rangka pembuatan bahan baku vaksin, diperlukan penyimpanan ookista *Eimeria* agar tidak sering melakukan penyegaran ookista. Penyimpanan ookista dilakukan dengan menggunakan berbagai macam krioprotektan untuk menjaga viabilitas ookista.

Untuk meningkatkan keamanan pangan produk-produk perikanan dan penerapannya pada biomedis, Djamartumpal F Lumban Batu dalam naskah yang berjudul ***Biotransformasi xenobiotik pada organisme perairan serta aplikasinya pada keamanan pangan dan biomedis*** menyampaikan bahwa dalam hati ataupun hepatopankreas berlangsung biotransformasi xenobiotik (drugs, steroids, karsinogen, mutagen, hormon, vitamin dan antigen) dengan bantuan berbagai jenis aktivitas

enzim. Bahan-bahan tersebut, dapat dikonversi menjadi derivat-derivat yang polar, berberat molekul rendah, larut dalam air dan mudah diekskresi. Kemampuan untuk melakukan biotransformasi xenobiotik tersebut dapat dimanfaatkan untuk mempercepat eliminasi toksikan dari dalam tubuh organisma perairan. Dalam bidang keamanan pangan terhadap berbagai jenis antibiotik, telah berhasil dikembangkan aplikasi determinasi berbagai jenis antibiotik dalam tubuh ikan dengan tingkat *recovery* yang sangat tinggi dibandingkan dengan metode sebelumnya. Dengan mengetahui konsentrasi maksimum, waktu paruh biologi dan lama tinggal dari antibiotik akan sangat bermanfaat untuk membersihkannya dari dalam tubuh ikan dan udang sehingga aman untuk dikonsumsi.

MF Rahardjo menyumbangkan pemikiran tentang pentingnya dilakukan tindakan konservasi ikan untuk mencegah kepunahan spesies atau penurunan keanekaragaman hayati ikan. Dalam naskah yang berjudul *Keanekaragaman hayati dan konservasi ikan sebagai tumpuan pengembangan perikanan yang berdaulat dan berkelanjutan*. Menurut Rahardjo, konservasi ikan adalah upaya untuk melindungi, melestarikan, dan memanfaatkan ikan. Dalam praktiknya, konservasi ikan dapat dilakukan melalui dua acara yaitu konservasi *in situ* dan konservasi *ex situ*. Beberapa langkah yang ditempuh untuk melaksanakan perlindungan adalah melalui pelarangan atau pembatasan eksploitasi ikan, penetapan daerah lindungan (*reservat*), dan pencegahan kerusakan lingkungan. Keberhasilan konservasi akan menjadikan perikanan Indonesia kokoh berdiri berdaulat dan berkelanjutan dalam mewujudkan kesejahteraan rakyat.

Menurut Mulia Purba, bidang Ilmu Oseanografi berperan untuk pengelolaan dan pemanfaatan sumber daya dan jasa lingkungan laut. Dalam naskahnya berjudul *Oseanografi fisik sebagai landasan/dasar pengembangan sumber daya dan jasa lingkungan laut* dikemukakan bahwa pengetahuan dinamika gerak air penting untuk memahami dan memprediksi keseimbangan pantai agar dampak kegiatan manusia di sekitar pusat kegiatan perekonomian, seperti pengembangan pantai, jalan raya, kota, pasar, dan sebagainya dapat ditelaah dan diprediksi. Pergerakan massa air yang unik sesuai dengan karakter dan lokasinya harus dimengerti dengan baik agar seseorang dapat dengan baik menelaah dan memprediksi bagaimana pola penyebaran material atau bahan yang

dibuang ke dalam air laut. Selanjutnya, Mulia Purba menyampaikan bahwa data dan informasi oseanografi yang dikumpulkan secara teratur dan rutin perlu disebarakan kepada masyarakat dalam kegiatan yang disebut *operational oceanography* setelah dilakukan analisis oleh lembaga yang berkompeten sehingga dapat dengan mudah digunakan untuk membantu kehidupan masyarakat. Prediksi yang didasarkan secara ilmiah tentang kejadian alam yang akan terjadi seharusnya digunakan sebagai dasar penetapan kebijakan (*scientific base policy*).

**BIOTRANSFORMASI XENOBIOTIK PADA
ORGANISME PERAIRAN SERTA APLIKASINYA
PADA KEAMANAN PANGAN DAN BIOMEDIS**



Djamartumpal F Lumban Batu

**Guru Besar Tetap Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan
Tanggal Orasi Ilmiah: 28 Mei 2016**

BIOTRANSFORMASI XENOBIOTIK PADA ORGANISME PERAIRAN SERTA APLIKASINYA PADA KEAMANAN PANGAN DAN BIOMEDIS

Djamartumpal F Lumban Batu

Pendahuluan

Limbah yang berasal dari berbagai aktivitas kehidupan manusia, akan memasuki ekosistem, sebagai komponen abiotik, limbah tersebut sangat besar kemungkinannya berinteraksi dengan komponen biotik, meliputi mikroorganisme, hewan daratan maupun perairan, serta manusia. Berbagai jenis ekosistem perairan, seperti sungai, situ, danau, muara, dan laut merupakan tempat penampungan terakhir bagi limbah tersebut. Dengan demikian, organisme penghuni ekosistem-ekosistem ini akan memperoleh dampak yang sangat merugikan. Salah satu jenis organisme perairan, misalnya ikan berkemampuan untuk melakukan biotransformasi, bioakumulasi, intoksikasi, dan detoksikasi yang bertujuan untuk menurunkan derajat toksisitas dari limbah ("xenobiotic") tersebut, namun di pihak lain juga berkemampuan untuk membentuk bahan-bahan yang lebih reaktif, bersifat mutagenik, karsinogenik dan sangat beracun "*very toxic*". Hal ini akan membahayakan kehidupan organisme itu sendiri maupun komponen biotik lainnya.

Bahan-bahan toksik yang terdapat dalam berbagai jenis limbah akan mengalami biotransformasi pada organ-organ target, khususnya pada tingkat subseluler, tepatnya pada fraksi mikrosom, cytosol, mitochondria, lysosom, nuclear, serta homogenate yang dikenal dengan detoksikasi. Transformasi metabolik tersebut didukung oleh berbagai jenis aktivitas enzim. Pada setiap fraksi sel, berlangsung reaksi metabolisme enzim yang khas "*specified*". Tanpa mengetahui mekanisme, jenis-jenis reaksi yang dikatalisasi oleh berbagai jenis enzim tersebut maka mustahil untuk mengetahui adanya induksi dan biotransformasi dari toksikan dalam tubuh organisme. Dengan demikian, toksikan yang memasuki rantai makanan dari tingkatan trofik terendah hingga tertinggi tidak akan dapat diketahui dengan jelas tentang keberadaan, jenis, struktur, dan toksisitasnya tanpa mengetahui secara lengkap tentang mekanisme biotransformasi pada organisme penderita yang akhirnya akan tetap merupakan ancaman berbahaya bagi makhluk hidup.

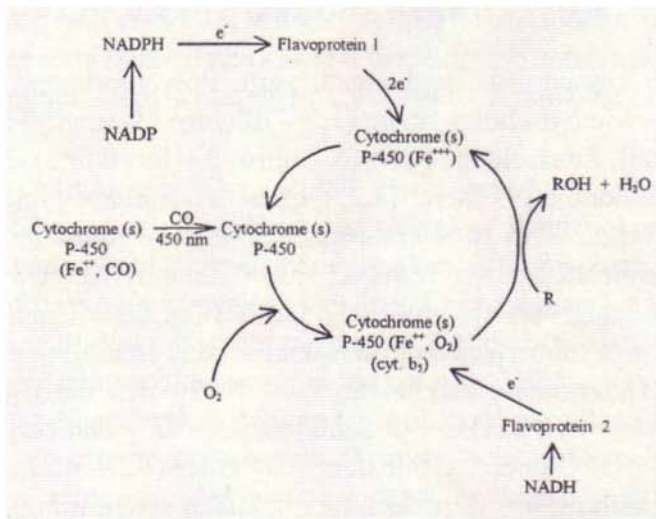
Pendugaan pencemaran lingkungan perairan melalui metode-metode yang digunakan selama ini terbatas pada parameter-parameter kimia yang sangat umum sifatnya, dan konsentrasi yang dapat dideteksi hanya sampai kadar ppm. Metode tersebut tidak mampu mendeteksi polutan/bahan-bahan pencemar lingkungan bila terdapat dalam konsentrasi yang sangat rendah. Padahal, polutan/bahan-bahan pencemar yang konsentrasinya sangat rendah di perairan jika bahan tersebut sangat toksik akan berakibat fatal bagi organisme perairan dan juga dapat digunakan untuk menentukan kualitas lingkungan. Oleh karena itu, pendugaan pencemaran perairan, induksi kontaminan lingkungan, determinasi kandungan Cyt. P-450 dan aktivitas enzim, biotransformasi toksikan, penentuan nasib toksikan dalam tubuh organisme dan di lingkungan, determinasi residu antibiotik dalam jaringan tubuh, upaya induksi aktivitas enzim untuk mempercepat pembersihan berbagai jenis antibiotik dari jaringan tubuh, oksidasi desulfurasi pestisida pada ikan dan udang, reduksi biokimia dari pestisida, serta toksikan pemicu kanker, tumor, dan desintegrasi sel dapat dikaji berlandaskan konsep "drug metabolizing enzyme activities" pada level subseluler dari organisme perairan. Metode ini jauh lebih peka, efisien, andal, dan merupakan hal yang sangat baru dalam rangka penerapannya dibidang ekotoksikologi perairan, keamanan pangan maupun biomedis di Indonesia.

Cytochrome P-450, Drug Metabolizing Enzyme Activities, dan Fraksionasi Sel

Cytochrome P-450 sebagian besar termasuk suatu protein integral, khususnya paling banyak terdapat dalam fraksi mikrosom. Sekitar tahun 1950-an beberapa hasil penelitian telah berhasil mendemonstrasikan fraksi mikrosom dari rat liver homogenate dapat melakukan oksidasi metabolisme dari bahan-bahan kimia. Beberapa tahun setelah itu, sekitar tahun 1960-an aktivitas enzim yang mirip dengan yang ditemukan pada mamalia tersebut juga dilaporkan dapat berlangsung pada liver ikan-ikan air tawar dan air laut (Adamson 1967). Sejak penemuan tersebut, studi tentang mekanisme oksidasi xenobiotik secara intensif telah dilakukan terhadap mikrosom hepatik dari beberapa spesies mamalia, umumnya yaitu *rat*, *mouse* dan *rabbit*. Mikrosom yang berasal dari lapisan endoplasmic reticulum hepatocyte ternyata mengandung satu

atau lebih famili hemeprotein yang kemudian dikenal dengan Cyt. P-450. Sejumlah enzim-enzim penting yang terdapat pada endoplasmic reticulum bertanggung jawab pada 1) sintesa-sintesa dari sterol, tryacyl glycerols dan phospholipid; 2) detoksikasi dari *drugs* (obat-obatan bahan luar) melalui modifikasi dari reaksi-reaksi, seperti methylation dan hydroxylase; 3) desaturasi dan elongasi dari asam-asam lemak; dan 4) Hydrolisis dari glucose-6-phosphate. Dengan demikian, kini telah diakui bahwa fungsi-fungsi oksidasi gabungan "*Mixed function oxidation, MFO*" dari bahan-bahan kimia "*Xenobiotic*" atau bahan-bahan luar "*foreign compounds*" berlangsung di sana (Omura dan Sato 1964; Sato and Omura, 1978; Remmer, 1972).

Padaprinsipnya, Cyt.P-450 dalam bentuk teroksidasi "*ferric*" berintegrasi dengan substrat. Selanjutnya akan terjadi suatu reduksi elektron, yang akhirnya akan membentuk suatu kompleks dari Cyt.P-450-substrates dalam bentuk tereduksi. Elektron tersebut secara normal disumbangkan oleh NADPH-cytochrome P-450 reductase. Namun demikian, adanya kemampuan NADH untuk membantu berlangsungnya MFO walaupun dengan laju yang rendah, terutama apabila tidak ada kehadiran NADPH, maka elektron akan ditransportasikan lewat beberapa rute alternatif, dalam hal ini diperlukan peranan dari NADH cytochrome b_5 reductase. Kemudian, kompleks dari Cyt. P-450-substrat dalam bentuk tereduksi akan melakukan kombinasi dengan molekul oksigen untuk membentuk kompleks dari "*Oxygenated reduced cytochrome P-450*" yang sifatnya sangat labil, di mana kompleks ini akan menerima elektron melalui NADPH cytochrome P-450 reductase atau NADH-cytochrome b_5 reductase yang pada akhirnya akan menghasilkan produk-produk terhidroksilasi, Cyt. P-450 dalam bentuk teroksidasi dan air (Gambar 1) (Lumban Batu 1992).



Gambar 1 Sistem transpor elektron pada hepatic mikrosom cytochrome P-450 (Lumban batu 1992)

Liver atau organ-organ yang ekuivalen dengannya misalnya hepatopancreas digunakan pada hampir semua studi-studi tentang oksidasi substrat dalam skala *in vitro*. Hal ini disebabkan karena dia memiliki kekhasan "*spesified*" dan aktivitas enzim total yang tinggi untuk melangsungkan oksidasi xenobiotik. Oleh karena itu, di dalam setiap Uji Pendahuluan tentang suatu spesies, pertama kali harus diketahui dahulu tentang sistem hepaticnya. Sistem hepatic tersebut, terutama MFO dari setiap spesies ikan air tawar dan air laut membutuhkan NADPH dan molekul oksigen agar mampu menghasilkan aktivitas oksidasi maksimum yang berlokasi pada fraksi mikrosom, sedangkan pada fraksi mitochondrial sering juga ditemukan adanya aktivitas enzim tersebut. Hal ini dimungkinkan oleh beberapa fragmen-fragmen berukuran besar dari endoplasmic reticulum pada fraksi mitochondrial tersebut. NADPH dapat mengadakan substitusi dengan NADH di dalam peranannya sebagai kofaktor dan juga sebagai penyumbang elektron. Hal ini telah terbukti pada spesies-spesies tertentu, namun aktivitas yang dihasilkannya sangat rendah (Lumban Batu 2001).

Kemampuan Induksi Toksikan

Tujuh jenis kontaminan lingkungan, yaitu Polychlorinated biphenyl (PCBs); 3 - Methyl cholanthrene [1,2 - dihydro -3- methyl benz - (j) aceanthylene]; furazolidone [N - (5 - nitro -2 - furylidine) -3 - amino -2 - oxazolidone]; j - BHC [1,2,3,4,5,6- hexachloro cyclohexane]; p,p' - DDT [2,2, - di (p - chlorophenyl - 1,1 - trichloro ethane)]; pentachlorophenol dan fenitrothion [O,O - dimethyl O - (3 - methyl -4 - nitrophenol) - phosphorotioate]. Dosis yang diberikan adalah 0,2 mg/100 g-berat tubuh/hari dan diberikan selama lima minggu kepada ikan mas. Determinasi kandungan Cyt. P-450 dan aktivitas enzim benzo(a)pyrene hydroxylase, p- nitroanisoole - O - demethylase, p - nitrophenol UDP Glucuronyl transferase, 1 - chloro -2,4- dinitrobenzene dan 1,2 - Dichloro 4 - nitrobenzene dilakukan setiap minggu selama berlangsungnya induksi.

Kandungan Cyt. P-450 tertinggi diperoleh pada mikrosom hepatic ikan mas yang diberi perlakuan dengan PCB yang meningkat sebanyak 3,2 kali lipat dibandingkan dengan kontrol. Sementara dengan 3-MC terinduksi hingga 1,88 kali lipat dibandingkan dengan kontrol. BHC dan DDT hanya mampu menginduksi kandungan Cyt. P-450 hingga sebesar 1,37 kali lipat dibandingkan dengan kontrol. Dilain pihak, PCP dan FS masing-masing mampu menginduksi kandungan Cyt. P-450 sebesar 1,28 dan 1,22 kali lipat dibandingkan dengan kontrol. Berdasarkan hasil pengukuran kandungan Cyt. P-450 dari seluruh perlakuan dengan kontaminan lingkungan, dapat terlihat bahwa PCB adalah induser utama bagi Cyt. P-450 dari mikrosom ikan mas, diikuti oleh 3-MC, serta furazolidone dan BHC yang ternyata menunjukkan perbedaan yang sangat nyata dibandingkan dengan kontrol. Meskipun DDT, chlordane, phenobarbital, dan phenylbutazone diketahui merupakan induser bagi Cyt. P-450 dari hewan-hewan mamalia (Lumban Batu 1991), namun hasil penelitian ini menunjukkan bahwa DDT, PCP, dan FS terbukti bukan merupakan induser efektif terhadap Cyt. P-450 dari hepatopancreas ikan mas.

Oleh karena itu, telah terbukti bahwa tujuh jenis kontaminan lingkungan telah mampu meningkatkan kandungan Cyt. P-450 secara bervariasi. Hal ini menunjukkan bahwa bentuk, peranan, sifat-sifat spektrum optikal dan katalitik dari Cyt. P-450 dari fraksi mikrosom *carp* sudah

tertentu, dan bila diinduksi dengan beragam kontaminan lingkungan, tipe induser serta sifat-sifatnya sangat berpengaruh untuk meningkatkan ataupun menurunkan kandungan Cyt. P-450 selama berlangsungnya induksi.

Meskipun kandungan Cyt. P-450 pada perlakuan dengan PCB meningkat hanya 3,2 kali lipat dibandingkan dengan kontrol, pada minggu kedua telah mampu meningkatkan aktivitas enzim benzo(a) pyrene hydroxylase sebanyak 43 kali lipat dibandingkan dengan kontrol. Kemudian, aktivitas enzim ini meningkat lagi pada minggu ketiga dan keempat, dan mencapai puncaknya pada minggu kelima, yaitu sebanyak 55 kali lipat dibandingkan dengan kontrol, pada aktivitas sebesar 1.66 nmol/min/mg-protein mikrosomal. Artinya, biotransformasi toksikan, detoksikasi, eliminasi, dan ekskresi dapat berlangsung dengan lebih cepat dan baik (Tabel 1).

Tabel 1 Hasil pengukuran kandungan cytochrome P-450 pada fraksi mikrosom *carp* setelah diberi perlakuan induksi dengan PCB, 3-MC, FZD, BHC, DDT, PCP, dan FS dibandingkan dengan kontrol selama lima minggu

Jenis kontaminan Lingkungan	Kandungan cytochrome P-450 pada minggu ke-				
	1	2	3	4	5
PCB	0,95	1,44	1,53	1,64	1,56
3MC	0,75	0,85	0,92	0,96	0,91
FZD	0,61	0,66	0,71	0,76	0,71
BHC	0,56	0,62	0,70	0,71	0,69
DDT	0,56	0,61	0,66	0,70	0,66
PCP	0,54	0,58	0,63	0,66	0,63
FS	0,50	0,55	0,59	0,63	0,59
Kontrol	0,45	0,45	0,56	0,55	0,53

Keterangan: Kandungan cytochrome P-450: nmol/mg-protein mikrosomal

Aktivitas enzim p-nitroanisole O-demethylase setelah diinduksi dengan PCB, FZD, dan DDT mampu meningkat sebanyak dua kali lipat dibandingkan dengan kontrol. Pada perlakuan dengan FS tidak terlihat adanya peningkatan aktivitas enzim yang dideterminasi pada penelitian ini, perlu dijelaskan bahwa sebenarnya enzim yang berperan untuk memetabolisme FS adalah oxydative desulfurase yang dalam

subpenelitian ini tidak dideterminasi, namun pada kelompok crustacean telah terbukti bahwa enzim oxidative desulfurase berperan untuk mengonversi Fenitrothion menjadi Fenitrooxon yang sangat toksik karena mampu menurunkan aktivitas acetylcholine esterase (AcChE) pada synaps hingga nol sehingga akan menghentikan pengiriman impuls saraf dari satu badan saraf ke badan saraf lainnya dan akhirnya mematikan crustacean tersebut. Sementara pada perlakuan dengan 3-MC dan BHC, aktivitas enzim p-nitroanisole O-demethylase ini jauh lebih rendah dibandingkan dengan perlakuan dengan FS. Dengan demikian, induksi dapat berlangsung melalui proses aktivasi enzim-enzim yang ada oleh sintesis Cyt. P-450.

Dari hasil penelitian ini, terbukti bahwa fraksi mikrosom *carp* mampu melangsungkan aktivitas enzim p-nitrophenol UDP-glucuronyl transferase berkat adanya enzim yang tergolong dalam famili Uridine Diphosphate (UDP) glucuronosyl transferase. Enzim ini memanfaatkan phenol, alkohol, amine, dan asam-asam karboksilat sebagai substrat yang sangat potensial untuk dapat melangsungkan konjugasi dengan asam glucuronik.

Fraksi cytosol *carp* mengandung glutathione, pada tahap pertama akan berperan dalam reaksi-reaksi sekuensi pembentukan suatu asam merkapturik, terutama dari konjugat-konjugat N - acetyl cysteine yang nantinya akan melakukan reaksi konjugasi di mana enzim glutathione transferase berfungsi sebagai katalisator. Dua jenis aktivitas enzim glutathione transferase yang diamati adalah 1-chloro-2,4-dinitrobenzene dan 1,2-dichloro 4-nitrobenzene keduanya menampilkan aktivitas enzim yang tinggi artinya PCB, 3-MC dan DDT mengalami biotransformasi pada cytosol yang dikatalisasi oleh enzim glutathione S-transferase. Biotransformasi toksikan sangat tergantung kepada kandungan Cyt. P-450 dan glutathione, kelayakan substrat, gugus reaktif, dan katalisasi enzim-enzim. Dengan demikian, setiap kontaminan mempunyai kecepatan metabolisme yang berbeda menjadi bentuk-bentuk polar dan melalui detoksikasi serta deaktivasi kontaminan tersebut akan diekskresikan ke lingkungan.

Studi Aktivitas Enzim sebagai Landasan Penentuan Kualitas Lingkungan

Kandungan Cyt. P-450 dan protein dari ikan kakap dan ikan kembung yang tertangkap di Perairan Teluk Jakarta lebih tinggi dibandingkan dengan Perairan Pelabuhan Ratu, kandungan Cyt. P-450 dalam unit nmol/g–liver dari ikan kakap Perairan Teluk Jakarta lebih tinggi 46% dibandingkan dengan yang tertangkap di Perairan Pelabuhan Ratu. Kemudian, kandungan protein pada liver ikan kakap dari Perairan Teluk Jakarta, baik pada fraksi mikrosom maupun cytosol lebih tinggi sekitar 12% dibandingkan dengan yang tertangkap dari Perairan Pelabuhan Ratu. Kandungan Cyt. P-450 ikan kembung dari Perairan Teluk Jakarta lebih tinggi 85% dibandingkan dengan yang tertangkap di Perairan Pelabuhan Ratu, sedangkan kandungan protein pada fraksi mikrosom dan cytosol dari ikan kembung yang tertangkap dari Perairan Teluk Jakarta hanya 7 % lebih tinggi dibandingkan dengan yang tertangkap di Perairan Pelabuhan Ratu (Tabel 2).

Tabel 2 Kandungan cytochrome P-450 dan protein pada fraksi mikrosom dan cytosol dari ikan kakap dan ikan kembung yang tertangkap di Perairan Teluk Jakarta dan Perairan Pelabuhan Ratu

Kandungan Cytochrome P-450 dan Protein	Perairan Teluk Jakarta		Perairan Pelabuhan Ratu	
	Kakap	Kembung	Kakap	Kembung
Cytochrome P-450 (nmol/mg-protein)	0,29	0,25	0,21	0,15
Cytochrome - P-450 (nmol/g–liver)	0,19	0,13	0,13	0,07
Protein-mikrosom (mg/g–liver)	12,83	11,43	11,82	10,95
Protein–cytosol (mg/g–liver)	10,17	9,04	8,09	7,59

Perairan Teluk Jakarta banyak menerima berbagai jenis limbah dan sudah terpolusi berat, sebaliknya Perairan Pelabuhan Ratu jauh lebih sedikit menerima limbah atau relatif masih lebih bersih. Berbagai jenis “xenobiotic” yang memasuki lingkungan perairan laut secara alamiah akan terpapar pada organisme perairan tersebut (ikan kakap dan

kembung), artinya akan berlangsung induksi komponen Cyt. P-450 itu sendiri. Pada serangkaian penelitian sebelumnya dengan menggunakan tujuh jenis kontaminan lingkungan, terbukti bahwa kandungan Cyt. P-450 dan protein pada hepatopancreas *carp* meningkat setelah diinduksi selama lima minggu. Polutan lingkungan lainnya pun, seperti polycyclic aromatic hydrocarbon (AHH) yang bersumber dari kegiatan industri dan migas, telah terbukti mampu menginduksi kandungan Cyt. P-450 dan berbagai aktivitas enzim lainnya dan terbentuk kompleks antara AHH dengan Cyt. P448. Dalam hal ini terjadi pergeseran panjang gelombang sebesar 2 nm dari 450 menjadi 448, dan kompleks baru ini merupakan cikal bakal kanker (Lumban Batu 1998). Besar kemungkinan, beberapa dari kontaminan lingkungan di Perairan Teluk Jakarta mampu menjadi substrat yang baik “*high turn over number*”, khususnya dalam pembentukan Cyt. P-450 yang baru.

Secara umum, berbagai aktivitas enzim MFO pada fraksi mikrosom dan cytosol ikan kakap maupun ikan kembung yang tertangkap dari Perairan Teluk Jakarta lebih tinggi dibandingkan dengan yang tertangkap dari Perairan Pelabuhan Ratu, kecuali lipoperoxidation pada mikrosom ikan kembung maupun ikan kakap ditemukan sama, yaitu 0,01 nmol/min/mg-protein microsomal (Tabel 3).

Tabel 3 Aktivitas enzim MFO pada mikrosom ikan kakap dari Perairan Teluk Jakarta dan Perairan Pelabuhan Ratu

Aktivitas enzim *)	Perairan	
	Teluk Jakarta	Pelabuhan Ratu
NADPH cytochrome c reductase	50,40	49,40
NADH cytochrome b ₅ reductase b)	132x10 ³	77,2x10 ³
7-Ethoxycoumarin o-deethylase	0,86	0,41
Aniline hydroxylase	0,13	0,06
Benzphetamine demethylase	1,49	0,98
Epoxide hydratase	6,10	4,07
Lipoperoxidation	0,01	0,01

Keterangan: *) Dalam nmol/min/mg-protein mikrosomal

b) Dalam μ mol/min/mg-proten mikrosomal

Perbedaan tersebut, disebabkan oleh refleksi kekhasan substrat. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa oksidasi dari substrat-substrat beberapa jenis kontaminan lingkungan dapat berlangsung pada fraksi mikrosom ikan uji. Aktivitas aniline hydroxylase pada ikan kakap yang

tertangkap dari Perairan Teluk Jakarta lebih tinggi 36% dibandingkan dengan yang tertangkap di Perairan Pelabuhan Ratu. Demikian pula aktivitas enzim ini pada ikan kembung yang tertangkap di Perairan Teluk Jakarta lebih tinggi sekitar 55% dibandingkan dengan yang tertangkap di Perairan Pelabuhan Ratu. Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa tingginya aktivitas enzim ini di Perairan Teluk Jakarta merupakan suatu akibat dari suatu hepatotoksin yang menyebabkan peningkatan aktivitas enzim MFO. Melalui peningkatan “electron terminal oxidation” pada fraksi mikrosom, terlihat adanya peranan penting dari komponen “marker enzyme”, seperti NADPH cytochrome c reductase dan NADH cytochrome b₅ reductase, serta data pada Tabel 4 yang menunjukkan bahwa aktivitas enzim aniline hydroxylase berbanding lurus dengan aktivitas kedua komponen “marker enzyme” tersebut.

Tabel 4 Aktivitas enzim MFO pada mikrosom ikan kembung dari Perairan Teluk Jakarta dan Perairan Pelabuhan Ratu.

Aktivitas enzim *)	Perairan	
	Teluk Jakarta	Pelabuhan Ratu
NADPH cytochrome c reductase	48,16	42,14
NADH cytochrome b ₅ reductase ^{b)}	146 x 10 ³	123 x 10 ³
7-Ethoxycoumarin o-deethylase	0,75	0,47
Aniline hydroxylase	0,17	0,11
Benzphetamine demethylase	1,62	1,28
Epoxide hydratase	7,6	5,1
Lipoperoxidation	0,01	0,01

Keterangan: *) Dalam nmol/min/mg-protein mikrosomal

b) Dalam μmol/min/mg-proten mikrosomal

Adanya perbedaan aktivitas enzim benzphetamine demethylase dari ikan kakap maupun kembung pada kedua perairan tersebut, memberikan bukti bahwa induksi dapat berlangsung melalui proses-proses aktivasi dari berbagai jenis enzim yang terdapat pada fraksi mikrosom dan juga sebagai pengaruh sintesis Cyt. P-450. Munculnya aktivitas enzim epoxide hydratase dan lipoperoxidation pada kedua jenis ikan uji, menunjukkan bahwa mikrosom hepatic ikan-ikan ini mampu melakukan biotransformasi xenobiotik melalui pembentukan suatu kompleks dari enzim-enzim MFO dengan NADPH. Hasil ini mengungkapkan bahwa kedua spesies ini mempunyai kemampuan yang berbeda untuk membentuk suatu toksikan yang potensiil, misalnya metabolit-metabolit yang terdiri dari epoxide dan arene oksida.

Tingginya aktivitas enzim tersebut, menunjukkan bahwa ikan pada lingkungan tertentu akan berupaya untuk melangsungkan laju oksidasi atau reaksi-reaksi lainnya agar xenobiotik yang masuk ke dalam tubuh dapat diekskresi ke lingkungan dan suatu ketika akan dicapai suatu keadaan yang seimbang antara toksikan yang terdapat dalam deposit dengan yang terdapat secara bebas dalam darah. Dengan demikian, ikan sangat beruntung memiliki sistem MFO agar dapat *survive* dalam berbagai keadaan lingkungan yang ekstrem sekalipun, yaitu dengan mengekskresikan xenobiotik serta metabolit-metabolitnya melalui reaksi-reaksi enzimatik. Meskipun proses induksi dapat berlangsung pada tubuh ikan yang hidup di suatu perairan yang terkontaminasi secara kronis ataupun terpolusi berat, namun kemampuan sistem MFO-nya juga sangat tergantung pada beberapa faktor, misalnya toksisitas relatif dari setiap tahapan perombakan, serta pengaruh-pengaruh fisiologis lainnya dapat dideteksi melalui analisis aktivitas enzim yang sangat peka dan aspek-aspek lainnya yang meliputi biodegradasi toksikan dan akumulasi kontaminan dapat dideterminasi hingga level subseluler dengan kepekaan hingga pmol (pico mole).

Aplikasi Determinasi Residu Antibiotik pada Jaringan Tubuh Ikan

Oxytetracycline (OTC) pada umumnya digunakan sebagai antibiotik pada kegiatan budidaya komersial ikan air tawar dan ikan air laut. Oxytetracycline merupakan komponen bakteriostatik dengan aktivitas antibakteria yang kuat terhadap mikroorganisme Gram-positif dan Gram-negatif. Untuk keperluan pencegahan dan penanggulangan terhadap penyakit infeksi pada ikan, berbagai jenis agen-agen antimikrobia penggunaannya telah berlangsung sangat luas dalam budidaya. Apabila ikan tersebut dikonsumsi, akan sangat berisiko apabila berbagai jenis antibiotik masih tertinggal dalam tubuh ikan. Oleh karena itu, sebelum ikan dikonsumsi oleh masyarakat, perlu dinyatakan bahwa ikan tersebut bebas antibiotik. Di samping itu, produk-produk perikanan Indonesia yang diekspor ke manca negara sering ditolak oleh importir karena sebagian besar masih mengandung antibiotik. Oleh karena itu, agar ekspor produk-produk perikanan kita bisa diterima di luar negeri, kita sangat perlu mengupayakan agar produk ekspor tersebut bebas antibiotik.

Bahkan, akhir-akhir ini negara negara maju yang menjadi tujuan ekspor kita juga menerapkan persyaratan yang sangat ketat terhadap komponen-komponen organotin yang terdapat dalam bahan makanan dan produk-produk perikanan kita. Hasil penelitian kita membuktikan bahwa komponen-komponen organotin sangat potensial menyebabkan penyakit kanker dan gangguan kelenjar endokrin bagi manusia. Oleh karena itu, sangat diperlukan suatu pengembangan Metode High Performance Liquid Chromatography (HPLC) untuk mendeterminasi residu OTC, oxolinic acid (OA), dan thiamphenicol (TP) dalam berbagai jaringan tubuh ikan misalnya liver, otot, ginjal, empedu, dan darah ataupun plasma ikan. Telah diketahui bahwa antibiotik OTC memiliki kecenderungan untuk bergabung dengan protein dan akan membentuk khelat bila bergabung dengan ion-ion logam. Oleh karena itu, sangatlah sulit untuk mengekstrak OTC dari berbagai jaringan tubuh ikan dan darah. Recovery OTC dari liver, otot, dan ginjal masing-masing 74,2; 72,2; 75.3%. Untuk meningkatkan keakuratan metode dan tingkat recovery yang lebih tinggi dari OTC, telah kami kembangkan prosedur analitik yang jauh lebih baik dibandingkan dengan yang dilaporkan sebelumnya, yaitu dengan menggunakan Na_2EDTA 5% sebanyak tiga kali. Kemudian, digunakan juga campuran methanol – acetonitrile – 0,2 M oxalic acid (larutan 1:1:4,4; pH 2,0) untuk tujuan: 1. Untuk mencuci OTC dari kolom Sep – Pak C_{18} , dan 2. Sebagai sarana mobil phase dari OTC. Kemudian, dilakukan pula modifikasi sistem ekstraksi dari dua kali menjadi tiga kali, serta penambahan larutan Na_2EDTA 5% diikuti dengan penggunaan larutan campuran methanol - acetonitrile – 0,2 M oxalic acid (1:1:4,4; pH 2,0) sebagai sarana mobil phase, dan teknik baru ini menghasilkan rata-rata *recovery* yang lebih tinggi, yaitu 79,8% dari OTC dari berbagai jaringan tubuh dan darah ikan. Kemudian, perlakuan dengan hexane dan penerapan Metode Kolum Sep – Pak C_{18} cartridge merupakan suatu prosedur pembersihan yang sangat cocok, mudah mempersiapkannya dan sangat efektif meningkatkan eliminasi dari lipid-lipid, serta substansi-substansi pengganggu lainnya yang terdapat dalam jaringan tubuh ikan. Metode yang kami kembangkan ini juga memberikan kondisi yang tepat bagi penggunaan mobile phase yang sangat efektif untuk meningkatkan *recovery* dari OTC, jauh lebih baik dari metode-metode yang dikembangkan sebelumnya (Lumban Batu 2010). Tingkat *recovery* pada plasma, liver, otot, dan

ginjal masing-masing 90; 72; 84; dan 73%. Batas deteksi OTC untuk otot adalah 0,05 ppm, serta untuk liver dan ginjal masing-masing adalah sama, yaitu 0,1 ppm. Hilangnya sekitar 15% dari capaian nilai *recovery* tersebut, kemungkinan disebabkan oleh terabsorpsinya OTC oleh gel Sep – Pak C₁₈ cartridge, degradasi kimia, dan terjadinya ikatan *irreversible* dengan protein selama masa penyimpanan sampel di “deep freezer”. Tingkat *recovery* OTC yang teramati pada plasma (90%); otot (84,5%); ginjal (73%), dan liver (72%) sangat tinggi. Hasil penelitian ini menunjukkan adanya perbedaan yang sangat nyata pada level absorpsi OTC pada berbagai jaringan tubuh. Rendahnya tingkat *recovery* pada liver dapat terjadi karena OTC yang diadministrasikan ke ikan kemungkinan mengalami biotransformasi menjadi bentuk-bentuk yang mudah terekstraksi melalui bantuan reaksi-reaksi enzimatik, seperti hydroxylase, epoksidasi, S-oksidasi, dealkylasi, reduksi, hydrolysis, dan konjugasi (Lumban Batu 2001). Data hasil penelitian kami juga menunjukkan bahwa OTC dibebaskan dengan cepat dari ginjal. Hal ini terlihat dari rendahnya *recovery* OTC pada ginjal bila dibandingkan dengan jaringan tubuh lainnya.

OTC yang diadministrasikan secara oral diserap dengan sangat mudah dan didistribusikan dengan sangat cepat pada jaringan tubuh ikan. Hasil penelitian ini juga telah menemukan konsentrasi maksimum (ppm), waktu yang diperlukan (hr), dan biological Half-life (hr) pada Tabel 5.

Tabel 5 Konsentrasi maksimum, waktu yang diperlukan, dan waktu-paruh biologi dari oxytetracycline pada liver dan kidney ikan setelah administrasi oral

Ikan	Konsentrasi maksimum (ppm)	Waktu yang dibutuhkan (jam)	Waktu paruh biologi (jam)
<i>Yellowtail</i>			
Liver	2,2	4	8-10
Kidney	1,6	2	6
<i>Red Sea Bream</i>			
Liver	2,3	12	16
Kidney	1,1	12	12

Tabel 5 Konsentrasi maksimum, waktu yang diperlukan, dan waktu-paruh biologi dari oxytetracycline pada liver dan kidney ikan setelah administrasi oral (lanjutan)

Ikan	Konsentrasi maksimum (ppm)	Waktu yang dibutuhkan (jam)	Waktu paruh biologi (jam)
Ayu			
Liver	10,8	12	12
Kidney	1,8	12	14
Carp			
Liver	2,8	12	12
Kidney	0,6	12	12
Rainbow trout			
Liver	7,4	26	70
Kidney	0,6	50	50

Konsentrasi maksimum dari OTC pada jaringan tubuh *yellow tail*, *red sea bream*, ayu, *carp* dan *rainbow trout* telah terdeteksi masing-masing 4–2 hr, 12 hr, 12 hr, 12 hr, dan 26–50 hr setelah dipapar. Waktu yang diperlukan untuk mencapai level konsentrasi maksimum dan biological Half-life dari OTC ikan uji memiliki orde yang sama dengan perlakuan pada OA dan thiamphenicol (TP) (Lumban Batu 2001^a; 2001^b). Konsentrasi tertinggi dari OTC ditemukan pada liver ayu (10,8 ppm) dan terendah pada *red sea bream* (2,3 ppm). Konsentrasi tertinggi dari OTC ditemukan pada ginjal ayu (1,8 ppm) dan terendah pada *carp* dan *red sea bream* (0,6 ppm). Hasil penelitian ini juga menunjukkan perubahan pada konsentrasi OTC setelah dilakukan administrasi oral dengan dosis 50 mg OTC/kg – berat tubuh terhadap *yellow tail*, *red sea bream*, ayu, *carp*, dan *rainbow trout*. OTC yang masih tertinggal terdeteksi pada darah, liver, otot dan ginjal dari *yellow tail*, *red sea bream*, ayu, dan *carp* 98 hr setelah diadministrasikan. Usus dari *rainbow trout* menunjukkan durasi paling lama dari OTC dibandingkan dengan ikan-ikan lainnya, sedangkan OTC pada usus ikan lainnya kecuali *rainbow trout* telah menghilang 24 jam setelah diadministrasikan. Namun demikian, OTC pada usus *rainbow trout* tetap tertinggal hingga 242 jam setelah diadministrasikan. Sebagai kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa absorpsi OTC pada saluran pencernaan dari masing-masing ikan uji berbeda satu sama lain. Lamanya OTC berada dalam jaringan tubuh

rainbow trout kemungkinan ada kaitannya dengan lambatnya proses pencernaan pada *rainbow trout*. Dengan pengecualian pada *rainbow trout* yang menunjukkan suatu kelambatan pada pencernaannya, telah dapat dibuktikan dengan adanya hubungan yang erat antara aktivitas enzim-enzim yang mampu metabolisme *drugs* (obat-obatan, kontaminan lingkungan, toksikan, foreign compounds, antibiotik), khususnya Aryl Hydrocarbon Hydroxylase (AHH) dan Glucuronyl transferase pada ikan uji dengan lama tinggal (“duration”) dari OTC yang diadministrasikan pada ikan (Lumban Batu 2002^c). Hasil penelitian ini sangat bermanfaat untuk mengetahui berapa jam waktu yang dibutuhkan agar antibiotik yang diadministrasikan pada ikan uji sudah terlepas ke media hidupnya atau lingkungan perairan. Dengan demikian, untuk kepentingan ekspor dan kebutuhan domestik masyarakat pemakan ikan dapat terhindar dari masuknya OTC ke dalam tubuhnya dan bioakumulasi OTC tidak akan terjadi. Melalui pengembangan metode HPLC yang kami kembangkan ini, telah berhasil mendemonstrasikan keberadaan dari residu OTC pada berbagai jaringan tubuh ikan, serta menghasilkan *recovery* tertinggi dibandingkan dengan hasil-hasil penelitian yang dilaporkan sebelumnya (Murray *et al.* 1997 dan Ueno *et al.* 1999).

Pengaruh Aktivitas Enzim yang Terinduksi oleh Polychlorinated Biphenyl terhadap Lama Tinggal Antibiotik

Pengembangan lebih lanjut dari induksi toksikan terhadap aktivitas enzim adalah memanfaatkan terjadinya peningkatan aktivitas enzim yang luar biasa dan mengetahui pengaruhnya terhadap eliminasi dari antibiotik oxytetracycline (OTC) dan lama tinggal dari antibiotik tersebut dalam tubuh *carp*. *Carp* diberi diet yang mengandung Polychlorinated biphenyl (PCB) (0,1 mg/100–berat tubuh/hari selama dua minggu untuk menginduksi aktivitas enzimnya. Setelah perlakuan tersebut, OTC diadministrasikan bersama-sama dengan diet kepada *carp* yang diberi perlakuan dengan PCB dan kontrol dengan dosis 50 mg/kg-berat tubuh/hari.

Pada ikan, berbagai jenis xenobiotik tidak secara langsung terkonjugasi melainkan pertama-tama mesti ditransformasi secara metabolik untuk menghasilkan suatu grup-grup bahan yang cocok melakukan kombinasi dengan agen-agen pengonjugasi. Reaksi seperti ini utamanya

dilaksanakan oleh reaksi Cyt. P-450-dependent. Pada beberapa spesies ikan, keberadaan dari Cyt. P-450 mikrosomal mampu memetabolisme xenobiotik yang larut dalam lemak dan mampu meningkatkan aktivitas enzim-enzim MFO (Lumban Batu 2009). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kandungan Cyt. P-450 dari mikrosom liver *carp* terinduksi sekitar 3,18 kali lipat dibandingkan dengan kontrol, dua minggu setelah diadministrasikan dengan PCB melalui studi yang sangat mendalam tentang sistem transpor elektron pada *carp*, dan metabolisme berbagai komponen, seperti biphenyl, benzo (a) pyrene dan 2,5 - diphenyl - oxazole oleh mikrosom *carp* telah ditemukan bahwa oksigen dan NADPH diperlukan untuk menghidupkan sistem transportasi elektron untuk mengonversi xenobiotik. Metabolisme dari komponen-komponen ini oleh sistem pada liver mikrosom *carp* terbukti dihambat sangat kuat oleh karbon monoksida (Lumban Batu 2001 b). Informasi ini dan berdasarkan suatu fakta bahwa Cyt. P-450 sebagaimana halnya juga dengan NADPH cyt. c reductase yang terdapat pada *carp*. Secara tegas menunjukkan bahwa ikan memiliki sistem Cyt. P-450 mediated monooxygenase yang sangat mirip dengan yang ditemukan pada mamalia (Lumban Batu 2001 b). Penelitian ini menunjukkan terjadinya induksi oleh PCB terhadap Cyt. P-450 pada *carp*, dan hasil penemuan ini digunakan untuk meneliti kemungkinan induksi PCB terhadap system MFO. Aktivitas enzim benzo(a)pyrene hydroxylase pada *carp* yang diberi perlakuan dengan PCB meningkat dengan cepat sekitar 17,5 kali lipat dibandingkan dengan kontrol, namun demikian aktivitas glutathione transferase, khususnya 1 - chloro - 2,4 - dinitrobenzene, lebih rendah bila dibandingkan dengan hydroxylase. Aktivitas enzim glucuronyl transferase, khususnya p-nitrophenol justru tidak terinduksi oleh PCB. Hal ini membuktikan bahwa secara alamiah Cyt. P-450 yang dilibatkan dalam setiap reaksi enzimatik benar-benar khas. Oleh karena itu, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa aktivitas glucuronyl transferase pada *carp* yang berkaitan erat dengan Cyt. P-450 yang berbeda-beda tipenya pada mikrosom liver *carp*, akibatnya muncul perbedaan kapabilitas dalam hal metabolisme serta induksi dari PCB terhadap MFO. Administrasi PCB pada *carp* akan ditransformasikan oleh enzim-enzim pemetabolisme *drugs*, seperti benzo(a)pyrene hydroxylase, glucuronyl transferase dan glutathione transferase, sedangkan Cyt. P-450 kemungkinan besar terlibat dalam upaya pembersihan OTC dari jaringan tubuh *carp*.

Konsentrasi maksimum OTC pada liver *carp* yang diberi perlakuan dengan PCB sedikit berbeda dibandingkan dengan kontrol yaitu sekitar 1.5 kali lipat. Konsentrasi maksimum OTC pada liver dan kidney dari *carp* secara tepat dicapai masing-masing pada 12 hr dan 26 - 12 hr. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai level maksimum dan waktu paruh biologi ("biological-half life") OTC pada liver dari *carp* yang diberi perlakuan dengan PCB telah dilaporkan oleh Lumban Batu (2002 c). Di mana pada kidney dari *carp*, yang diberi perlakuan dengan PCB tercapai setelah 26 hr. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat perubahan dari konsentrasi OTC pada berbagai jenis jaringan, seperti liver, muscle dan kidney serta darah, dan tidak terlihat adanya suatu perbedaan yang jelas antara grup perlakuan dengan PCB dengan kontrol. Hasil ini menunjukkan, walaupun PCB mampu menginduksi aktivitas enzim arylhydrocarbonhydroxylase (AHH) sangat tinggi di antara semua enzim-enzim lainnya yang terlibat dalam sistem transport elektron pada mikrosom hepatik *carp*, tetapi hydroxylase yang terinduksi tersebut tidak melakukan reaksi dengan OTC, hal ini ditunjukkan dengan tidak adanya perubahan konsentrasi OTC pada level jaringan, paling tinggi 3 kali lipat terlihat pada aktivitas enzim benzo(a)pyrene hydroxylase setelah *carp* mengalami perlakuan pendahuluan, dan terjadinya hal ini tidak dapat dijelaskan bila hanya menggunakan terjadinya peningkatan kandungan dari Cyt. P-450. Besar kemungkinan juga bahwa sekelompok enzim yang memiliki perbedaan substrat yang sangat spesifik telah terinduksi oleh PCB dalam tubuh *carp*, salah satu hal yang pasti adalah ada komponen kimia yang menghambat atau menginduksi sejumlah Cyt. P-450 yang terlibat dalam rangka pembersihan OTC dalam tubuh *carp*. Hasil ini juga menunjukkan bahwa adanya perbedaan dalam hal aktivitas enzim-enzim pemetabolisme *drugs*. Kandungan Cyt. P-450, substrat dan reaksi-reaksi enzimatik terhadap OTC memunculkan perbedaan-perbedaan dalam lintas anjak metabolisme ("metabolic pathway"), eliminasi dan lama tinggal ("duration") dari OTC dalam *carp*. Hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan untuk mengetahui berapa lama suatu antibiotik berada dalam tubuh ikan dan untuk memastikan apakah suatu produk-produk perikanan kita aman atau tidak untuk dikonsumsi. Kemudian, hubungan antara mekanisme enzimatik dan absorpsi dan depuration time dari OTC dalam jaringan tubuh *carp* mungkin saja merupakan sesuatu yang membutuhkan pembahasan di

masa depan terkait dengan pengaturan dari gen-gen individu dari Cyt. P-450, dan ada kemungkinan juga akan berkembang untuk mempelajari "gen-gen chiremic" (Guengerich 1988; Lumban Batu 1996). Oleh karena itu, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pada pola absorpsi dan ekskresi dari OTC tidak menunjukkan perbedaan yang nyata setelah diberi perlakuan dengan PCB.

Metabolisme Pestisida pada Mikrosom Ikan

Suatu studi telah dilakukan tentang oksidasi desulfurasi dari [¹⁴C]-fenitrothion yang berlangsung pada mikrosom liver dari beberapa spesies ikan. Penelitian pendahuluan telah dilakukan untuk mengetahui kondisi optimum pada suatu Uji Fenitrothion yang berlangsung pada liver dari spesies ikan uji, meliputi beberapa parameter seperti pH, suhu, waktu pra-inkubasi, inhibitor trypsin, serta pengaruh dari NADPH dan NADH. Mikrosom liver dari kontrol dan perlakuan telah digunakan pada Uji Oxidative Desulfurase denitrothion, dan untuk mendeterminasi kandungan protein dan Cyt. P-450. Salah satu peranan paling penting dari liver ikan adalah untuk mendetoksikasi berbagai jenis komponen luar yang cenderung bersifat toksik. Komponen ini masuk ke dalam liver melalui pembuluh darah vena, dan sebagian besar akan dioksidasi menjadi metabolit-metabolit yang lebih polar yang selanjutnya akan dimetabolisme oleh enzim-enzim, seperti epoxide hydratase dan konjugasi menjadi metabolit-metabolit yang larut dalam air dan selanjutnya diekskresi keluar tubuh dengan cepat dan aman (Lumban Batu 1991).

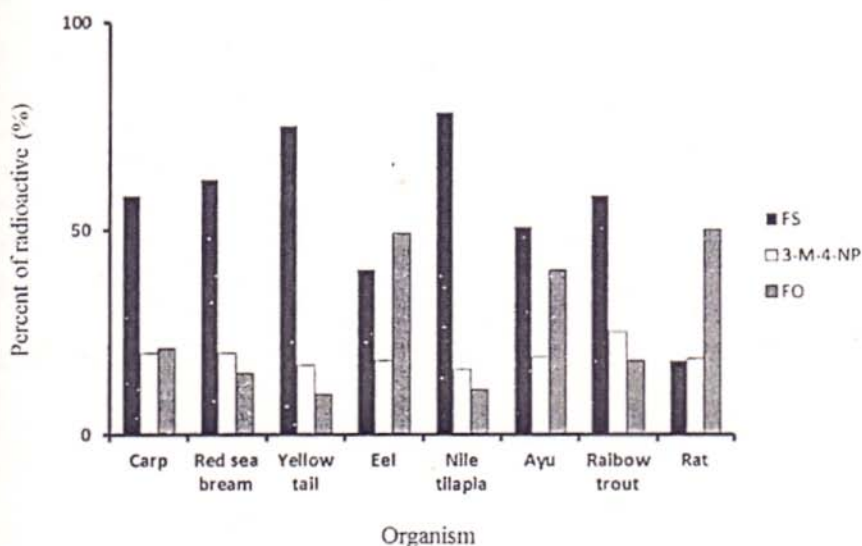
Cytochrome P-450 yang terdapat pada mikrosom liver merupakan suatu kunci penting bagi enzim yang berpartisipasi pada tahap-tahap awal proses detoksikasi tersebut, dan telah dapat dipastikan bahwa mikrosom ikan memiliki fungsi untuk mengoksidasi *drugs* (Lumban Batu 1992). Kelompok pestisida organophosphorous merupakan suatu kelompok utama dari pestisida, di mana kemungkinan sebagian kecil dari pestisida ini akan ditransportasikan ke lingkungan perairan sebagai pengaruh akibat penggunaannya pada pertanian padi dan kehutanan atau melalui "run off" pada akhirnya masuk ke berbagai jenis ekosistem perairan sebagai suatu hal yang tidak dapat dihindari. Fenitrothion [Sumithion, O, O - dimethyl O - (3-methyl 4-nitrophenol) phosphorothioate]

merupakan salah satu jenis pestisida yang sangat luas penggunaannya di dunia ini, yang digunakan untuk mengontrol hama pada pertanian dan kehutanan, sejak itu tampaknya menjadi sangat toksik untuk berbagai jenis organisme perairan. Dengan disisipkannya suatu grup methyl pada methyl parathion yaitu pada posisi-m rantai benzennya maka toksisitas dari produk yang dihasilkan tersebut, yaitu fenitrothion terhadap mamalia menurun sekitar 4,4 sampai 54,3%, dibandingkan dengan methyl parathion melalui administrasi oral, dan toksisitasnya terhadap ikan dan kerang tidak begitu berbeda (Lumban Batau 2001a; 2001b). Suatu penelitian telah kami lakukan untuk menjelaskan hubungan antara aktivitas enzim pemetabolisme *drugs* dengan aktivitas pembentukan formasi metabolit-metabolit fenitrothion dalam upaya untuk mengonfirmasi ketahanan toksikan ("toxicant resistant") dari ikan terhadap fenitrothion dan untuk membahas saling ketergantungan antara ikan dan perlakuan menggunakan mikrosom liver.

Pada penelitian ini, digunakan radioaktif dari FS yaitu [ring-U-¹⁴C] Fenitrothion. Aktivitas spesifik dari larutan yang mengandung radioisotop yang dipersiapkan ini adalah 30 μ Ci/ml yang disumbangkan oleh Institute for Biological Sciences Sumitomo Chemical Co. Ltd. Metabolit-metabolit radioaktif dari Fenitrothion, yaitu fenitrooxon (FO), des-methyl fenitrothion (DMFS), des-methyl fenitrooxon (DMFO) dan 3-methyl-4-nitrophenol (3-M-4-NP) juga disumbangkan oleh Institut tersebut. Glucose-6-phosphatase dehydrogenase (G6PDH), glucose-6-phosphatase (G-6-P), *nicotinamide adenine dinucleotide phosphatase dehydrogenase* (NADPH) diperoleh dari Sigma Chemical Co, USA, dan pereaksi-pereaksi lain yang digunakan tergolong memiliki mutu tertinggi.

Suatu studi pendahuluan telah dilakukan untuk mengetahui kondisi optimum dari *assay* terhadap mikrosom liver dari seluruh ikan uji, yaitu *rainbow trout*, *Salmo gairdneri*; *red sea bream*, *Chrysophrys major*; *yellow tail*, *Seriola quinquerdinata*; *ell*, *Anguilla japonica*; tilapia *nila*, *Oreochromis niloticus*; dan ayu, *Plecoglossus altivelis*; meliputi pH, suhu, masa inkubasi, masa pra-inkubasi, inhibisi trypsin, NADPH, dan NADH. Kondisi terbaik yang dibutuhkan untuk melangsungkan aktivitas oxidative desulfuration adalah pada *assay* yang diberi NADPH (25 μ l) dan NADH (30 μ l) yang menghasilkan 36 pmol FO/mg-P/min untuk perlakuan pra-inkubasi dan 65 pmol FO/mg-P/min untuk masa

inkubasi 5 menit. Kemudian pemberian NADH (25 μ l) dan NADH (30 μ l) menghasilkan 33 pmol FO/mg-P/min untuk perlakuan pra-inkubasi dan 59 pmol FO/mg-P/min untuk masa inkubasi 5 menit. Inkubasi berlangsung selama 20 menit pada suhu 30°C. Hasil penelitian ini menunjukkan pengaruh pyridine nucleotide dari Fenitrothion untuk menghasilkan Fenitrooxon. Hasil ini juga menunjukkan laju pembentukan metabolit-metabolit mikrosom dengan adanya kehadiran dari NADPH. Pembentukan FO mengalami peningkatan yang linier dari menit ke-0 hingga 20, kemudian dari menit ke-21 hingga 40 hampir konstan, kemudian menurun sejak menit ke-41. Metabolisme dari [¹⁴C]-FS telah diuji dalam kondisi *in vitro*. Selama masa inkubasi 20 menit, FS telah dimetabolisme dengan segera melalui reaksi oksidasi dalam mikrosom liver dan metabolit-metabolitnya terbentuk melalui reaksi-reaksi enzimatik. Aktivitas dari FS dan metabolit-metabolitnya dalam mikrosom liver berbagai jenis ikan uji telah dapat dihitung berdasarkan persentase radioaktif FS dan metabolit-metabolitnya baik pada ikan maupun pada *rat* sebagai pembanding (Gambar 2).



Gambar 2 Persentase radioaktif dari fenitrothion dan metabolit-metabolitnya pada mikrosom ikan dan *rat*

Aktivitas enzim akan menurun secara drastis dengan cara tidak menambahkan NADH dan NADPH pada *assay*, namun jelas sekali bahwa protein asli, oksigen, dan NADPH sangat dibutuhkan untuk dapat menghasilkan aktivitas penuh dari dalam mikrosom liver. Substitusi dari NADH dalam bentuk tereduksi menjadi NADPH yang merupakan sistem pembangkit yang menstimulasi aktivitas enzim, menunjukkan bahwa dalam hal ini dibutuhkan suatu bentuk tereduksi dari coenzim. NADH maupun sistem pembangkit NADH tidak dapat menggantikan NADH, level optimum dari NADPH dan NADH untuk mencapai aktivitas maksimum dari *oxidative desulfurase* FS masing-masing adalah 10 mM dan 6 mM. Suatu sistem pembangkit isositrik *dehydrogenase* NADPH dapat dikatakan lebih efektif dibandingkan dengan persiapan mikrosom lainnya. Pengaruh pH terhadap aktivitas *oxidative desulfuration* FS pada mikrosom liver dan *carp* juga telah diketahui. Terlihat adanya sedikit perbedaan pada ketergantungan terhadap pH pada berbagai ikan uji. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pH optimum untuk dapat melangsungkan aktivitas *oxidative desulfurase* dari FS adalah 7,6; dalam buffer Tris-HCl. Sementara suhu optimum untuk melangsungkan aktivitas *oxidative desulfuration* dan NADPH – *cytochrome c reductase* adalah sekitar 30°C. Dengan memperpanjang masa inkubasi untuk aktivitas *oxidative desulfurase* menjadi satu jam, dapat dinyatakan bahwa suhu optimum yang diperlukan adalah sekitar 30°C. Ketidakstabilan suhu dari sistem mikrosom hepatik *carp* telah diteliti terutama terhadap benzo(a)pyrene (Lumban Batu 2010). Pada masa inkubasi 20 menit dan pada suhu di atas 40°C, terlihat bahwa telah terjadi suatu inaktivasi, sedangkan pada suhu 43°C aktivitas yang berlangsung hanya tinggal sekitar 30% dari aktivitas yang seharusnya masih ada. Hal ini menunjukkan dengan tegas bahwa sistem pada mikrosom hepatik *carp* tidak dapat mentolerir terjadinya suatu inaktivasi termal (panas), demikian juga halnya pada mamalia.

Di lain pihak, aktivitas pembentukan metabolit FS menurun dengan bertambah lamanya masa inkubasi. Aktivitas pembentukan metabolit DMFS dan DMFO juga meningkat sejalan dengan bertambahnya masa inkubasi. Berbeda dengan metabolit lainnya, aktivitas pembentukan FO menurun pada waktu 80 menit masa inkubasi. Hal ini menunjukkan bahwa metabolisme lintas-anjak “*metabolic pathway*” peluruhan FS

pada mikrosom hepatik *carp* untuk menghasilkan DMFS, FO, dan menghasilkan DMFS, termasuk juga 3-M-4-NP. FO dan DMFO keduanya akan menghasilkan 3-M-4-NP. Oleh karena itu, lintas-anjak metabolik peluruhan FS dalam mikrosom heaptik *carp* urutan-urutannya adalah sebagai berikut: FO – DMFO – 3-M-4-NP dan FO – 3-M-4-NP. 3-Methyl-4- Nitrophenol telah terbukti sebagai suatu metabolit utama, bagi *red sea bream* (21.57%); *yellow tail* (16.70%); ayu (21.55%); dan *rainbow trout* (18.63%). Akan tetapi, untuk *carp*, *ell*, dan *rat* FO terbukti merupakan metabolit utama. Metabolit utama dari FS pada *ell* adalah FO (45,61%), persentase ini hanya sedikit berada di bawah *rat* (47,60%). Dilain pihak, metabolit terdemethylase, DMFS ditemukan sekitar 2% pada *carp* dan ayu, sedangkan pada spesies lainnya berada dibawah 1%, begitu pula DMFO juga di bawah 1%.

Menghilangnya FS dan terbentuknya metabolit-metabolit lainnya pada kondisi *in vitro* pada mikrosom hepatik beberapa jenis ikan, membuktikan bahwa pada mikrosom tersebut telah dapat berlangsung reaksi enzimatik *oxidative desulfurase* dari FS menjadi FO (O,O-dimethyl O- (3-methyl-4-nitrophenol-phosphate), oksidasi grup m-methyl dari FO dengan adanya kehadiran dari NADPH dan hydrolytic cleavage dari FO menjadi 3-Methyl-4-NP di mana Mg^{2+} berperan sebagai kofaktor. Pada penelitian pendahuluan, telah diketahui bahwa NADPH merupakan penyumbang elektron yang lebih baik dibandingkan dengan NADH. Aktivitas oksidasi FS akan meningkat ketika NADP digantikan oleh NADPH dalam volume yang sama. Oleh karena itu, NADPH dan NADP menyebabkan peningkatan aktivitas enzim sekitar 10% dibandingkan dengan yang terobservasi dengan sejumlah volume NADP dan NADPH, baik pada perlakuan pada pra-inkubasi selama 5 menit maupun tanpa pra-inkubasi. Terjadinya perbedaan dalam laju pembentukan FO dan 3-M-4-NP kemungkinan besar dibantu oleh berbagai tipe Cyt. P-450 salah satu dari tipe Cyt. P-450 ini bertanggung-jawab dalam pembentukan FO, dan tipe lainnya untuk 3-M-4-NP. Dua jenis reaksi metabolisme FS yang dihasilkan dari penelitian ini sebagai berikut: 1) Metabolisme arylasi mengakibatkan terlepasnya ikatan P – O dari FS dan FO untuk menghasilkan 3-M-4-NP; serta 2) Metabolisme dealkylasi mengakibatkan terbentuknya *cleavage* dari ikan CH_3 -O-P dari FS dan FO untuk membentuk metabolit-metabolit desmethyl (DMFS dan DMFO).

Hasil penelitian kami ini menunjukkan bahwa ketujuh spesies ikan uji dapat mengoksidasi FS dengan bantuan sistem oksidasi obat-obatan pada mikrosom hepatic dari ketujuh ikan tersebut, sama seperti yang dapat terjadi pada *rat*, walaupun dengan aktivitas enzim yang lebih rendah.

Biotransformasi Pestisida pada Udang

Berdasarkan hasil uji toksisitas akut yang telah dilakukan sebelumnya telah diketahui bahwa LC_{50} – 24 jam dari fenitrothion terhadap udang adalah 1 ppb. Dengan demikian, pada penelitian berikutnya telah dilakukan studi tentang perubahan radioaktivitas, serta konsentrasi [^{14}C] fenitrothion dan metabolit-metabolitnya yang terakkumulasi di dalam tubuh udang, setelah dilakukan pemaparan dengan setengah nilai LC_{50} – 24 jam agar udang dapat tetap hidup hingga waktu pemaparan 24 jam. Perubahan dari radioaktivitas dan konsentrasi dari [^{14}C] fenitrothion dan/atau metabolit-metabolitnya di dalam ekstrak benzene, ethyl – ether dan residu pada tubuh udang, selama berlangsungnya pemaparan dengan [^{14}C] fenitrothion air laut dengan konsentrasi 0.5 ppb. Jumlah [^{14}C]fenitrothion dan metabolit-metabolitnya dihitung berdasarkan radioaktivitas di mana didalam penelitian ini aktivitas spesifik dari [^{14}C] fenitrothion adalah 46 dpm/pmol.

Distribusi jumlah fenitrothion dan metabolit-metabolitnya yang terdapat dalam tubuh udang diperoleh dari hasil pemaparan fenitrothion pada: 0,5; 1; 2; 4; 8; 12 dan 24-jam di mana konsentrasi yang digunakan adalah 0.5 ppb. Hasil penelitian menunjukkan jumlah fenitrothion mengalami peningkatan sejak pemaparan 0,5 jam hingga 12 jam yang mencapai 21,94 pmol/g-udang (Tabel 6), kemudian menurun pada waktu pemaparan 24 jam. Pola peningkatan yang sama ditunjukkan oleh fenitrooxon, desmethyl fenitrothion, desmethyl fenitrooxon, dan 3-methyl-4-nitrophenol, namun dari ke-4 metabolit tersebut, jumlah 3-methyl-4-nitrophenol sejak waktu pemaparan 4 jam jauh melebihi jumlah fenitrothion serta ke-3 metabolit lainnya pada waktu pemaparan 24 jam. Konsentrasi 3-methyl-4-nitrophenol dalam tubuh udang adalah 185,48 pmol/g-udang. Konsentrasi bahan yang tidak terdeteksi juga mengalami peningkatan sejak awal hingga akhir waktu pemaparan. Walaupun konsentrasi fenitrothion pada waktu pemaparan 0,5 jam

dan 1 jam merupakan yang tertinggi dibandingkan dengan metabolit-metabolit lainnya, yaitu sekitar 53% dan 42% dibandingkan dengan jumlah total [¹⁴C] fenitrothion, namun setelah waktu pemaparan 4 jam level dari fenitrothion tersebut dapat dikatakan hampir merata hingga berakhirnya waktu pemaparan, yaitu 18,72 pmol/g-udang dengan nilai Rasio Biotransformasi sebesar 8,3. Konsentrasi fenitrothion pada waktu pemaparan 24 jam menurun sekitar 20% dibandingkan dengan waktu pemaparan 12 jam. Dilain pihak, konsentrasi metabolit-metabolit fenitrothion, seperti fenitrooxon, desmethyl fenitrothion, desmethyl fenitrooxon, 3-methyl-4-nitrophenol, dan yang tidak terdeteksi pada waktu pemaparan 24 jam, masing-masing 6,80; 8,66; 14,84; 185,48; dan 17,31 pmol/g; dengan nilai Rasio Biotransformasi masing-masing sebesar 3,77; 4,81; 8,24; 103,04; dan 9,62.

3-Methyl-4-nitrophenol merupakan satu-satunya metabolit yang konsentrasinya jauh melebihi konsentrasi metabolit-metabolit lainnya. Hal ini bisa terlihat sejak waktu pemaparan 2–24 jam. Hal ini berkaitan dengan tingginya aktivitas enzim phosphatase pada kelenjar “mid-gut” dari udang (Lumban Batu 2013). Pestisida fenitrothion yang masuk ke dalam tubuh udang, melalui mekanisme enzim yang khas dapat diolah melalui biotransformasi menjadi metabolit-metabolit, bahan-bahan yang lebih polar dan mudah diekskresi. Dengan mengetahui berbagai aktivitas enzim yang dapat berlangsung pada fraksi mikrosom udang, akan dapat dipelajari mekanisme biotransformasi yang akan menuntun kita untuk dapat mengetahui tentang konversi suatu bahan menjadi suatu bahan yang toksik, mutagenik, dan karsinogenik, khususnya untuk mengetahui metabolisme pestisida organofosfat pada level subseluler yang meliputi metabolit-metabolit yang dihasilkan dan membandingkan toksisitas masing-masing metabolit dan bagaimana berlangsungnya lintas-anjak metabolisme (“metabolic pathway” dari metabolit-metabolit tersebut pada organ-organ tubuh yang berbeda. Untuk keperluan tersebut, dilakukan determinasi terhadap empat jenis aktivitas enzim utama yang erat kaitannya dengan absorpsi, akumulasi, dan lintas-anjak metabolik dari fenitrothion, yaitu aminopyrine-N-demethylase, oxidative desulfurase, p-nitroanisoile-O-demethylase, dan aniline hydroxylase.

Tabel 6 Distribusi jumlah fenitrothion dan metabolit-metabolitnya di dalam tubuh udang ^{a)}

[¹⁴ C] Fenitrothion	Waktu Pemaparan (Jam)						
	0,5	1	2	4	8	12	24
Fenitrothion	7,36	8,53	12,15	17,24	18,40	21,94	17,31
Fenitrooxon	1,05	1,10	1,66	2,33	2,86	4,81	6,80
Desmethyl Fenitrothion	0,53	0,60	0,77	0,93	1,20	1,60	8,66
Desmethyl Fenitrooxon	0,32	0,34	1,66	2,65	6,81	9,61	14,84
3-Methyl-4-Nitrophenol	4,21	8,49	15,46	37,13	61,08	112,12	185,48
Tidak terdeteksi	0,53	1,27	2,21	5,31	10,90	14,42	17,31
Total	14,00	20,33	33,91	65,60	104,10	164,50	250,40

Keterangan: ^{a)} pmol/g-udang

Konsentrasi [¹⁴C] Fenitrothion = 0,5 ppb

= 1,8 nmol/l

= 18 pmol/ml

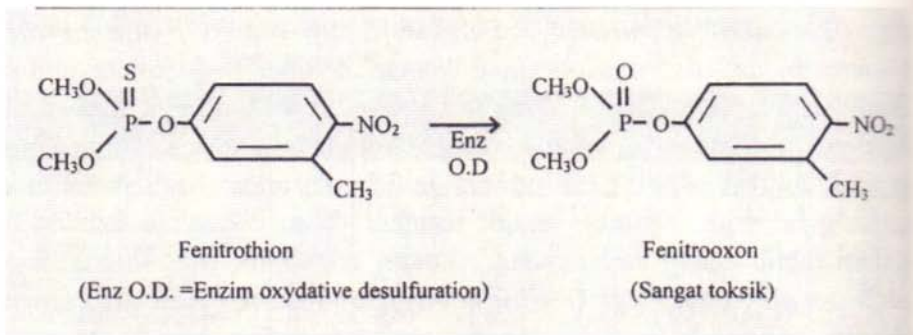
(1,8 pmol/g)

Sistem fungsi-fungsi oksidasi mono “*mono oxygenase*” maupun gabungan “*Mixed Function Oxygenase, MFO*” yang terdapat pada endoplasmic reticulum, khususnya pada fraksi mikrosom dari udang, yaitu dengan terdeterminasinya ke-4 aktivitas enzim tersebut dan terbukti bertanggung-jawab untuk melakukan metabolisme dari fenitrothion dan mampu merubah struktur kimiawi dari substansi tersebut, berupa metabolit-metabolit. Jadi, Cyt. P-450 atau hemeprotein dari udang adalah merupakan suatu terminal transfer elektron yang mampu melangsungkan biotransformasi fenitrothion menjadi metabolit-metabolit. Hasil determinasi menunjukkan bahwa ke-4 aktivitas enzim tersebut dapat berlangsung pada fraksi mikrosom udang. Aktivitas enzim *oxidative desulfurase*, *p-nitroanisole O-demethylase*, dan benzo(a)pyrene hydroxylase pada udang masing-masing 0,06; 0,12, dan 0,008%, sedangkan aktivitas aminopyrine N-demethylase sebesar 0.008 %, dibandingkan dengan aktivitas-aktivitas enzim yang sama pada rat. Secara umum, aktivitas enzim pada udang lebih tinggi sekitar empat kali lipat dibandingkan dengan ikan bandeng, khususnya aktivitas enzim *oxidative desulfurase* pada udang sekitar tiga kali lipat dibandingkan dengan ikan bandeng dan metabolisme enzim inilah yang menghasilkan metabolit fenitrooxon yang sangat toksik terhadap udang. Enzim aminopyrine N- demethylase bertanggung jawab untuk menghasilkan produk-produk seperti desmethyl fenitrothion

dan *desmethyl fenitrooxon*, sedangkan enzim seperti *p-nitroanisole O-demethylase* dan *aniline hydroxylase* bertanggung jawab untuk menghasilkan 3-methyl-4-nitrophenol serta produk-produk degradasi lainnya, di mana 3-methyl-4-nitrophenol tersebut juga merupakan produk hidrolisis dari fenitrothion. Jadi berdasarkan hasil penelitian tentang berbagai aktivitas enzim tersebut dapat dikatakan bahwa di dalam tubuh udang berlangsung sekuensi metabolik yang dikatalisasi oleh enzim-enzim, seperti *N-demethylase*, *O-demethylase*, *oxidative desulfurase* dan hidrolisis. Aktivitas enzim *oxidative desulfurase* pada udang adalah 0,17 nmol/min/mg-mikrosomal protein yaitu sekitar tiga kali lipat dibandingkan dengan ikan bandeng, namun hanya sekitar 6,25% dibandingkan dengan *rat*. Namun demikian, tingginya aktivitas *oxidative desulfurase* pada udang ternyata sangat ampuh untuk melakukan konversi fenitrothion (P = S) menjadi fenitrooxon (P = O), di mana fenitrooxon tersebut terbukti jauh lebih toksik bila dibandingkan dengan fenitrothion. Untuk memastikan bahwa fenitrooxon lebih toksik dibandingkan dengan metabolit-metabolit lainnya dan mekanisme penghambatan pengiriman *impuls* pada badan saraf akibat tidak aktifnya AcChE karena terbentuknya fenitrooxon tersebut akan diutarakan pada tulisan berikut ini.

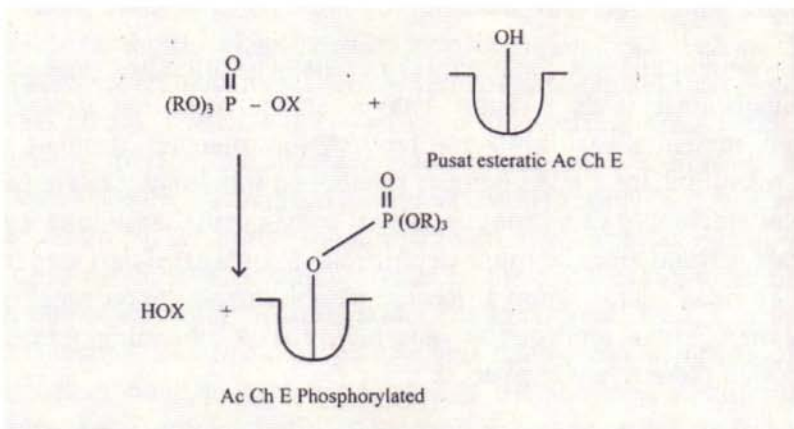
Penurunan Toksisitas Pestisida, Reduksi Biokimia *Oxidative Desulfurase* untuk Mencegah Kematian Udang

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa melalui mekanisme biotransformasi telah terbukti bahwa enzim *oxidative desulfurase* mampu mengatalisasi konversi fenitrothion menjadi turunan yang lebih toksik dibandingkan dengan komponen induknya. Dalam hal ini turunan (metabolit) fenitrooxon sangat toksik terhadap udang karena ternyata mampu menghentikan pengiriman impuls saraf dari satu badan saraf ke badan saraf lainnya. Reaksi pembentukan "oxon type" yaitu untuk membentuk fenitrooxon yang lebih toksik dibandingkan dengan komponen induknya (Gambar 3).



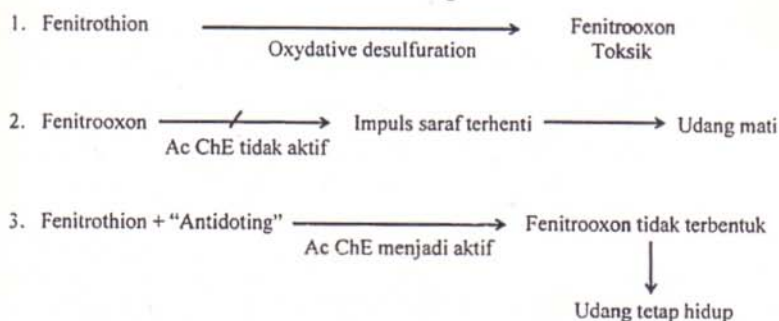
Gambar 3 Konversi fenitrothion menjadi fenitrooxon

Turunan “oxon type” inilah yang mampu menurunkan aktivitas enzim AcChE hingga nol sehingga tidak mampu lagi mengirimkan impuls saraf dari satu badan saraf ke badan saraf lainnya. Tanpa kecuali bahwa fenitrothion sangat tidak mampu menjalankan fungsi sebagai inhibitor AcChE. Dengan demikian, pada saat berlangsungnya reaksi enzimatik oxidative desulfurase di dalam fraksi mikrosom, terlebih dahulu harus dilakukan aktivasi. Dalam hal ini dibutuhkan elektron yang bersumber dari NADPH *cytochrome c reductase* dan oksigen yang cocok dengan phosphate. Di dalam reaksi ini yang berlangsung adalah oksidasi sulfur bukan oksidasi fosfor, yaitu untuk menghasilkan fenitrooxon. Pada saat terjadinya aktivitas tersebut, akan terbentuk *phosphate phosphorylates AcChE* pada tempat-tempat aktifnya, yaitu pada serine-OH yang terletak pada ujung-ujung synaps (Gambar 4).



Gambar 4 Pembentukan phosphate phosphorylates Acetyl choline esterase pada serine-OH

Fenitrooxon yang sangat toksik tersebut akan menghambat aktivitas enzim AcChE, akibatnya impuls saraf terhenti pengirimannya dan udang windu akan segera mati. Oleh karena itu, penyebab kematian udang windu adalah terbentuknya fenitrooxon. Pada penelitian ini, telah diketahui bahwa udang windu yang mati setelah terpapar dengan 0.5 ppb fenitrothion selama 4 jam, terbukti bahwa fenitrooxon telah terbentuk dalam tubuh udang windu sekitar 47 pmol/g-udang, metabolit fenitrooxon inilah yang menyebabkan matinya udang dalam waktu yang relatif singkat. Dengan demikian, apabila udang windu diketahui terpapar atau akan segera terpapar dengan fenitrothion, sangat perlu sesegera mungkin dilakukan suatu upaya penanggulangan kematian masal udang windu yang sebenarnya tidak lain dari pada suatu upaya untuk menghambat terbentuknya fenitrooxon dalam tubuh udang windu, yaitu mencari suatu bahan penawar (“anti doting”) yang mampu menghentikan aktivitas enzim *oxidative* desulfurase tersebut (Gambar 5).



Gambar 5 Sekuensi pembentukan fenitrooxon dan pemberian ‘antidoting’

Setelah meneliti secara mendalam tentang pembentukan metabolit-metabolit toksik, kemampuan sistem transfer elektron di dalam perangkat heme-protein Cyt. P-450, berbagai aktivitas enzim yang berperan dalam biotransformasi fenitrothion dan berbagai reaksi reaksi konversi dari fenitrothion menjadi metabolit-metabolit, serta konversi lanjutan dari metabolit-metabolit tersebut akhirnya telah dapat diusulkan suatu lintas-anjak metabolisme (“metabolic pathway”) dari fenitrothion dan metabolit-metabolitnya dalam tubuh udang. Dengan telah diketahuinya secara khusus karakteristik kimia dari fenitrothion

dan fenitrooxon, meliputi pemutusan ikatan kovalen dari P = S menjadi P = O maka hasil penelitian ini telah menemukan suatu bahan kimia yaitu Piperonyl butoxide (PB) yang mampu menghambat (“inhibit”) perubahan dari “thiono-type” (P = S) menjadi “oxon-type” (P = O) yaitu suatu bahan reduktor biokimia yang mampu menurunkan/menghentikan aktivitas enzim oxidative desulfurase (atau reaksi desulfuration) yang pada akhirnya akan menghentikan konversi fenitrothion menjadi fenitrooxon. Piperonyl butoxide tersebut dapat kita sebut sebagai “antidoting” yang mampu membuat enzim oxidative desulfurase tidak aktif, sedangkan enzim AcChE dapat diaktifkannya kembali. Dampak yang ditimbulkannya bahwa fenitrooxon tidak terbentuk dan udang tetap hidup. Dari hasil penelitian ini juga telah dapat dibuktikan bahwa fenitrothion mengalami biotransformasi menjadi fenitrooxon, di mana toksisitas fenitrooxon terhadap udang windu sekitar 1.000 hingga 2.000 kali lipat dibandingkan dengan fenitrothion. Dengan demikian, konsentrasi lethal minimum dari fenitrooxon pada skala *in vivo* adalah antara 0,08 hingga 0,2 pmol/g-berat tubuh udang atau setara dengan konsentrasi fenitrothion di dalam media, yaitu sebesar 0,2 ppb. Metabolisme enzim oxidative desulfurase merupakan metabolisme yang sangat penting di dalam proses intoksikasi.

Untuk mengetahui sampai seberapa jauh proses penghambatan pembentukan fenitrooxon dapat terjadi pada hepatopancreas udang windu, pada penelitian ini mekanisme aktivitas penghambatan oleh beberapa jenis bahan kimia, yaitu Piperonyl butoxide, Pargyline, Phenelzin, dan Tranyl cypromine telah dilakukan (Tabel 7).

Tabel 7 Inhibisi aktivitas enzim oxidative desulfurase pada mikrosom hepatopancreas udang windu oleh beberapa jenis inhibitor enzim

Inhibitor	Konsentrasi inhibitor (mM)	Aktivitas enzim oxidative desulfurase (pmol/mg-liver/min)	Rasio aktivitas enzim terhadap kontrol (%)
Kontrol	-	129	100
Piperonyl butoxide	0,1	5	3,9
Pargyline	0,1	109	84,5
Phenelzin	0,1	108	83,7
Tranyl cypromine	0,1	TD	0,0

Keterangan: T.D. = Tidak terdeteksi.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Piperonyl butoxide merupakan suatu inhibitor enzim yang sangat efektif untuk menghambat aktivitas enzim oxidative desulfurase. Aktivitas maksimum (V_{max}), Konstanta Michaelis (K_m) dan konsentrasi dari Piperonyl butoxide yang mampu menghambat 50% dari aktivitas enzim oxidative desulfurase pada liver mikrosom udang windu. Pada perlakuan A (dosis 0,5 ppb FS + 3,4 ppb PB), terlihat bahwa aktivitas enzim AcChE sebesar 50% mulai terlihat sejak masa pemaparan 2 jam, sedangkan pada perlakuan B (dosis 0,5 ppb FS + 10,4 ppb PB) aktivitas enzim AcChE sebesar 50% sudah terdeteksi 30 menit setelah masa pemaparan, kemudian mengalami peningkatan hingga mencapai $\pm 100\%$ pada masa pemaparan 24 jam. Pada perlakuan C (dosis 0,5 ppb FS + 102 ppb PB) aktivitas enzim sebesar 100% sudah terdeteksi pada masa pemaparan 4 jam, dan aktivitas ini terdeteksi selalu, hingga masa pemaparan 24 jam. Demikian pula pada perlakuan D (dosis 0,5 ppb FS + 204 ppb PB), 30 menit setelah masa pemaparan maka aktivitas enzim AcChE sudah mencapai $\pm 50\%$, sedang sejak masa pemaparan 4–24 jam aktivitas enzim ini tetap konstan sebesar 100% (Tabel 8). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemakaian Piperonyl butoxide sekitar 400 kali lipat dari dosis fenitrothion (FS), sudah sangat efektif untuk mencegah kematian udang windu.

Tabel 8 Persentase aktivitas enzim Acetyl choline esterase pada udang windu yang dipapar dengan Fenitrothion dan Piperonyl butoxide

Perlakuan	Waktu pemaparan (jam)						
	0,5	1	2	4	8	12	24
A	22	38	48	60	76	80	85
B	46	66	72	76	82	86	96
C	74	80	88	92	98	98	100
D	88	90	94	100	100	100	100

Perlakuan A : (0,5 ppb Fenitrothion + 3,4 ppb Piperonyl butoxide)

Perlakuan B : (0,5 ppb Fenitrothion + 10,4 ppb Piperonyl butoxide)

Perlakuan C : (0,5 ppb Fenitrothion + 102 ppb Piperonyl butoxide)

Perlakuan D : (0,5 ppb Fenitrothion + 204 ppb Piperonyl butoxide)

Penutup

Hati dan hepatopankreas dari organisme perairan merupakan suatu organ tubuh yang sangat potensial untuk memproteksi tubuh terhadap semua bahan-bahan toksik yang masuk ke dalam tubuhnya, Di sana berlangsung biotransformasi *drugs*, toksikan, karsinogen, antigen, dan steroid dengan bantuan berbagai jenis reaksi enzimatik. Bahan-bahan tersebut dapat dikonversi menjadi derivat-derivat nonpolar dan polar. Kemampuan bahan-bahan tersebut untuk menginduksi Cyt. P-450 menjadi kunci berlangsungnya biotransformasi, artinya meningkatnya kandungan Cyt. P-450 sebesar 2–3 kali lipat ternyata mampu meningkatkan aktivitas enzim sekitar 47 kali lipat. Dengan demikian, peluang akselerasi untuk mengeliminasi sisa-sisa metabolisme dari dalam tubuh organisme menjadi sangat cepat. Potensi kandungan Cyt. P-450 dan berlangsungnya berbagai reaksi enzim pada organisme perairan, sama seperti yang ditemukan pada mamalia, walaupun dalam kandungan, dan aktivitas enzim yang lebih rendah. Namun, sangat menguntungkan bagi organisme perairan. Kemampuan tersebut dapat kita manfaatkan untuk melakukan detoksikasi maupun deaktivasi berbagai jenis toksikan agar dengan mudah dapat diekskresikan ke lingkungan. Kemampuan berbagai jenis toksikan untuk menginduksi kandungan Cyt. P-450, akan mengakselerasi enzim untuk meningkatkan aktivitasnya yang pada akhirnya dapat dimanfaatkan untuk mempercepat eliminasi toksikan termasuk antibiotik dari dalam tubuh organisme perairan. Determinasi berbagai jenis aktivitas enzim pada level subseluler, juga bermanfaat untuk mengetahui lintas-anjak metabolik toksikan yang pada akhirnya dapat memastikan sekuensi terbentuknya berbagai metabolit, mengungkap nasib toksikan, keberadaannya pada jaringan tubuh organisme dan di lingkungan, dan menentukan lama tinggal toksikan tersebut dalam tubuh organisme. Pada penelitian ini, dapat dibuktikan bahwa mikrosom dan cytosol ikan dan udang mampu melakukan biotransformasi terhadap pestisida. Di samping itu, telah ditemukan pula suatu antidote yaitu *Piperonyl butoxide* yang dapat dimanfaatkan untuk mencegah terbentuknya metabolit fenitroxon yang 20.000 kali lebih toksik dari komponen induknya, yaitu fenitrothion yang sangat merugikan bagi petambak udang sebab fenitrooxon dapat segera mematikan udang. Kemudian, melalui pengembangan teknik

dan analisis ekstraksi residu antibiotik pada jaringan, telah ditemukan pula suatu tingkat *recovery* yang sangat tinggi dibandingkan metode-metode sebelumnya. Kemudian dengan mengetahui konsentrasi maksimum, lama tinggal dan waktu paruh biologi dari berbagai jenis antibiotik maka dapat ditentukan berapa jam suatu antibiotik akan menghilang dari berbagai jaringan tubuh ikan serta organisme perairan lainnya. Dengan demikian, produk-produk perikanan kita aman untuk dikonsumsi dan tidak merugikan bagi organisme perairan maupun manusia yang memakannya. Hasil penelitian ini akan bermanfaat untuk menjamin keamanan produk-produk perikanan, ekotoksikologi, kesehatan ekosistem, dan biomedis.

Daftar Pustaka

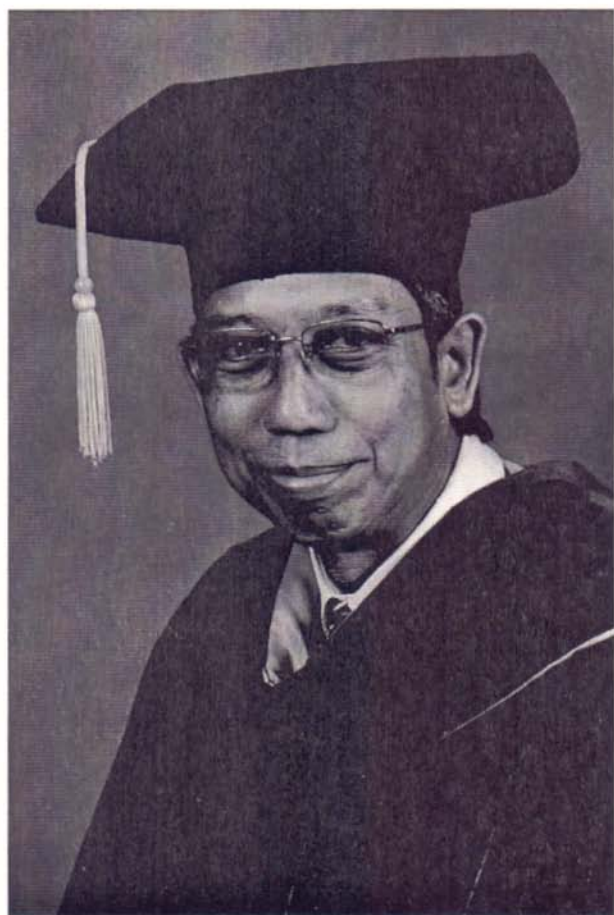
- Adamson RH. 1967. Drug metabolism in marine vertebrates. *Fedn. Proc.* 26(4): 1047–1055.
- Guengerich FP. 1988. Cytochrome P-450. *Comp. Biochem. Physiol.* 89(1):1–4.
- Lumban Batu DF. 1991. A study on the characteristics of drug-metabolizing enzyme and its relation to the changes in duration of *drugs* in fishes [Doctor Degree Dissertation]. Japan: Kyushu University. Fukuoka, 131 p.
- Lumban Batu DF. 1992. Induction of the cytochrome P-450 dependent mixed function oxidases in *carp* by dietary administration of environmental contaminant. Submitted to: The Regional Seminar on waste water treatment and recovery technology. The sixth NCPB meeting of wastenet, Bogor. August 25–28, 1992.
- Lumban Batu DF, Naulita Y. 1994. Pengaruh beberapa kontaminan lingkungan terhadap aktivitas enzim pada fraksi mikrosom dan cytosol ikan mas. Laporan Hasil Penelitian. Pusat Penelitian Lingkungan Hidup, IPB.
- Lumban Batu DF. 1996. Induction capabilities of some environmental contaminants on the enzyme activities of *carp* microsomes and cytosol fraction. *Scientific Journal. Gakuryoku* 2:31–43.
- Lumban Batu DF. 1998. Studi aktivitas enzim ikan dari Perairan Teluk Jakarta dan Perairan Pelabuhan Ratu sebagai landasan penentuan kualitas lingkungan. *Buletin Ilmiah. Gakuryoku* 7(2):51–62.
- Lumban Batu DF. 2001 a. Effect of several environmental contaminants on the benzo(a)pyrene hydroxylase enzyme activity of *carp* microsome. *Indonesian Journal of Aquatic Sciences and Fisheries* 8(1):23–29.
- Lumban Batu DF. 2001 b. Induction of several environmental contaminants on the cytochrome P-450 content of *carp* microsome and cytosol fractions. *Indonesian Journal of Aquatic Science and Fisheries* 8(2):9–18.

- Lumban Batu DF. 2002a. Determination of residual thiamphenicol in fishes by high performance liquid chromatography. *Indonesian Journal of Aquatic Science and Fisheries* 8(1):23–29.
- Lumban Batu DF. 2002b. Comparison of tissue level of oxolinic acid in fresh and sea water fishes after oral administration. *Indonesian Journal of Aquatic Sciences and Fisheries* 9(1): 53–58.
- Lumban Batu DF. 2009. Effect of drug-metabolizing enzyme activity induced by polychlorinated biphenyl on the duration of oxytetracycline in *carp*. *Indonesian Journal of Aquatic Sciences and Fisheries* 9(2):187–193.
- Lumban Batu DF. 2010. Determination of residual oxytetracycline in fishes by high performance liquid chromatography. *Jurnal Iktiologi Indonesia* 10(1): 35–45.
- Lumban Batu DF. 2011. Oxydative desulfuration of [14C]fenitrothion by liver microsomes of some species of fishes. *Jurnal Iktiologi Indonesia* 11(1):87–92.
- Lumban Batu DF. 2012. Ekofisiologi Hewan Air. Bagian Ekobiologi dan Konservasi Sumberdaya Peariran, Departemen Manajemen Sumberdaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor. 59 Hal.
- Lumban Batu DF. 2014. Studi biotransformasi pestisida organofosfat dalam upaya penurunan toksisitasnya bagi sumberdaya hayati perairan dengan teknologi reduksi biokimia. Laporan Penelitian. Menristek–LIPI.
- Melancon MJ, Lech JJ. 1997. Uptake, biotransformation, disposition and elimination of 2-methyl-naphthalene and naphthalene in several fish species. *Aquatic Toxicology* 5: 22–27.
- Murray J, Mc Gill AS, Hardy R. 1997. Development of a method for the determination of oxytetracycline in trout. *Food additives and contaminations* 5(1): 77–83.
- Omura T, Sato R. 1964. Carbon monoxide binding pigment of liver microsomes. *J.Biol.Chem.* 239(7): 2370–2378.
- Remmer H. 1992. Induction of drug metabolizing enzymes system in liver. *Eur.J.Clin.Pharmacol.* 5: 116–136.

Sato R, Omura T. 1978. Cytochrome P-450. Kodansha Ltd. Tokyo. Academic Press, New York, 233 p.

Ueno R, Uno K, Kubota SS, Horiguchi Y. 1989. Determination of oxytetracycline in fish tissues by high performance liquid chromatography. *Nippon Suisan Gakkaishi* 55(7):1273-1276.

**KEANEKARAGAMAN HAYATI
DAN KONSERVASI IKAN SEBAGAI TUMPUAN
PENGEMBANGAN PERIKANAN
YANG BERDAULAT DAN BERKELANJUTAN**



MF Rahardjo

**Guru Besar Tetap Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan
Tanggal Orasi Ilmiah: 27 Agustus 2016**

KEANEKARAGAMAN HAYATI DAN KONSERVASI IKAN SEBAGAI TUMPUAN PENGEMBANGAN PERIKANAN YANG BERDAULAT DAN BERKELANJUTAN

MF Rahardjo

Pendahuluan

Ikan adalah sumber pangan yang vital dan merupakan menu yang bernutrisi. Sebagai menu yang menyehatkan, ikan mengandung semua asam amino esensial, lemak esensial (asam lemak omega-3 rantai panjang), vitamin, dan mineral. Ikan memberi manfaat kesehatan dalam melawan penyakit kardiovaskular dan menyokong perkembangan otak dan sistem saraf.

Konsumsi ikan per kapita dunia (global) adalah 20,1 kg dan mengalami kenaikan yang terus menerus. Tahun 60-an (9,9 kg per kapita), tahun 90-an (14,4 kg per kapita), dan tahun 2013 tercatat 19,7 kg per kapita (FAO 2016). Di Indonesia, konsumsi per kapita per tahun tercatat sebesar 35,2 kg pada tahun 2013 (Pusat Data, Statistik, dan Informasi 2014) yang jauh lebih tinggi daripada konsumsi dunia. Namun, konsumsi per kapita per tahun tidak merata antarprovinsi, nilainya berkisar dari 16,6 kg (Yogyakarta)–50,67 kg (Maluku).

Konsumsi ikan yang tinggi di atas rata-rata dunia, ternyata tidak berkorelasi secara langsung dengan produksi perikanan. Perikanan tangkap Indonesia tahun 2014 sebesar 6.016.525 ton (nomor dua setelah Tiongkok yang sebesar 14.811.390 ton). Di perairan umum, daratan Indonesia menduduki urutan ke-7 (420.190 ton) dan kalah jauh dengan Tiongkok yang juga nomor satu (2.295.157 ton). Volume produksi perikanan budidaya tahun 2013 mencapai 13,3 juta ton. Pemenuhan kebutuhan akan ikan inilah yang mendorong Indonesia masih mengimpor ikan. Jumlah impor ikan segar mencapai 138.535 ton pada tahun 2013 (Pusat Data, Statistik, dan Informasi 2014). Hal ini menunjukkan bahwa Indonesia masih belum sepenuhnya berdiri di atas kaki sendiri dalam sektor perikanan; dengan perkataan lain

belum sepenuhnya berdaulat dalam bidang perikanan, sebagaimana yang diamanatkan dalam Undang-Undang No. 18 Tahun 2012 tentang pangan.

Potensi perikanan Indonesia di laut mencapai 6,5 juta ton per tahun (Pusat Data, Statistik, dan Informasi 2014). Lebih jauh lembaga ini mencatat bahwa produksi tangkap di laut sebesar 5,7 juta ton, sedangkan di perairan umum daratan sebesar 420 ribu ton pada tahun 2013. Dari segi penangkapan, secara nasional produksi masih bisa ditingkatkan, namun diperlukan kehati-hatian karena di beberapa daerah telah mulai terjadi lebih tangkap. Perikanan budidaya pada tahun yang sama menghasilkan 13,3 juta ton, dan terus mengalami kenaikan setiap tahunnya.

Perikanan merupakan sumber pangan, nutrisi, pendapatan, dan mata pencarian bagi ratusan juta penduduk di dunia (FAO 2016), termasuk Indonesia. Selain sebagai sumber pangan atau sebagai penyedia protein, ikan juga dimanfaatkan dan berguna bagi kepentingan lain. Ikan di kalangan masyarakat tertentu digunakan sebagai persyaratan kelengkapan upacara adat. Di bidang olahraga dan rekreasi, ikan menjadi objek pemancingan—yang disebut sebagai perikanan rekreasi (*recreational fisheries*) atau *sportfishing* (Pitcher dan Hollingworth 2002; Cowx dan Arlinghaus 2008, Arlinghaus dan Cooke 2009; FAO 2012). Perikanan rekreasi merupakan kegiatan yang berbeda tujuannya dengan tujuan perikanan tangkap komersial (*commercial fisheries*) atau yang umum disebut sebagai perikanan. Sebagian masyarakat memanfaatkan ikan untuk estetika dan kedamaian rohani yaitu sebagai ikan hias, mengingat ikan punya bentuk dan corak warna tubuh yang beragam dan sangat indah, serta tingkah laku yang menarik. Ikan hias sebagai komoditas perdagangan sangat menjanjikan.

Satu hal lagi yang sering terluput dari perhatian masyarakat adalah ikan dapat digunakan sebagai biomonitor lingkungan perairan (Uzarski *et al.* 2005; Ferreira 2007). EFI (*European Fish Index*) adalah satu panduan yang digunakan untuk memantau status ekologis sungai di Eropa (Fame 2004). Mengapa ikan digunakan sebagai biomonitor? Beberapa alasan yang mendasarinya antara lain ikan ditemui hampir di semua tipe perairan, identifikasi ikan relatif mudah, ikan berumur relatif panjang, ikan menempati jenjang trofik tinggi dan ini menyatu

(*integrate*) dengan kondisi jenjang trofik di bawahnya, serta ikan mewakili berbagai kelompok jenjang trofik yang berbeda (insektivora, planktivora, krustasivora, dan piscivora).

Perikanan laut dunia secara kontinu terus berkembang dan mencapai puncak produksinya pada tahun 1996 (86,4 juta ton), namun sejak itu menunjukkan kecenderungan menurun. Produksi global tercatat 80,9 juta ton pada tahun 2013. Perikanan darat di beberapa negara mengalami penurunan (Mesir, Rusia, Kongo, dan Brasilia). Penurunan ini disebabkan oleh beberapa faktor, seperti pencemaran, degradasi lingkungan, juga terbatasnya habitat, dan sumber daya ikan mudah mengalami lebih tangkap (FAO 2016). Kondisi tersebut perlu diwaspadai pada kasus pengembangan perikanan di Indonesia.

Dengan modal keanekaragaman hayati yang besar (Indonesia termasuk negara *megabiodiversity*) dan luas perairan, Indonesia mampu berdaulat dalam bidang perikanan dan dapat terus berlanjut secara lestari. Salah satu *soko guru* perikanan yang dapat diandalkan untuk menyokong terwujudnya cita-cita yang mulia ini adalah konservasi ikan.

Keanekaragaman Hayati Ikan

Keanekaragaman hayati adalah kuantitas, keragaman, dan persebaran dalam skala biologis mencakup genetik, populasi, spesies, komunitas, dan ekosistem (Mace *et al.* 2005). Istilah keanekaragaman hayati diperkenalkan pada pertengahan tahun 80-an oleh naturalis yang cemas akan kerusakan lingkungan alami yang cepat. Istilah ini muncul dalam *National Forum on BioDiversity* di Washington DC pada 21–24 September 1986 yang diselenggarakan oleh National Academy of Sciences dan the Smithsonian Institution, kemudian menjadi populer dan pusat perhatian pada *Conference on Sustainable Development* di Rio de Janeiro pada tahun 1992 (Wilson 1997; Leveque dan Mounolou 2003). Sejak itulah, keanekaragaman hayati menjadi isu sentral ilmiah dan kepedulian politik yang mendunia.

Bertalian dengan keanekaragaman hayati ikan, para ahli memperkirakan jumlah ikan di dunia sampai 40.000 spesies. Nelson (2006) mencatat bahwa terdapat deskripsi ilmiah yang sah bagi 27.977 spesies ikan yang hidup dalam 515 famili dan 62 ordo. Dengan jumlah spesies

sebesar itu, ikan menempati lebih dari setengah jumlah Vertebrata (54,711 spesies). Informasi lengkap tentang spesies ikan dapat dilihat pada buku "Catalog of Fishes" sebanyak tiga volume yang disunting oleh Eschemeyer *et al.* (2016) yang senantiasa diperbarui.

Indonesia termasuk dalam negara *mega biodiversity*. Kekayaan jenis ikan Indonesia mencapai 4.700 spesies yang terdiri atas 1.200 spesies air tawar dan 3.500 ikan laut (Froese dan Pauly 2016). Jumlah tersebut belum final, diperkirakan masih ada sekitar ratusan spesies ikan di wilayah Indonesia yang belum ditemukan dan dideskripsikan. Sebagai contoh, dalam beberapa tahun terakhir ini banyak spesies ikan air tawar, khususnya ikan pelangi ditemukan di Papua (Kadarusman *et al.* 2012; Allen *et al.* 2014a, 2014b; 2015a; Graff 2015; Nugraha *et al.* 2015) dan Pulau Aru (Allen 2015b). Di laut pun ikan spesies baru ditemukan, misalnya ikan hiu, *Hemiscyllium halmahera* di daerah pantai (Allen *et al.* 2013), atau di laut bebas (Allen *et al.* 2016a; 2016b), bahkan di laut dalam pun ditemukan tiga jenis ikan baru (Ho *et al.* 2016). Salah satu yang monumental adalah ditemukannya spesies terkecil di dunia (*Paedocypris progenetica*) di perairan rawa-rawa Jambi. Ikan ini telah mencapai dewasa (matang gonad) pada panjang 0,76 cm (Kottelat *et al.* 2005).

Meskipun penemuan spesies baru terus bertambah, di sisi lain juga banyak spesies ikan yang terancam punah. Namun, menghitung secara persis laju kepunahan ini nyaris menjadi pekerjaan mustahil karena banyak spesies yang belum dideskripsikan. Tidak tertutup kemungkinan bahwa ada ikan-ikan yang punah sebelum sempat diidentifikasi dan dideskripsikan, apalagi diteliti aspek biologi dan ekologi. Hal inilah yang dikhawatirkan oleh para iktiologis.

Helfman *et al.* (2009) menekankan bahwa laju kepunahan spesies meningkat secara dramatis karena kegiatan manusia dalam 50 tahun terakhir, laju sekarang adalah 1000 kali lebih besar daripada rata-rata dan 10–1000 kali lebih besar daripada kepunahan pada periode yang lalu. Sekitar 20% dari 9000 spesies ikan air tawar punah atau terancam punah. Ikan laut kurang terancam karena persebarannya yang lebih luas, namun demikian banyak spesies ekonomis penting menunjukkan sangat menurun.

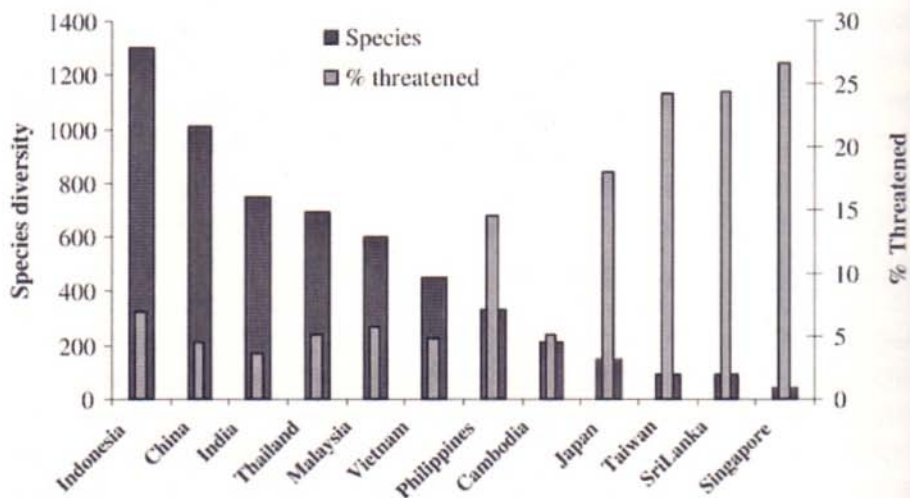
Banyak faktor yang dapat menyebabkan punahnya suatu spesies ikan. Faktor penyebab tersebut dapat berasal dari internal perikanan yaitu penangkapan yang berlebihan, penggunaan alat tangkap yang merusak, dan masuknya spesies asing; sedangkan yang kedua disebabkan oleh faktor eksternal perikanan, antara lain degradasi habitat, rekayasa dan fragmentasi habitat, serta perubahan iklim (Rahardjo 2012).

Penangkapan yang berlebihan

Tingkat pemanfaatan sumber daya ikan yang berlebihan terjadi apabila tingkat pengusahaannya lebih besar daripada tingkat pemanfaatan lestariannya. Penangkapan lebih telah menjadi pusat perhatian dan kepedulian (Allan *et al.* 2005) karena merupakan faktor utama yang mengancam keanekaragaman hayati ikan (Dulvy *et al.* 2000). Kegiatan penangkapan di perairan intensif mulai dari alat yang sederhana sampai dengan alat tangkap yang dapat menangkap ikan dalam jumlah banyak.

Perikanan tangkap di perairan bersifat multi-spesies. Pada awalnya tangkapan akan didominasi oleh ikan berukuran besar dan sebagian kecil ikan berukuran sedang. Sejalan dengan perkembangan waktu dan bertambahnya upaya tangkap maka hasil tangkapan ikan berukuran besar dan sedang kian menurun menjadi tinggal hanya sedikit, kemudian berangsur digantikan dan didominasi oleh ikan berukuran kecil yang umumnya berada pada jenjang trofik yang lebih rendah. Fenomena ini diistilahkan sebagai *fishing down the food web* (Pauly *et al.* 1998; Pauly dan Palomares 2005). Di Danau Taihu, Tiongkok indikasi fenomena tersebut telah muncul (Li *et al.* 2010). Demikian juga di laut fenomena ini muncul, misalnya di zona penangkapan ikan Argentina-Uruguay (Jaureguizar dan Milessi 2008), perairan pantai India (Bhathal dan Pauly 2008), dan laut Brasil Timur (Freire dan Pauly 2010).

Nguyen dan de Silva (2006) memperlihatkan jumlah spesies ikan yang terancam punah dibandingkan dengan total spesies di berbagai negara Asia (Gambar 1). Terlihat pada gambar tersebut di Indonesia jumlah spesies yang terancam punah mencapai sekitar 8%.



Gambar 1 Jumlah spesies ikan yang terancam punah di berbagai negara Asia yang dinyatakan dalam persen (Nguyen dan de Silva 2006)

Penangkapan yang merusak

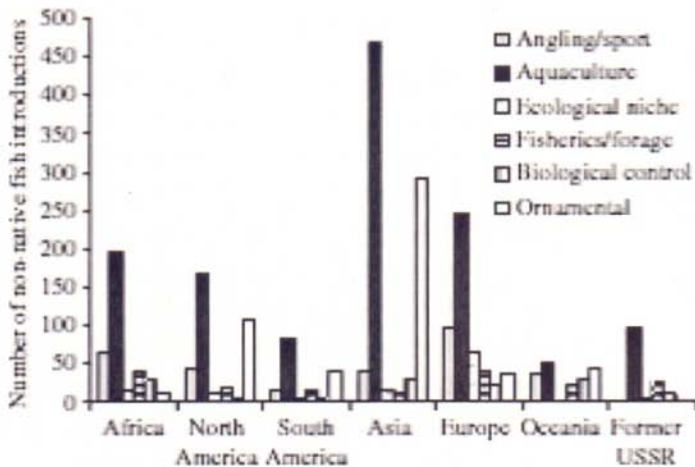
Beberapa kegiatan penangkapan membahayakan lingkungan dan keberlanjutan populasi ikan, seperti racun, bahan peledak, dan setrum. Racun dan setrum efektif dalam menangkap ikan, namun yang terjadi bukan saja ikan sasaran yang tertangkap; juga ikan jenis lain dan anak-ikan yang bukan sasaran ikut tertangkap. Penggunaan bom sangat merusak; selain semua ikan dari segala ukuran mati, habitat ikan juga hancur.

Ikan hias lebih banyak merupakan hasil tangkapan dari alam, dibandingkan dengan ikan hasil budidaya (Reksodihardjo-Lilley dan Lilley 2007). Penangkapan ikan hias sering dilakukan dengan menggunakan sianida untuk membuat ikan tidak mampu berenang. Penggunaannya yang sering terlalu banyak mengakibatkan ikan sasaran dan bukan sasaran mati karena lewat takaran (*overdoses*) (Cervino *et al.* 2003). Penggunaan sianida untuk menangkap ikan hias di terumbu karang efektif, namun sangat merusak. Cara penangkapan seperti ini masih sering dilakukan oleh sebagian masyarakat, tanpa menyadari akan dampak lanjutannya.

Introduksi ikan

Introduksi ikan adalah suatu kegiatan manusia melepaskan atau memasukkan suatu spesies ikan baru yang sebelumnya tidak ada ke dalam suatu perairan (Welcomme 1988). Menurutnya, introduksi telah dilakukan sejak lama, sejak awal abad ke-19. Motif orang melakukan introduksi bermacam-macam, antara lain meningkatkan produktivitas perikanan di suatu perairan, mengembangkan jenis ikan yang lebih disenangi/disukai dalam perikanan untuk konsumsi atau perikanan rekreasi (pemancingan), mengisi relung yang kosong, mengendalikan hama atau gulma (pengendalian biologis), dan karena ketidak sengajaan. Gozlan (2008) mencatat bahwa jumlah spesies yang diintroduksi di seluruh dunia diketahui mencapai 624 spesies, untuk memenuhi kebutuhan pangan (51%), ikan hias (21%), olahraga pancing (12%), dan perikanan tangkap (7%) (Gambar 2).

Banyak spesies ikan yang masuk ke perairan Indonesia, beberapa spesies masih diingat orang dan beberapa yang lain sudah dianggap ikan asli. Ikan mas (*Cyprinus carpio*), sepat siam (*Trichopodus pectoralis*), dan mujair (*Oreochromis mossambicus*) bukan asli Indonesia. Ikan-ikan tadi dikembangkan untuk meningkatkan produktivitas perairan. Ikan mas datang dari Tiongkok dan sekarang tak dapat disangkal menjadi andalan dalam perikanan budidaya, terutama di Jawa Barat. Pada dasawarsa tujuh puluhan ikan mujair menjadi primadona dalam setiap introduksi ikan ke perairan waduk yang baru dibangun di Jawa Timur, seperti Karangkates dan Selorejo. Introduksi ikan mujair tersebut dinilai berhasil. Manfaatnya sampai kini terus dinikmati oleh masyarakat sekitar waduk. Produksi perikanan meningkat dari hasil penangkapan. Pola ini kemudian menjadi suatu kecenderungan, yakni pada setiap pembangunan waduk baru selalu dilakukan penebaran ikan. Bahkan, pada akhirnya bukan hanya pada waduk, melainkan perairan lain seperti danau juga ditebari ikan.



Gambar 2 Histogram jumlah ikan air tawar yang diintroduksi per tiap sektor. Spesies yang sama dapat diintroduksi untuk tujuan berbeda pada negara yang berbeda (Gozlan 2008)

Di samping ikan asing yang bermanfaat (seperti tiga spesies yang telah disebutkan), beberapa spesies asing justru memberikan dampak negatif terhadap keanekaragaman ikan setempat. Ikan oskar (*Amphilophus citrinellus*) dan kongo (*Parachromis managuensis*) adalah ikan asing yang berkembang dominan dan mendesak spesies ikan asli di Waduk Ir H Djuanda, Jawa Barat.

Contoh yang dramatis adalah masuknya ikan *Lates niloticus* ke Danau Victoria (Afrika). Pada tahun 1978, ikan ini hanya 2% dari total tangkapan, namun pada tahun 1986 ikan ini mendominasi hasil tangkapan total lebih dari 80%. Ratusan spesies asli lenyap dan komunitas ikan hanya disusun oleh dua spesies asing (*Oreochromis niloticus* dan *Lates niloticus*) dan satu spesies asli *Rastrineobola argentea* (Kaufman 1992). Ikan *Lates niloticus* yang diintroduksi ke danau tersebut telah mengakibatkan lebih dari 200 spesies ikan endemik lenyap (Shoko 2005). Bukan hanya pengurangan spesies, melainkan juga perubahan dalam struktur fungsional. Hal ini terlihat dari menghilangnya genus *Haplochromis* zooplanktivorous bersamaan dengan peningkatan dramatik enam kali lipat biomassa *R. argentea* zooplanktivorous (Pringle 2005).

Spesies asing dapat tumbuh dan berkembang di habitat barunya sehingga menjadi invasif karena dua faktor. Pertama, tidak ada spesies asli yang menjadi pesaing dalam mendapatkan makanan ataupun ruang di perairan tersebut. Bila ada, spesies asli tersebut kalah bersaing. Kedua, tidak ada spesies asli (musuh alami) yang menjadi pemangsa yang dapat menahan laju perkembangan mereka sehingga spesies asing ini dapat menyebar dan berkembang pesat di suatu perairan. Berbeda halnya dengan di habitat aslinya, secara ekologis spesies tersebut tentu mempunyai pengendali alami (pemangsa atau parasit dan penyakit) sehingga perkembangannya terkendali.

Terbebas dari pemangsa dan pesaing, spesies asing menjadi mapan, tumbuh, dan berkembang sangat cepat di habitat baru mereka. Kejadian ini seringkali mengubah komposisi spesies dan struktur komunitas spesies, mendominasi, dan menyingkirkan spesies asli (La Porta *et al.* 2010). Mereka mengambil alih kedudukan spesies asli (yang menjurus ke penurunan dan kepunahan) dan menjadi pengganggu yang memakan biaya. Secara umum, spesies asing dapat disebut sebagai “pencemar biologis” yang mengakibatkan kehilangan besar keanekaragaman hayati dan pergantian habitat di seluruh dunia. Rowe (2007) menyimpulkan adanya hubungan negatif antara kecerahan air dengan kehadiran spesies asing di danau Selandia Baru. Invasi biologis menjadi elemen global perubahan lingkungan dan menjadi salah satu masalah utama dewasa ini yang menjurus kepada penyeragaman biotik (*biotic homogenization*) fauna regional, terutama fauna perairan tawar (Rahel 2007; Villéger *et al.* 2011). Lebih jauh Villéger *et al.* (2011) menjelaskan bahwa penyeragaman fauna ikan air tawar meskipun dalam skala global masih rendah (0,5%), namun mencapai tingkat substansial (10%) pada beberapa daerah aliran sungai yang sangat terinvasi spesies asing di mintakat Neaktik dan Palearktik.

Ikan asing yang masuk dapat membawa parasit/penyakit. *Saprolegnia* masuk ke Indonesia ikut inangnya ikan nila (*Oreochromis niloticus*) yang datang dari Taiwan pada era 70-an. Parasit ini sempat mewabah pada masa itu. Gozlan *et al.* (2005) juga menekankan hal yang sama bahwa ikan asing dikatakan invasif karena membawa patogen baru.

Dampak negatif tersebut, secara umum merupakan dampak biologis, sosio-ekonomik, dan mengancam kesehatan masyarakat. Spesies yang menimbulkan salah satu dari tiga dampak negatif tersebut dinamakan spesies invasif. Banyak contoh dari dampak sosial, ekonomi, dan lingkungan yang signifikan yang ditimbulkan oleh spesies asing invasif. Xie *et al.* (2001) mengulas balik (*review*) spesies invasif di Tiongkok. Sugianti *et al.* (2014) mencatat 79 spesies ikan berpotensi sebagai spesies asing invasif di Indonesia. Sayangnya di Indonesia belum ditemukan tulisan yang secara menyeluruh mengulas tentang spesies invasif. Bahkan Peh (2010) menyatakan bahwa spesies asing invasif di Asia Tenggara belum banyak dipelajari. Banyak pertanyaan penting tersimpan bagi para ekologiwan untuk dijawab tentang dampak spesies asing invasif berkaitan dengan gangguan lainnya. Diperlukan kehati-hatian dalam mengintroduksi ikan asing.

Degradasi dan kerusakan habitat

Degradasi habitat akuatik merupakan isu utama yang mengancam kelestarian ikan di suatu perairan. Kondisi ini terutama disebabkan oleh pembuangan limbah yang berasal dari perindustrian, pertambangan, pertanian, permukiman, dan kegiatan antropogenik lainnya. Degradasi tersebut terlihat pada menurunnya kualitas fisik kimiawi perairan, seperti terjadinya deplesi oksigen terlarut, meningkatnya kandungan fosfat, H_2S , dan amonia, serta meningkatnya kandungan logam berat seperti Cu, Pb, dan Hg (Boening 2000; Stockner *et al.* 2000; Storelli 2002; Staudinger 2011; Pouilly *et al.* 2013). Kesemuanya itu pada akhirnya berakibat terhadap penurunan keanekaragaman dan populasi ikan.

Kegiatan manusia memengaruhi siklus biogeokimiawi unsur hara, seperti nitrogen dan fosfor sehingga proses penyuburan (eutrofikasi) akan dipercepat. Masuknya sejumlah besar unsur hara ke Danau Piediluco mengakibatkan status kesuburan danau meningkat dengan cepat berdasarkan kandungan fosfat total. Tahun 1980 danau ini berstatus mesotrofik (40 mg l^{-1}), meningkat menjadi eutrofik (80 mg l^{-1}) pada 1989, dan sekarang dimasukkan dalam status hiper-eutrofik (110 mg l^{-1}). Komposisi populasi ikan berubah signifikan sebagai akibat eutrofikasi ditambah masuknya spesies asing (La Porta *et al.* 2010).

Kerusakan habitat spesifik seperti rusaknya daerah pemijahan, tempat ikan mencari makan, dan tempat asuhan dan pembesaran anak ikan merupakan permasalahan yang serius bagi kelestarian ikan. Kerusakan habitat tersebut sering disebabkan oleh antara lain erosi, reklamasi lahan, dan penambangan pasir dan batu kali.

Sedimentasi karena erosi dan reklamasi lahan di pinggir perairan cenderung akan mempercepat pendangkalan perairan. Pendangkalan selain berakibat buruk terhadap sumber daya ikan juga akan mengakibatkan bencana banjir. Pendangkalan juga dapat disebabkan pertumbuhan gulma air yang tak terkendali, misalnya perkembangan eceng gondok (*Eichornia crassipes*) di Rawa Pening di Jawa Tengah dan Danau Limboto di Gorontalo. Selain pendangkalan, meningkatnya kekeruhan dan debit sungai yang sangat fluktuatif antara musim penghujan dan kemarau menambah panjang daftar keterancaman keanekaragaman hayati ikan di sungai akibat degradasi habitat (Sullivan dan Watzin 2010).

Rekayasa dan fragmentasi habitat

Kegiatan rekayasa habitat terjadi karena pembangunan bendungan, penyodetan sungai, bangunan irigasi, dan infrastruktur lainnya. Pembangunan bendungan, kanalisasi dan penyodetan sungai telah merubah pola musiman aliran air. Pembendungan sungai untuk menjadi waduk menjadikan sungai terfragmentasi. Kondisi ini menghalangi ikan yang melakukan ruaya pemijahan dari sungai ke arah laut maupun sebaliknya, sehingga dapat memutus keberlanjutan populasi ikan tersebut. Selain itu, perubahan dari habitat mengalir menjadi habitat tergenang menciutkan keanekaragaman ikan riverin (sungai), dan sebaliknya menguntungkan bagi ikan lakustrin (danau) (Mims dan Olden 2013).

Kekayaan jenis ikan di waduk menurun dibandingkan kekayaan jenis ikan di sungai utama di Cina (Li 2001). Kartamihardja (2008) mencatat bahwa dalam jangka waktu 40 tahun setelah Waduk Ir H Djuanda digenangi, jumlah spesies ikan menurun dari 31 spesies menjadi 18 spesies. Mc Allister *et al.* (2001) memaparkan bagaimana dampak bendungan terhadap keanekaragaman hayati ikan air tawar dan biota lainnya pada banyak sungai di dunia. Arthington (2009) merinci bahwa

bendungan menurunkan populasi ikan paru-paru (*Neoceratodus forsteri*) karena mengacaukan daur pemijahan, mengurangi rekrutmen yuwana, dan memperburuk kualitas habitat. Bahiyah *et al.* (2013) menambahkan bahwa Waduk Panglima Besar Soedirman telah mengakibatkan variasi genetik yang berbeda pada ikan brek (*Barbonymus balleroides*) yang mendiami bagian atas waduk dengan ikan brek yang mendiami bagian bawah waduk.

Perubahan iklim

Menarik untuk menyinggung masalah keanekaragaman hayati dengan perubahan iklim. Emisi gas rumah kaca akibat kegiatan manusia menjadikan bumi kian panas. Naiknya suhu perairan ini akan langsung memengaruhi ikan yang bersifat poikilotermik. Perubahan ini dapat dimaknai sebagai bertambahnya tekanan bagi kehidupan ikan sehingga terjadi perubahan laju pertumbuhan, perubahan dalam ruaya dan persebaran, perubahan dalam waktu reproduksi, serta perubahan dalam rekrutmen dan mortalitas (Rahardjo 2011).

Perubahan iklim berdampak pada produksi perikanan baik perikanan tangkap maupun perikanan budidaya (Roessig *et al.* 2004; Cochrane *et al.* 2009). Perubahan iklim mengakibatkan pemutihan karang (*coral bleaching*) (Baker *et al.* (2008), yang kemudian diikuti oleh perubahan keragaman ikan dan fungsi kumpulan ikan (Pratchett *et al.* 2011).

Ikan merupakan sumber daya penting di Indonesia. Oleh karena itu, kepedulian dinyatakan dengan memperhatikan kepada potensi dampak yang merugikan akibat perubahan iklim. Diperlukan suatu perangkat yang dapat mengevaluasi potensi dampak dengan biaya dan waktu yang efektif. Para pemangku kepentingan harus bangkit dan berperan serta sesuai dengan kompetensi masing-masing pada tingkat lokal maupun nasional.

Konservasi Ikan

Di bagian depan, telah dikemukakan secara panjang lebar tentang keanekaragaman hayati ikan serta manfaat dan keterancamannya. Ancaman akan kepunahan spesies ikan ini masih belum sepenuhnya disadari dan dipahami oleh banyak kalangan. Seringkali, terjadi orang baru tersadar ketika segalanya sudah terlambat karena kekayaan plasma

nutraf hilang. Pertanyaan yang mengemuka adalah apa tindakan yang perlu dilakukan agar kepunahan spesies atau penurunan keanekaragaman hayati ikan dapat dicegah. Jawabannya adalah diperlukan tindakan konservasi ikan. Namun konservasi tidak boleh dimaknai hanya sekedar menjaga spesies tidak punah, melainkan lebih daripada itu.

Apakah konservasi itu? Pada hakekatnya konservasi ikan adalah upaya untuk melindungi, melestarikan, dan memanfaatkan ikan. Dalam praksisnya, konservasi ikan dapat dilakukan melalui dua cara yaitu konservasi *in situ* dan konservasi *ex situ*.

Konservasi *in situ* adalah upaya konservasi yang dilakukan di habitat alami spesies yang dikonservasi. Konservasi spesies bukan sekedar melindungi spesies itu sendiri, tetapi juga melindungi lingkungannya. Ini merupakan bentuk konservasi yang terbaik mengingat satu populasi tidak dapat hidup sendiri. Suatu spesies memerlukan interaksi dengan spesies lain dan lingkungannya.

Konservasi *ex situ* adalah upaya konservasi yang dilaksanakan di luar habitat alami spesies. Upaya ini, jelas tidaklah mudah. Banyak spesies yang bila dibawa keluar dari habitat aslinya tidak mampu atau sulit beradaptasi dengan lingkungan barunya. Upaya yang perlu dilakukan ialah menempatkan ikan pada lingkungan perairan yang mirip dengan lingkungan habitat aslinya dan menyediakan menu alami sesuai dengan jenis makanan dan kebiasaan makannya.

Kedua cara konservasi tersebut (*ex situ* dan *in situ*), saling melengkapi. Bila pada konservasi *ex situ* spesies dapat tumbuh dan berkembang, sebagian individu dari populasi tersebut secara berkala dilepaskan ke habitat aslinya. Hal ini telah dilakukan pada kasus ikan siluk/arwana (*Sclerofagus formosus*). Para penangkar ikan arwana, diwajibkan untuk mengembalikan 10% anak ikan dari hasil penangkaran untuk dikembalikan ke alam.

Pelaksanaan konservasi, baik *ex situ* maupun *in situ* suatu spesies ikan memerlukan pengetahuan yang cukup rinci dan menyeluruh tentang aspek ekobiologi spesies tersebut dan lingkungannya sebagai pertimbangan agar dapat mencapai hasil sesuai dengan tujuan yang ditetapkan.

Perlindungan ikan

Hal yang dimaksudkan perlindungan di sini adalah upaya yang dilakukan untuk melindungi ikan dari eksploitasi yang berlebihan dan tetap ada di perairan. Beberapa langkah yang ditempuh untuk melaksanakan perlindungan adalah melalui pelarangan atau pembatasan eksploitasi (jenis alat tangkap, ukuran alat tangkap, dan area penangkapan), penetapan daerah lindungan (*reservat*), dan pencegahan kerusakan lingkungan. Kegiatan perlindungan lebih mengarah pada upaya konservasi *in situ*.

Pelarangan atau pembatasan eksploitasi

Langkah pembatasan eksploitasi sumber daya ikan dapat ditempuh melalui cara: penutupan area dan masa penangkapan, pembatasan jenis alat tangkap, serta pelarangan alat beracun dan berbahaya.

Penutupan masa penangkapan berlaku pada pada masa yang rentan bagi kehidupan ikan. Masa tersebut adalah waktu pemijahan dan ruaya ikan. Ikan di sungai umumnya memijah pada awal musim penghujan ketika ketinggian permukaan air mulai naik. Penutupan ini dimaksudkan agar ikan-ikan tersebut mendapat kesempatan untuk berpijah sebagai upaya agar proses rekrutmen tidak terganggu. Setelah waktu pemijahan diperkirakan berakhir, barulah masa penangkapan boleh dibuka.

Kebijakan lain untuk melindungi kepastian rekrutmen anak ikan ialah penutupan suatu area. Suatu area perairan yang diperkirakan merupakan area tempat pemijahan ikan dan atau tempat pembesaran ikan dapat dinyatakan tertutup bagi penangkapan ikan. Penutupan dapat diberlakukan sementara hanya selama musim pemijahan atau bersifat permanen. Hal ini yang kemudian dikembangkan dalam daerah lindungan ikan atau sering pula disebut suaka perikanan.

Pembatasan jenis alat tangkap sering diperlukan, terutama diberlakukan terhadap jenis alat tangkap yang nonselektif dan mengambil semua jenis ikan dengan semua ukuran sehingga tidak memberi kesempatan pada ikan untuk berkembang dan bertumbuh. Alat tangkap yang merusak, seperti bom, racun, dan setrum (*electrofishing*) secara tegas harus dilarang penggunaannya.

Penetapan daerah lindungan

Suaka perikanan adalah areal yang berfungsi sebagai daerah perlindungan. Areal ini mempunyai peran penting dalam memasok stok ikan di perairan. Penentuan daerah suaka ini memerlukan penelitian yang mendalam, bukan asal ditetapkan (Hermoso *et al.* 2009).

Pencegahan kerusakan lingkungan perairan

Kerusakan lingkungan perairan terjadi akibat berbagai kegiatan yang berlangsung, baik di perairan maupun di luar perairan. Oleh karena itu, kegiatan-kegiatan yang dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan perairan perlu dikendalikan. Kegiatan pengendalian dampak ini lebih diperluas, tidaklah semata-mata tertuju kepada ikan, tetapi untuk seluruh biota perairan yang akhirnya bermuara bagi kesehatan masyarakat sekitar.

Pelestarian ikan

Rehabilitasi habitat dan rekayasa lingkungan

Kegiatan ini dilakukan untuk membuat suatu tempat sebagai habitat yang nyaman bagi ikan sehingga memberikan kesempatan dalam pemijahan ataupun menyediakan sumber makanan yang dapat mendukung pertumbuhan.

Termasuk dalam kegiatan ini antara lain rehabilitasi tepian perairan danau. Beberapa kegiatan ditengarai telah mengubah struktur riparian yang menjadikan tepian berpasir dan berkerikil bagi pemijahan dan pembesaran bagi banyak ikan rusak. Hilangnya tumbuhan riparian dan tumbuhan mengapung yang sering dipakai juga untuk berlindung ataupun pemijahan sangat merugikan ikan. King *et al.* (2010) melaporkan bahwa pengaturan aliran air di sungai dapat merangsang pemijahan. Laporan ini diperkuat oleh Layman (2010) yang meneliti rawa banjiran di Venezuela.

Restorasi

Bila pada kegiatan rehabilitasi, unsur/komponen lingkungan yang digunakan tidak harus asli dari perairan tersebut yang diutamakan adalah fungsi ekologisnya sama. Sebaliknya, pada restorasi unsur/komponen yang digunakan haruslah asli perairan tersebut. Dengan

perkataan lain, restorasi adalah satu kegiatan yang mengupayakan agar segala sesuatu menjadi pulih seperti sediakala (Livingstone 2006; Moss 2007; Erkinaro *et al.* 2011).

Penebaran

Penebaran adalah suatu tindakan memasukkan jenis ikan ke dalam suatu perairan, dan jenis ikan tersebut sudah ada sebelumnya di perairan. Dalam hal ini ikan yang ditebar adalah ikan asli perairan tersebut yang populasinya sudah sangat menurun atau yang dulu pernah ada dan sekarang sudah tidak ditemukan lagi. Sumber ikan untuk penebaran dapat berasal dari pemijahan alami di perairan dan atau dari panti benih yang diadakan untuk keperluan tersebut. Disinilah pentingnya ada penangkaran (*captivity*) ikan-ikan yang terancam punah. Pada penangkaran perlu adanya satu kolam yang dibuat semirip mungkin dengan kondisi lingkungan alami asal ikan yang ditangkarkan (Copp *et al.* 2008).

Dalam beberapa kejadian seringkali penebaran dikerjakan tanpa tujuan yang jelas, dan lebih bersifat seremonial belaka. Akibatnya sudah jelas, yaitu terjadi kegagalan. Sebelum kegiatan penebaran dilakukan sebaiknya protokol penebaran perlu diperhatikan yakni: sumber daya ikan, kepadatan penebaran, ukuran dan umur ikan, waktu penebaran, dan mekanisme penebaran. Selanjutnya kekurangan yang banyak terjadi dalam penebaran ialah tidak adanya kegiatan pemantauan yang diikuti oleh evaluasi, sehingga tingkat keberhasilan penebaran di suatu perairan tidak terekam.

Pemanfaatan ikan

Ikan sebagai sumber daya hayati perikanan haruslah dimanfaatkan bagi kesejahteraan masyarakat. Sebagaimana telah dikemukakan di depan bahwa konservasi ikan bukan sekedar melestarikan tapi juga memanfaatkan. Ada semacam jargon yang perlu dilaksanakan sekaligus menjadi tujuan, yakni pelestarian yang bermanfaat dan pemanfaatan yang lestari. Pada kenyataannya banyak spesies yang belum dimanfaatkan secara optimal. Memanfaatkan sekaligus melestarikan.

Perhatian perlu diarahkan secara khusus pada ikan endemik dan ikan yang terancam punah. Dua kelompok ikan inilah yang harus diprioritaskan dalam konservasi. Pemanfaatan dapat dalam bentuk sebagai ikan konsumsi dan atau sebagai ikan hias.

Ikan endemik adalah ikan yang keberadaannya hanya ditemukan pada satu tempat tertentu dan tidak ditemukan di tempat lain. Diperkirakan ikan endemik di Indonesia berjumlah sekitar 120 spesies. Beberapa spesies ikan endemik diperlihatkan pada Tabel 1. Spesies inilah yang harus diutamakan dalam konservasi karena bila tidak ditemukan di habitatnya maka hal itu bermakna bahwa ikan tersebut punah.

Tabel 1 Beberapa spesies ikan endemik di Indonesia

Nama ilmiah	Nama inggris	Nama lokal	Lokasi
<i>Adrianichthys oophorus</i>	Eggcarrying buntingi	rono	Danau Poso
<i>Chilatherina sentaniensis</i>	Sentani rainbowfish		Danau Sentani
<i>Anguilla celebensis</i>	Celebes longfin eel	sogili	Danau Poso
<i>Melanotaenia ajamaruensis</i>	Ajamaru lakes rainbowfish		Danau Ayamaru
<i>Melanotaenia arfakensis</i>	Arfak rainbowfish		Arfak
<i>Melanotaenia japenensis</i>	Yapen rainbowfish		Yapen
<i>Mugilogobius sarasinorum</i>	Sarasin's goby	Bungu	Danau Poso
<i>Oryzias matanensis</i>	Matano medaka		Danau Matano
<i>Telmatherina celebensis</i>	Celebes rainbow	Opudi	Danau Towuti

Beberapa spesies ikan ditemukan tersebar di berbagai perairan, namun karena mengalami tekanan penangkapan yang intensif ataupun faktor penyebab lain ikan-ikan tersebut menjadi terancam punah. Keberadaan mereka di perairan menjadi kian menipis. Beberapa di antara ikan tersebut dicantumkan dalam Tabel 2.

Tabel 2 Jenis-jenis ikan terancam punah di Indonesia

Nama ilmiah	Nama inggris	Nama lokal
<i>Balantiocheilos melanopterus</i>	Tricolor sharkminnow	Batang buro
<i>Chilatherina bleheri</i>	Bleher's rainbowfish	
<i>Chilatherina sentaniensis</i>	Sentani rainbowfish	
<i>Telmatherina bonti</i>		Bonti-bonti
<i>Osteochilus kappenii</i>		Kelajang
<i>Poropuntius tawarensis</i>		Keperas
<i>Oryzias marmoratus</i>	Marmorated medaka	
<i>Rasbora subtilis</i>		Seluang

Pengembangan jenis baru ikan konsumsi

Membicarakan masalah budidaya ikan, pertama yang perlu disorot adalah jumlah spesies ikan yang telah dibudidayakan di Indonesia. Sejauh yang dapat dicatat jumlah spesies ikan yang telah mampu dibudidayakan dan berhasil di Indonesia tidaklah banyak. Komoditas utama ikan hanya berkuat pada jenis-jenis kerapu, kakap, bandeng, mas, nila, lele, dan patin. Perlu digarisbawahi bahwa empat jenis ikan terakhir adalah bukan ikan asli Indonesia, namun telah mendominasi produksi perikanan budidaya. Secara keseluruhan, keragaman ikan budidaya masih sangat kecil dibandingkan dengan keragaman hayati yang dimiliki Indonesia.

Hal ini merupakan tantangan bagi kita semua bagaimana meningkatkan jumlah jenis ikan yang dapat dibudidayakan. Begitu banyak jenis ikan di Indonesia, namun ironisnya begitu sedikit yang dibudidayakan. Sudah tiba saatnya dicari spesies ikan baru yang ada di alam untuk dikembangkan menjadi komoditas ikan budidaya, khususnya ikan endemik dan ikan yang terancam punah. Hal ini perlu dilakukan agar keanekaragaman spesies budidaya bertambah dan dengan demikian pilihan masyarakat terhadap ikan menjadi lebih beragam.

Upaya pencarian spesies baru dapat dilakukan dengan melalui serangkaian kegiatan mulai dari pengenalan sifat ekobiologis ikan dan tingkah lakunya, kemudian melakukan domestikasi, dan dilanjutkan dengan manipulasi untuk memperoleh produksi yang optimal. Upaya ini lebih khusus ditujukan pada ikan-ikan yang telah terancam punah maupun ikan endemik, antara lain yang tertera pada Tabel 1 dan 2. Selanjutnya, sebagian ikan yang dikembangkan dapat dikembalikan lagi ke habitat aslinya. Sangat menarik bila di setiap provinsi dikembangkan minimal satu jenis ikan lokal khas provinsi itu. Kita akan mendapatkan 34 jenis ikan budidaya.

Budidaya ikan di sungai pada prinsipnya adalah memanfaatkan aliran sungai untuk memelihara ikan di suatu wadah (keramba). Keramba ini umumnya terbuat dari bambu dengan luasan tertentu. Di sini orang tidak perlu risau dengan masalah air karena terus mengalir. Jenis ikan yang dipilih adalah ikan-ikan yang termasuk kelompok rheofilik atau menyenangkan arus. Selama ini yang dipelihara umumnya adalah ikan mas (*Cyprinus carpio*). Perlu dipikirkan untuk mengembangkan ikan

budidaya jenis baru yang khas daerah setempat, misalnya belida (*Chitala chitala*) di Provinsi Sumatera Selatan, tapah (*Ompok bimaculatus*) di Provinsi Riau, dan jelawat (*Leptobarbus hoevenii*) di Kalimantan.

Sama halnya dengan di waduk dan danau, budidaya ikan di laut dapat dilakukan lebih kurang seperti di danau. Beberapa spesies yang bernilai tinggi dipelihara di laut dengan menggunakan metode yang serupa dengan metode yang digunakan di danau. Ikan yang mulai dibudidayakan antara lain kerapu dan kakap. Beberapa ikan lain perlu dikembangkan pula misalnya napoleon (*Cheilinus undulatus*) dan beronang (*Siganus* spp.) yang telah banyak mengalami tekanan penangkapan.

Pengembangan jenis baru ikan hias

Sejauh ini ikan yang banyak dijual adalah ikan hias impor, misal *Corydoras*. Hal ini perlu segera diakhiri. Jenis ikan Indonesia sangat banyak. Ikan yang indah warna dan bentuk maupun tingkah lakunya juga banyak. Sebagian diantaranya adalah ikan endemik dan terancam punah. Salah satu contoh keberhasilan domestikasi adalah ikan siluk (*Sclerofagus formosus*) yang dalam perdagangan lebih dikenal sebagai ikan arwana. Sebagai ikan hias, ikan ini sangat mahal harganya. Beberapa contoh ikan yang potensial dikembangkan adalah kelompok ikan pelangi, antara lain *Telmatherina*, *Glossolepis*, dan *Chilatherina*. Sulawesi dan Papua kaya akan jenis-jenis ikan pelangi.

Langkah konservasi

Upaya konservasi suatu spesies ikan dimulai dengan mengumpulkan data dasar ikan, mencakup ciri morfologis, persebaran dan struktur populasi, reproduksi dan pertumbuhan, perilaku, interaksi biotik (pemangsaan dan persaingan), serta lingkungan (hayati dan nirhayati). Pengumpulan data dan informasi dapat diperoleh melalui studi pustaka (buku, jurnal ilmiah, makalah teknik, dan laporan). Kedua, data dikumpulkan dari hasil penelitian di lapangan maupun di laboratorium.

Langkah selanjutnya adalah kumpulan data dasar tersebut dipilah, dikelompokkan, dan dianalisis sehingga memberikan pemahaman menyeluruh lengkap dan rinci tentang ikan sasaran. Pemahaman ini dijadikan landasan dan acuan dalam menetapkan peta jalan konservasi ikan yang melingkupi menetapkan tujuan dan sasaran konservasi,

merancang langkah-langkah pelaksanaan, menyiapkan sarana dan prasarana pendukung yang diperlukan, menentukan kriteria atau tolok ukur keberhasilan konservasi, serta memantau dan mengevaluasi hasil berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan.

Peran Pemangku Kepentingan

Keberhasilan konservasi ikan pada akhirnya ditentukan oleh peran pemangku kepentingan yang terlibat di dalamnya. Para pemangku kepentingan secara garis besar dapat dikelompokkan dalam tiga kelompok besar. Mereka ini, yaitu masyarakat, perguruan tinggi, dan pemerintah.

Masyarakat

Praktik-praktik konservasi di Indonesia pada hakikatnya telah dilakukan sejak dahulu. Di beberapa daerah, masyarakat nelayan tradisional biasanya mempunyai bentuk konservasi tersendiri. Sejak zaman Kerajaan Kutai Kartanegara 500 tahun yang lalu, sistem suaka perikanan telah diterapkan di Danau Loa Kang dan Batu Bumbun, daerah sungai Mahakam, Kalimantan Timur. Suaka tersebut berfungsi sebagai daerah penyangga produksi benih ikan untuk menjamin kelangsungan rekrutmen ikan. Pada masyarakat Maluku dikenal dengan *sasi*, seperangkat sistem hukum yang memuat aturan-aturan hukum mengenai tata cara pengelolaan dan pemanfaatan fungsi lingkungan laut dan pesisir bagi kepentingan anak-anak negeri atau masyarakat adat pesisir beserta kelembagaan hukum yang mendukungnya. Di Aceh, dikenal adanya hukum adat laot. Masih ada banyak kearifan lokal dalam masyarakat di samping yang telah dikemukakan terkait dengan upaya konservasi ikan. Kearifan lokal ini yang perlu dijaga dan dikembangkan sesuai dengan kondisi kini.

Pada sebagian masyarakat lain, masalah keanekaragaman hayati ikan belum terpahami benar, terlebih lagi masalah konservasinya. Namun demikian, kesadaran masyarakat mengenai konservasi sudah mulai tumbuh. Akan tetapi, tingkat kesadaran yang ada belum cukup tinggi untuk memengaruhi perilaku mereka ataupun untuk menjadi motivasi yang kuat yang dapat melahirkan tindakan yang nyata dalam upaya konservasi perbaikan dan pelestarian lingkungan hidup.

Peningkatan kesadaran masyarakat mengenai konservasi dapat dilakukan dengan upaya menyosialisasikan pengetahuan tentang pentingnya kelestarian ikan untuk masa sekarang dan yang akan datang. Hal ini untuk membangkitkan peran serta masyarakat dalam kegiatan konservasi. Peningkatan kesadaran ini berpacu dengan waktu sebab perusakan-perusakan masih terus berlanjut dan meningkat.

Strategi dalam peningkatan kesadaran masyarakat akan pentingnya konservasi, yaitu melalui pendidikan, penyuluhan, dan pemanfaatan media komunikasi yang sesuai dengan karakteristik masing-masing daerah. Pada kegiatan ini, lembaga swadaya masyarakat (misalnya Wahana Lingkungan Hidup Indonesia) dan organisasi profesi (misalnya Masyarakat Ikhtologi Indonesia) dapat mengambil bagian.

Perguruan tinggi

Perguruan tinggi mempunyai peran strategis dalam kegiatan konservasi. Beberapa peran yang dapat dilakukan adalah melakukan penelitian terkait jenis ikan, teknik konservasi, dan lain-lain; berbagai kajian terapan teknik dalam mendukung kegiatan konservasi, melakukan penyuluhan, seminar dan lain-lain untuk menyebar-luaskan pemahaman akan makna konservasi. Semua kegiatan tersebut merupakan implementasi dari tri darma perguruan tinggi.

Pemerintah

Perhatian kita masih sangat sedikit terhadap masalah keanekaragaman hayati ikan di perairan tawar. Peraturan Pemerintah (PP) No. 7 Tahun 1999 tentang Pengawetan jenis tumbuhan dan satwa membuktikan dengan jelas ketidakperhatian kita. Peraturan tersebut, hanya memuat tujuh spesies ikan, sedangkan tentang burung terdapat 93 spesies, disusul oleh mamalia (70 spesies), dan reptil 31 spesies. Nama ilmiah ikan pada PP itu juga ada yang kesalahannya fatal, tertulis *Latimeria chalumnae* yang seharusnya *Latimeria menadoensis*. Hal yang menjadi pertanyaan mengapa ini bisa terjadi? Setelah itu, pada tahun 2007 pemerintah mengeluarkan PP No. 60 tentang konservasi sumber daya ikan yang pelaksanaannya belum terlihat nyata dan signifikan. Secara sektoral, Kementerian Kelautan dan Perikanan mengeluarkan peraturan menteri dan keputusan menteri terkait perlindungan ikan.

Selain mengeluarkan peraturan, pemerintah perlu lebih tegas dan terlihat berperan dalam hal memperkuat kelembagaan kegiatan konservasi, memfasilitasi rehabilitasi dan pemberdayaan masyarakat, mendorong kegiatan pendidikan, pelatihan dan penyuluhan tentang pengelolaan sumber daya di kawasan konservasi, serta menyusun petunjuk teknis yang terkait dengan kegiatan konservasi sesuai dengan kondisi di wilayahnya.

Penutup

Keanekaragaman hayati ikan di Indonesia sangat tinggi yang merupakan modal dasar penting dan tidak ternilai bagi bukan hanya pembangunan perikanan, tetapi lebih luas lagi bagi masa depan Indonesia. Oleh karena itu, keanekaragaman hayati ikan perlu dijaga dan dilestarikan dari kemungkinan punahnya spesies ikan di suatu lokasi.

Masalah keanekaragaman hayati ikan belum banyak dipahami oleh sebagian masyarakat, terlebih lagi perihal konservasi. Pengetahuan tentang ikan masih sedikit yang telah diungkap dan dipelajari. Para iktiologis, dapat mengambil peran yang signifikan. Berangkat dari titik ini, jelas masih dibutuhkan lebih banyak eksplorasi untuk lebih memahami, agar bukan hanya keanekaragaman ikan terjaga, namun dapat juga dimanfaatkan bagi kesejahteraan masyarakat. Begitu banyaknya spesies yang ada di Indonesia, sayangnya dalam kenyataan masih sedikit spesies yang dimanfaatkan.

Sungguh luar biasa bila nanti ikan-ikan, terutama ikan endemik dan ikan yang terancam punah, di suatu daerah dapat dimanfaatkan apakah sebagai ikan konsumsi atau sebagai ikan hias andalan daerah tersebut. Setiap daerah mempunyai jenis ikan andalan khas daerah itu dan menjadi ikon daerah itu. Indonesia tidak perlu mendatangkan spesies asing yang sering dapat mengancam keberadaan ikan asli. Perikanan Indonesia akan kokoh berdiri berdaulat dan berkelanjutan dalam mewujudkan kesejahteraan rakyat.

Ketika kita mampu melestarikan dan memanfaatkan spesies ikan secara bijak dari kepunahan, itu adalah cerminan penghormatan kita kepada alam. Alam yang telah memberikan banyak kebaikan bagi hidup dan kehidupan kita.

Daftar Pustaka

- Allan JD, Abell R, Hogan Z, Revenga C, Taylor BW, Welcomme RL, Winemiller K. 2005. Overfishing of inland waters. *Bioscience* 55(12): 1041–1051.
- Allen GR, Erdmann MV, Dudgeon CL. 2013. *Hemiscyllium halmahera*, a new species of bambo shark (Hemiscylliidae) from Indonesia. *Aqua, International Journal of Ichthyology* 19(3): 123–136.
- Allen GR, Hadiaty RK, Peter J, Unmack PJ. 2014a. *Melanotaenia flavipinnis*, a new species of Rainbowfish (Melanotaeniidae) from Misool Island, West Papua Province, Indonesia. *Aqua, International Journal of Ichthyology* 20(1): 35–52.
- Allen GR, Unmack PJ, Hadiaty RK. 2014b. Three new species of Rainbowfishes (Melanotaeniidae) from the Birds Head Peninsula, West Papua Province, Indonesia. *Aqua, International Journal of Ichthyology* 20(3): 139–158.
- Allen GR, Unmack PJ, Hadiaty RK. 2015a. *Melanotaenia rubrivittata*, a new species of rainbowfish (Melanotaeniidae) from Northwestern Papua Province, Indonesia. *Fishes of Sahul* 29(1): 846–858.
- Allen GR, Hadiaty RK, Unmack PJ, Erdmann MV. 2015b. Rainbowfishes (*Melanotaenia*: Melanotaeniidae) of the Aru Islands, Indonesia with descriptions of five new species and redescription of *M. patoti* Weber and *M. senckenbergianus* Weber. *Aqua, International Journal of Ichthyology*. 21(2): 66–108.
- Allen GR, Erdmann MV, Cahyani NKD. 2016a. *Sueviota bryozophila*, a new species of coralreef goby from Indonesia (Teleostei: Gobiidae). *Journal of the Ocean Science Foundation* 20: 76–82.
- Allen GR, Erdmann MV, Yusmalinda NLA. 2016b. Review of the Indo-Pacific Flasherwrasses of the genus *Paracheilinus* (Perciformes: Labridae), with description of three new species. *Journal of the Ocean Science Foundation* 19: 18–90.
- Arlinghaus R, Cooke SJ. 2009. Recreational fisheries: socioeconomic importance, conservation issues and management challenges. In: Barney Dickson B, Jon Hutton J, William M. Adams WM. *Recreational Hunting, Conservation and Rural Livelihoods: Science and Practice*. Blackwell Publishing Ltd. Oxford. pp 39–58.

- Arthington AH. 2009. Australian lungfish, *Neoceratodus forsteri*, threatened by a new dam. *Environmental Biology of Fishes*. 84: 211–221.
- Bahiyah, Solihin DD, Affandi R. 2013. Variasi genetik ikan brek (*Barbonymus balleroides* Val 1842) sebagai dampak fragmentasi habitat di Sungai Serayu. *Jurnal Iktiologi Indonesia* 13(2): 175–186.
- Baker AC, Glynn PW, Riegl B. 2008. Climate change and coral reef bleaching: An ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 80: 435–471.
- Bhathal B, Pauly D. 2008. ‘Fishing down marine food webs’ and spatial expansion of coastal fisheries in India, 1950–2000. *Fisheries Research* 91(1): 26–34.
- Boening DW. 2000. Ecological effects, transport, and fate of mercury: a general review. *Chemosphere* 40(12): 1335–1351.
- Cervino J, Hayes RL, Honovich M, Goreau TJ, Jones S, Rubec PJ. 2003. Changes in zooxanthella density, morphology, and mitotic index in hermatypic corals and anemones exposed to cyanide. *Marine Pollution Bulletin* 46(5): 573–586.
- Cochrane K, de Young C, Soto D, Bahri T. (eds). 2009. Climate change implications for fisheries and aquaculture: overview of current scientific knowledge. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper*. No. 530. Rome, 212 p.
- Copp GH, Warrington S, Wesley J. 2008. Management of an ornamental pond as a conservation site for a threatened native fish species, crucian carp *Carassius carassius*. *Hydrobiologia* 597: 149–155.
- Cowx IG, Arlinghaus R. 2008. Recreational fisheries in the twenty-first century: toward a code of conduct. In: Aas O. *Global Challenges in Recreational Fisheries*. Blackwell Publishing Ltd Fishery stability, local extinctions and shifts in community structure in skates.. Oxford. pp. 338–352.

- Dulvy NK, Metcalfe JD, Glanville J, Pawson MG, Reynolds JD. 2000. Fishery stability, local extinctions, and shifts in community structure in skates. *Conservation Biology* 14(1): 283–293.
- Erkinaro J, Laine A, Maki-Petays A, Karjalainen TP, Laajala E, Hirvonen A, Orell P, Yrjana T. 2011. Restoring migratory salmonid populations in regulated rivers in the northernmost Baltic Sea area, Northern Finland – biological, technical and social challenges. *Journal of Applied Ichthyology* 27(Suppl. 3): 45–52.
- Eschemeyer WN, Fricke R, van der Laan R. 2016. *Catalog of fishes: version of 1 July 2016*. California Academy for Sciences, San Francisco.
- FAME Consortium. 2004. Manual for the application of the European Fish Index - EFI. A fish-based method to assess the ecological status of European rivers in support of the Water Framework Directive. Version 1.1, January 2005.
- FAME Consortium. 2004. Manual for the application of the European Fish Index - EFI. A fish-based method to assess the ecological status of European rivers in support of the Water Framework Directive. Version 1.1, January 2005.
- [FAO] Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2012. Recreational Fisheries. *FAO Technical Guidelines for Responsible Fisheries*. No. 13. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. 176 p.
- [FAO] Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2016. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2016. Contributing to local diversity and nutrition for all*. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome 200 pp.
- Ferreira T, Oliveira J, Caiola N, de Sostoa A, Casals F, Cortes R, Economou A, Zogaris S, Garcia-Jalon D, Ilhe' UM, Martinez-Capel F, Pont D, Rogers C, Prenda J. 2007. Ecological traits of fish assemblages from Mediterranean Europe and their responses to human disturbance. *Fisheries Management and Ecology*. 14(6): 473–481.

- Freire KMF, Daniel Pauly D. 2010. Fishing down Brazilian marine food webs, with emphasis on the east Brazil large marine ecosystem. *Fisheries Research* 105(1): 57–62.
- Froese R, Pauly D. Editors. 2016. Fish Base. World Wide Web electronic publication. www.fishbase.org. version (01/2016)
- Graf JA, Herder F, Hadiaty RK. 2015. A new species of rainbowfish (Melanotaeniidae), *Melanotaenia garylangei*, from Western New Guinea (Papua Province, Indonesia). *Fishes of Sahul*. 29(2): 870–881.
- Gozlan RE, St-Hilaire S, Feist FW, Martin P, Kent ML. 2005. Disease threat to European fish. *Nature* 435, 1046.
- Gozlan RE. 2008. Introduction of non-native freshwater fish: is it all bad? *Fish and Fisheries* 9(1): 106–116
- Helfman GS, Collette BB, Facey DE, Bowen BW. 2009. *The diversity of fishes: Biology, evolution, and ecology*. Willey-Blackwell, Chichester. 720 p.
- Hermoso V, Linke S, Prenda J. 2009. Identifying priority sites for the conservation of freshwater fish biodiversity in a Mediterranean basin with a high degree of threatened endemics. *Hydrobiologia* 623: 127–140.
- Ho HC, Kawai T, Amaoka K. 2016. Records of deep-sea anglerfishes (Lophiiformes: Ceratioidei) from Indonesia, with descriptions of three new species. *Zootaxa* 4121 (3): 267–294
- Jaureguizar AJ, Milessi AC. 2008. Assessing the sources of the fishing down marine food web process in the Argentinean-Uruguayan Common Fishing Zone. *Sci Marina* 72(1): 25–36.
- Kadarusman, Hadiaty RK, Gilles G, Wibawa GS, Caruso D, Pouyaud L. 2012. Four new species of Rainbowfishes (Melanotaeniidae) from Arguni Bay, West Papua, Indonesia. *Cybium* 36(2): 369–382.
- Kartamihardja ES. 2008. Perubahan komposisi komunitas ikan dan faktor-faktor penting yang memengaruhi selama empat puluh tahun umur Waduk Ir. Djuanda. *Jurnal Iktiologi Indonesia* 8(2): 67–78.
- Kaufman L. 1992. Catastrophic change in species-rich freshwater ecosystems. The lesson of Lake Victoria. *Bioscience* 42(11): 846–858.

- King AJ, Ward KA, O'Connor P, D. Green D, Tonkin Z, Mahoney J. 2010. Adaptive management of an environmental watering event to enhance native fish spawning and recruitment. *Freshwater Biology* 55(1): 17–31.
- Kottelat M, Britz R, Hui TH, Witte KE. 2005. *Paedocypris*, a new genus of Southeast Asian cyprinid fish with a remarkable sexual dimorphism, comprises the world's smallest vertebrate. *Proceedings of the Royal Society: Biological Sciences*. 1–5.
- La Porta G, Angeli V, Bicchi A, Carosi A, Pedicillo G, Viali P, Lorenzoni M. 2010. Variations in the fish community in Lake Piediluco (Italy) caused by changes in the lake's trophic status and the introduction of alien species. *Journal of Applied Ichthyology* 26(Suppl. 2): 53–59.
- Layman CA, Montana CG, Allgeier JE. 2010. Linking fish colonization rates and water level change in littoral habitats of a Venezuelan floodplain river. *Aquatic Ecology* 44(1): 269–273.
- Leveque C, Mounolou J-C. 2003. *Biodiversity*. Translated into English by Vivien Reuter. John Wiley & Sons Ltd, Chichester. 284 p.
- Li S. 2001. The impact of large reservoirs on fish biodiversity and fisheries in Tiongkok. In: De Silva S.S. (ed.), *Reservoir and Culture-Based Fisheries: Biology and Management*. ACIAR Conference Proceedings 98, Canberra, Australia, pp. 22–28.
- Li YK, Song B, Chen Y, Chen LQ, Yu N, Olson D. 2010. Changes in the trophic interactions and the community structure of Lake Taihu (Tiongkok) ecosystem from the 1960s to 1990s. *Aquatic Ecology* 44(2): 337–348.
- Livingstone RJ. 2006. *Restoration of Aquatic System*. Taylor & Francis. Boca Raton. 459 p.
- Mace G, Masundire H, Baillie J, Ricketts T, Brooks T. 2005. Biodiversity. In: Hassan R, Scholes R, Ash N. (Eds.). *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends*. Findings of the Condition and Trends Working Group. Island, pp. 77–122.
- McAllister DE, Craig JF, Davidson N, Delany S, Seddon M. 2001. *Biodiversity impacts of large dams*. IUCN, UNEP or UNF. 68 p.

- Mims MC, Olden JD. 2013. Fish assemblages respond to altered flow regimes via ecological filtering of life history strategies. *Freshwater Biology* 58(1): 50–62.
- Moss B. 2007. The art and science of lake restoration. *Hydrobiologia* 581(1): 15–24.
- Nelson JS. 2006. *Fishes of the World*. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc. New York. 601 p.
- Nguyen TTT, de Silva SS. 2006. Freshwater finfish biodiversity and conservation: an asian perspective. *Biodiversity and Conservation* 15(11): 3543–3568.
- Nugraha MFI, Kadarusman, Hubert N, Avarre J-C, Hadiaty RK, Jacques J, Carman O, Sudarto, Ogistira R, Pouyau L. 2015. Eight new species of Rainbowfishes (Melanotaeniidae) from the Birds Head Region, West Papua, Indonesia. *Cybium* 39(2): 99–130.
- Pauly D, Christensen V, Dalsgaard, Froese JR, Tores F. 1998. Fishing down marine food webs. *Science* 278: 860–863.
- Pauly D, Palomares M. 2005. Fishing down marine food web: it is far more pervasive than we thought. *Bulletin of Marine Science* 76(2): 197–211.
- Peh KSH. 2010. Invasive species in Southeast Asia: the knowledge so far. *Biodiversity and Conservation* 19(4): 1083–1099.
- Pitcher TJ, Hollingworth CE. 2002. *Recreational Fisheries: Ecological, Economic and Social Evaluation*. Blackwell Science Ltd. Oxford. 271 p.
- Pouilly M, Rejas D, Perez T, Duprey JL, Molina CI, Hubas C, Guimaraes JRD. 2013. Trophic structure and mercury biomagnification in tropical fish assemblages, Ite'nez River, Bolivia. *Plos One* 8(5): 1–9 e65054.
- Pratchett MS, Hoey AS, Wilson SK, Messmer V, Graham NAJ. 2011. Changes in biodiversity and functioning of reef fish assemblages following coral bleaching and coral loss. *Diversity* 3: 424–452.
- Pringle RM. 2005. The origin of Nile perch in Lake Victoria. *Bioscience* 55(9): 780–787.

- Sugianti B, Hidayat EH, Japet N, Anggraeni Y. 2014. Daftar Pisces yang berpotensi sebagai spesies asing di Indonesia. Kementerian Kelautan dan Perikanan, Jakarta. 163 p.
- Sullivan SMP, Watzin MC. 2010. Towards a functional understanding of the effects of sediment aggradation on stream fish condition. *River Research and Application* 26(10): 1298–131.
- Uzarski DG, Burton TM, Cooper MJ, Ingram JW, Timmermans S. 2005. Fish habitat use within and across wetland classes in coastal wetlands of the five Great Lakes: development of a fish-based Index of Biotic Integrity. *Journal of Great Lakes Research* 31(Suppl. 1): 171–187.
- Villéger S, Blanchet S, Beauchard O, Oberdorff T, Brosse S. 2011. Homogenization patterns of the world's freshwater fish faunas. *Academy of Sciences of the United State of America* 108(44): 18003–18008.
- Welcomme RL. 1988. International introductions of inland aquatic species. *FAO Fish Technical Paper* (294): 318 p.
- Wilson EO. 1997. Introduction. In: Reaka-Kudla ML, Don E. Wilson DE, Edward O. *Biodiversity II: Understanding and Protecting Our Biological Resources*. A Joseph Henry Press Book. Washington DC. 560 p.
- Xie Y, Li Z, Gregg WP, Li D. 2001. Invasive species in Tiongkok – an overview. *Biodiversity and Conservation* 10(8): 1317–1341.