

Eutrofikasi (akademia)

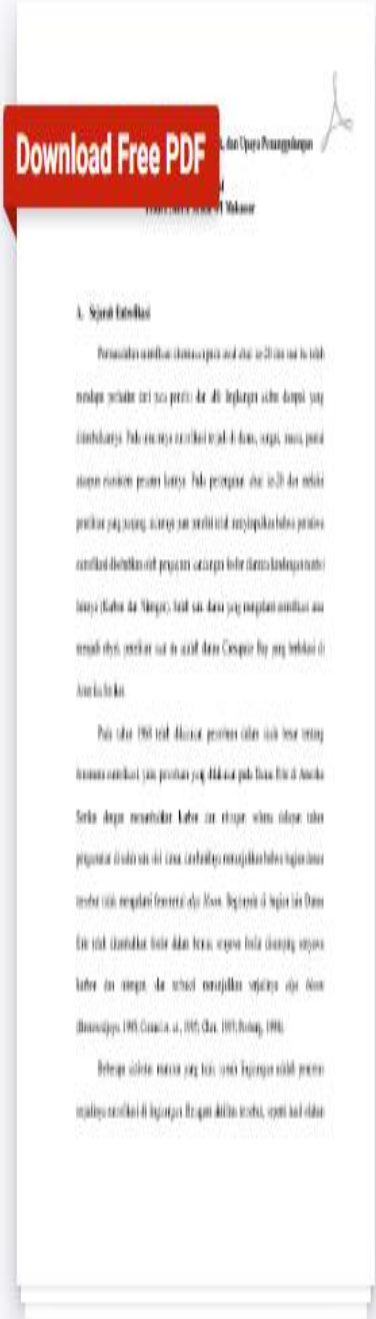
Muh. Sri Yusal

2022, Eutrofikasi

Eutrofikasi merupakan pengayaan (enrichment) nutrisi perairan yang berupa fosfor dan nitrogen yang dapat memicu peningkatan produktivitas perairan sehingga terjadi ketidakseimbangan ekosistem yang mengarah ke penurunan tingkat kualitas perairan. Eutrofikasi dapat terjadi secara alami dengan jangka waktu yang sangat lama ($\pm$ ratusan-ribuan tahun), tetapi hal ini dapat dipercepat akibat beberapa aktivitas manusia yang tidak ramah lingkungan. Penyebab utama terjadinya percepatan eutrofikasi di perairan adalah aktivitas antropogenik yang menghasilkan limbah-limbah organik yang terlepas ke lingkungan perairan. Dampak utama dari eutrofikasi adalah kerusakan ekosistem perairan secara bertahap yang merupakan habitat dari berbagai organisme sehingga memicu terjadinya kepunahan pada biota-air yang tidak mampu beradaptasi pada perubahan lingkungan tersebut. Oleh karena itu eutrofikasi akan menurunkan tingkat biodiversitas dan mengganggu keseimbangan ekologis pada suatu ekosistem.

See Full PDF

Download PDF



Eutrofikasi (akademia)

 Muh. Sri Yusal

2022, Eutrofikasi

 106 Views  32 Pages 2 Files ▾

 MARINE POLLUTION, Benthic Ecology, Marine Larval Biology & Ecology, Marine Biology, Environment, Conservation, Marine Ecology and Biodiversity

Show more ▾

Eutrofikasi merupakan pengayaan (enrichment) nutrisi perairan yang berupa fosfor dan nitrogen yang dapat ...read more

↓ Download PDF

 Download Full PDF Package

 Translate PDF



ABOUT AUTHOR



Muh. Sri Yusal

STKIP-PI MAKASSAR

Department Member

PAPERS

1

FOLLOWERS

1

RELATED PAPERS

Sumber Daya Air

Anisa Aprilia

↓ Download  More Options

Penyebab Eutrofikasi

ckyta angel

↓ Download  More Options

Activate Windows

Eutrofikasi: Masalah Lingkungan, Dampak, dan Upaya Penanggulangan

Muh. Sri Yusal

Prodi P.MIPA STKIP-PI Makassar

A. Sejarah Eutrofikasi

Permasalahan eutrofikasi ditemukan pada awal abad ke-20 dan saat itu telah mendapat perhatian dari para peneliti dan ahli lingkungan akibat dampak yang ditimbulkannya. Pada umumnya eutrofikasi terjadi di danau, sungai, muara, pantai ataupun ekosistem perairan lainnya. Pada pertengahan abad ke-20 dan melalui penelitian yang panjang, akhirnya para peneliti telah menyimpulkan bahwa peristiwa eutrofikasi disebabkan oleh pengayaan kandungan fosfor diantara kandungan nutrisi lainnya (Karbon dan Nitrogen). Salah satu danau yang mengalami eutrofikasi atau menjadi obyek penelitian saat itu adalah danau Chesapeake Bay yang berlokasi di Amerika Serikat.

Pada tahun 1968 telah dilakukan percobaan dalam skala besar tentang fenomena eutrofikasi, yaitu percobaan yang dilakukan pada Danau Erie di Amerika Serikat dengan menambahkan karbon dan nitrogen selama delapan tahun pengamatan di salah satu sisi danau dan hasilnya menunjukkan bahwa bagian danau tersebut tidak mengalami fenomenal *alga bloom*. Begitupula di bagian lain Danau Erie telah ditambahkan fosfor dalam bentuk senyawa fosfat disamping senyawa karbon dan nitrogen, dan terbukti menunjukkan terjadinya *alga bloom* (Brotowidjoyo, 1995; Connel *et. al.*, 1995; Chen, 1997; Fosberg, 1998).

Beberapa aktivitas manusia yang tidak ramah lingkungan adalah pencetus terjadinya eutrofikasi di lingkungan. Beragam aktifitas tersebut, seperti hasil olahan

rumah tangga, industri, pemukiman padat, peternakan, pertanian dan perikanan ditengarai sebagai penghasil limbah senyawa organik yang berbahaya. Pada umumnya limbah organik yang terdiri dari karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, fosfor, sulfur dan bahan mineral lainnya yang telah memasuki badan perairan dalam bentuk padatan yang mengendap, koloid, tersuspensi dan terlarut. Senyawa dalam bentuk padatan akan langsung mengendap ke substrat perairan, sedangkan senyawa dengan bentuk lain akan tetap berada pada badan air, di lingkungan yang bersifat aerob maupun anaerob (Mukhtasor, 2007; Yusal *et al.*, 2019a,b,c,d; Yusal, 2020; Yusal, 2021; Yusal & Hasyim, 2022).

B. Terminologi dan Faktor Penyebab Terjadinya Eutrofikasi

Eutrofikasi ialah peningkatan produktivitas primer lingkungan perairan akibat pengayaan (*enrichment*) nutrisi yang berupa fosfor dan nitrogen yang memang sangat dibutuhkan oleh tumbuhan. Secara etimologi, eutrofikasi berasal dari bahasa Yunani (*eutrophia*) yang artinya nutrisi atau hara. Oleh sebab itu eutrofikasi dapat didefinisikan sebagai suatu bentuk pencemaran air yang disebabkan oleh sejumlah kandungan nutrisi yang berlebih di dalam lingkungan perairan dan secara umum mengakibatkan terjadinya penurunan kualitas air. Proses eutrofikasi juga dapat memicu pertumbuhan organisme produsen menjadi sangat cepat, apabila dibandingkan pertumbuhan secara normal. Proses inilah yang disebut *blooming*, yang secara etimologi diartikan sebagai hal yang mekar dengan sangat cepat (Fosberg, 1998; Dale *et. al.*, 2006; Mukhtasor, 2007; Eyre *et. al.*, 2008).

Pada umumnya eutrofikasi disebut sebagai bentuk pencemaran yang disebabkan oleh munculnya nutrisi yang berlebihan pada ekosistem air dan mengakibatkan pertumbuhan tanaman air menjadi tidak terkontrol. Kejadian tersebut

berawal dari beberapa kandungan bahan organik dan senyawa nutrisi yang muncul di badan air, kemudian terdekomposisi oleh bakteri melalui penggunaan oksigen terlarut dalam proses biokimia maupun proses biodegradasi. Kejadian inilah yang mengakibatkan terjadinya penurunan kadar oksigen terlarut (Dissolved Oxygen) di badan air.

Laju eutrofikasi didukung oleh faktor kondisi lingkungan yang baik, selain dari faktor kelebihan nutrisi atau pengayaan (*enrichment*). Kondisi yang dimaksud adalah proses penyinaran sinar matahari cukup, temperatur cukup baik, dan laju proses fotosintesa meningkat. Kondisi perairan yang cerah berefek pada peningkatan proses fotosintesis yang mengakibatkan produsen primer menjadi tumbuh subur dan terjadi peningkatan populasi fitoplankton. Keadaan ini telah memicu terjadinya persaingan antara beberapa komunitas dalam suatu ekosistem, sehingga sebagian besar organisme akan mati akibat tingginya persaingan untuk bertahan hidup dan daya adaptasi yang rendah terhadap perubahan lingkungan di perairan (Salmin, 2005; Supriharyono, 2009).

Pada dasarnya eutrofikasi adalah proses alamiah yang terjadi di dalam suatu perairan, dalam hal ini danau akan mengalami penuaan secara bertahap dan lebih produktif bagi pertumbuhan biomassa suatu organisme, tetapi keadaan ini berbanding terbalik akibat beberapa aktivitas manusia yang tidak ramah lingkungan atau peningkatan aktivitas antropogenik yang justru memicu percepatan terjadinya proses eutrofikasi perairan. Percepatan eutrofikasi akan terjadi apabila terdapat kontaminasi senyawa nitrat dan fosfat akibat hasil aktivitas manusia dan telah berlangsung secara terus menerus (APHA, 1995; Battistoni *et. al.*, 1997; Geogrios *et.al.*, 2009).

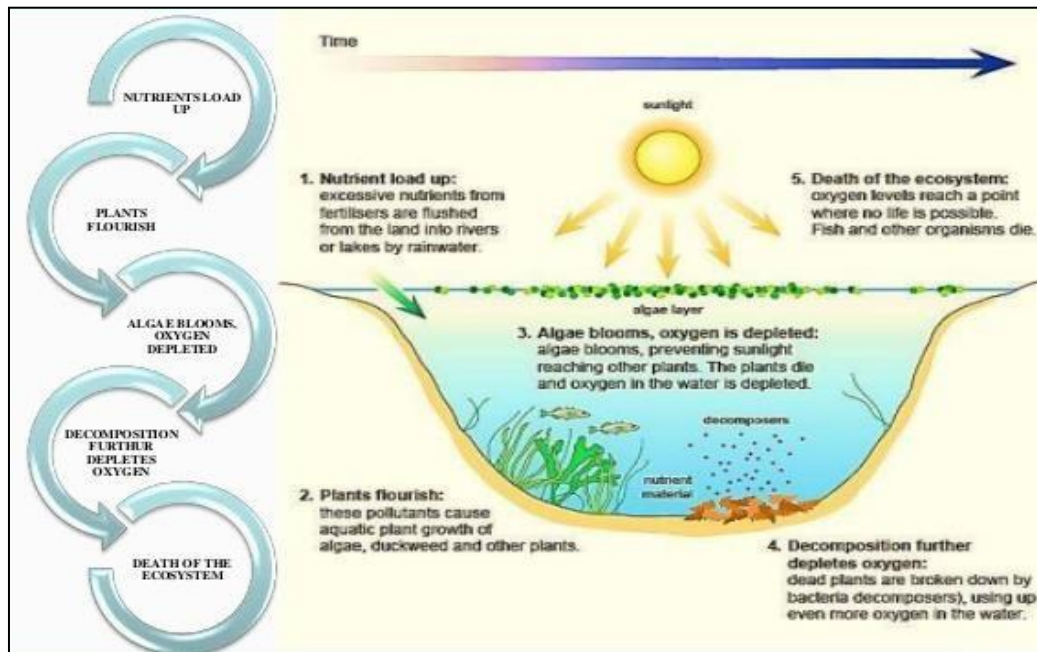
Proses pengayaan nutrisi (unsur hara) pada perairan adalah bagian terpenting di dalam pencemaran air, dimana proses tersebut menimbulkan rangsangan terhadap pertumbuhan algae (ganggang) dan makrofit yang bersifat abnormal dan tidak terkendali. Kejadian blooming tersebut akan berdampak buruk terhadap sumber daya perikanan maupun kualitas air. Para ahli telah membedakan eutrofikasi perairan dibagi menjadi dua jenis:

1. Eutrofikasi kultural (*cultural eutrophication*) dan
2. Eutrofikasi alamiah (*natural eutrophication*).

Eutrofikasi kultural merupakan kejadian eutrofikasi yang terjadi oleh adanya proses peningkatan unsur hara di perairan akibat aktivitas manusia di sepanjang aliran sungai dan selanjutnya masuk ke badan perairan. Adapun eutrofikasi alamiah (*natural eutrophication*) adalah jenis eutrofikasi yang terjadi akibat adanya aliran yang membawa detritus tanaman, garam-garaman dan tersimpan ke dalam badan air selama waktu geologis. Kondisi alamiah ini terjadi, apabila tidak terdapat campur tangan manusia di dalamnya (Praseno *et. al.*, 2000; Simanjuntak, 2012; Suhartono, 2009).

Air mengalami *eutrofik* jika mengandung konsentrasi total fosfat (PO_3^-) sebesar 35-100 $\mu\text{g/L}$, sedangkan *oligotrop* terjadi apabila fosfat dalam air sangat rendah, yaitu $< 0,01 \mu\text{g/L}$. Keadaan *oligotrop* menyebabkan pertumbuhan ganggang menjadi terhalang. Begitupula sebaliknya, dalam keadaan *eutrop* atau kadar fosfat tinggi dalam perairan, maka terjadi pertumbuhan tanaman dan ganggang tidak terkendali. Sehingga keadaan ini dapat mereduksi jumlah oksigen terlarut air. Pada dasarnya eutrofikasi membutuhkan waktu yang sangat lama (ribuan tahun), tetapi adanya perkembangan ilmu teknologi yang canggih/modern tanpa diiringi kearifan

lingkungan, maka hal ini dapat mempercepat terjadinya eutrofikasi dalam hitungan puluhan atau beberapa tahun saja. Peningkatan sedimen secara cepat dalam proses eutrofikasi akan mempercepat terbentuknya rawa dan menghilangkan perairan. (Damar, 2003; Effendi, 2003; Jao *et. al.*, 2007; Yusal, 2019). Mekanisme terjadinya eutrofikasi dapat dilukiskan melalui gambar 1 di bawah:



Gambar 1. Proses terjadinya eutrofikasi

Sumber: restuputria.blogspot.com

Morse *et. al.* (2008) melaporkan bahwa sumber senyawa fosfor yang menjadi penyebab eutrofikasi adalah 10% berasal dari proses alamiah di lingkungan perairan itu sendiri (background source), 7% berasal dari industri, 11% berasal dari detergen, 17% berasal dari pupuk pertanian, 23% berasal dari limbah manusia, dan yang terbesar adalah 32%, berasal dari limbah peternakan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan adanya kontribusi yang besar dari jumlah populasi dan keragaman aktivitas masyarakat modern yang telah menjadi penyumbang yang sangat besar terhadap pelepasan fosfor ke lingkungan perairan.

Beberapa aktivitas manusia yang menjadi penyebab terjadinya eutrofikasi, sebagai berikut (Morse *et. al.*, 2008):

1. Industri

Senyawa fosfat sering dicampurkan ke air untuk mencegah terjadinya oksidasi besi atau kalsium karbonat berubah bentuk, apabila bahan buangan tersebut dilepaskan ke saluran pembuangan, danau, sungai, atau laut, maka senyawa ini akan masuk ke badan air dan dapat menimbulkan eutrofikasi.

2. Detergen

Pada umumnya detergen merupakan sumber fosfat yang terkandung di dalam air limbah. Penggunaan detergen sangat susah dibatasi karena sering digunakan dalam kehidupan sehari-hari, misalnya untuk keperluan mencuci dan lain-lain. Saat ini, hampir setiap rumah atau satu keluarga telah menggunakan detergen sebagai bahan pelengkap di dalam rumah tangga, sementara limbah yang mengandung detergen sangat sulit diuraikan oleh bakteri dan bahkan dapat bertahan atau masih aktif dalam jangka waktu lama. Beberapa peraturan undang-undang ataupun peraturan yang memberikan batasan atau pelarangan penggunaan detergen yang mengandung fosfat, tetapi sampai saat ini belum berhasil mengeliminasi masalah eutrofikasi.

3. Sektor pertanian

Penggunaan pupuk maupun pestisida dalam pengelolaan tanaman dapat menyebabkan timbulnya pencemaran pada tanah atau lingkungan perairan. Salah satu dampak dari penggunaan pupuk atau pestisida adalah munculnya limbah yang kemungkinan besar dapat terbawa oleh aliran air sampai ke sungai, danau, pesisir, atau di laut.

Pestisida merupakan salah satu polutan organik yang bersifat cair yang berasal dari lahan pertanian. Begitupula dalam penggunaan pupuk pada lahan pertanian, dimana aktivitas ini dapat mengakibatkan masuknya senyawa fosfat ke badan perairan melalui air hujan. Hal tersebut terjadi karena wadah atau botol bekas pemupukan maupun pestisida yang terbuang secara sembarangan di sekitar lahan pertanian ataupun di wilayah irigasi.

Oleh karena itu tidak mengherankan jika limbah pupuk atau pestisida dapat berada di tempat yang jauh dari area pertanian atau daerah asal akibat mengikuti aliran air sampai ke sungai-sungai, muara, laut, maupun danau. Air limbah yang telah mengandung fosfat dan nitrat tersebut (senyawa nutrisi) adalah pemicu utama terjadinya eutrofikasi akibat adanya rangsangan terhadap pertumbuhan organisme tertentu yang bersifat abnormal (tidak terkendali) (Marganof, 2007).

Pestisida juga dapat lepas ke lingkungan melalui penyemprotan dan penguapan, sedangkan pestisida lepas dari tanah melalui leaching ataupun pengaliran air. Reaksi pelepasan pestisida sangat tergantung pada afinitas senyawa kimia yang dipergunakan pada air, tanah, jumlah/konsentrasi, dan kecepatan. Proses pelepasan pestisida sangat bergantung pada waktu dan kecepatan curah hujan, teknik penggunaan pestisida, jenis tanah, dan karakteristik pestisidanya. Pestisida juga mampu mencapai lingkungan perairan, jika terjadi tumpahan dalam proses pencampuran, pencucian, pengisian, dan penggunaan. (Ferianita *et. al.*, 2005; Kelderman *et. al.*, 2002).

Selain P (fosfor) senyawa lain yang harus mendapat perhatian adalah nitrogen. Penggunaan pupuk nitrogen telah mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Senyawa nitrogen bersifat mudah larut dan berpindah tempat, sedangkan

tanaman memiliki kemampuan yang terbatas dalam penyerapan unsur pupuk nitrogen. Hal ini menyebabkan peningkatan unsur-unsur nitrogen akan masuk ke dalam tanah dan tidak terbatas pada area *sandy soil*. Kandungan nitrogen dalam bentuk nitrat akan mengalami peningkatan secara bertahap di beberapa mata air di areal pertanian maupun yang telah terlepas ke perairan (Muhamadi *et. al.*, 2001; Nybakken, 1998).

Penggunaan pupuk nitrogen (N) di tanah dapat mempercepat penguraian nitrogen menjadi amonium dan nitrat. Sekitar 30% nitrogen lepas ke alam melalui proses *leaching* (pencucian). Nitrat memiliki kelarutan yang tinggi sehingga mudah lepas ke lingkungan. Nitrat masuk ke lingkungan perairan melalui sistem drainase atau aliran air dibawah permukaan atau melalui lapisan tanah bagian bawah. Kandungan nitrogen (N) di perairan mengalami peningkatan pada saat terjadi pemupukan dan setelah hujan. Begitupula amonia yang merupakan pecahan dari dapat lepas ke alam atau ke lingkungan perairan melalui pemanfaatan sumber- sumber nutrisi organik, seperti pupuk atau pupuk cair (*slury*). Kandungan nitrogen (N) tinggi dapat juga ditemukan pada sektor peternakan. Hasil penelitian dari UK (*United Kingdom*) telah menunjukkan bahwa sektor peternakan menghasilkan limbah nitrogen sekitar 600 kg/ha/hari kemudian lepas kembali ke tanah dalam kisaran 200 kg/ha.

4. Pakan ternak

Pemberian pakan ternak yang terkonsentrasi juga merupakan pemicu dari peristiwa eutrofikasi di lingkungan, dalam hal ini pemberian pakan hewan terkonsentrasi (CAFO) memiliki kandungan nutrisi fosfor dan nitrogen yang tinggi sebagai penyebab eutrofikasi, apabila terlepas ke dalam lingkungan perairan. Sisa- sisa pakan yang terbawa arus ke sungai, danau, dan lautan akan terakumulasi dalam

bentuk konsentrasi tinggi. Selanjutnya terserap oleh tumbuhan air dan akan mempercepat pertumbuhannya, sehingga mengganggu organisme dan badan perairan akibat kekurangan cahaya dan kandungan oksigen di perairan.

5. Limbah kotoran manusia

Bahan makanan yang dikonsumsi oleh manusia juga berpotensi mengandung zat adiktif fosfat yang dapat meningkatkan kandungan senyawa fosfat pada kotoran manusia. Kandungan senyawa fosfat tersebut juga memiliki kemungkinan dapat terbawa ke lingkungan perairan di sekitarnya sehingga mampu memicu terjadinya eutrofikasi. Hal tersebut dapat terjadi, apabila telah berlangsung lama dan dibiarkan tanpa pengolahan.

6. Limbah peternakan

Fosfor sangat berperan dalam proses metabolisme pada suatu organisme atau makhluk hidup. Setiap fosfor dalam bentuk fosfat juga dapat ditemukan di dalam kotoran ternak. Pada umumnya dapat terjadi pemusatan aliran (*runoff*) senyawafosfat di badan perairan yang berada di sekitar peternakan sapi, babi, dan ayam, ataupun berada di sekitar area aktivitas pergudangan.

Emisi nutrisi dari peternakan juga berperan utama dalam kejadian eutrofikasi di berbagai belahan dunia. Pelepasan senyawa fosfor selain dari areal peternakan, juga datang dari pertanian, dan pemukiman penduduk atau rumah tangga. Akumulasi pelepasan senyawa fosfor di dalam tanah terjadi pada saat penggunaan kompos maupun pakan ternak secara besar-besaran dalam pengaturan produksi ternak hewan (Mukhtasor, 2007).

7. Budidaya perikanan

Kotoran ikan ataupun sisa pakan ikan merupakan salah satu limbah yang mengandung unsur hara fosfor dan nitrogen yang dapat memicu peningkatan produktivitas perairan dan merangsang pertumbuhan fitoplankton atau alga di dalam perairan. Oleh karena unsur hara yang berlebih tersebut akan memicu terjadinya blooming pada alga yang bersifat merugikan organisme yang hidup di perairan, seperti ikan atau organisme lainnya. Musim pancaroba merupakan salah satu ancaman bagi lingkungan perairan terhadap bahaya eutrofikasi, dimana pada musim tersebut terjadi peningkatan suhu udara, pemanasan cahaya matahari, dan tiupan angin kencang dapat menyebabkan pergolakan air. Kondisi ini akan menyebabkan arus naik dari dasar perairan yang telah membawa massa air yang mengendap. Massa air yang telah mengandung beberapa senyawa tertentu dapat menyebabkan kandungan oksigen terlarut menjadi berkurang. Kondisi inilah yang dapat mengakibatkan kematian ikan secara massal. (Kim, 2006; Koropitan *et. al.*, 2009)

Eutrofikasi juga dapat disebabkan oleh beberapa faktor lain, seperti:

1. Pembangunan

Aktivitas pembangunan menghasilkan beberapa dampak ke lingkungan sekitarnya. Pembentukan lahan baru kemungkinan besar akan mengakibatkan erosi tanah, kegiatan konversi lahan basah atau rawa menjadi lahan tertentu dapat menimbulkan lepasnya fosfor dari lapisan tanah atau fosfor terekspos ke lingkungan. Dampak lainnya adalah terjadinya peningkatan pelepasan fosfor ke badan air akibat penyerapan secara alami oleh tumbuhan maupun semak belukar. Aktivitas lain yang menjadi penyebab tereksposnya fosfor adalah penggunaan orthofosfat maupun polifosfat pada proses pengolahan air minum dan penyediaan air bersih (Adrianto, 2021; Darmayani *et al.*, 2021a,b).

2. Fosfat Pertambangan

Aktivitas pertambangan juga merupakan salah satu kegiatan yang menyebabkan lepasnya fosfor ke beberapa area lingkungan. Salah satu bentukan fosfor yang sering ditemukan di area pertambangan adalah fosfat yang berbentuk apatite ($\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$) di dalam mineral tambang.

3. Kebakaran Hutan

Kebakaran hutan dapat mengakibatkan erosi tanah serta terlepasnya ikatan fosfor dari partikel tanah, kemudian fosfor tersebut dapat ditemukan di lingkungan perairan melalui aliran sungai atau terbawa oleh air hujan.

4. Material Sintetik

Penggunaan organofosfat dalam pembuatan bahan sintetik bertujuan untuk memperkuat kandungan material konstruksi supaya dapat tahan panas. Selain itu senyawa organofosfat dapat dimanfaatkan dalam proses pembuatan plastik. Berbagai jenis penggunaan organofosfat tersebut, memungkinkan senyawa tersebut dapat terlepas dan menjadi limbah perairan.



Gambar 2. Danau yang mengalami eutrofikasi
Sumber: (Biologiqionz.blogspot.com)

C. Dampak eutrofikasi terhadap makhluk hidup di ekosistem perairan

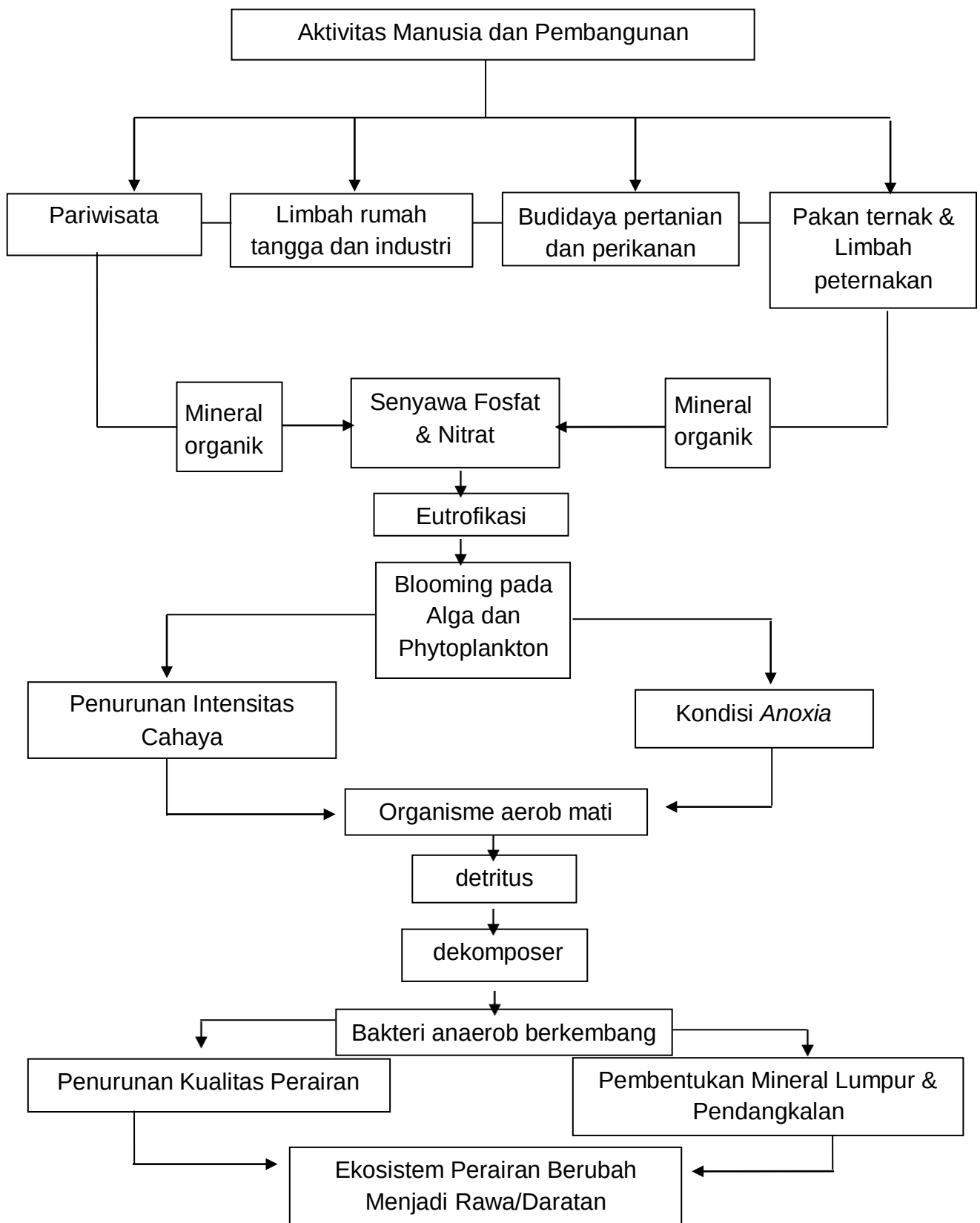
Dampak utama dari eutrofikasi adalah kerusakan ekosistem perairan secara bertahap yang merupakan ciri khas suatu daerah. Lingkungan perairan merupakan habitat dari berbagai macam organisme, dengan demikian kejadian perubahan lingkungan perairan menjadi daratan atau lingkungan tertentu akan menghilangkan keanekaragaman organisme yang hidup di dalamnya. Perubahan lingkungan tertentu juga disertai perubahan jenis-jenis organisme yang mendiami lingkungan tersebut, apalagi organisme tersebut bersifat endemik, maka secara perlahan akan mengalami kepunahan. Oleh karena itu eutrofikasi akan menurunkan tingkat biodiversitas dan mengganggu keseimbangan ekologis pada suatu ekosistem perairan.

Dampak lain dari eutrofikasi adalah terjadinya penurunan kualitas air, estetika lingkungan terganggu, masalah navigasi perairan, dan tingkat keanekaragaman organisme perairan maupun kandungan oksigen terlarut yang menjadi rendah. Beberapa hal tersebut terjadi karena adanya peningkatan pertumbuhan organisme tertentu di perairan, seperti terjadinya *blooming* pada alga. *Alga bloom* mengakibatkan tereduksinya nilai konservasi, estetika, rekreasional, dan pariwisata sehingga membutuhkan biaya ekonomi dan sosial yang tidak sedikit untuk mengatasinya. Hal lain yang ditemukan pada lingkungan perairan yang mengalami eutrofikasi adalah ditemukannya banyak bakteri yang melakukan pembusukan di sedimen dasar (Yusal, 2019; Yusal *et al.*, 2019c; Yusal, 2020; Yusal, 2021).

Tingkat kandungan oksigen yang rendah di dalam perairan akan berpengaruh besar terhadap kehidupan organisme di lingkungan perairan. (Hutagalung dan Rozak, 1997; Risamasu *et. al.*, 2011). Organisme perairan menggunakan kandungan oksigen terlarut (DO) untuk kebutuhan pernapasan, proses metabolisme atau pertukaran zat

yang dapat menghasilkan energi untuk pertumbuhan dan perkembangbiakan. Oleh karena itu kandungan DO yang rendah di perairan akan memiliki pengaruh buruk bagi kehidupan organisme akuatik. Kondisi perairan yang sudah tidak memiliki kandungan DO akan menciptakan kondisi anaerobik yang berbau busuk sehingga mengganggu estetika. (Praseno *et. al.*, 1996; Prayitno, 2011).

Kandungan limbah organik yang tinggi dari senyawa fosfat akan mengakibatkan peningkatan pertumbuhan alga maupun tumbuhan berukuran mikro sehingga hal ini mengganggu kehidupan organisme dan berdampak pada ketidakseimbangan ekosistem perairan. Proses blooming pada tumbuhan air membutuhkan kadar oksigen lebih banyak dari biasanya dan berdampak pada penurunan kandungan DO air (Yusal *et al.*, 2019a,b,c,d,e; Yusal, 2020; Yusal, 2021; Yusal & Hasyim, 2022). Begitupula pada alga yang telah mati dan mengendap di sedimen perairan telah menjadi sumber makanan organik bagi mikroorganisme air, seperti bakteri. Bakteri tersebut akan mendegradasi senyawa organik menjadi anorganik melalui metabolisme yang membutuhkan oksigen (Supriharyono, 2001). Secara rinci, bagan siklus terjadinya eutrofikasi dapat dilihat pada gambar 3. di bawah:



Gambar 3. siklus terjadinya eutrofikasi

Pada umumnya proses nitrifikasi-denitrifikasi berlangsung secara aerob melalui bakteri *Nitrococcus* sp, *Nitrosomonas* sp, dan *Nitrobacter* sp. Keadaan ini menyebabkan kandungan oksigen di lingkungan perairan semakin berkurang, warna perairan berubah menjadi kehijauan, dan mengalami peningkatan kekeruhan. Peristiwa ini memaksa percepatan pendangkalan perairan akibat adanya penguraian bahan sisa yang dapat membentuk mineral lumpur yang pada akhirnya organisme perairan akan punah, karena adanya persyaratan hidup yang tidak layak maupun tingkat adaptasi yang sangat rendah untuk tetap bertahan hidup (*survive*).

Proses metabolisme pada populasi bakteri yang besar memerlukan oksigen yang tinggi, sedangkan produk metabolisme yang berasal dari bakteri anaerob yang berupa senyawa H_2S adalah senyawa yang menghasilkan bau menyengat (bau yang tidak sedap atau anyir). Senyawa NH_3 dan H_2S hasil dekomposisi bakteri anaerob dalam konsentrasi tertentu adalah bersifat berbahaya dan beracun, sehingga sangat membahayakan organisme lain seperti plankton (fitoplankton atau zooplankton), ikan-ikan kecil atau kematian massal jenis ikan di lingkungan perairan (Darmono, 2001; Supriharyono, 2009). Kondisi ini dapat dilihat pada gambar 4. di bawah:



Gambar 4. Kematian ikan secara massal akibat eutrofikasi
Sumber: (Mediabahri.com)

Dampak lain dari hasil metabolisme bakteri anaerob adalah munculnya berbagai macam jenis cyanobacteria (*blue-green algae*) yang patogen dan beracun di badan air yang sangat merugikan biota air. Fitoplankton juga memiliki kemampuan yang berbeda dalam proses peningkatan biomassa perairan, pada umumnya mereka mempunyai kecepatan tumbuh yang berbeda. Selain itu, beberapa jenis fitoplankton memiliki respon yang berbeda terhadap perbandingan nutrisi yang terlarut dalam badan air. Hal tersebut mengakibatkan komunitas fitoplankton mempunyai struktur dominasi jenis yang berbeda dengan badan air lainnya, sehingga menghasilkan biomassa organik tinggi dan bersifat beracun. (Damar, 2003; Effendi, 2003). Frisk *et. al.* (1999) melaporkan bahwa beberapa senyawa beracun dari komunitas fitoplankton adalah *Paralytic Shellfish Poisoning* (PSP), *Amnesic Shellfish Poisoning* (ASP), dan *Diarrhetic Shellfish Poisoning* (DSP). Ketiga racun tersebut mampu melumpuhkan sistem kerja otot, saraf, dan jantung biota perairan



Gambar 5. Kondisi perairan pesisir yang mengalami eutrofikasi
Sumber: (Dunia.kita.blogspot.com)

Eutrofikasi juga mampu merangsang pertumbuhan tanaman air lainnya yang hidup di tepian (eceng gondok/*Eichhornia crassipes* Mart) maupun di dalam badan air itu sendiri (kayambang/*Hydrilla verticillata*). Pada umumnya rawa-rawa atau danau yang mengalami eutrofikasi telah ditumbuhi dengan subur berbagai jenis tumbuhan air tersebut. Kehadiran tumbuhan akuatik ini akan mempengaruhi konsentrasi O₂ dan pH lingkungan perairan, termasuk menciptakan fluktuasi pH dan oksigen terlarut di air.

Eceng gondok yang telah mati akan mengakibatkan terjadinya proses pembusukan oleh organisme dekomposer yang pada akhirnya akan terbentuk detritus berlebihan dan menghabiskan kadar oksigen terlarut di dalam air (*anoxia*), selain itu terjadi pengendapan bahan atau mineral-mineral yang menyebabkan pendangkalan. Keadaan ini dapat mempengaruhi kehidupan biota air seperti ikan dan hewan air lain yang sangat membutuhkan oksigen. Hal tersebut akan menyebabkan terganggunya proses metabolik dalam organisme air yang berakhir pada kematian. (Praseno dan Sugestiningih, 2001; Prayitno, 2011). Kondisi perairan yang dipenuhi eceng gondok akibat terjadi eutrofikasi, dapat dilihat pada gambar 6. di bawah:



Gambar 6. Perairan yang perlahan mulai dangkal dan dipenuhi tanaman eceng gondok (*Eichhornia crassipes* Mart)

Sumber: Dokumentasi pribadi, 2020

D. Penanggulangan eutrofikasi di lingkungan perairan

Permasalahan eutrofikasi sudah menjadi persoalan global yang rumit yang tidak hanya dikaji secara lokal dan temporal saja, tetapi juga menuntut adanya perhatian serius dari berbagai pihak pemerintah maupun elemen masyarakat itu sendiri. Eutrofikasi merupakan salah contoh kasus yang menuntut adanya pendekatan lintas disiplin ilmu maupun lintas sektoral. Adapun beberapa faktor yang menyebabkan penanggulangan eutrofikasi sulit membuahkan hasil yang memuaskan, yaitu aktivitas peternakan yang intensif dan hemat lahan, peningkatan dalam mengkonsumsi bahan kimiawi yang mengandung unsur fosfat, laju peningkatan penduduk bumi yang tidak terkendali, urbanisasi yang mengalami peningkatan, dan terjadinya pelepasan senyawa kimia fosfat yang telah terakumulasi pada sedimen yang akan menuju badan air.

Salah satu kebijakan yang dibutuhkan dalam mencegah peningkatan laju eutrofikasi di muka bumi adalah langkah monitoring atau pengontrolan terhadap pertumbuhan penduduk bumi (*birth control*). Peningkatan populasi penduduk bumi telah berkontribusi besar terhadap beragam jenis kegiatan yang memicu pelepasan fosfat ke lingkungan perairan. Pemerintah juga diharapkan dapat mendorong para pengusaha untuk mengubah produk detergen yang ramah lingkungan dan tidak mengandung fosfat. Begitu pula pada produk makanan maupun minuman agar tidak mengandung senyawa adiktif fosfat. Kebijakan strategis lainnya adalah pengurangan penggunaan pupuk fosfat di sektor pertanian dan pengelolaan sektor peternakan secara berkelanjutan untuk mencegah kehilangan fosfat yang masuk ke lingkungan perairan. Adapun untuk masyarakat umum, sebaiknya mengurangi konsumsi

makanan atau minuman yang banyak mengandung zat aditif fosfat (Hadjikiss *et. al.*, 1997; Hadikusumah dan Marojhan, 2011).

Usaha penanggulangan eutrofikasi dibagi menjadi dua cara, yaitu sistem input dan sistem output. Sistem input dilakukan dengan mencegah bahan pencemar masuk ke dalam perairan, sedangkan sistem output dilakukan dengan pembersihan perairan yang terdampak eutrofikasi (Darmono, 2001):

1. Sistem input

- a. Membangun sarana pengolahan limbah yang dipergunakan untuk menyaring fosfat yang berasal dari aliran limbah industri atau sarana pengolahan limbah lainnya yang dapat mencapai 90% sebelum dibuang ke badan perairan.
- b. Melakukan pembatasan limit kandungan fosfat yang diperbolehkan pada penggunaan detergen di rumah tangga, dan bahan pencuci lainnya dalam rangka mengurangi kandungan fosfat yang terbuang di sarana pengolahan limbah.
- c. Mengurangi penggunaan herbisida atau algasida dalam memberantas pertumbuhan tanaman pengganggu.
- d. Pengawasan ketat terhadap penggunaan lahan, melakukan konservasi tanah, pembersihan jalanan secara teratur untuk mengurangi sedimen tanah yang mengandung pupuk, kotoran hewan, dan tanah tercemar yang akan terbawa arus air menuju perairan. Mengeluarkan aturan yang mewajibkan petani menanam pepohonan di perbatasan antara lahannya dengan badan perairan sebagai penahan sedimen agar tidak terbawa ke perairan.
- e. Melakukan penanaman mangrove di pesisir atau pantai untuk menyaring bahan-bahan pencemar dari daratan yang terbawa aliran arus air.

2. Sistem output

- a. Melakukan pengerukan sedimen dasar perairan untuk membuang nutrisi yang mengendap bersama algae yang tumbuh subur di atasnya. Usaha ini sulit dilakukan apabila terjadi pada perairan yang luas dan dalam, selain itu hasil kerukan seharusnya dibuang jauh dari lokasi karena dapat mempengaruhi habitat lokasi buangan.
- b. Membuang atau mengambil tumbuhan air di dalam perairan. Usaha ini juga sulit dilakukan pada perairan yang luas karena memerlukan biaya yang sangat besar.
- c. Memompa udara ke dalam perairan untuk menyuplai kekurangan kandungan oksigen di dalam air, hal ini susah terealisasi karena memerlukan biaya yang sangat mahal.
- d. Memberantas jenis ikan tertentu (ikan karper) yang sering melakukan pengadukan unsur nutrisi dalam sedimen dasar sehingga nutrisi tersebut tersebar luas di lingkungan perairan. Usaha ini tidak bisa diwujudkan karena bertentangan dengan Undang-Undang konservasi lingkungan. Salah satu upaya penanggulangan eutrofikasi dengan sistem output, dapat dilihat pada gambar 7. di bawah:



Gambar 7. Penanggulangan eutrofikasi dengan sistem output
Sumber: (Furqonispered.blogspot.com)

Salah satu cara yang paling efektif dalam penanganan eutrofikasi adalah melalui pendekatan yang terintegrasi untuk mengatur dan mengontrol input nutrisi, sehingga konsentrasi kandungan nutrisi dapat direduksi menjadi sangat rendah dan menghilangkan kemungkinan terjadinya *alga bloom*. Teknik ini sangat menguntungkan dari sudut pandang ekologi, jika terjadi peningkatan senyawa fosfor yang lepas atau hilang berhubungan erat dengan erosi serta lepasnya sedimen secara besar-besaran, maka dilakukan kontrol erosi untuk mengurangi dampak negatif sedimen di sistem akuatik (Wouthuyzen, 2006).

Aktivitas penting yang dilakukan untuk mengontrol laju eutrofikasi adalah melakukan perombakan fosfat pada limbah kotoran, pengontrolan fosfat yang telah terdifusi dari sektor pertanian, penguraian fosfat dari deterjen, mengalihkan tempat pembuangan kotoran. Kegiatan pengontrolan konsentrasi senyawa fosfor di lingkungan perairan dilakukan melalui pembatasan atau pengurangan nutrisi dari sumber utama dan melakukan peningkatan teknologi perombakan nutrisi dari limbah kotoran (*sewage*).

Salah satu langkah untuk mereduksi pelepasan fosfor dari kawasan pertanian ke lingkungan perairan adalah pengaturan level fosfor di tanah dan melakukan peningkatan efisiensi penggunaan fosfor melalui penyeimbangan masukan fosfor (P input) di dalam kandungan pakan maupun pupuk dengan luaran fosfor (P output) pada produksi tanaman dan hewan (Risamasu *et. al.*, 2011; Salmin, 2005; Simanjuntak, 2012).

Sumber utama fosfor di tanah pertanian adalah berasal dari proses pemupukan, seperti pupuk kimia, organik, kompos, dan pupuk kandang. Oleh karena itu dibutuhkan suatu sistem pengaturan pertanian yang bersifat ramah lingkungan,

terdapat dua jenis usaha yang dapat mengurangi atau mereduksi dampak fosfor terhadap lingkungan, yaitu mengontrol sumber fosfor dan sistem transportasinya atau perpindahan fosfor ke lokasi yang rawan terhadap leaching, pengaliran, serta erosi.

Pengaturan harus terfokus pada area sumber fosfor dan sistem transportasinya yang saling bertemu atau disebut “*critical source area*”. Penentuan lokasi titik rawan ini menjadi sangat penting dalam mencegah eutrofikasi di daerah padat pertanian. Langkah lain yang dapat dilakukan untuk mencegah terjadinya eutrofikasi adalah melakukan pengurangan konsentrasi pencemar di dalam limbah cair industri maupun limbah domestik yang sesuai dengan peraturan Pemerintah. Berdasarkan hal tersebut di atas, maka sangat mutlak diperlukan adanya teknologi pengolahan limbah yang bersifat efisien serta menguntungkan secara ekologi maupun ekonomi (Supriharyono, 2009).

Salah satu upaya mencegah dan mengeliminasi lepasan nitrogen ke dalam lingkungan perairan adalah penggunaan *artificial wetland* yang dipasang sepanjang aliran air atau di areal pertanian untuk memerangkap kandungan nitrogen di dalam perairan yang akan mengalir ke perairan. Bentuk pencegahan lainnya adalah meningkatkan sistem pengolahan limbah domestik di kawasan pesisir, pantai, atau daerah kota besar lainnya melalui proses biologi, mengingat pendekatan secara kimiawi hanya mereduksi sebagian kecil kandungan nitrogen pada limbah cair. Upaya pengurangan konsentrasi nitrogen pada sumbernya adalah hal penting dibandingkan mengurangi input nutrisi pada perairan yang sudah terdampak eutrofikasi karena hal tersebut membutuhkan waktu dan biaya yang tidak sedikit (Marganof, 2007).

E. Penanggulangan eutrofikasi di berbagai negara

Beberapa negara, terutama negara maju telah menjadikan permasalahan eutrofikasi sebagai agenda lingkungan hidup yang perlu penanganan serius, misalnya Australia sudah mempunyai suatu program yang disebut *The National Eutrophication Management Program*, yang bertujuan mengkoordinasi, mendanai, dan mensosialisasikan aktivitas riset mengenai eutrofikasi dan dampaknya. Beberapa negara di benua Amerika membentuk asosiasi yang disebut *North American Lake Management Society* yang memberikan perhatian penuh terhadap pelestarian danau dalam bentuk aktivitas sains, manajemen, edukasi, dan advokasi.

Amerika Serikat dan beberapa negara di Eropa telah membentuk komite khusus dalam mencari solusi terhadap permasalahan akibat hubungan antara manusia dengan lingkungan melalui pengawasan ketat terhadap pencemaran lingkungan. Pada umumnya, beberapa negara tersebut membatasi kandungan senyawa fosfat di lingkungan perairan. Hal ini dilakukan dengan mencantumkan label “*phosphate free*” atau “*environmental friendly*” pada produk kebutuhan rumah rumah tangga. Pengurangan pelepasan kandungan senyawa fosfat dan nitrat juga dilakukan melalui serangkaian *treatment* tertentu. Selain itu, mereka mendirikan organisasi *American Society of Limnology and Oceanography* yang mengkaji bidang *aquatic sciences* untuk menginformasikan hasil-hasil riset di bidang eutrofikasi. Tujuan lain dari program ini adalah untuk mengidentifikasi dan mencari solusi atas permasalahan akibat hubungan antara manusia dengan lingkungannya (Chazanah, 2002; Eyre *et. al.*, 2002; Jao *et. al.*, 2007) .

Beberapa negara di kawasan Eropa juga memiliki komite khusus yang disebut *Scientific Committee on Phosphates in Europe* yang menerapkan *The Urban*

Waste Water Treatment Directive. Komite ini bertujuan untuk menangani problem fosfat yang berasal dari limbah cair dan termasuk cara penanggulangannya, bahkan telah mendirikan jurnal ilmiah *European Water Pollution Control* yang bertujuan melakukan kajian-kajian pencemaran air di kawasan Eropa maupun di negara-negara yang berada di luar benua biru tersebut.

SIMPULAN & REKOMENDASI

Simpulan

Eutrofikasi merupakan pengayaan (*enrichment*) nutrisi perairan yang berupa fosfor dan nitrogen yang dapat memicu peningkatan produktivitas perairan sehingga terjadi ketidakseimbangan ekosistem yang mengarah ke penurunan tingkat kualitas perairan. Eutrofikasi dapat terjadi secara alami dengan jangka waktu yang sangat lama ($\pm$ ratusan-ribuan tahun), tetapi hal ini dapat dipercepat akibat beberapa aktivitas manusia yang tidak ramah lingkungan, sehingga terjadi pertumbuhan alga/ganggang secara tidak terkendali (*blooming*) yang sangat merugikan organisme lain yang hidup di perairan tersebut.

Penyebab utama terjadinya percepatan eutrofikasi di perairan adalah aktivitas antropogenik yang menghasilkan limbah-limbah organik yang terlepas ke lingkungan perairan, beberapa aktivitas tersebut berasal dari Industri, pemakaian detergen, pemakaian pupuk dalam pertanian, kotoran manusia, pakan ternak, limbah peternakan, pertambangan, dan kebakaran hutan. Aktivitas tersebut menghasilkan emisi nutrisi yang mengandung fosfor atau nitrogen, kemudian tercuci (*leaching*) dan mengalir ke perairan.

Dampak utama dari eutrofikasi adalah kerusakan ekosistem perairan secara bertahap yang merupakan habitat dari berbagai organisme sehingga memicu terjadinya kepunahan pada biota air yang tidak mampu beradaptasi pada perubahan lingkungan tersebut. Oleh karena itu eutrofikasi akan menurunkan tingkat biodiversitas dan mengganggu keseimbangan ekologis pada suatu ekosistem perairan.

Dampak lain dari eutrofikasi adalah Seperti berkurangnya kandungan oksigen (DO), timbulnya bau yang anyir, dan percepatan pendangkalan suatu perairan. Peningkatan kandungan nutrisi yang berupa fosfor dan nitrogen akan merangsang pertumbuhan fitoplankton atau alga, sehingga meningkatkan produktivitas primer perairan. Hal tersebut memicu timbulnya *blooming* alga/fitoplankton yang merugikan kehidupan organisme yang ada dalam badan air. Kejadian *blooming* akan mengurangi intensitas cahaya yang masuk di dalam air dan kandungan DO menjadi berkurang, bahkan *blooming* tersebut bersifat toksik bagi organisme perairan.

Eutrofikasi dapat meningkatkan laju pertumbuhan bakteri di dasar dan sedimen, seperti bakteri *Nitrococcus* sp, *Nitrosomonas* sp, dan *Nitrobacter* sp. Bakteri-bakteri ini menguraikan bahan sisa nutrisi yang disebut proses nitrifikasi- denitrifikasi, proses inilah yang paling banyak menghabiskan oksigen, menghasilkan kandungan beracun, serta membentuk mineral lumpur yang bisa menyebabkan pendangkalan perairan. Selain itu, warna perairan mengalami perubahan menjadi kehijauan, terjadi kekeruhan, dan menghasilkan bau yang tidak sedap.

Laju eutrofikasi juga merangsang pertumbuhan tanaman air lainnya, seperti eceng gondok (*Eichhornia crassipes* Mart) dan rumput air lainnya, seperti kayambang (*hydrilla verticillata*). Tanamam aquatik tersebut juga mempengaruhi

konsentrasi O₂ dan pH perairan disekitarnya. Hal tersebut menyebabkan terganggunya proses metabolik dalam organisme, yang akhirnya dapat menyebabkan kematian.

Langkah utama dalam menanggulangi peningkatan laju eutrofikasi di muka bumi adalah dengan mengontrol pertumbuhan penduduk dan menjadikan eutrofikasi sebagai agenda lingkungan hidup yang harus ditangani dengan serius dalam suatu negara. Langkah strategis lainnya dalam mengurangi laju eutrofikasi adalah penggunaan pendekatan yang terintegrasi dalam mengatur dan mengontrol semua masukan nutrisi utama (fosfor dan nitrogen) sehingga konsentrasi nutrisi dapat dibatasi atau direduksi menjadi cukup rendah sehingga tidak menyebabkan alga bloom, dan merancang penggunaan teknologi dalam perombakan nutrisi dari buangan kotoran (*sewage*), seperti penggunaan artificial wetland yang dipasang sepanjang aliran air atau di areal pertanian untuk menangkap kandungan fosfor atau nitrogen dalam air yang mengarah ke perairan.

Rekomendasi

Eutrofikasi merupakan permasalahan lingkungan yang perlu mendapat penanganan yang serius, oleh sebab itu dibutuhkan suatu lembaga khusus untuk mencegah dan menanggulangi kerusakan lingkungan tersebut. Beberapa negara maju telah membentuk komite khusus untuk menanggulangi laju eutrofikasi di negaranya

DAFTAR PUSTAKA

- Adrianto, H., Ulinniam, Purwanti, E.W., Yusal, M.S., Widyastuti, D.A., Sutrisno, E., Hetharia, C., Dailami, M., Rini, Angga, L.O., Khairina, A., Hariri, M.R., Nendissa, D.M., Nendissa, S.J., Noviantari, A., & Chrisnawati, L., 2021. *Bioteknologi*, Bandung: Widina Bhakti Persada
- Anggraeni, 2002, Kualitas Air Perairan Laut Teluk Jakarta Selama Periode 1996-2002. Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan, tesis: Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB, Bogor.
- APHA, AWWA, WEF, 1995, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th edition, Ed : Andrew D. Eaton, APHA, Washington DC.
- Battistoni, P., G. Fava, P. Pavan, A. Musacco, dan F. Cecchi, 1997, "Phosphat Removal in Anaerobic Liquors by Struvite Crystallization without Addition of Chemicals: Preliminary Results," *Water Research* 31, hal 2925- 2929.
- Brotowidjoyo, D.M., D. Tribowo, Eko. M., 1995, *Pengantar Lingkungan Perairan dan Budidaya Air*, Yogyakarta: Liberty.
- Connel, W.D. dan G. J. Miller, 1995, *Kimia dan Ekotoksikologi Pencemaran*, Terjemahan: Penerbit Universitas Indonesia.
- Chazanah, M. (2002), Biodegradasi surfaktan linear alkyl bensen sulfonat yang terkandung dalam deterjen pada reactor batch aerob, Tesis: Program magister teknik lingkungan program pasca sarjana Institut Teknologi Bandung.
- Chen, S., 1997, "Biogeochemical Behaviour of Nutrisis and Their Fluxes in the Minjiang River Estuary," *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 15(2), hal 150-155.
- Dahuri, R., Jacub, R., Sapta, P.G., dan Sitepu, M.J., 2004, *Menata Ruang Laut Terpadu*, Cetakan ketiga, Jakarta: Penerbit Pradnya Paramita.
- Damar, A., 2003, Effects of Enrichment On Nutrisi Dynamics, Phytoplankton Dynamics and Productivity in Indonesia Tropical Waters: A Comparasion Between Jakarta Bay, Lampung Bay and Semangka Bay, Disertasi: Christian Albrechts University, Kiel.
- Darmono. 2001. *Lingkungan Hidup dan Pencemaran (Hubungannya dengan Toksikologi Senyawa Logam)*, Jakarta: Universitas Indonesia Press.

- Dale, B. Edwards, M. Reid, P.C., 2006, "Ecology of Harmful algae : Climate change and harmful algal bloom," *Springer-verlag*. Heidelberg 440(8).
- Darmayani, S., Hidana, R., Sa'diyah, A., Laksitarahmi, P.I., Hidayati, Jumiarni, D., Anggita Rahmi Hafsari, A.R., Latumahina, F.S., Setyowati, E., Estikomah, S.A., Kurniati, S., Syam, S., Moh Imam Sufiyanto, M.I., Yusal, M.S., Watuguly, T.W., Gultom, V.D.N., 2021a. *Bioteknologi Teori dan Aplikasi*, Bandung: Widina Bhakti Persada.
- Darmayani, S., Hidana, R., Latumahina, F.S., Nendissa, S.J., Situmorang, M.V., Juniatmoko, R., Widarawati, R., Novita, M.Z., Swardana, A., Octorina, P., Siagian, G., Hasibuan, A.K.H., Yusal, M.S., Mutolib, A., 2021b. *Ekologi Lingkungan Hidup dan Pembangunan*, Bandung: Widina Bhakti Persada.
- Effendi, H., 2003, *Telaah Kualitas Air Bagi Pengelolaan Sumberdaya dan Lingkungan Perairan*, Yogyakarta: Penerbit Kanisius.
- Eyre, B.D., dan Lester, J.M., 2002, "Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Budgets for a Shallow Subtropical Coastal Embayment (Moreton Bay, Australia)", *Lymnology, oceanography*, 47(4) hal 1043-1055.
- Elliot, J.A. Irish, A.E. Reynolds, C.S and Tett, P., 1999, "Sensitivity analysis of protech, a new approach in phytoplankton modelling". 414(6), hal 45-51.
- Seminar Nasional MIPA 2005: Komunitas Fitoplankton sebagai Bio-Indikator Kualitas Perairan Teluk Jakarta, 2005, Ferianita-Fachrul, M., H. Haeruman dan L.C.Sitepu., FMIPA-Universitas Indonesia, 24-26 November 2005, Jakarta.
- Forsberg (1998), "Which Policies Can Stop Large Scale Eutrophication," *Water Science and Technology*, 37(3), hal 193-200.
- Frisk, A.B. Kapainen, H. Malve, O and Mols, M. 1999, "Modelling phytoplankton dynamic of the eutropic lake Vortsjarv", *Estonia, Hydrobiologia* 414, hal 59-69.
- Georgios, K.S, dan Vassilios, A.T, 2009, "A Budget Model to Scale Nutrisi Biogeochemical Cycles in Two Semiencloded Gulfs," *Environmental Modelling Assessment*, 14(4), hal 59-72.
- Hadikusumah, dan Marojahan S., 2011, "Box Model Air Tawar, Salinitas, dan Zat Hara di Delta Mahakam, Kalimantan Timur," *Makara Sains*, 15(1) hal 79-88.
- Hodgkiss, I.J. dan Ho, K.C., 1997, "Are change in N, P ration in coastal waters the key to increased red tide blooms," *Hydrobiologia*, 352(8), hal 141-147.

- Hutagalung, H.P dan A., Rozak, 1997, *Metode Analisis air laut, sedimen dan biota*, edisi kedua, Jakarta: Pusat Penelitian dan Pengembangan Oseanologi
- Joao, M.N., Mogens, R.F., Joao, C.M., dan Miguel, A.P., 2007, "Modelling Nutrisi Mass Balance in Temperate Meso Tidal Estuary: Implication for Management. Estuarine," *Coastal, and Shelf Science*, 76(1), hal 175-185.
- Kelderman, P., Barendregt, A., Normala, S., Douven, M., dan Heun, J.C., 2002, "Using Mass Budgets for The Assessment of Water and Nutrisi Inputs from The Banten River into Banten Bay (Indonesia)," *Jurnal Pesisir dan Lautan*, 4(2), hal 1-8.
- Kim, H.G. 2006, "Mitigation and control of HABS, Ecological studies: Analysis and synthesis", *Springer*, 189 (4) hal 327-338.
- Koropitan, A.F., Ikeda, M., Damar, A., dan Yamanaka, Y., 2009, "Influences of Physical Processes on the Ecosystem of Jakarta Bay: a Coupled Physical-Ecosystem Model Experiment," *ICES Journal of Marine Science*, 66(2), hal 336-348.
- Proceedings of The Conference on Nitrogen as A Water Pollutant: Industrial Waste Water, 1977, Landner, L., Copenhagen: 55-65 pp.
- Marganof, 2007, Model pengendalian pencemaran perairan di Danau Maninjau Sumatera Barat, disertasi: Institut Pertanian Bogor.
- Morse, Croix Mark, D.S., Korf T., 2008, "The Economic and Environment Impact of Phosphorus Removal from Wastewater in the European Community," *ICES Journal of Marine Science*, 48(2) hal 436-448.
- Muhamadi, Aminullah, E., Soesilo, B., 2001, *Analisis Sistem Dinamis, Lingkungan Hidup, Sosial, Ekonomi, Manajemen*, Jakarta: UMJ Press.
- Muchtar, M., 2004, "Kondisi lingkungan perairan Teluk Jakarta dan sekitarnya," Penelitian IPTEK Kelautan Pusat Penelitian Oseanografi, LIPI, Jakarta.
- Muchtar, M dan Simanjuntak, 2008, Karakteristik dan Fluktuasi Zat Hara Fosfat, Nitrat dan Derajat Keasaman (pH) di estuary Cisadane pada Musim yang Berbeda, Dalam ekosistem Estuari Cisadane, tesis: Universitas Indonesia.
- Mukhtasor, 2007, *Pencemaran Pesisir dan Laut*, Cetakan Pertama, Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Nybakken, J.W. 1998, *Biologi Laut Suatu Pendekatan Ekologi*. Penerjemah: M. Eidman, Koesoebiono, D.G. Bengen, M. Hutomo dan S. Sukarjo, Jakarta: PT. Gramedia.

- Praseno, P.P dan Sugestiningsih. 2000, "Redtaid di perairan Indonesia," P3O-LIPI, hal 1-15.
- Praseno, D.P dan Wiadnyana, N.N., 1996, "HAB organism in Indonesian water," *fisheries and aquatic sicience*, 2138(8), hal 68-75.
- Prayitno, H.B., 2011, "Kondisi trofik perairan Teluk Jakarta dan potensi terjadinya ledakan populasi alga berbahaya," *Oseanologi dan Limnologi di Indonesia*, 37(2), hal 247-262.
- Risamasu, F.J.L. dan Prayitno, H.B., 2011, "Kajian Zat Hara Fosfat, Nitrit, Nitrat dan Silikat di Perairan Kepulauan Matasiri, Kalimantan Selatan. Ilmu Kelautan Universitas Diponegoro," 16(3), hal 135-142.
- Salmin, 2005, "Oksigen Terlarut (DO) dan Kebutuhan Oksigen Biologi (BOD) Sebagai Salah Satu Indikator Untuk Menentukan Kualitas Perairan," *Oseana*, Vol.XXX (3), hal 21 – 26.
- Santoso, A. D., 2007. Kandungan zat hara fosfat pada musim barat dan musim timur di Teluk Harun Lampung. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, Jakarta, 2(4): 43-47.
- Simanjuntak, M., 2012, "Kualitas Air Laut Ditinjau Dari Aspek Zat Hara, Oksigen Terlarut dan pH di Perairan Banggai, Sulawesi Tengah," *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, Vol. 4, No. 2, FPIK-IPB, hal. 290-303.
- Suhartono, E., 2009, Identifikasi Kualitas Perairan Pantai Akibat Limbah Domestik Pada Monsun Timur dengan Metode Indeks Pencemaran, Studi Kasus di Jakarta, Semarang, dan Jepara, Tesis: Universitas Indonesia.
- Supriharyono, 2000, *Pelestarian dan Pengelolaan Sumber Daya Alam di Wilayah Pesisir Tropis*, Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Supriharyono, 2009. *Konservasi Ekosistem Sumberdaya Hayati di Wilayah Peisir dan Laut Tropis*. Edisi Kedua, Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Susana, T dan Suyarso, (2008), "Penyebaran Fosfat dan Deterjen di Perairan Pesisir dan Laut Sekitar Cirebon, Jawa Barat," *Jurnal Oseanologi dan Limnologi Indonesia*. 34, hal 117-131.
- Sutamiharja, R.T.M., 1987, Kualitas dan Pencemaran Lingkungan, Tesis: Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Wouthuyzen, 2006, "Pendeteksian Dini Kejadian Marak Alga (Harmful Alga Bloom/HAB) Perairan Teluk Jakarta dan Sekitarnya," P2OLIPi, 6(8).
- Yusal, M.S., 2019. Kajian Kualitas Perairan Berdasarkan Keanekaragaman Meiofauna Interstisial, Kandungan Fosfor, dan Parameter Fisik Lingkungan di Zona Pesisir Losari Makassar, Disertasi: Program Studi

Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana Universitas Gadjah Mada,
Yogyakarta.

- Yusal, M.S., Marfai, M.A., Hadisusanto, S., & Khakhim, N., 2019a. Abundance and Diversity of Meiofauna as Water Quality Bioindicator In Losari Coast, Makassar, Indonesia. *Ecology, Environment and Conservation*. 25(2): 589–598.
- Yusal, M.S., Marfai, M.A., Hadisusanto, S., & Khakhim, N., 2019b. Abundance of Meiofauna and Physical-Chemical Parameters as Water Quality Indicator. *Indonesian Journal of Marine Sciences*. 24(2): 81–90. [https://doi: 10.14710/ik.ijms.24.2.81-90](https://doi.org/10.14710/ik.ijms.24.2.81-90)
- Yusal, M.S., Marfai, M.A., Hadisusanto, S., & Khakhim, N., 2019c. Water Quality Study Based on Meiofauna Abundance and Pollution Index in the Coastal Zone of Losari Beach, Makassar. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 17(1): 172–180. [https:// doi:10.14710/jil.17.1.172-180](https://doi.org/10.14710/jil.17.1.172-180)
- Yusal, M.S., Marfai, M.A., Hadisusanto, S., & Khakhim, N., 2019d. Analisis Ekologis Meiofauna Sebagai Bioindikator di Pesisir Pantai Losari, Makassar. *Bionature*. 19(1):15–22. <https://doi.org/10.35580/bionature.v19i1.7308>.
- Yusal, M.S., Marfai, M.A., Hadisusanto, S., & Khakhim, N., 2019e. The Ecological Analysis of Meiofauna as a Water Quality Bioindicator in the Coast of Losari Beach, Makassar. International Conference on Environmental Resources Management in Global Region. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, Yogyakarta, Indonesia 256 (2019) 012024. [https://doi:10.1088/1755-1315/256/1/012024](https://doi.org/10.1088/1755-1315/256/1/012024)
- Yusal, M.S., 2020. Studi Struktur Komunitas Meiofauna dan Kualitas Perairan Zona Pesisir Losari Makassar. *Jurnal Ilmu Alam dan Lingkungan*. 11(2):63–71. <https://doi.org/10.20956/jal.v11i2.10676>.
- Yusal, M.S., 2021. Studi Potensi Eutrofikasi di Pesisir Losari Makassar. *Jurnal Enggano*. 6 (2): 348-357. <https://doi.org/10.31186/jenggano.6.2.348-357>.
- Yusal, M.S. & Hasyim, A., 2022. Kajian Kualias Air Berdasarkan Keanekaragaman Meiofauna dan Parameter Fisika-Kimia di Pesisir Losari, Makassar. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 20(1): 45-57. [https://doi: 10.14710/jil.20.1.45-57](https://doi.org/10.14710/jil.20.1.45-57)

