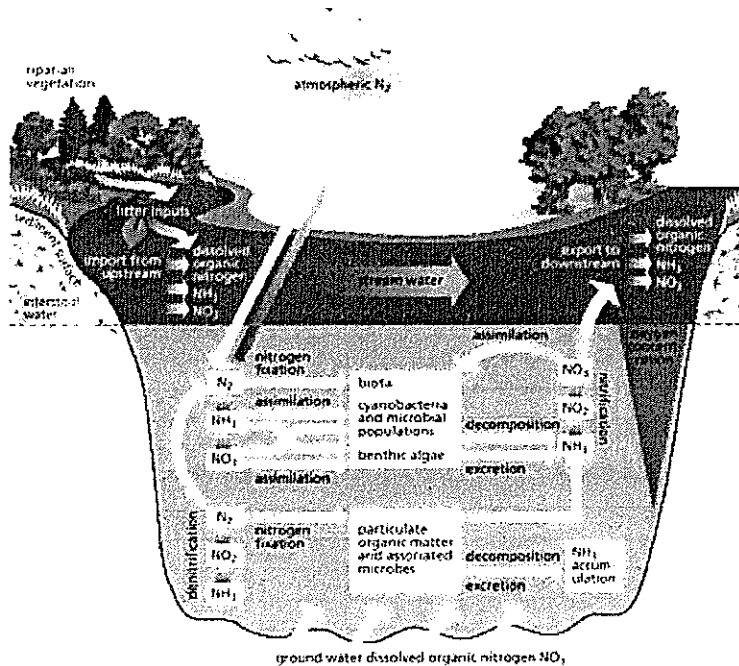


BUKU AJAR

“PENGELOLAAN KUALITAS LINGKUNGAN”



OLEH :
 BADRUS ZAMAN, ST ,MT
 IR. SYAFRUDIN,CES ,MT

UPT-PUSTAK-UNDIP
 No. Daft: 0108/BA/ET/1e1
 Tgl. : 23-7-2009

JURUSAN TEKNIK LINGKUNGAN
 FAKULTAS TEKNIK
 UNIVERSITAS DIPONEGORO
 SEMARANG
 2008

DAFTAR ISI

	Hal.	
BAB I	PENDAHULUAN	1-1
BAB II	BAHASA INDEK	2-1
	Fungsi-Fungsi Kerusakan	2-2
	Teori Fungsi-Fungsi Kerusakan	2-3
	Pengembangan Informasi Dosis-Efek	2-6
BAB III	SRUKTUR INDEK LINGKUNGAN	3-1
	Struktur Matematis	3-1
	Subindek	3-2
	Fungsi Linier	3-3
	Fungsi Linier Bersegmen	3-5
	Fungsi Nonlinier	3-7
	Penggabungan Subindek	3-11
	Bentuk-Bentuk Penjumlahan	3-11
	Root-Sum-Power	3-13
	Root-Mean-Square	3-15
	Maksimum Operator	3-16
	Bentuk-Bentuk Perkalian	3-17
	Minimum Operator	3-21
BAB IV	INDEK KUALITAS AIR	4-1
	Umum	4-1
	Perumusan Indek Kualitas Air (IKA)	4-1
BAB V	INDEK STANDAR PENCEMARAN UDARA (ISPU)	5-1
	Umum	5-1
	Perumusan Indek Standar Pencemaran Udara (ISPU)	5-2
	Metode Perhitungan Indek Standar Pencemaran Udara (ISPU)	5-5
	Contoh Perhitungan	5-5
BAB VI	INDEK KEBISINGAN	6-1
	Pendahuluan	6-1
	Tingkat Tekanan Suara, Daya Suara, dan Intensitas Suara	6-1
	Tingkat Tekanan Suara	6-1
	Tingkat Daya Suara	6-1
	Tingkat Intensitas Suara	6-2
	Pembobot A,B,dan C	6-2
	Beberapa Sistem Skala Kebisingan	6-3
	Tingkat Desil L_{10} , L_{50} dan L_{90}	6-3
	Tingkat Energi Ekuivalen (L_{eq})	6-4
	Tingkat Polusi Kebisingan (LNP)	6-5

	Indeks Kualitas Kebisingan	6-6
	Indeks Kebisingan untuk Bandara	6-6
	A. Noise and Number Index (NNI)	6-6
	B. Annoyance Index (AI)	6-6
	C. Disturbance Index (Q)	6-6
	D. Noisiness Index (NI).	6-7
	Indeks Kebisingan Untuk Lalu-lintas	6-7
	A. Traffic Noise Index (TNI)	6-7
	B. Disturbance Index (Q)	6-7
	C. Annoyance Index (AI).	6-8
	D. Total Noise Load (B)	6-8
BAB VII	INDEKS BIOTA PERAIRAN DAN TERESTERIAL	7-1
	Umum	7-1
	Metode Penentuan Indeks Biotik	7-1
	Sistem Saprobik	7-1
	Sistem Diversitas (Indeks Keanekaragaman Hayati)	7-3
	Kriteria Mutu Lingkungan Perairan Berdasarkan Indeks Biotik	7-6
	Metode Penentuan Indeks Terrestrial	7-7
BAB VIII	INDEK RADIOAKTIF	8-1
	Pendahuluan	8-1
	Isotop Radioaktif	8-1
	Indek Radioaktif	8-3
	Cara Perhitungan CUEX	8-4
	Aplikasi CUEX	8-5

BAB I PENDAHULUAN

Berbagai Penulis, Pegawai pemerintah, dan berbagai organisasi menekankan pengembangan dan penggunaan berbagai indeks lingkungan. Aturan berbagai indeks tersebut biasanya memainkan peranan yang berhubungan dengan alasan-alasan mendasar dimana data monitoring lingkungan dikumpulkan. Data monitoring lingkungan berisi tentang pengukuran-pengukuran rutin variabel-variabel fisik, kimia dan biologi yang dimaksudkan untuk menggambarkan kondisi-kondisi lingkungan. Data-data tersebut sering menghasilkan batas penting yang menilai efektifitas berbagai program peraturan untuk perbaikan lingkungan.

Russell Train pada tahun 1973 membuat catatan sebelum acara "National Conference on Managing the Environment " :

"Accurate and timely information on the status of the environment is necessary to shape sound public policy and to implement environmental quality programs efficiently. It is virtually impossible to develop effective programs and to monitor their implementation without good monitoring data. Very detailed data are necessary for certain types of planning and enforcement."

Dari konsep asli di atas, data monitoring lingkungan berfungsi sebagai "umpan balik" untuk mengevaluasi efektifitas dari berbagai kegiatan peraturan. Dari satu data monitoring lingkungan yang diperoleh selanjutnya diperlukan untuk menterjemahkannya ke bentuk yang lebih mudah dipahami. Russell Train menunjukkan bahwa berbagai indeks lingkungan memainkan aturan penting dalam proses penterjemahan:

"For top management and general public policy development, monitoring data must be shaped into easy-to-understand indices that aggregate data into understandable forms. I am convinced that much more effort must be placed on the development of better monitoring systems and indices than we have in the past. Failure to do so will result in sub-optimum achievement of goals at much greater expense."

Indeks yang dikembangkan dan diterapkan seharusnya berfungsi sebagai "tools" untuk menjelaskan tren yang menggambarkan kondisi-kondisi lingkungan yang spesifik dan membantu pengambil keputusan dalam pemerintahan dalam mengevaluasi efektifitas program-program peraturan seperti yang ditulis Russell Train dalam *science*:

"A limited number of environmental indices, obtained by aggregating and summarizing available data, could be used to illustrate major trends and highlight the existence of significant environmental conditions. These indices could provide measures of the

success of federal, state, local, and private programs in coping with environmental problems that must be solved."

Indek lingkungan tentu bukan hanya sumber informasi untuk keputusan lingkungan. Pembuatan keputusan akan berdasarkan pada banyak pertimbangan selain indek dan data monitoring sebagai dasarnya. Russell Train menunjukkan bahwa indek lingkungan sebagai performa yang penting dalam membuat data teknis kepada manager :

"Policy-making neither can nor should become totally "scientific" Vital decisions will always depend ultimately on the values we hold and on the way we express these values through the political system. But we must also strive to make maximum use of the scientific evidence available to us, and development of environmental indices is one important way of doing this."

Laporan dari Planning Committee on Environmental Indices of the National Academy of Sciences (NAS) pada tahun 1975 menyimpulkan bahwa tidak terjadi kemajuan yang memadai dalam pengembangan berbagai metoda untuk mengevaluasi berbagai kondisi lingkungan :

"Environmental indices provide an important method for evaluating the state of the environment. Despite strong statements of need from an three branches of government, progress toward the development and use of methods for evaluating environmental quality has not been satisfactory."

Laporan NAS menunjukkan performa indek lingkungan penting dalam empat area:

- Membantu memformulasikan kebijakan
- Menjelaskan terhadap efektifitas program-program perlindungan terhadap lingkungan
- Membantu dalam desain program-program tersebut
- Memfasilitasi komunikasi dengan publik yang menaruh perhatian terhadap berbagai kondisi lingkungan dan mempercepat kemajuannya

Komite merekomendasikan bahwa pemerintah federal mengambil bagian secara aktif dalam pengembangan indek lingkungan :

"A program to develop and use environmental indices (EI) should begin immediately. The Congress and the Executive should assure that this effort is implemented by directing and encouraging adequate programs and by providing appropriate stimuli and resources

The Committee has concluded that the development of EI is an important and urgent matter. Indices are needed now for a variety of reasons, and the need for indices will become increasingly apparent and pressing in future years. A useful system of EI can and should be initiated now. Programs to use existing indices and to develop additional EI

should begin immediately. Thus, both short- and long-term goals can be identified for the development of environmental indices."

Indek dikembangkan atau disusun untuk enam dasar penggunaan tetapi kadang penerapannya untuk lebih dari satu :

- Alokasi sumber : indek dapat diterapkan untuk keputusan lingkungan untuk membantu manager dalam mengalokasikan dana dan memperkirakan prioritas.
- Merangking berbagai lokasi : indek dapat diterapkan untuk membantu dalam membandingkan berbagai kondisi lingkungan di lokasi yang berbeda atau area-area geografis.
- Membuat berbagai standar: indek dapat diterapkan di lokasi spesifik untuk memperkirakan tingkatan berbagai standar legislatif dan kriteria yang ada akan sesuai atau tidak.
- Analisis kecenderungan : indek dapat diterapkan untuk data lingkungan pada titik-titik yang berbeda pada waktu tertentu untuk memperkirakan perubahan kualitas lingkungan (menurun atau naik) yang terjadi pada waktu tertentu.
- Informasi publik : indek dapat digunakan untuk menginformasikan ke publik tentang berbagai kondisi lingkungan.
- Riset Ilmu Pengetahuan : indek dapat diterapkan dengan maksud untuk mengurangi kuantitas data yang besar menjadi bentuk yang memberikan berbagai pengertian kepada peneliti yang berhubungan dengan studi beberapa fenomena lingkungan

Adanya perbedaan pengguna yang membutuhkan data yang berbeda, identifikasi pengguna seharusnya menjadi bagian yang kritis pada pengembangan dan aplikasi berbagai indek lingkungan, seperti harapan Coate dan Mason :

"It is absolutely critical that the user be identified. The scientist, administrator, elected official, and general public cannot usually be satisfied by the same environmental measure. The administrator needs to see the resource allocation implications and the scientist needs to see the cause and effect implications. Who the user is will also affect geographical or political aggregation of data and the decision to highlight or obscure interjurisdictional comparisons."

Proses pengembangan berbagai indek lingkungan sendiri merupakan wilayah yang kontroversial. Debat berpusat di sekitar jumlah informasi yang hilang dalam proses penyederhanaan yang mungkin dibuat oleh indek. Orang yang sangat familiar dengan

kompleksitas dalam membuat berbagai pengukuran lingkungan umumnya melihat potensi terjadinya distorsi dalam indeks sebagai sesuatu yang tidak dapat diterima. Sebaliknya, orang yang lebih meninggalkan proses pengukuran mempunyai penerimaan yang tinggi terhadap distorsi untuk membantu memudahkan pengertian, meskipun kemungkinan gambaran kualitas lingkungannya kasar. Coate dan Mason berargumen:

"Much of the discussion as to the appropriateness of constructing and disseminating environmental information in the form of indices may be reduced to the following: The advocates say 'something is better than nothing' and the adversaries say 'something defective is worse than nothing.' Both sides agree that better information is needed for decision-making or public information purposes and both sides agree that perfect measures of environmental quality are impossible to construct except perhaps for very limited topical areas. The advocates say the best way to proceed is to develop indices, test their usefulness through experience, and refine the process through use."

BAB II BAHASA INDEK

Beberapa bahasa umum dikembangkan untuk menggambarkan data polusi. Dalam area indek lingkungan, tidak semua istilah seragam. Untuk menghindari kerancuan kita seharusnya memasukkan beberapa definisi dari istilah yang konsisten yang digunakan dalam buku.

Dalam ilmu matematika istilah “variabel” biasanya mengacu pada beberapa atribut dari ketertarikan yang diambil pada nilai-nilai yang berbeda. Dalam profesi lingkungan, kata “parameter” biasa digunakan untuk menggantikan “variabel lingkungan” yaitu beberapa kuantitas lingkungan yang diukur. Untuk menghindari kerancuan antara istilah matematis dan bahasa lingkungan, harus digunakan istilah “variabel polutan” yaitu *setiap kuantitas fisik, kimia, atau biologi yang dimaksudkan sebagai ukuran polusi lingkungan*. Sebagai contoh, pengurangan visibilitas oleh partikel-partikel atmosfer, konsentrasi SO₂ di atmosfer, keasaman sungai, atau massa emisi polutan yang dikeluarkan dari cerobong asap setiap jam semuanya adalah variabel polutan.

Berbagai indek lingkungan seringkali termasuk variabel-variabel lingkungan yang menggambarkan kuantitas polutan yang dilepasakan ke dalam lingkungan-massa berbagai polutan yang diemisikan dari cerobong asap atau berbagai efluen dari instalasi pengolahan limbah cair-dan bukan kuantitas sebenarnya yang ada dalam lingkungan ambien setelah terjadi difusi dan pencampuran. Karena sumber variabel-variabel polutan hanya menyinggung kuantitas polutan yang awalnya dikeluarkan ke dalam lingkungan sehingga tidak secara langsung menggambarkan bagian dari lingkungan. Variabel-variabel yang menggambarkan bagian dari lingkungan disebut *kualitas lingkungan*, variabel-variabel polutannya diukur pada kondisi-kondisi aktual ambien, kandungan pestisida dalam tanah, konsentrasi berbagai gas di atmosfer, kuantitas berbagai substansi toksik dalam sungai.

Istilah “indikator lingkungan” adalah kuantitas tunggal yang berasal dari satu variabel polutan dan digunakan untuk menggambarkan beberapa atribut lingkungan. Misalnya, *jumlah hari* observasi konsentrasi SO₂ di atmosfer yang melebihi baku mutu udara ambien dengan menggunakan indikator tingkat polusi SO₂. Hal yang sama adalah variasi

angka 0 dan 1 yang menggambarkan kuantitas DO dalam sungai merupakan indikator lingkungan dari kandungan DO.

Indikator-indikator lingkungan dapat ditampilkan secara individu atau gabungan matematis dalam beberapa bentuk "indek lingkungan". Indek adalah angka tunggal yang berasal dari dua atau lebih indikator. Penghitungan indek pada langkah awalnya biasanya menghitung indikator-indikator tunggal, satu untuk setiap variabel polutan. Indikator-indikator juga berdasarkan pada "subindek". Perbedaan mendasar antara indikator dan indek adalah indikator berasal dari variabel polutan tunggal, sedangkan indek berasal dari satu variabel polutan. Jumlah indikator yang ada pada saat yang sama untuk menghasilkan gambaran kondisi lingkungan (tetapi tidak digabungkan) disebut "Profil kualitas lingkungan".

FUNGSI-FUNGSI KERUSAKAN

Proses membentuk pengertian berbagai indikator kualitas lingkungan akan lebih sederhana jika fungsi-fungsi matematisnya valid yang diperoleh dari hubungan variabel-variabel polutan terhadap efeknya pada manusia dan lingkungan.

Jika diperoleh persamaan yang akurat, sebagai contoh, dapat di prediksinya angka kenaikan kematian di kota Semarang sebagai fungsi konsentrasi yang diukur dari setiap polutan udara, fungsi ini akan dapat digunakan sebagai petunjuk untuk mendesain berbagai indikator polusi udara. Jika fungsi kedua yang diperoleh untuk menterjemahkan secara akurat berbagai observasi pengukuran dari semua polutan ke dalam "estimasi laju kematian", umumnya indek polusi udara dapat menjadi dasar estimasi tersebut.

Seperti hubungan yang disebut "fungsi kerusakan" atau "fungsi efek dosis-respon" adalah persamaan atau set kurva yang berhubungan dengan berbagai variabel polutan untuk mengamati berbagai efek pada material, tanaman, binatang, organisme biologi, kesehatan manusia, dan estetika di sekitar manusia.

Hershaft, Morton, dan Shea mendefinisikan fungsi kerusakan adalah :

"A damage, or dose-effect, function is the quantitative expression of a relationship between exposure to specific pollutants and the type and extent of the associated effect on a target population. In plotting such a function, the ordinate may represent either the number of individuals affected or severity of effect, whereas the abscissa indicates the

dosage in terms of time and ambient concentration. In reporting a damage function, one needs to specify the pollutant, the dose rate, the effect, and the target population."

Sedangkan perbedaan antara fungsi kerusakan biologis dan fungsi kerusakan ekonomi adalah :

"The damage can become manifest in a number of ways and can be expressed in either physical and biological, or economic terms. If the effect is physical or biological, the resultant relationship is known as a physical or biological damage function, or a dose-effect function. In an economic damage function, on the other hand, the effect is expressed in monetary terms. Economic damage functions can be developed by assigning dollar values to the effects of a physical or biological damage function, or by direct correlation of economic damages with ambient pollutant levels."

Teori Fungsi-Fungsi Kerusakan

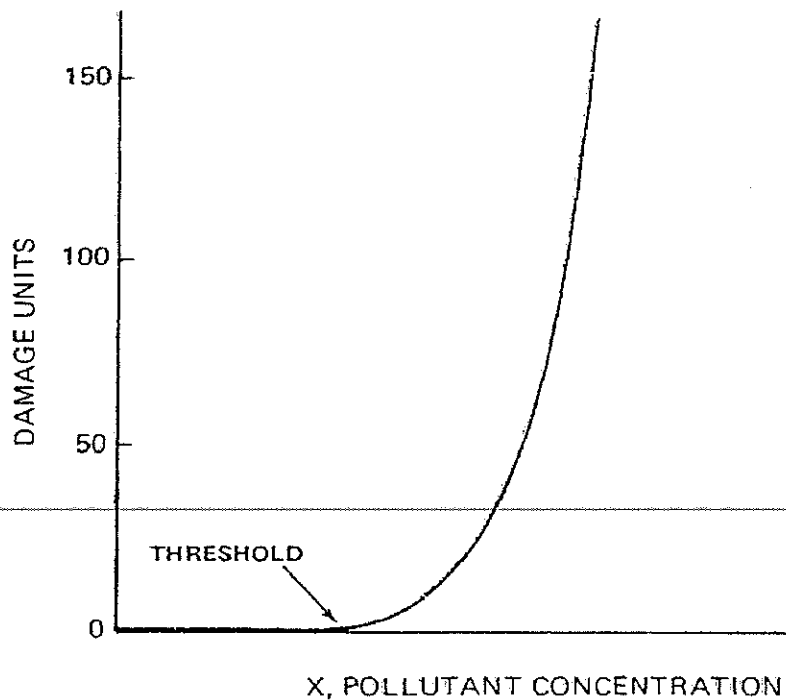
Jika fungsi-fungsi kerusakan yang valid dikembangkan, akan tampak seperti apa? Dari teori aslinya dapat ditunjukkan fenomena "threshold". Fenomena threshold berdampak bahwa sedikit di bawah nilai minimum threshold tidak ada kerusakan yang terjadi, di atas nilai threshold, efek akan naik dengan cepat sejalan dengan kenaikan variable polutan. Hipotesis keberadaan tingkatan threshold disebut juga "Threshold Limiting Value(TLV)" yang didasarkan pada konsep adaptasi yaitu kecenderungan manusia dan organisme hidup lain untuk mengembangkan toleransi terhadap berbagai racun berkonsentrasi rendah. Sebagai contoh banyak polutan udara yang berasal dari alam dan buatan manusia, seperti pembakaran hutan, organisme laut, dan reaksi fotokimia dengan senyawa-senyawa organik yang dihasilkan tanaman. Ekspos yang terus menerus menyebabkan berkembangnya toleransi yang digambarkan oleh keberadaan tingkat threshold.

Argumen kedua untuk keberadaan TLV adalah mekanisme biokimia oleh aktivitas seluler akibat berbagai substansi asing. Argumen ini didasarkan bahwa interaksi kimia dengan sistem-sistem biologi dapat terjadi hanya pada saat sejumlah besar atom atau molekul substansi asing yang hadir memadai. Meskipun pengetahuan yang ada belum memadai untuk membangun model interaksi biokimia seluler tersebut, Dinmann dan yang lain mempunyai pendapat bahwa akan terjadi sedikit perubahan aktivitas biokimia jika konsentrasi atom atau molekul per sel kurang dari 10.000. Meskipun hal ini masih

diperdebatkan tetapi beberapa eksperimen mendukung keberadaan tingkat threshold khususnya untuk substansi-substansi toksik seperti timbal. Berbagai organisme biologis sering menunjukkan resistensi terhadap berbagai polutan pada konsentrasi yang sangat rendah. Jika konsentrasi naik barrier tingkat resistensi akan rusak dan terjadi efek yang signifikan.

Fungsi kerusakan bersama fenomena threshold pertama-tama akan horisontal tetapi kemudian slopenya akan naik dengan cepat pada saat threshold dicapai (gambar 1). Seperti pada gambar dengan unit kerusakan diplot pada ordinat dan konsentrasi polutan pada absis akan menggambarkan seperti "tongkat hokey". Hasselblad, Creason, dan Nelson mendiskripsikan kurva ini :

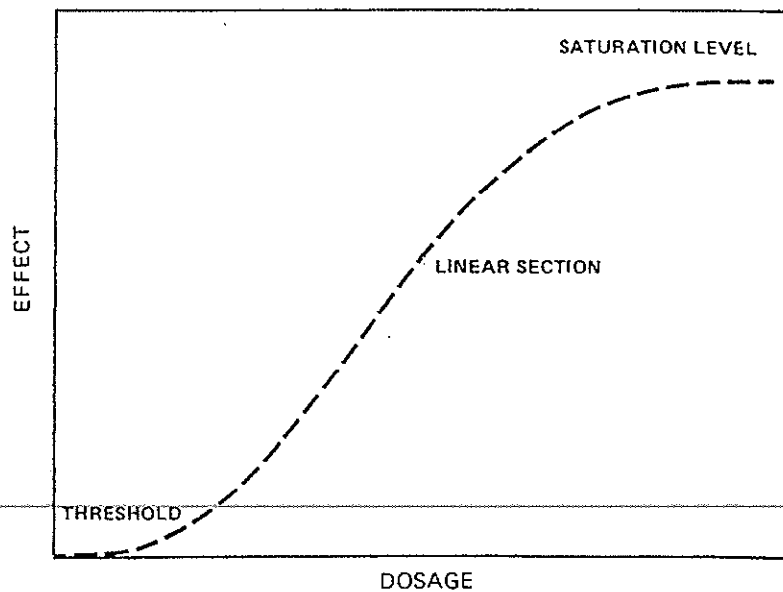
The establishment of criteria for air pollutants requires that a threshold level be established below which no adverse health effects are observed. Since standard dose-response curves, such as the logit or probit, assume an effect at all levels, a segmented function was developed. This function has zero slope up to a point, and then increases monotonically from that point. Thus the name "hockey stick" function.



Gambar 2.1. Hipotesis Karakteristik Fungsi Kerusakan "Tongkat Hokey" dan Tingkat Threshold

Hipotesis fungsi kerusakan yang dinyatakan oleh Hershafft, Morton, dan Shea mempunyai karakteristik yang sama dengan bentuk mendekati bentuk aslinya, tetapi rdisimpulkan bahwa semua fungsi kerusakan seharusnya juga termasuk “tingkat saturasi” yang menghasilkan bentuk sigmoid atau kurva bentuk-s (gambar 2) :

*The ordinate may represent either the number of individuals affected or severity of effect
The abscissa indicates the dosage in terms of time at a given ambient concentration, or in terms of ambient concentration for a fixed period of time. The lower portion of the curve suggests that, up to a certain exposure value, known as a threshold level, no damage is observed, while the upper portion indicates that there exists a damage saturation level (ag., death of the target population or total destruction of the crops), beyond which increased exposure levels do not produce additional damage. The middle, quasilinear portion is very useful in that any data points here can be readily interpolated, and the frequent assumption about linearity of a damage function is most valid in this sector.*



Gambar 2.2. Hipotesis Fungsi Kerusakan oleh Hershafft, Morton, dan Shea yang Menunjukkan Karakteristik Sigmoid

Sebenarnya sangat sulit dalam penelitian sebenarnya untuk membuat fungsi-fungsi kerusakan seperti kurva-kurva teoritis yang ada. Studi penelitian berbagai efek polutan biasanya hanya terdiri dua variabel (misalnya, materi partikulat dan tingkat kematian) yang “berhubungan” secara statistik berkorelasi secara signifikan. Pada studi penelitian lebih rumit oleh kenyataan bahwa orang yang berbeda akan mempunyai fungsi-fungsi dosis-efek dan efek-efek sinergis yang berbeda pula pada saat lebih dari satu polutan beraksi bersama-sama. Hal ini menyebabkan sering tidak mungkin untuk mengidentifikasi fungsi dosis-efek yang diaplikasikan kepada variabel polutan tunggal dan mencakup semua segmen dari populasi.

Pengembangan Informasi Dosis-Efek

Berdasarkan asumsi disamping pengembangan fungsi-fungsi kerusakan bahwa hubungan tunggal sebab-efek dapat dibentuk antara variable-variabel polutan dan efek yang merugikan sering dipandang sebagai penyederhanaan yang tinggi dan tidak siap diterima oleh banyak peneliti di lapangan. Sumber utamanya adalah usaha ilmuwan untuk mengembangkan maksud kerusakan atau fungsi-fungsi dosis-efek yang harus memperhatikan kompleksitas pengontrolan untuk berbagai factor-faktor luar yang juga berefek pada efek-efek yang diteliti. Sebagai contoh, studi memperkirakan hubungan antara kematian dan konsentrasi polutan udara di kota yang berbeda harus dikontrol untuk perbedaan kepadatan penduduk, tingkat pendapatan, komposisi ras, distribusi umur, jenis industri, gaya hidup dan berbagai variable lainnya. Hal yang sama, studi epidemiologi yang dilakukan dengan kota tunggal harus dikontrol untuk factor-faktor seperti factor-faktor efek cuaca pada kematian, tenggang antara lama hari konsentrasi tinggi dan kenaikan laju tingkat kematian, efek libur terhadap akhir pekan, efek dari berbagai polutan lain, spasial yang kurang representatif dari data polusi, dan eror data kematian.

BAB III STRUKTUR INDEK LINGKUNGAN

Indek adalah untuk menyederhanakan yang merupakan proses dari sejumlah informasi yang mungkin menjadi sebuah pengertian yang penting. Melalui manipulasi matematis, indek lingkungan dilakukan untuk mereduksi dua atau lebih variabel lingkungan menjadi angka tunggal (atau satu set angka, kata-kata atau symbol) yang mempunyai arti. Meskipun indek-indek lingkungan yang dikembangkan menunjukkan variasi yang besar dan perbedaan yang nyata, hal ini memungkinkan untuk membentuk cara kerja matematis yang bersifat umum sehingga dapat mengakomodasi sebagian besar berbagai indek lingkungan.

Bentuk umum indek ada dua yaitu : 1) Nilai indek yang naik dengan naiknya polusi lingkungan., 2) Nilai indek yang turun dengan naiknya polusi lingkungan. Menurut beberapa ahli yang pertama sebagai indek “ polusi lingkungan (environmental pollution indices) dan yang kedua sebagai indek “kualitas lingkungan (environmental quality indices)”.

Berdasarkan terminologi tersebut indek dengan $I=0$ berarti air murni dan $I=100$ menunjukkan air sangat tercemar, disebut indek “polusi air (water pollution)”, sebaliknya indek dengan $I=0$ berarti kualitas air yang jelek dan $I=100$ menunjukkan kualitas air yang baik, disebut indek “kualitas air (water quality)”. Istilah ini tidak diterima secara universal, sehingga untuk mengatasi keraguan maka ditetapkan indek :1) bentuk “skala naik (increasing scale)” yaitu nilai indek yang naik dengan kenaikan polusi, 2) bentuk “skala turun (decreasing scale)” yaitu nilai indek yang menurun dengan kenaikan polusi . Indek polusi udara umumnya berbentuk skala naik, sedangkan indek polusi air (atau kualitas air) berbentuk skala turun. Perbedaan ini berasal dari komunikasi yang terbatas antara pengembang indek polusi air dan polusi udara.

Struktur Matematis

Perhitungan indek lingkungan terdiri dari dua langkah dasar yaitu:

1. Perhitungan subindek variable-variabel polutan yang digunakan dalam indek.
2. Penggabungan berbagai subindek ke dalam indek.

Satu set penelitian untuk n variable polutan dimana X_1 sebagai nilai untuk polutan variable pertama, X_2 sebagai nilai untuk polutan variable kedua, dan X_i sebagai nilai untuk polutan variable ke-i, kemudian satu set penelitian sebagai $(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n)$. Untuk setiap variable polutan X_i , sub indeks I_i dihitung menggunakan fungsi sub indeks $f_i(X_i)$:

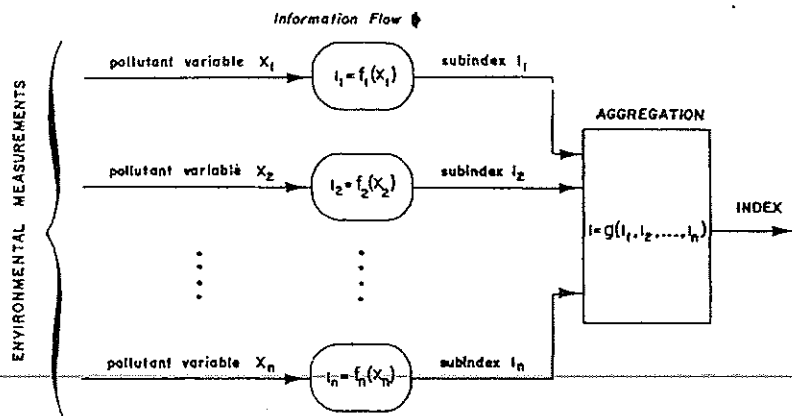
$$I_i = f_i(X_i) \quad (1)$$

Dalam kebanyakan indeks, perbedaan fungsi matematis digunakan untuk menghitung setiap variable polutan, fungsi-fungsi subindek $f_1(X_1), f_2(X_2), \dots, f_n(X_n)$. Setiap subindek menggambarkan karakteristik lingkungan yang merupakan bagian dari variable polutan. Fungsi-fungsi tersebut dapat berupa perkalian sederhana, atau kenaikan variable polutan sesuai power, atau beberapa yang lain berupa hubungan fungsi.

Subindek-subindek yang dihitung biasanya digabungkan melalui langkah matematis menjadi bentuk indeks akhir :

$$I = g(I_1, I_2, \dots, I_n) \quad (2)$$

Penggabungan fungsi tersebut biasanya berupa operasi *penjumlahan* atau operasi *perkalian*, atau operasi *maksimum*, Seluruh proses perhitungan tersebut dapat digambarkan dengan diagram alir sebagai berikut :



Gambar 3.1. Diagram alir Proses Penyusunan Indeks Lingkungan

Subindek

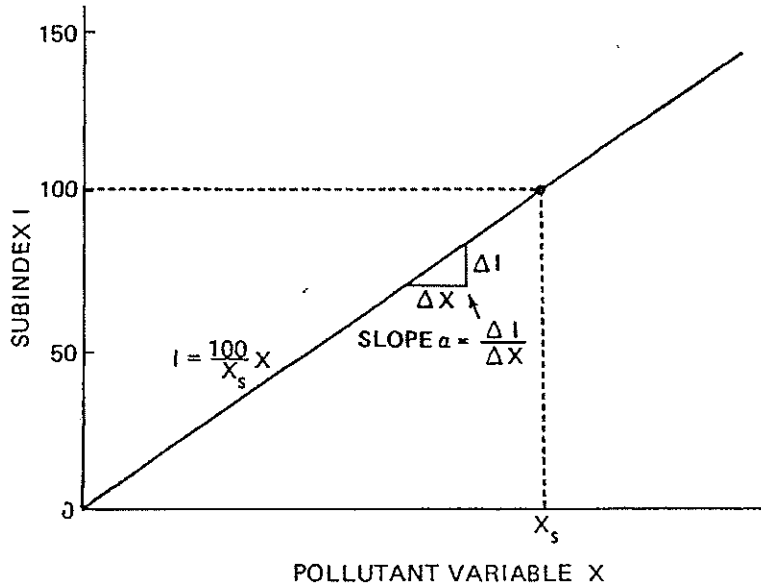
Banyak fungsi-fungsi yang berbeda untuk persamaan antara subindek I dan variabel polutan X yang mungkin.

FUNGSI LINIER

Fungsi subindek yang paling sederhana adalah fungsi linier :

$$I = \alpha X \quad (3)$$

dapat digambarkan dengan grafik berikut:



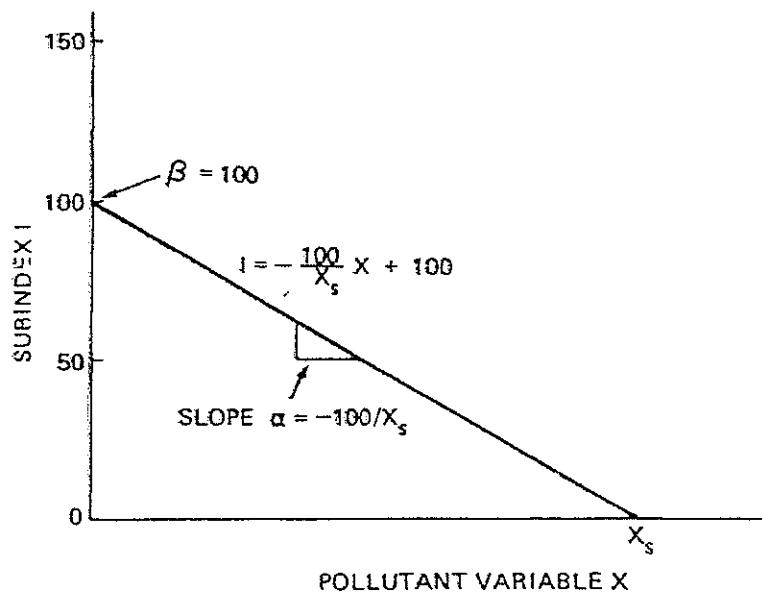
Gambar 3.2. Fungsi subindek naik monoton

Berdasarkan fungsi tersebut terdapat bagian langsung antara subindek dengan variabel polutan, sehingga variabel polutan X ganda akan menghasilkan subindek I ganda pula. Slope kurva α konstan, akibatnya untuk setiap perubahan absolut ΔX , subindek berubah $\Delta I = \alpha \Delta X$ unit. Sebagai contoh jika α ditentukan sehingga $I = 100$ sebagai standar lingkungan, $X = X_s$, kemudian $\alpha = 100 / X_s$ dan subindek I dapat diartikan sebagai "Persen standar".

Pada contoh di atas, garis lurus melewati asal $I = 0$ untuk $X = 0$. Fungsi linier subindek sederhana dapat didasarkan dari aslinya dengan menambahkan konstanta β menjadi :

$$I = \alpha X + \beta \quad (4)$$

Dimana konstanta β sebagai intersep dari aksis I , dengan $I = \beta$ untuk $X = 0$ seperti gambar berikut dengan $\alpha = 125$ dan $\beta = 75$:



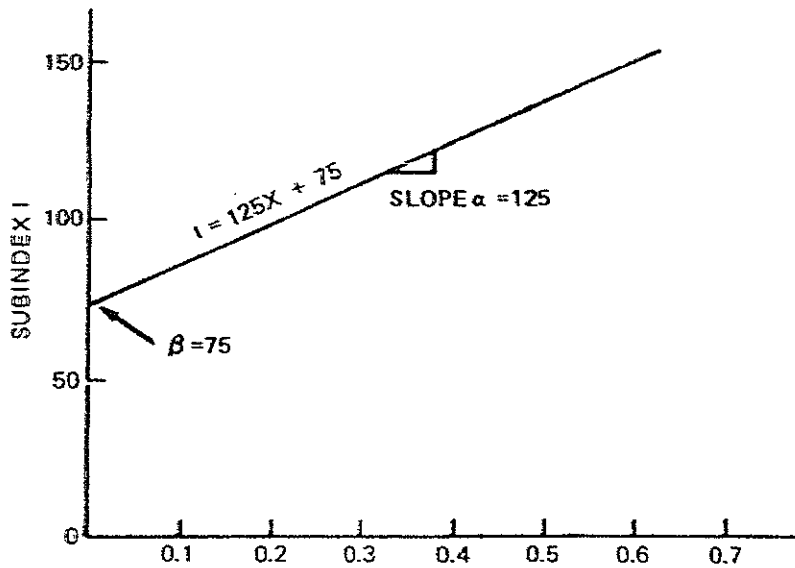
Gambar 3.3. Fungsi subindek sederhana (skala naik) yang tidak melewati titik asalnya

Jika α lebih dari nol, persamaan 3 dan 4 akan menghasilkan skala fungsi subindek X yang naik sehingga untuk setiap kenaikan X , I juga akan naik. Jika α kurang dari nol, fungsi subindek akan berupa skala turun (turun secara monoton). Jika ditentukan $\alpha = -100/X_s$ dan $\beta = 100$, skala menurun fungsi subindek akan menghasilkan $I=100$ untuk $X=0$ dan $I=0$ untuk $X=X_s$, seperti pada gambar di bawah dengan persamaan:

$$I = -\frac{100}{X_s} X + 100 \quad (5)$$

Persamaan 5 menunjukkan bentuk skala turu dari "Persen Standar" dimana 100 menunjukkan kualitas 100% (tidak ada polusi), dan 0 adalah kualitas 0% (mencapai standar).

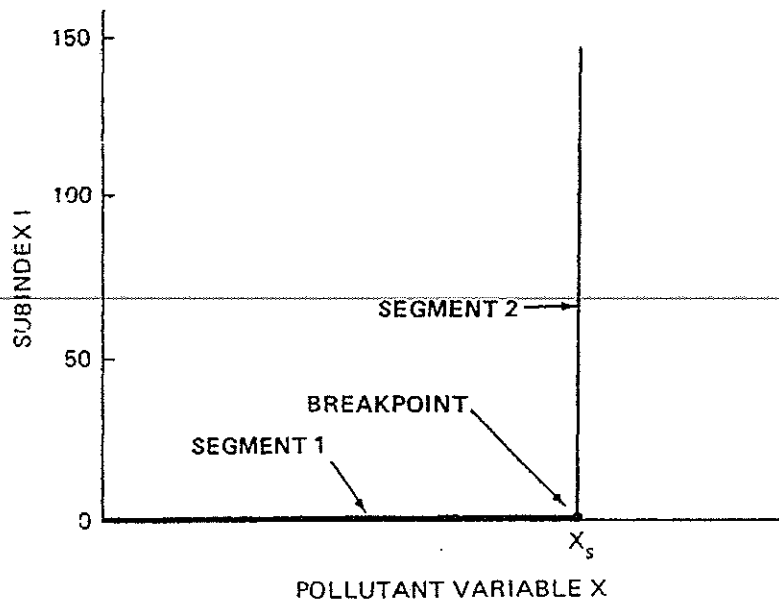
Indek linier mempunyai keuntungan yang mudah untuk menghitung dan mudah dimengerti. Konsep linier kemungkinan familiar karena sangat banyak variabel dalam hidup kita yang berhubungan dengan kelinieran. Misalnya: berat (konversi dari pound ke kilogram), temperatur (konversi dari Fahrenheit ke Celcius) dan gerak (hubungan kecepatan dengan gerak).



Gambar 3.4. Fungsi linier subindek dengan skala menurun

Fungsi Linier Bersegmen

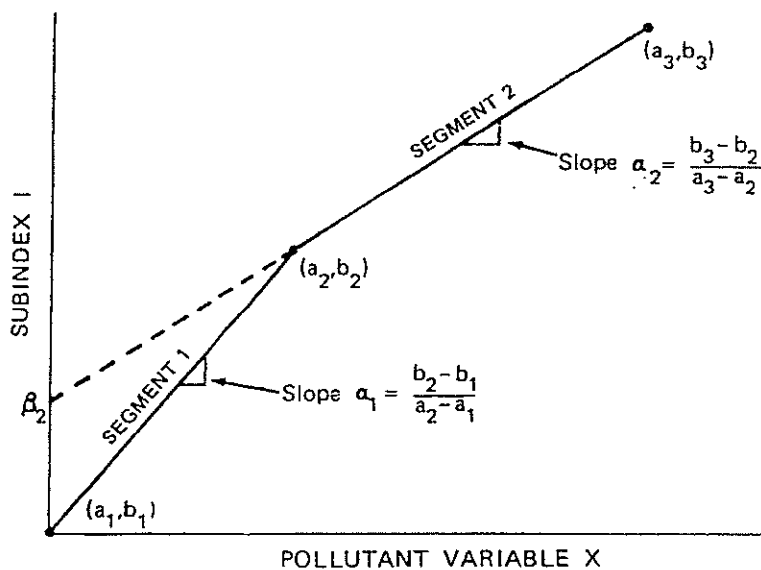
Seperti pada fungsi kerusakan, di bawah “threshold level” tidak ada efek yang terjadi, menghasilkan kenaikan berupa fungsi “tongkat hokey”. Hal yang sama pada situasi hipotesa bahwa tidak ada efek lingkungan yang merugikan pada konsentrasi di bawah batas baku mutu yang ditetapkan $X=X_s$, sementara efek yang sangat serius terjadi pada konsentrasi $X>X_s$, kemudian fungsi subindek dapat mengandung dua garis lurus yang berhubungan dengan sudut tegak lurus pada $X=X_s$ seperti gambar berikut :



Gambar 3.5 Contoh fungsi linier bersegmen (Tongkat Hokey)

Pada kasus yang ekstrim, subindek akan nol untuk semua konsentrasi di bawah batas yang direkomendasikan tetapi angka subindek akan menjadi sangat besar dengan cepat begitu batas tersebut terlampaui. Karena fungsi tersebut mengandung dua segmen garis lurus yang berhubungan pada satu titik (breakpoint) maka disebut “fungsi linier bersegmen”

Secara umum fungsi linier bersegmen terdiri dari dua atau lebih garis lurus, biasanya dengan slope yang berbeda, bertemu pada titik tertentu. Jika koordinat pertemuan X dan I adalah (a_1, b_1) , (a_2, b_2) , ... (a_j, b_j) seperti gambar berikut:



Gambar 3.6. Bentuk umum fungsi linier bersegmen

Setiap fungsi linier dengan segmen m dapat dirumuskan dengan persamaan :

$$I = \frac{b_{j+1} - b_j}{a_{j+1} - a_j} (X - a_j) + b_j \quad (6)$$

$$\text{for } a_j \leq X \leq a_{j+1}$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, m$$

menggunakan persamaan 6 segmen pertama adalah:

$$I = \frac{b_2 - b_1}{a_2 - a_1} (X - a_1) + b_1 \quad (7)$$

$$\text{for } a_1 \leq X \leq a_2$$

Hasil ini mudah di cek dengan mensubstitusikan $X = a_1$ ke dalam persamaan 7, memberi hasil b_1 :

$$I = \frac{b_2 - b_1}{a_2 - a_1} (a_1 - a_1) + b_1 = 0 + b_1 = b_1 \quad (8)$$

Selanjutnya $X=a_2$ disubstitusi ke dalam persamaan 7, memberi hasil b_2 :

$$I = \frac{b_2 - b_1}{a_2 - a_1} (a_2 - a_1) + b_1 = b_2 - b_1 + b_1 = b_2 \quad (9)$$

Persamaan untuk segmen kedua diperoleh dari persamaan 6 dengan cara yang sama :

$$I = \frac{b_3 - b_2}{a_3 - a_2} (X - a_2) + b_2 \quad (10)$$

$$\text{for } a_2 \leq X \leq a_3$$

Persamaan 7 harus menghasilkan nilai yang sama untuk I pada akhir segmen pertama yang diperoleh dari persamaan 10 untuk segmen kedua.

Persamaan 6 dapat ditulis dalam bentuk yang sama dengan persamaan 4 :

$$I = \alpha_j X + \beta_j \quad (11)$$

$$\text{for } a_j \leq X \leq a_{j+1}$$

dimana

$$\alpha_j = \frac{b_{j+1} - b_j}{a_{j+1} - a_j}$$

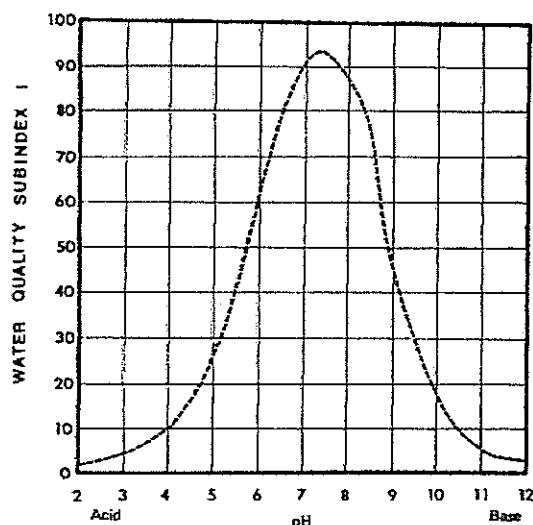
$$\beta_j = \frac{b_{j+1} a_j - a_j b_{j+1}}{a_{j+1} - a_j}$$

disini α_j menunjukkan slope untuk setiap garis segmen, dan β_j menunjukkan intersep I jika garis diperpanjang seperti pada gambar 3.6. (garis putus-putus).

FUNGSI NON LINIER

Meskipun fungsi-fungsi linier fleksibel tetapi tidak sesuai untuk beberapa situasi, dimana slope (laju perubahan) berubah sangat gradual dengan kenaikan tingkat polusi lingkungan. Dalam hal ini biasanya lebih tepat digunakan fungsi non linier. Ada dua tipe dasar fungsi-fungsi non linier yaitu 1) fungsi implisit, yang berupa plot pada grafik tetapi tidak ada persamaannya. 2) fungsi eksplisit, yang berupa persamaan matematis.

Contoh fungsi implisit adalah kurva subindek pH yang berbentuk lonceng, tetapi tidak ada persamaan matematis yang berhubungan meskipun persamaan eksplisit mungkin dapat dikembangkan untuk memperkirakan kurvanya. Untuk mengukur pH, pengguna indek membaca vilai subindek dari grafik yang digambarkan seperti berikut :



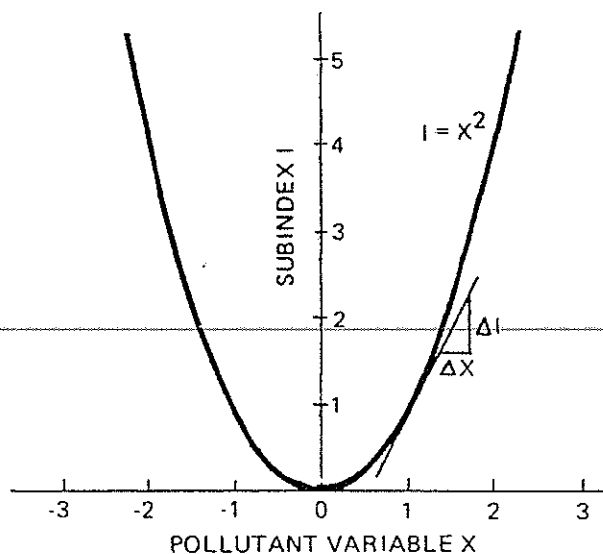
Gambar 3.7. Contoh Fungsi Implisit Subindek Nonlinier pH dari Indek Kualitas Air

Dalam fungsi-fungsi nonlinier, kurva berdasarkan pada persamaan matematis. Hal umum yang penting pada fungsi nonlinier adalah variabel polutan yang naik sampai ke pangkat lebih dari satu. Fungsi subindek tersebut :

$$I = X^c$$

dimana $c \neq 1$

Jika $c = 2$ akan dihasilkan parabola $I=X^2$, dengan kurva yang naik dengan cepat sesuai slopenya seperti gambar berikut :

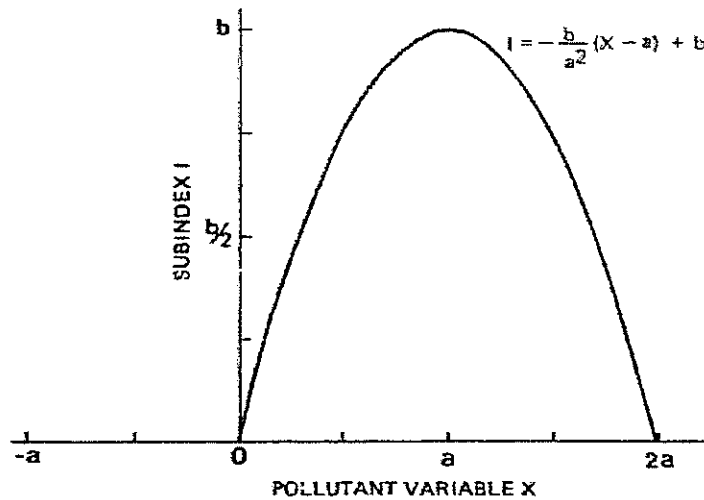


Gambar 3. 8. Contoh Fungsi Eksplisit Subindek Nonlinier, Parabola $I=X^2$

Pada bentuk parabola yang lebih umum seperti gambar di bawah dimana $I=b$, a maksimum pada saat $X=a$ dan $I=0$ pada saat $X=0$ atau $X=2a$:

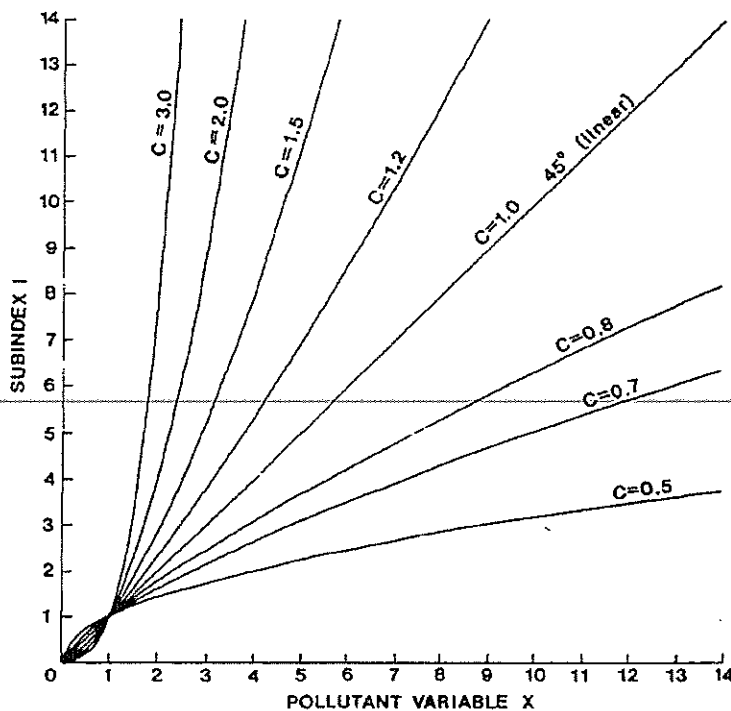
$$I = -\frac{b}{a^2} (X - a)^2 + b \quad (13)$$

for $0 \leq X \leq 2a$



Gambar 3.9. Contoh Fungsi Parabolik Subindek Berdasarkan Kualitas Air

Untuk variabel polutan X pada persamaan 12 dapat naik sesuai pangkatnya selain 2 sehingga menghasilkan variasi bentuk nonlinier :



Gambar 3.10. Plot fungsi subindek $I=X^c$ dengan nilai c yang berbeda

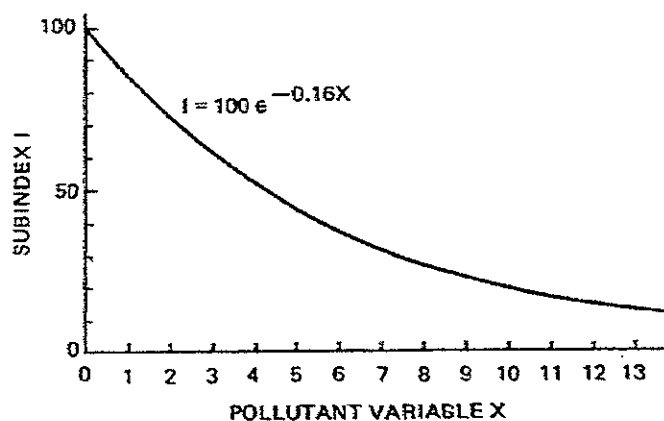
Fungsi nonlinier yang lain adalah fungsi eksponensial dimana variabel polutan X adalah eksponen dari konstanta :

$$I = c^X \quad (14)$$

Biasanya konstanta yang dipilih selain 10 adalah e ($e=2,71828128\dots$). Jika a dan b adalah konstan, bentuk umum fungsi eksponensial :

$$I = ae^{bX} \quad (15)$$

Kurva eksponensial berubah sesuai proporsi konstanta, sebagai contoh pada gambar di bawah, $I=100$ untuk $X=0$, untuk $X=1$, $I=85,2$ (85,2% dari 100)



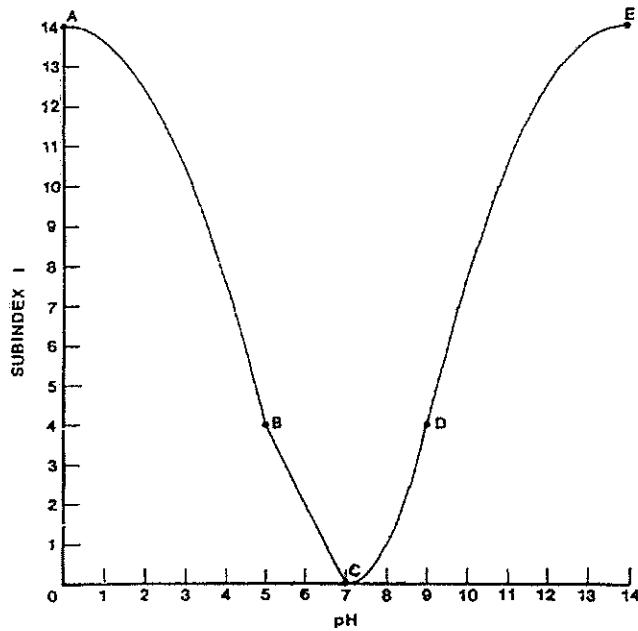
Gambar 3.11. Contoh Fungsi subindek eksponensial $I = ae^{bX}$ untu $a= 100$ dan $b=-0,16$

Fungsi Nonlinier Bersegmen

Meskipun persamaan nonlinier yang kompleks dapat digunakan untuk kurva dengan variasi bentuk yang berbeda, beberapa persamaan menjadi terlalu sulit. Pendekatan yang lebih fleksibel adalah membagi kurva menjadi beberapa bagian dan tiap bagian berupa persamaan nonlinier yang menghasilkan “fungsi nonlinier bersegmen” yang digunakan pada sejumlah indek kualitas air. Seperti fungsi linier bersegmen, garis segmen juga bertemu pada titik potong tertentu.

Fungsi nonlinier bersegmen yang digunakan untuk subindek pH dalam indek kualitas air yang mengandung empat segmen :

Segmen I(AB)	$0 \leq X \leq 5$	$I = -0,4X^2 + 14$
Segmen I(BC)	$5 \leq X \leq 7$	$I = -2X + 14$
Segmen I(CD)	$7 \leq X \leq 9$	$I = X^2 - 14X + 49$
Segmen I(DE)	$9 \leq X \leq 14$	$I = -0,4X^2 + 11,2X - 64,4$



Gambar 3.12. Contoh Fungsi Nonlinier Bersegmen pada pH untuk Indeks Kualitas Air

PENGGABUNGAN SUBINDEK

Proses penggabungan adalah salah satu langkah yang paling penting dalam peerhitungan setiap indeks lingkungan. Disini penyederhanaan (reduksi infoemasi) terjadi dan distorsi dapat terjadi.

Bentuk-Bentuk Penjumlahan

Fungsi-fungsi penggabungan yang paling sederhana adalah penjumlahan. Sering disebut sebagai penambahan subindek tanpa pemberatan, dimana tidak ada subindek yang naik dengan pangkat lebih dari satu atau disebut "linier sum":

$$I = \sum_{i=1}^n I_i \quad (16)$$

I_i = subindek untuk variabel polutan I

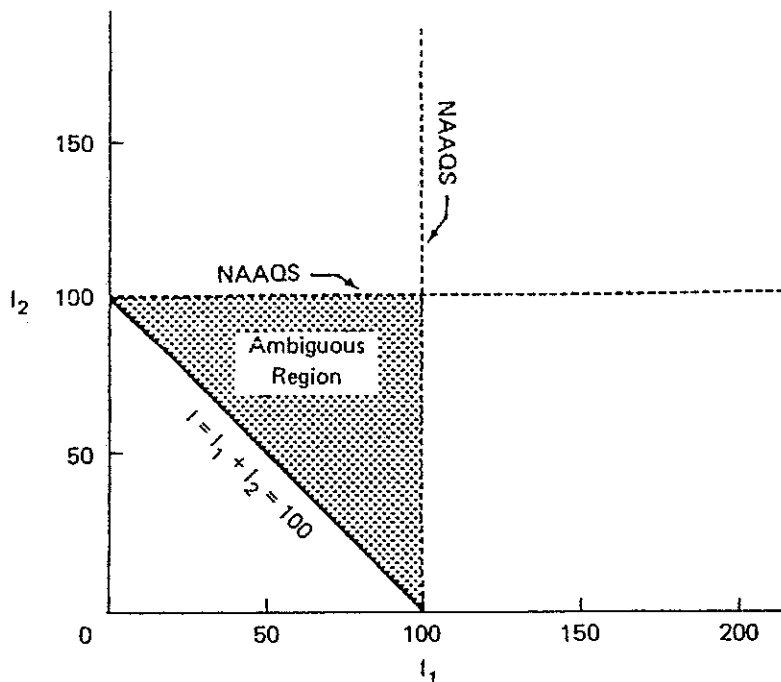
n = jumlah variabel polutan

Penjumlahan linier indek polusi udara dibentuk hanya dari dua subindek

$$I = I_1 + I_2 \quad (17)$$

Dalam indek yang sederhana ini diasumsikan I_1 dan I_2 dimana $I_1=0$ dan $I_2=0$ menunjukkan konsentrasi polutan nol untuk variabel polutan X_1 dan X_2 , dan $I_1 \geq 100$ dan $I_2 \geq 100$ menunjukkan konsentrasi pada tau di atas baku mutu. Jika subindek yang pada persamaan 17 melampaui 100 maka semua indek akan melampaui 100. Berdasarkan hal ini jika $I_1 \geq 100$ atau $I_2 \geq 100$ sehingga $I \geq 100$. Sistem penggabungan subindek dalam

bentuk yang sesuai jika selisih antar subindek besar (Polusi udara yang sangat berbahaya), Bagaimanapun kebanyakan pengguna akan mengharapkan I melebihi 100 dimaksudkan bahwa baku mutu telah terlampaui paling tidak oleh satu subindek dan sebenarnya memungkinkan terjadinya I yang melampaui 100 tanpa melebihi baku mutu. Sebagai conoth, jika tingkat polusi sedang terjadi pada kedua variabel polutan $I_1=50$ dan $I_2=50$ lalu $I=100$,Hal yang sama jika $I_1=60$ dan $I_2=70$ lalu $I=130$. Indek menunjukkan bahwa baku mutu terlampaui tetapi sebenarnya tidak terlampaui sehingga menghasilkan pembacaan yang mempunyai dua arti atau disebut “ambiguous”. Variaso kombinasi lain nilai subindek (I_1, I_2) yang menghasilkan dua arti untuk $I= 100$ contohnya $(5,95)$, $(20,80)$, $(35,65)$, $(60,40)$, $(75,25)$, $(99,1)$. Semua kombinasi berlaku untuk persamaan $I_2=100-I_1$, fungsi ini dapt digambarkan :



Gambar 3.13. Plot Penjumlahan Linier $I_1+I_2=100$ yang Menunjukkan “Daerah Dua Arti (Ambiguous Region)”

Untuk mengeliminasi terjadinya daerah dua arti dapat dilakukan dengan memberikan koefisien atau “pemberatan” dengan memodifikasi fungsi penggabungan. Pemberatan penjumlahan linier bentuk umumnya :

$$I = \sum_{i=1}^n w_i I_i \quad (18)$$

dimana

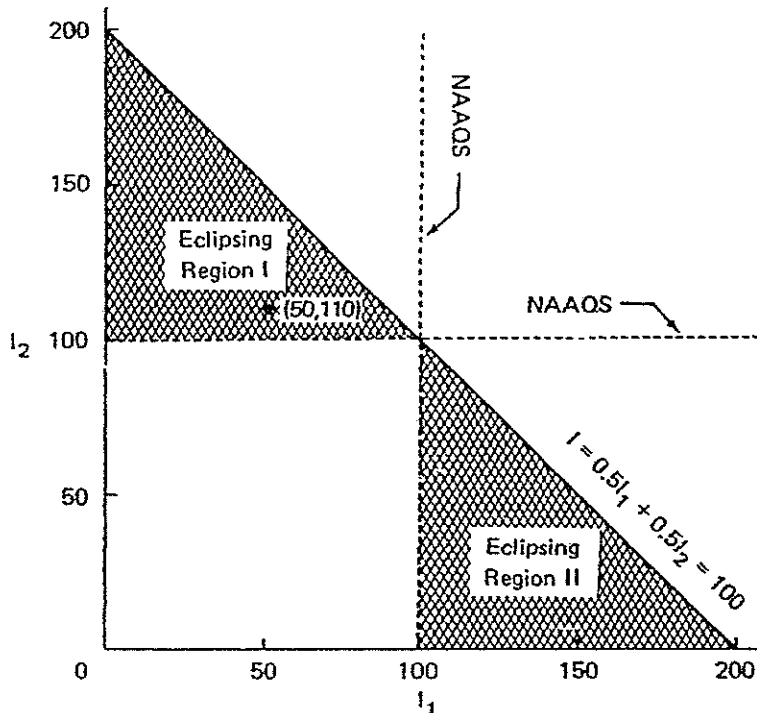
$$\sum_{i=1}^n w_i I_i = 1$$

Untuk kasus dua variabel :

$$\begin{aligned} I &= w_1 I_1 + w_2 I_2 & (19) \\ w_1 + w_2 &= 1 \end{aligned}$$

Hasil pemberatan w_1 dan w_2 , dengan asumsi $w_1 = w_2 = 0,5$ atau persamaan $I = 0,5 I_1 + 0,5 I_2$

Dapat digambarkan :



Gambar 3.14. Plot Penjumlahan Linier dengan Pemberatan $0,5 I_1 + 0,5 I_2 = 100$

Meskipun dengan pemberatan penjumlahan linier tidak terjadi daerah dua arti tetapi terdapat masalah yang lebih serius yang disebut “eclipsing” yang menggambarkan daerah tidak terestimasi (underestimate). Eclipsing terjadi saat kualitas lingkungan sangat rendah.

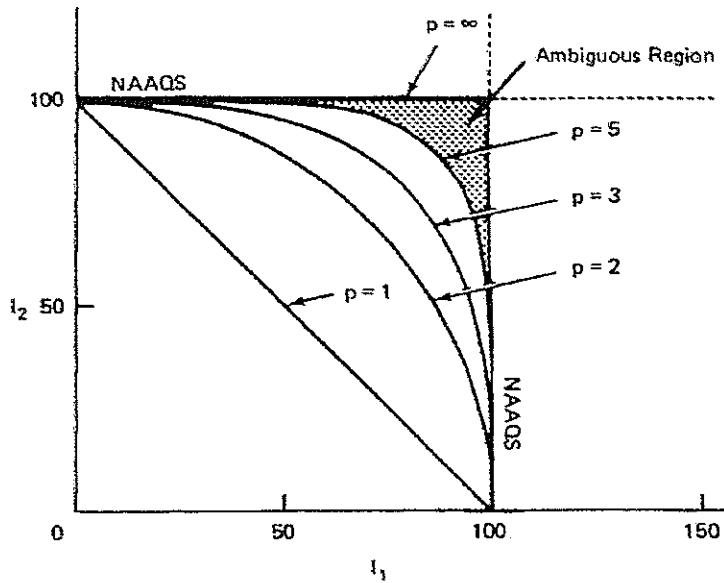
Root-sum-power

Untuk mengatasi daerah dua arti yang lain adalah dengan akar-jumlah-pangkat yang merupakan penggabungan fungsi non linier dengan bentuk :

$$I = \left[\sum_{i=1}^n I_i^p \right]^{1/p} \quad (20)$$

untuk kasus dua variabel

$$I = (I_1^p + I_2^p)^{1/p} \quad (21)$$

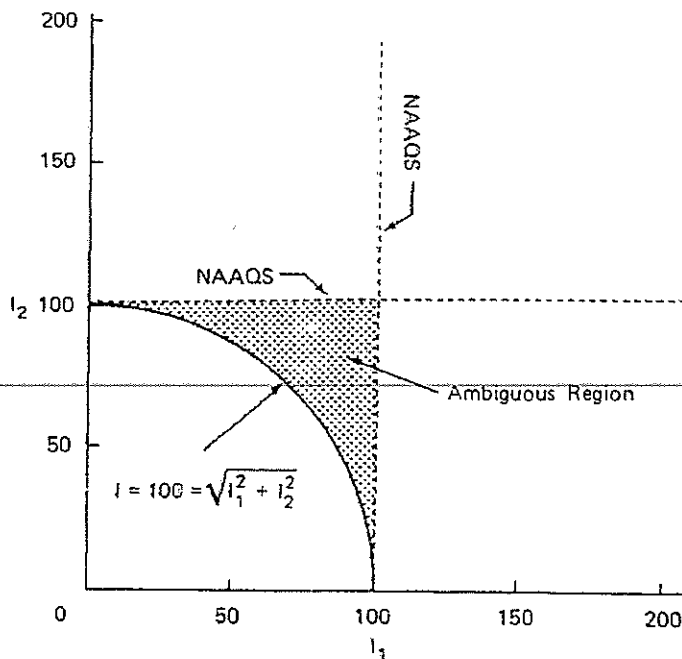


Gambar 3.15. Plot dari $I = (I_1^p + I_2^p)^{1/p}$ untuk nilai P yang berbeda

Jika $p=2$ fungsi penggabungan disebut akar-jumlah-kuadrat :

$$I = \sqrt{(I_1)^2 + (I_2)^2} \quad (22)$$

dengan plot :



Gambar 3.16. Plot dari fungsi penggabungan akar-jumlah-kuadrat (I_1, I_2)

Untuk membatasi kasus dimana p mendekati tak terhingga, akar-jumlah-pangkat mempunyai pola untuk penggabungan subindek. Fungsi yang lebih sederhana dengan pola yang sama dengan maksimum operator:

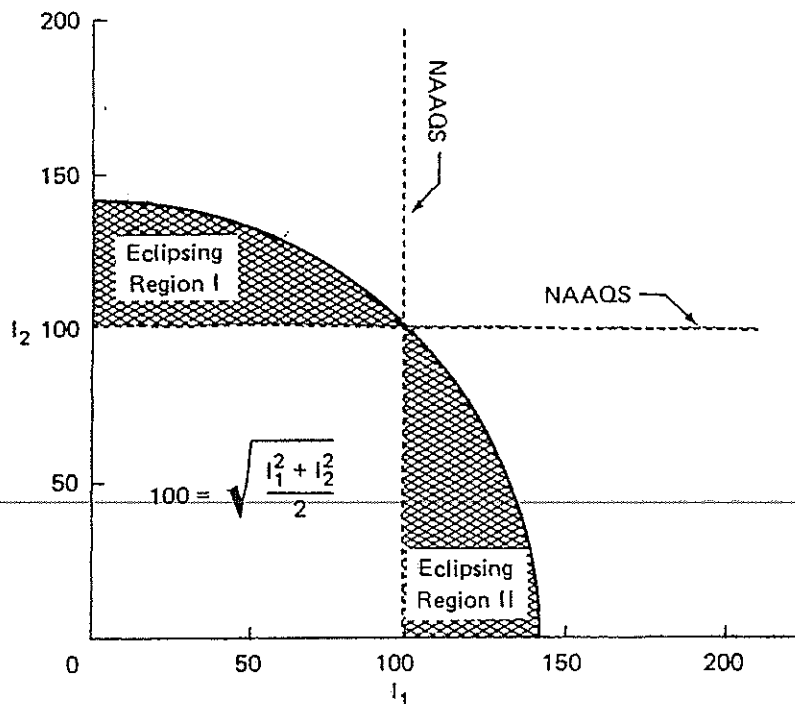
$$\lim_{p \rightarrow \infty} \left\{ [I_1^p + I_2^p]^{1/p} \right\} = \max \{I_1, I_2\} \quad (22)$$

Root-Mean-Square

Contoh lain bentuk penjumlahan adalah akar-rata-rata-kuadrat. Penggabungan ini sama dengan akar-jumlah-kuadrat, kecuali rata-rata aritmatik kuadrat subindek dihitung sebelum akar kuadrat. Untuk kasus dua variabel polutan :

$$I = \sqrt{(1/2)(I_1^2 + I_2^2)} \quad (23)$$

Plot fungsi ini berupa lingkungan dengan jari-jari $\sqrt{2}I$, sebagai contoh jika $I_1=50$ dan $I_2=120$ lalu $I=91,2$ dan yang melampaui baku mutu untuk variabel polutan X_2 adalah eclip:



Gambar 3.17. Plot penggabungan fungsi akar-rata-rata-kuadrat (I_1, I_2)

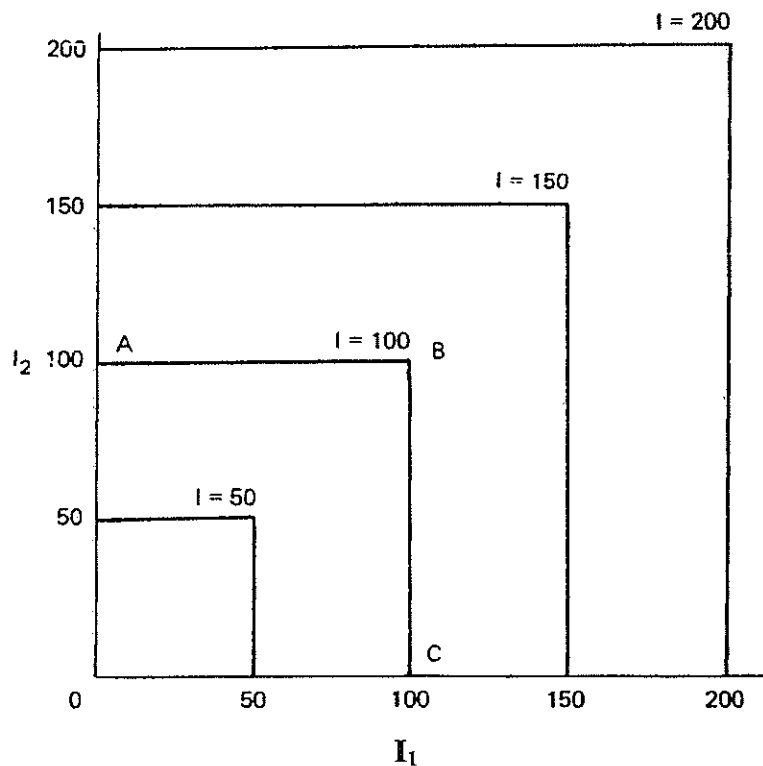
Maksimum Operator

Bentuk umum maksimum operator adalah:

$$I = \max \{I_1, I_2, \dots, I_i, \dots, I_n\} \quad (24)$$

Dalam maksimum operator diambil nilai yang terbesar dari semua subindek dan $I=0$ jika dan hanya jika $I_i=0$ untuk semua i .

Seperti pada fungsi-fungsi penggabungan yang lain pola maksimum operator untuk dua subindek $I = \max \{I_1, I_2\}$ dengan plot :



Gambar 3.18. Plot dari $I = \max \{I_1, I_2\}$ untuk nilai I yang berbeda

Sebagai contoh dalam penggunaan maksimum operator bila ada dua kasus indeks polusi udara pada dua hari yang berbeda yaitu hari pertama, subindek : $I_1 = 98$, $I_2=110$, $I_3=80$, dan $I_4=90$. Hari kedua sub indek : $I_1 = 0$, $I_2=110$, $I_3=5$, dan $I_4=0$, maksimum operator akan memberikan nilai yang sama yaitu $I=110$ untuk kedua kasus:

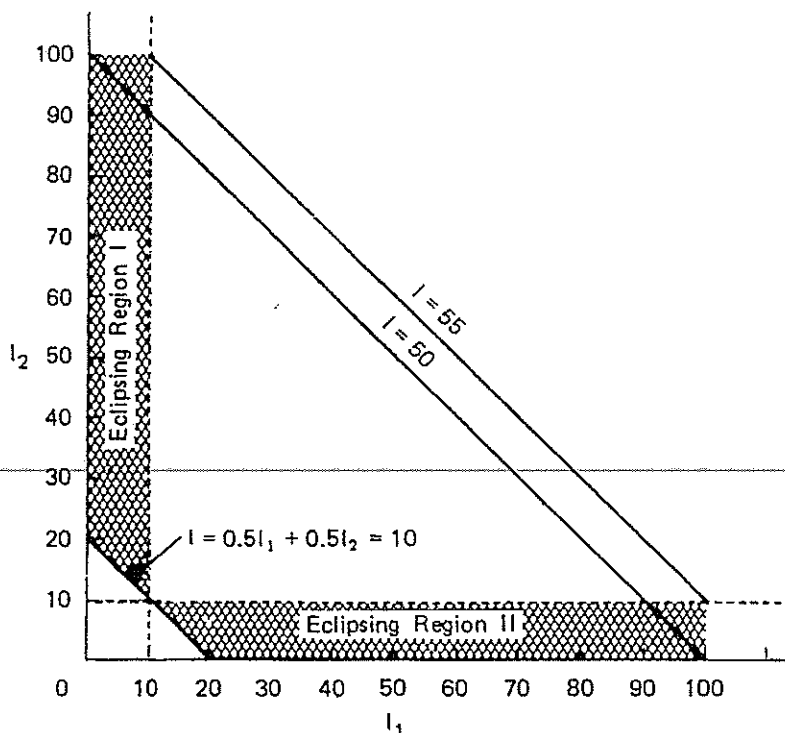
$$I = \max \{98, 110, 80, 90\} = 110$$

$$I = \max \{0, 110, 5, 0\} = 110$$

Beberapa peneliti akan skeptis pada hasil ini karena mereka akan merasa secara umum angka yang lebih besar pada kasus pertama menunjukkan polusi udara yang lebih berbahaya daripada kasus kedua. Catatan bahwa pada fungsi penggabungan seperti rata-rata aritmatik menghasilkan kasus pertama $I=94,5$ dan kasus kedua $I=57,5$. Gradasi ini tidak masalah. Hal yang lebih penting untuk kualitas udara adalah range tiap variabel sehingga maksimum operator tidak akan sesuai dan rata-rata aritmatik yang mungkin lebih baik.

Bentuk-Bentuk Perkalian

Pada skala turun $I = 0,5I_1 + 0,5I_2$ menunjukkan beberap garis untuk $I > 10$ nilai terbesar untuk I , area yang melalui titik $I_1=10$ dan $I_2= 100$ menghasilkan $I = (0,5)(10) + (0,5)(100) = 55$. Berdasarkan contoh ini terjadi “eclipsing” dengan luas relatif terhadap nilai $10 < I < 55$. Hasil ini menunjukkan masalah eclipsing yang serius pada indek-indek skala turun dengan bentuk penjumlahan (seperti penjumlahan linier dengan pemberatan). Secara umum bentuk penjumlahan kurang baik untuk penggabungan pada subindek skala turun :



Gambar 3.19. Plot $I = 0,5I_1 + 0,5I_2$ Pada Skala Turun Yang Menunjukkan Wilayah Eclipsing untuk $I_1 \leq 10$ atau $I_2 \leq 10$ Sementara $I > 10$

Utuk mengatasi masalah ini dilakukan dengan bentuk perkalian yang paling umum fungsi penggabungan perkalian adalah hasil pemberatan yang mempunyai bentuk umum:

$$I = \prod_{i=1}^n I_i^{w_i} \quad (25)$$

$$\text{dimana : } \sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (25a)$$

Fungsi penggabungan ini pada semua bentuk perkalian, indek adalah nol jika ada satu subindek yang nol.

$$I = \prod_{i=1}^n I_i^{w_i} (0)^{w_i} = 0 \quad (26)$$

Karakteristik ini mengeliminasi masalah eclipsing, karena jika satu subindek berada di kualitas lingkungan yang jelek, maka semua indek akan berkualitas lingkungan jelek pula. Sebaliknya I=0 jika dan hanya jika satu subindek adalah nol dan karakteristik ini mengeliminasi masalah dua arti.

Jika nilai maksimum untuk setiap subindek pada persamaan 25 adalah 100, nilai maksimum akan 100. Hal ini dapat dijelaskan, jika diasumsikan bahwa setiap subindek mempunyai nilai konstanta maksimum I_{\max} , $I_i = I_{\max}$ untuk semua I, persamaan 25 :

$$I = \prod_{i=1}^n [I_{\max}]^{w_i} \quad (27)$$

logaritma pada kedua sisi, persamaan 27 menjadi :

$$\log I = \sum_{i=1}^n w_i \log I_{\max} = \log I_{\max} \sum_{i=1}^n w_i \quad (28)$$

substitusi persamaan 25a ke persamaan 27 :

$$\log I = (\log I_{\max}) (1) = \log I_{\max} \quad (29)$$

$$\text{Dengan antilogaritma : } I = I_{\max} \quad (30)$$

Persamaan 26 dan 30 terlihat bahwa jika range tiap subindek adalah 0 sampai 100 lalu range untuk semua indek dari I=0 sampai I=100.

Untuk kasus sederhana yang terdiri dua subindek :

$$I = I_1^{w_1} I_2^{w_2} \quad (31)$$

dimana : $w_1+w_2 = 1$

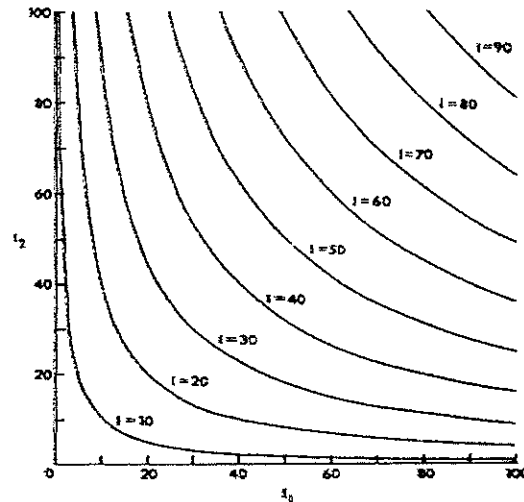
dengan pemberatan $w_1=w_2=0,5$

$$I = I_1^{0,5} I_2^{0,5} \quad (32)$$

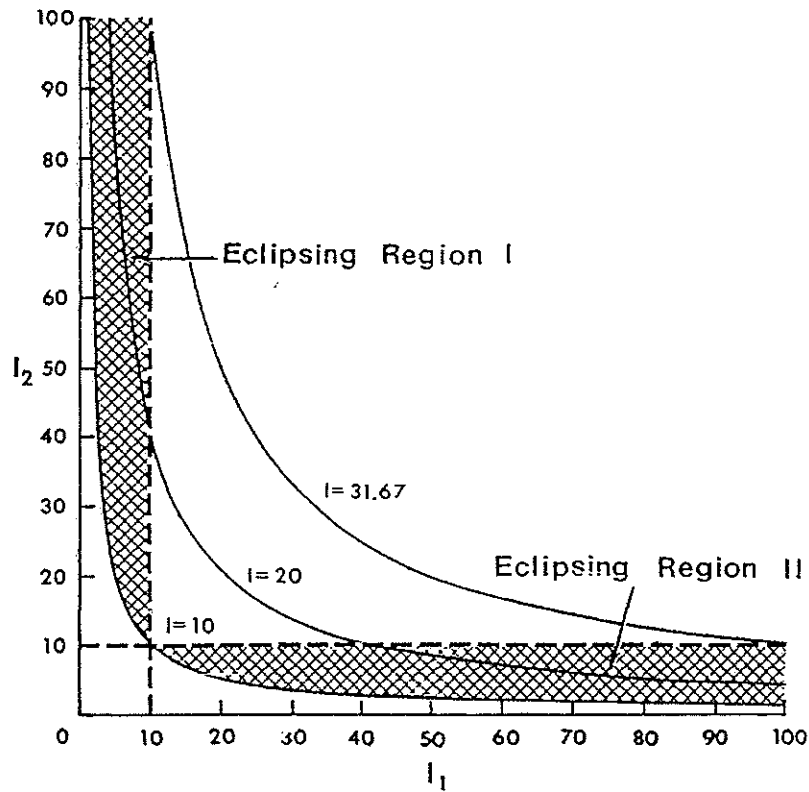
Dengan fungsi penggabungan untuk I_2 sebagai fungsi I dan I_1 :

$$I_2 = \frac{I^2}{I_1} \quad (33)$$

Persamaan ini jika diplot sebagai berikut :



Gambar 3.20. Plot Fungsi Penggabungan Perkalian $I = I_1^{0,5} I_2^{0,5}$ untuk Nilai I Berbeda
Seperti pada gambar 3.19 wialyah dengan kulaitas lingkungan rendah (garis putus-putus)
 $I_1 = 10$ dan $I_2 = 10$, eclipsing terjadi jika $I_i \leq 10$ untuk setiap i dan $I > 10$. Untuk pemberatan
pada persamaan 33, dua daerah eclipsing terbentuk. Satu eclipsing terbentuk oleh kurva I
 $= 10$ dan garis $I_1 = 10$, dan eclipsing yang lain terbentuk oleh kurva $I = 10$ dan garis $I_2 = 10$.
Nilai terbesar untuk I dimana eclipsing dapat terjadi adalah untuk $I = 10\sqrt{10} = 31,62$,
dimana kurva melalui titik $(10, 100)$ dan $(100, 10)$:



Gambar 3.21. Plot hasil pemberatan $I = I_1^{0.5} I_2^{0.5}$ yang Menunjukkan daerah Eclipsing $I_1 \leq 10$ atau $I_2 \leq 10$ tetapi $I > 10$.

Versi umum hasil pemberatan adalah fungsi penggabungan geometrik :

$$I = \left[\prod_{i=1}^n I_i^{g_i} \right]^{1/\gamma} \quad (34)$$

dimana

$$\gamma = \sum_{i=1}^n g_i$$

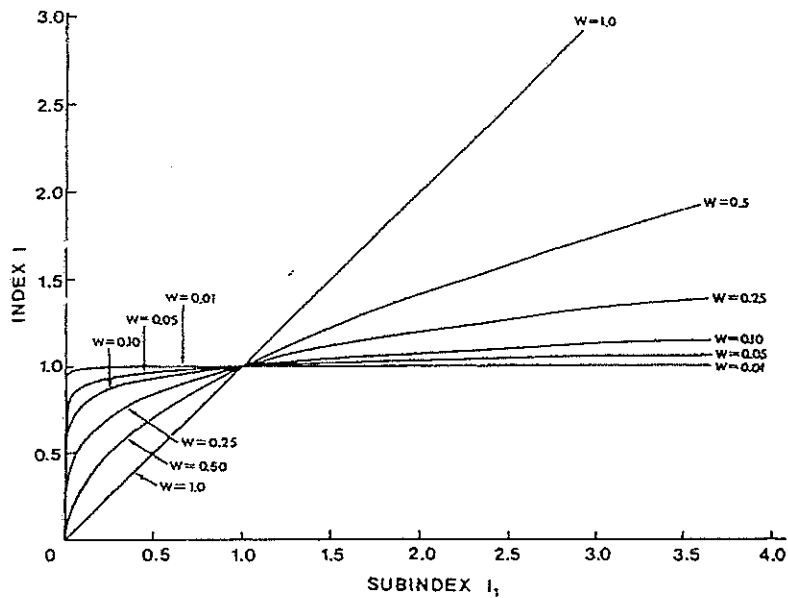
Pada persamaan tersebut jika setiap subindek naik $1/\gamma$ persamaannya menjadi

$$w_i = \frac{g_i}{\gamma} = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^n g_i} \quad (35)$$

Jumlah dari pemberatan dalam unit :

$$\sum_{i=1}^n w_i = \frac{\sum_{i=1}^n g_i}{\sum_{i=1}^n g_i} = 1 \quad (36)$$

Sebenarnya pemberatan menjadi lebih kesil, kurva berubah dari bentuk gradual ke bentuk curam. Karakteristik nonlinier tersebut bila diplot I dengan I_1 menggunakan persamaan $I=I_1^w$:



Gambar 3.22. Plot Fungsi Penggabungan $I=I_1^w$ yang Menunjukkan Ketajaman Kurva yang Mendekati Nol

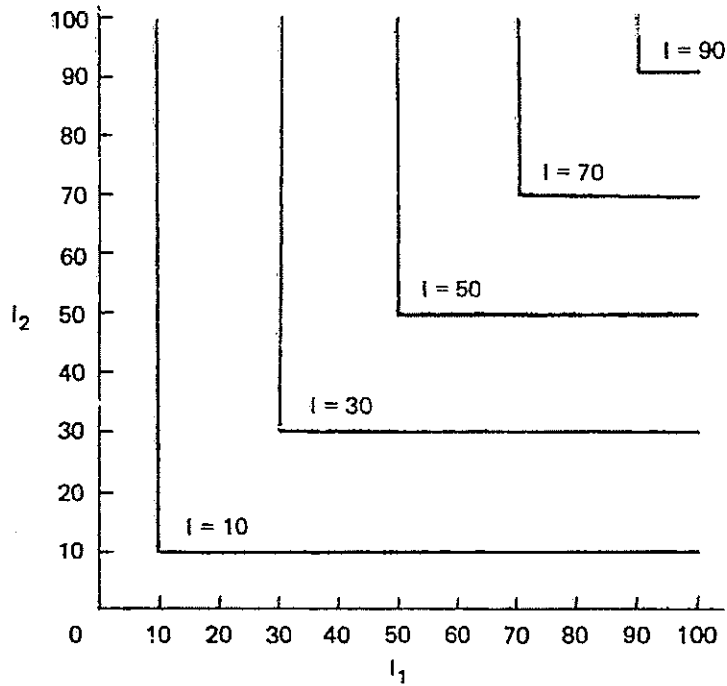
Minimum Operator

Minimum operator saat diterapkan pada subindek skala menurun, bentuk dan performanya sama dengan skala naik maksimum operator dimana :

$$I = \min \{ I_1, I_2, \dots, I_j, \dots, I_n \}$$

untuk kasus dua subindek skala menurun:

$$I = \max \{ I_1, I_2 \}$$



Gambar 3.23. Plot $I = \min I_1, I_2$ dengan nilai I Berbeda

Seperti pada hasil pembertan, fungsi-fungsi minimum operator tidak pernah menyentuh dua aksis, sehingga tidak terjadi eclipsing dan daerah dua arti. Konsekuensinya minimum operator menjadi penggabungan yang baik untuk subindek skala turun.

BAB IV

INDEKS KUALITAS AIR (IKA)

Umum

Maksud pemantauan kualitas air terhadap badan air adalah sebagai bahan kajian guna mengevaluasi program pengendalian kualitas lingkungan pada umumnya dan kualitas perairan pada khususnya. Interpretasi data kualitas air tersebut seringkali sangat kompleks. Hal ini dikarenakan variabel yang diukur terlalu banyak, peruntukan kawasan perairan untuk berbagai peruntukkan, serta standar ambien yang ditetapkan pada suatu wilayah tidak cocok untuk katagori banyak penggunaan.

Dalam studi ini, data kualitas air diperoleh dari data sekunder hasil pengamatan maupun hasil studi yang pernah dilakukan oleh beberapa instansi. Meskipun sudah beberapa kali badan air tersebut diamati seringkali teknik pengamatan terhadap sampel yang dikumpulkan tidak berada pada lokasi yang titik yang sama sehingga untuk menampilkan secara statistik banyak hambatan.

Perumusan Indek Kualitas Air (IKA)

Pada dasarnya indek kualitas air adalah merupakan petunjuk atau informasi guna menterjemahkan tingkat pencemaran yang didasarkan hubungan kuantitas tiap parameter air. Adanya penurunan kualitas air permukaan dapat diketahui dari informasi IKA. Disamping itu , IKA juga merupakan perangkat analisis untuk menyederhanakan informasi sehingga dalam menyajikan kualitas suatu badan air cukup disajikan dalam nilai tunggal, sehingga dapat dibandingkan antara kualitas perairan yang satu dengan yang lain.

Penilaian IKA didasarkan atas pengaruh tiap parameter bahan pencemar terhadap peruntukkan kualitas air. Langkah awal yang ditempuh dalam membuat perumusan IKA adalah meterjemahkan pengaruh parameter pencemar dalam bentuk fungsi subindeks. Angka Indeks Kualitas Air disajikan antara 0 hingga 100, nilai menyatakan kualitas badan air yang paling jelek, sedangkan nilai 100 nilai yang paling bagus, dimana IKA merupakan penjumlahan antara perkalian parameter yang ditinjau dengan bobot setiap parameter.

Mempertimbangkan kondisi data kualita air dari berbagai pengamatan yang tidak seragam, indeks kualita air yang diinformasikan juga sangat terbatas. Namun demikian

informasi ini paling tidak dapat membantu untuk program pengendalian lingkungan. Adapun formulasi IKA dilakukan dengan mengkombinasikan individual subindeks dengan mengagregasikan nilai ini dengan memperhatikan faktor bobot kepentingan yang dinyatakan :

$$IKA = \sum_{i=1}^n (I_i) \times (W_i)$$

Catatan :

IKA = Indeks Kualitas Air (0-100),

I_i = Subindeks Peubah parameter pencemar (0-100),

W_i = Satuan Bobot peubah parameter pencemar (0-1),

n = Jumlah parameter pencemar yang ditinjau

Oleh karena itu, IKA diperhitungkan pada studi ini hanya untuk berbagai parameter tertentu seperti Suhu, pH, TDS, DHL, DO, BOD, NO₃, NH₃, Cl, PO₄, Fe dan Mn dengan penentuan bobot sebagaimana tabel :

Tabel 4.1
Penentuan Bobot setiap pencemar yang digunakan
untuk menentukan besarnya IKA

No	Parameter	Bobot
1	Temperatur	0,070
2	Total Disolved Solid	0,060
3	Derajad Keasaman (pH)	0,090
4	Daya hantar listrik (DHL)	0,700
5	Oksigen Terlarut (DO)	0,125
7	BOD	0,110
8	NO ₃	0,070
9	NH ₃	0,070
10	PO ₄	0,050
11	Fe	0,050
12	Mn	0,050
13	Fecal colli	0,115

Sumber : Dinius, S.H, Design of An Index Of Water Quality (1987)

Sedangkan hubungan indeks dengan peruntukan perairan dijelaskan sebagai berikut :

Tabel 4.2
Nilai Skoring berdasarkan Klasifikasi Indeks
Peruntukan Badan Air

Persen

100	Tidak dibutuhkan pemulihan	Diterima untuk semua jenis olahraga perairan	Diterima untuk perikanan/ Semua ikan	Pemulihan tidak dibutuhkan	↑ D I T E R I M A ↓	↑ D I T E R I M A ↓		
90	Kebutuhan Pemulihan secara sederhana			Pemulihan ringan dibutuhkan untuk kualitas air industri				
80	Dibutuhkan treatment yang lebih ekstensif	Menjadi tercemar, diterima dengan catatan kandungan bakteri	Peka untuk jenis ikan trout Meragukan untuk perikanan yang sensitif	Tidak dibutuhkan treatment untuk industri normal				
70								
60	Meragukan	Belum tentu menimbulkan penyakit apabila terjadi kontak langsung	Hanya untuk perikanan yang tahan	Untuk semua industri membutuhkan treatment				
50								
40	TIDAK DAPAT DITERIMA	Hanya untuk kapal	Hanya untuk perikanan yang agak sensitif	Hanya untuk industri tertentu			Tercemar nyata	
30		Kenampak-an tercemar secara nyata	TIDAK DAPAT DITERIMA					TIDAK DAPAT DITERIMA
20		Kenampak-an tercemar						
10	DAPAT DITERIMA	dan tidak dapat diterima					DAN TIDAK DITERIMA	TIDAK DAPAT DITERIMA
0								
	Pemenuhan Air Minum	Rekreasi	Ikan, kerang²an dan binatang perairan	Industri dan Pertanian	Navigasi	Transportasi Air Limbah		

BAB V INDEKS STANDAR PENCEMAR UDARA (ISPU)

Umum

Pemantauan kualitas udara diperlukan untuk memperoleh nilai yang digunakan sebagai alat untuk pengendalian pencemaran udara suatu daerah. Data yang diperoleh dapat dibandingkan dengan standar kualitas udara sehingga dapat diperoleh indikasi pengaruh pencemaran udara terhadap kesehatan lingkungan. Adapun terminologi pengelolaan kualitas udara digunakan untuk menjelaskan semua fungsi yang dipakai untuk pengendali atmosfer.

Standar kualitas ambient kualitas udara baik primer maupun sekunder ditentukan berdasarkan *Clean Air Act Amandement* Tahun 1970; Standar primer didasarkan pada kriteria kualitas udara yang berkaitan dengan perlindungan keselamatan masyarakat, tanaman, binatang, properti dan material lainnya. Standar primer dan sekunder terdiri dari 6 (enam) bahan pencemar yang dijelaskan pada tabel berikut :

Tabel 5.1
Standar Nasional Ambient Kualitas Udara

No	Pencemar	Primer (ppm)	Sekunder (ppm)
1	Material Partikulat		
	- Tahunan (rata-rata geometrik)	75	60
	- Maksimum 24 jam	260	150
2	Lead		
	-Rata-rata 3 bulan	1,5	idem
3	Hidrokarbon		
	- Maksimum 3 jam (pukul 06.00- 09.00)	0,24	idem
4	Karbon Monooksida		
	- Maksimum 8 jam	9,0	
	- Maksimum 1 jam	35	idem
5	Sulfur Oksida		
	- Tahunan (Rata2 Aritmatik)	0,03	
	- Maksimum 24 jam	0,14	
	- maksimum 3 jam	-	0,5
6	Nitrogen Oksida		
	- Tahunan (Rata2 Aritmatik)	0,05	idem
7	Photokimia Oksida		
	- Maksimum 1 jam	0,12	idem

Selanjutnya untuk keperluan evaluasi Indeks Standart Pencemar Udara (ISPU) data diperoleh dari hasil laporan dan publikasi oleh lembaga resmi seperti Puserdal Bapedal, Hiperkes Dati I Jawa Tengah, Bapedalda dan BLH Kodia . Sehingga sistematika dan

pemilihan lokasi pantau yang telah ditetapkan akan mempengaruhi hasil observasi yang akhirnya berpengaruh pada penentuan ISPUnya.

Perumusan Indeks Standart Pencemar Udara (ISPU)

Merupakan perangkat analisis yang digunakan untuk menyederhanakan informasi terhadap peubah pencemar udara (CO, NO_x, O_x, So_x, TSP) dalam suatu nilai tunggal, sehingga dapat dibandingkan antara tempat yang satu dengan tempat yang lain.

Angka dan katagori Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) didasarkan pada Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor KEP-45/MENLH/10/1997 Tanggal 13

Oktober 1997 Tentang Indeks Standar Pencemar Udara sebagaimana tabel 2.6. berikut :

Tabel 5.2
Angka dan Katagori Indeks Pencemar Udara

KATAGOR I	RENTANG	PENJELASAN
Baik	0-50	Tingkat Kualitas udara yang tidak memberikan efek bagi kesehatan manusia atau hewan dan tidak berpengaruh pada tumbuhan, bangunan ataupun nilai estetika
Sedang	51-100	Tingkat Kualitas udara yang tidak berpengaruh pada kesehatan manusia atau hewan tetapi berpengaruh pada tumbuhan yang sensitif dan nilai estetika
Tidak Sehat	101-199	Tingkat Kualitas udara yang bersifat merugikan pada manusia ataupun kelompok hewan yang sensitif atau bisa menimbulkan kerusakan pada tumbuhan dan nilai estetika
Sangat Tidak sehat	200-299	Tingkat Kualitas udara yang dapat merugikan kesehatan pada sejumlah segmen populasi yang terpapar
Berbahaya	300-lebih	Tingkat kualitas udara berbahaya yang secara umum dapat merugikan kesehatan yang serius pada populasi

Sumber : Lampiran Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor : KEP-45/MENLH/10/1997

Angka 0 menunjukkan kualitas udara paling baik, sedang angka 300 menunjukkan kualitas udara yang sangat buruk atau sangat berbahaya bagi kesehatan manusia. Ini berarti

kualitas udara dikatakan baik bila ISPU kurang dari 50. Sedangkan pengaruh besarnya Indeks Standar Pencemar Udara terhadap kesehatan manusia, untuk setiap parameter pencemar mengacu pada Keputusan Kepala Badan Pengendalian Dampak Lingkungan (Bapedal) Nomor KEP-107/KABAPEDAL/II/1997 Tanggal 21 Nopember 1997 Tentang Pedoman Teknis Perhitungan dan Pelaporan Serta Informasi Indeks Standar Pencemar Udara sebagaimana tabel 2.7. berikut :

Tabel 5.3
Pengaruh Indeks Standar Pencemar Udara
Untuk Setiap Parameter Pencemar

Kategori	Rentang	Carbon Monooksida (CO)	Nitrogen (NO ₂)	Ozon (O ₃)	Sulfur Oksida (SO ₂)	Partikulat
Baik	0-50	Tidak ada efek	Sedikit berbau	Luka pada beberapa spesies tumbuhan akibat kombinasi dengan SO ₂ selama 4 jam	Luka pada beberapa spesies tumbuhan akibat kombinasi O ₃ selama 4 jam	Tidak ada efek
Sedang	51-100	Perubahan kimia darah tapi tidak terdeteksi	Berbau	Luka pada beberapa spesies tumbuhan	Luka pada beberapa spesies tumbuhan	Terjadi penurunan pada jarak pandang
Tidak sehat	101-199	Peningkatan pada gejala kardiovaskular pada perokok yang sakit jantung	bau dan Kehilangan warna. Peningkatan reaktivitas pembuluh tenggorokan pada penderita asma	Penurunan kemampuan pada atlet yang berlatih keras	Bau ,Meningkatnya kerusakan tanaman	jarak pandang turun dan terjadi pengotoran debu dimana - mana
Sangat tidak sehat	200-299	Meningkatnya gejala kardiovaskular pada orang bukan perokok yang berpenyakit jantung dan akan tampak. Beberapa kelemahan yang terlihat secara nyata	Meningkatnya sensitivitas yang berpenyakit asma dan bronhitis	Olah raga ringan mengakibatkan pengaruh pernafasan pada pasien yang berpenyakit paru-paru kronis	Meningkatnya sensitivitas pada pasien berpenyakit asma dan bronhitis	Meningkatnya sensitivitas pada pasien berpenyakit asthma dan bronhitis
Berbahaya	300-lebih	Tingkat yang berbahaya bagi semua populasi yang terpapar				

Sumber : Lampiran Keputusan Kepala Bapedal Kep-107/KABAPEDAL/II/1997.

Parameter - parameter dasar untuk Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) dan periode waktu pengukuran didasarkan pula pada Lampiran Keputusan Kepala Badan Pengendalian Dampak Lingkungan Nomor KEP-107/KABAPEDAL /II/1997 Tanggal 21 Nopember 1997 Tentang Pedoman Teknis Perhitungan dan Pelaporan Serta Informasi Indeks Standar Pencemar Udara sebagaimana tabel 2.2.6 berikut :

Tabel 5.4
Parameter -Parameter Dasar Untuk Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)
Beserta Periode Waktu Pengukurannya

No.	Parameter	Waktu Pengukuran
1	Partikulat (PM 10)	24 jam (Periode Pengukuran rata-rata)
2	Sulfur Dioksida (SO ₂)	24 jam (Periode Pengukuran rata-rata)
3	Carbon Monoksida (CO)	8 jam (Periode Pengukuran rata-rata)
4	Ozon (O ₃)	1 jam (Periode Pengukuran rata-rata)
5	Nitrogen Dioksida (NO ₂)	1 jam (Periode Pengukuran rata-rata)

Sumber : Lampiran Keputusan Kepala Bapedal Kep-107/KABAPEDAL/11/1997.

Sehingga pada dasarnya ISPU dibuat untuk mengagregasikan beberapa faktor yang cukup kompleks dari kualitas udara. Adapun perumusan ISPU yang didasarkan pada konsentrasi polutan hasilnya dapat diskoring dengan kriteria indeks kualitas udara sehingga batas Indeks Standar Pencemar Udara dapat disusun dalam bentuk tabel dan grafis untuk lebih mudah penelaahannya . Namun dalam kaitan penelitian dimana data lapangan sebagian besar dalam satuan ppm maka tabel dibawah ini ditunjukkan batas indeks dalam bentuk dua satuan sesuai keputusan diatas.

Tabel 5.5
Batas Indeks Standar Pencemar Udara Dalam satuan SI

ISPU	24 jam PM 10 µg/m ³	24 jam SO ₂ µg/m ³ (ppm)	8 jam CO mg/m ³ (ppm)	1 jam O ₃ µg/m ³ (ppm)	1 jam NO ₂ µg/m ³ (ppm)
50	50	80 (0,0300)	5 (4,500)	120 (0,6000)	(2)
100	150	365 (0,1400)	10 (9,0000)	235 (0,1160)	(2)
200	350	800	17 (15,0000)	400 (0,2000)	1130 (0,6000)
300	420	1600	34 (30,0000)	800 (0,4000)	2260 (1,2000)
400	500	2100	46 (40,0000)	1000 (0,5000)	3000 (1,6000)
500	600	2620	57,5 (50,0000)	1200 (0,6000)	3750 (2,0000)

Sumber : Lampiran Keputusan Kepala Bapedal Kep-107/KABAPEDAL/11/1997 dan Hasil konversi ke satuan ppm
Catatan :

1. Pada 25°C dengan tekanan normal 760 mm Hg,
2. Tidak ada indeks yang dapat dilaporkan pada konsentrasi rendah dengan jangka pemaparan yang pendek.

Metode Perhitungan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)

Perhitungan besarnya indeks parameter - parameter dasar didasarkan pula pada Lampiran Keputusan Kepala Badan Pengendalian Dampak Lingkungan Nomor KEP-107/KABAPEDAL /II/1997 Tanggal 21 Nopember 1997 Tentang Pedoman Teknis Perhitungan dan Pelaporan Serta Informasi Indeks Standar Pencemar Udara sebagaimana berikut :

- Konsentrasi ambient dinyatakan dalam (X_x) dalam satuan ppm, mg/m³ dan lainnya
- Angka nyata Indeks Standar Pencemar Udara dinyatakan dalam (I),
- Rumus yang digunakan dalam perhitungan adalah :

$$I = \frac{I_A - I_B}{X_A - X_B} (X_x - X_B) + I_B$$

dimana :

- I = ISPU terhitung
- I_A = ISPU batas atas
- I_B = ISPU batas bawah
- X_A = Ambien batas atas
- X_B = Ambien batas bawah
- X_x = Kadar Ambien nyata hasil pengukuran

CONTOH PERHITUNGAN

Diketahui konsentrasi udara ambien untuk jenis parameter SO₂ adalah 322 µg/m³, kemudian konsentrai tersebut diubah dalam bentuk angka Indeks Standar Pencemar Udara adalah sebagai berikut (dari tabel di atas) :

X_x = Kadar Ambien nyata hasil pengukuran (diketahui) 322 µg/m³,

I_A = ISPU batas atas = 100 (baris3)

I_B = ISPU batas bawah = 50 (baris2)

X_A = Ambien batas atas = 365 (baris3)

X_B = Ambien batas bawah = 80 (baris2)

Tabel 5.6
Batas Indeks Standar Pencemar Udara Dalam satuan SI

ISPU	24 jam PM 10	24 jam SO ₂	8 jam CO	1 jam O ₃	1 jam NO ₂
	μg/m ³	μg/m ³	μg/m ³	μg/m ³	μg/m ³
50	50	80	5	120	(2)
100	150	365	10	235	(2)
200	350	800	17	400	1130
300	420	1600	34	800	2260
400	500	2100	46	1000	3000
500	600	2620	57,5	1200	3750

Sumber : Lampiran Keputusan Kepala Bapedal Kep-107/KABAPEDAL/11/1997.

Sehingga angka-angka tersebut dimasukkan dalam rumus menjadi :

$$I = \frac{I_A - I_B}{X_A - X_B} (X_x - X_B) + I_B = \frac{100 - 50}{365 - 80} (322 - 80) + 50 = 92,45$$

Jadi konsentrasi udara ambien SO₂ 322 μg/m³, dirubah menjadi Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) adalah sebesar 92,45 atau dibulatkan 92.

BAB VII INDEKS BIOTA PERAIRAN DAN TERESTERIAL

Umum

Perubahan yang terjadi pada lingkungan perairan sebagai akibat adanya masukan bahan pencemar akan menyebabkan perubahan didalam penyebaran dan kelimpahan jenis organisme. Karena kumpulan jenis (spesies) organisme ini merupakan suatu populasi, yang secara totalitas nantinya membentuk komunitas, maka perubahan mutu lingkungan ini dapat mengakibatkan terjadinya perubahan pada struktur komunitas organisme tersebut.

Kehidupan di dalam perairan biasanya masih dapat bertahan dalam bentuk struktur komunitas yang khas, meskipun berada dalam kondisi lingkungan yang kurang menguntungkan. Keadaan struktur komunitas organisme yang khas ini dapat dijadikan indikator untuk menilai kemandirian ekosistem perairan di mana organisme tersebut berada. Organisme air yang umum dipakai sebagai indikator biotik adalah : **Plankton, Benthos dan Nekton.**

Metode Penentuan Indeks Biotik

Metode perhitungan indeks biotik dapat dilakukan dengan dua sistem yaitu: sistem saprobik (penilaian saprobitas perairan) dan sistem diversitas (penilaian keanekaragaman dan kelimpahan jenis organisme).

Sistem Saprobitas

Pengukuran indeks saprobik pada umumnya dilakukan pada perairan yang diduga mengalami pencemaran bahan organik. Dengan demikian, besarnya angka/indek yang diperoleh merupakan petunjuk tentang tingkat pencemaran bahan organik atau saprobitas perairan.

Penilaian tingkat saprobitas perairan dengan sistem ini dapat dilakukan dengan dua cara.

- a, dengan pendekatan kualitatif, yaitu dengan melihat kelompok organisme yang dominan saja (sesuai karakter saprobitasnya).
- b, dengan pendekatan kuantitatif, yaitu dengan perhitungan empirik berdasarkan kelimpahan jenis dan struktur komunitasnya.

Dari dua pendekatan tersebut dapat dinyatakan bahwa pendekatan kuantitatif lebih dapat diandalkan, khususnya untuk keperluan penilaian tingkat pencemaran dan kemantapan ekosistem perairan.

Dengan pendekatan kuantitatif, ada dua cara yang biasa digunakan untuk penilaian saprobitas perairan, yaitu: **Indek saprobik (IS)** dan **Koefisien saprobik (KS)**.

Indek saprobik (IS) dapat dihitung berdasarkan cara Pantle and Buck (Persoone and De Pauw, 1979) dengan rumus :

$$IS = (S \times h) / h$$

dimana :

IS : indek saprobik

S : tingkat saprobitas dengan ketentuan :

S = 1, untuk kelompok organisme oligosaprobik

S = 2, untuk kelompok organisme Mesosaprobik

S = 3, untuk kelompok organisme Mesosaprobik

S = 4, untuk kelompok organisme Polisaprobik

h : Frekuensi dari keberadaan organisme yang dijumpai;

h = 1, untuk organisme yang jarang dijumpai

h = 2, untuk organisme yang sering dijumpai

h = 3, untuk organisme yang sangat berlimpah.

Koefisien saprobik dapat dihitung dengan rumus Dresscer and Van Der Mark (Persone and De Pauw, 1979) sebagai berikut:

$$KS = (C + 3D - B - 3A) / (A + B + C + D)$$

dimana :

KS : koefisien saprobik (nilainya berkisar antara -3 sampai 3)

A : jumlah organisme penyusun kelompok Polisaprobik atau Ciliata

B : jumlah organisme penyusun kelompok α Mesosaprobik atau Euglenophyta

C : jumlah organisme penyusun kelompok β Mesosaprobik atau Chlorococcales dan Diatomae

D: jumlah organisme penyusun kelompok Oligosaprobik atau Peridinae, Chryssophyceae dan Conjugatae.

Sistem Diversitas (Indeks Keanekaragaman Hayati)

Indeks keanekaragaman hayati menyatakan besarnya komposisi dan struktur komunitas yang ada dalam suatu wilayah. Indeks ini meliputi keanekaragaman spesies (*species diversity*) dan derajat perubahan komposisi makhluk hidup dalam suatu komunitas. Keanekaragaman dalam suatu sistem ekologi adalah karakteristik dari sistem yang dilihat dari bermacam-macam komponen yang ada didalamnya serta interaksinya dalam ruang dan waktu. Sedangkan *cenotic level* adalah tingkatan dari ekologi dimana kehidupan spesies tersebut mempunyai kesamaan dalam berperilaku

Penyusunan indeks kualitas perairan dengan parameter biologi berdasar pada dampak pencemaran terhadap kondisi kehidupan organisme perairan. Dasar penentuannya antara lain:

- a) Menentukan spesies indikator yang akan digunakan.
- b) Perhitungan besarnya perubahan populasi makhluk hidup dalam komunitas.
- c) Menentukan besarnya pengaruh parameter pengganggu terhadap keadaan fisiologi atau perilaku makhluk hidup perairan.

Struktur dasar penyusunan indeks biologi adalah seperti yang tergambar dalam gambar, $X_1; X_2; \dots; X_i$ menyatakan jenis-jenis spesies yang ditemukan, sedangkan $y_1; y_2; \dots; y_i$ menyatakan level, lokasi atau tempat ditemukannya spesies tersebut dalam suatu komunitas atau sistem ekologi.

S p e c i e s	<i>Cenotic Level</i>				
	y_1	y_2	y_j	y_R	
x_1	X_{11}	X_{12}	X_{1j}	X_{1R}	X_1
x_2	X_{21}	X_{22}	X_{2j}	X_{2R}	X_2
x_i	X_{i1}	X_{i2}	X_{ij}	X_{iR}	X_i
x_s	X_{s1}	X_{s2}	X_{sj}	X_{sR}	X_s
	X_1	X_2	X_j	X_R	X

Gambar 2.1. Matrik Spesies dan *Cenotic Level*

(Sumber : www.blackweb1-synergy.com/links/doi/10.1046/, 1993)

$$X_i = \sum_j X_{ij}$$

$$X_j = \sum_i X_{ij}$$

$$X = \sum_i \sum_j X_{ij}$$

Indeks biologi dikembangkan untuk memudahkan dalam menghubungkan populasi makhluk hidup dengan kondisi kualitas air yang ada. Indeks-indeks biologi tersebut antara lain:

a) Indeks Kemelimpahan Jenis

Yaitu indeks yang digunakan untuk menggambarkan komposisi jenis dalam komunitas.

$$D_i = \frac{n_i}{N} \times 100$$

$$D_i = p_i \times 100$$

Dimana :

D_i = Indeks Kemelimpahan dari jenis i

n_i = Jumlah individu jenis ke-i

N = Jumlah total individu seluruh jenis

p_i = Proporsi dan jumlah individu jenis I dengan jumlah individu

b) Indeks Keanekaragaman Jenis (*species diversity*)

Indeks Keanekaragaman atau *species diversity* adalah indeks yang menggambarkan kestabilan komunitas, semakin tinggi keanekaragaman jenis komunitas maka semakin stabil. Indeks keanekaragaman yang umum digunakan adalah indeks Shanon-Wiener.

$$H' = - \sum \left\{ \frac{n_i}{N} \cdot \ln \left(\frac{n_i}{N} \right) \right\}$$

Di mana :

H' = Indeks keanekaragaman

n_i = jumlah individu jenis ke-i

N = Jumlah total individu seluruh jenis

Kriteria yang diberikan terhadap kualitas perairan berdasarkan nilai BOD, DO dan indeks keanekaragaman akibat suatu pencemaran seperti yang tercantum dalam tabel

Tabel 7.1.
Kriteria Kualitas Perairan

Derajat Pencemaran	H'	DO (mg/l)	BOD (mg/l)
Tidak Tercemar	>2	>6.5	<3.0
Tercemar Ringan	2.0-1.6	4.5-6.5	3.0-4.9
Tercemar Sedang	1.5-1.0	2.0-4.4	5.0-15.0
Tercemar Berat	<1.0	<2.0	>15.0

Sumber : Lee, 1978

c) Indeks Pemerataan

Yaitu indeks untuk mengetahui pemerataan penyebaran individu yang dimiliki suatu jenis dalam suatu komunitas.

$$e = \frac{H'}{\ln S}$$

Dimana :

e = Indeks pemerataan

H' = Indeks keanekaragaman jenis

S = Jumlah spesies

Evaluasi terhadap nilai indeks pemerataan dapat dilihat dalam tabel 2.8.

Tabel 7.2.
Evaluasi Indeks Pemerataan

Nilai Indeks	Evaluasi Nilai Indeks
<0.1	Sangat jelek
0.1-0.3	Jelek
0.3-0.6	Sedang
0.6-0.8	Baik

Sumber : Lee, 1978

d) Indeks tingkat ekologi (*cenotic diversity*)

Cenotic diversity adalah indeks yang menggambarkan keberadaan spesies dalam beberapa tingkat ekologi.

$$H' y = -\sum Q_j \cdot \ln Q_j \quad H' y = -\sum Q_j \cdot \ln Q_j$$

Dimana :

$H' y$ = *Cenotic deversity*

Q_j = Keanekaragaman spesies I dalam berbagai level

Sedangkan persamaan untuk menghitung derajat perubahan lingkungan adalah menurut persamaan Stock dan Scheiner:

$$\Delta = \{V(x) + V(S) + V(n) + V(H'x) + V(H'y)\} / 5$$

$$V_m = (E_m - C_m) / (E_m + C_m)$$

Dimana :

Δ = Derajat perubahan makrozoobentos

x = Rata-rata seluruh spesies yang ditemukan

S = Jumlah jenis spesies yang ditemukan

$H'x$ = *Species diversity* atau indeks Keanekaragaman Shanon Wiener

E_m = Nilai yang akan dibandingkan untuk parameter m dengan nilai lain.

Derajat perubahan komposisi organisme dalam suatu komunitas dapat dinyatakan dalam perubahan tiap waktu atau dibandingkan dengan daerah lain yang mempunyai kualitas tidak tercemar daripada lokasi studi.

Kriteria Mutu Lingkungan Perairan Berdasarkan Indeks Biotik

Mutu lingkungan perairan dapat diklasifikasikan berdasarkan indikator biotik. Klasifikasi berdasarkan rujukan yang ada adalah sebagai berikut:

a. Berdasarkan Spesies Indikator

Dominasi kelompok organisme akuatik menurut konsep Leibmann memberikan indikasi tingkat saprobitas dan pencemaran perairan sebagai berikut :

Tabel 7.3.
Tingkat Saprobitas dan Pencemaran Perairan

	Kelompok organisme akuatik	Tingkat Pencemaran Perairan
A	Biota Polisaprobik	Sangat Berat
B	Biota α Mesosaprobik	Berat
C	Biota β Mesosaprobik	Sedang
D	Biota Oligosaprobik	Ringan

b. Berdasarkan Indeks Saprobik (IS)

Mutu lingkungan perairan didasarkan pada indeks saprobiknya adalah sebagai berikut :

Tabel 7.2
Kisaran Indeks Saprobitas dan Pencemaran Perairan

Kisaran indeks saprobik (IS)	Kriteria tingkat Cemaran Air
1.0 - 1.5	Ringan atau belum tercemar
>1.5 - 2.5	Sedang (β mesosaprobik)
>2.5 - 3.5	Berat (α mesosaprobik)
>3.5 - 4.0	Sangat Berat (polisaprobik)

(c). Berdasarkan Nilai Gabungan Koefisien Saprobik dan Indeks Diversitas Shannon

Kriteria mutu lingkungan perairan berdasarkan nilai gabungan dari koefisien saprobik (KS) dan indeks diversitas Shannon (H^{\wedge}) serta indeks biologi akuatik (IBA) sesuai rujukan yang tersedia adalah sebagai berikut:

Tabel 7.3
Klasifikasi Dan Kriteria Kemantapan Berdasarkan Indeks Gabungan Koefisien Saprobik Dan Indeks Diversitas Shannon

KS	H^{\wedge}	IBA	Klasifikasi & kriteria kemantapan ekosistem perairan
> 1.50	>2.0	>75 - 100	A. Sangat Mantap, Tingkat Pencemaran sangat ringan
>0.5 - 1.5	>1.5 - 2.0	>50 - 75	B. Mantap, Tingkat Pencemaran ringan
-1.5 - 0.5	1.0 -1.5	25 -50	C. Kurang Mantap. Tingkat pencemaran berat
<-1.5	<1.0	<25	D. Tidak Mantap, tingkat pencemaran sangat berat

Keterangan : $IBA = (KS + H^{\wedge}) / 4 \times 100\% \rightarrow 4 =$ banyaknya klas

Metode Penentuan Indeks Terrestrial

Metode perhitungam indeks terestrial dapat dilakukan dengan cara mengetahui besarnya Indeks Nilai Penting tanaman.

Untuk mengetahui besarnya nilai penting dari vegetasi dihitung dengan menjumlahkan kerapatan relatif, frekuensi relatif dan dominansi relatif. Untuk menghitung frekuensi relatif (FR), kerapatan relatif (KR) dan dominansi relatif (DR) yang dinyatakan dengan luas bidang dasar dipakai rumus Cox (1967) sebagai berikut :

$$\text{Frekuensi} = \frac{\sum \text{titik pengambilan sampel dimana species terdapat}}{\text{Jumlah plot pada tiap transek}}$$

$$\text{FR} = \frac{\text{Nilai frekuensi tiap jenis}}{\text{Nilai frekuensi semua jenis}} \times 100\%$$

$$\text{Kerapatan} = \frac{\sum \text{species yang terdapat dalam titik pengambilan sampel}}{\text{Luas areal pengambilan sampel}}$$

$$\text{KR} = \frac{\text{Jumlah individu tiap jenis}}{\text{Jumlah individu semua jenis}} \times 100\%$$

Dominansi = Total basal area dari suatu species yang dihitung dari diameter pohon

$$\text{DR} = \frac{\text{Total basal area tiap jenis}}{\text{Total basal area semua jenis}} \times 100\%$$

$$\text{Indek Nilai Penting (INP)} = \text{KR} + \text{FR} + \text{DR}$$

BAB VIII

INDEK RADIOAKTIF

Pendahuluan

Radioaktivitas lingkungan di permukaan bumi dapat dibedakan sebagai radioaktivitas alami dan radioaktivitas buatan. Radioaktivitas alami dapat berasal dari angkasa (radiasi kosmik) maupun dari dasar bumi. Radioaktivitas buatan berasal dari pencemaran radioaktif antara lain dari fasilitas nuklir, PLTN, PLTG ataupun jatuhnya radioaktif (*fall out*). Radiasi alami dari dalam bumi berasal dari elemen radioaktif yang terkandung di dalam kulit bumi. Besarnya radiasi alam dari dalam bumi tergantung pada kadar elemen radioaktif yaitu deret uranium, thorium, dan potasium dalam kulit bumi.

Secara alami unsur kimia saling berasosiasi sesuai dengan sifat unsur dan lingkungan fisika-kimia. Pembentukan asosiasi tersebut secara primer berhubungan erat dengan kegiatan magmatisme dan secara sekunder dipengaruhi oleh proses pelapukan fisika (disintegrasi) dan kimia (dekomposisi), media dan cara transportasi, serta lingkungan pengendapannya. Proses-proses tersebut merupakan bagian terpenting dari proses geologi yang menentukan keberadaan serta sebaran setiap unsur termasuk unsur radioaktif baik individu maupun kelompok dalam batuan atau rombakkannya

Pada keadaan normal, kadar unsur radioaktif dalam air, tanah, dan lumpur dikontrol oleh geologi (faktor endogen) dan faktor eksogen. Keadaan tersebut dapat juga diubah oleh pengaruh artifisial yang diakibatkan oleh kelalaian manusia yang mungkin terjadi selama perencanaan dan pengoperasian fasilitas nuklir. Perubahan tersebut dapat diketahui dan dipantau dengan membandingkan rona (data) setelah fasilitas pabrik beroperasi terhadap rona awal sebelum fasilitas dibangun.

Isotop Radioaktif

Zat radioaktif dapat menimbulkan efek toksik karena adanya penyinaran α , β dan/atau γ . Pada kontak dari luar, sinar α hanya, menyebabkan kerusakan pada epidermis karena sinar ini hanya mempunyai daya tembus yang relatif kecil. Sinar β yang memancarkan sinar elektron, dapat menembus lapisan kulit yang lebih dalam, sinar γ dapat menyebabkan kerusakan yang sama seperti sinar rontgen.

Isotop radioaktif yang masuk ke dalam tubuh (sinar yang lebih lunak lebih aktif secara biologik !) terutama merusak organ yang peka penyinaran seperti misalnya sumsum, tulang, dan juga dapat merusak tempat dimana ia tertimbun. Disamping menimbulkan kerusakansomatis, sinar ini dapat pula, menyebabkan kerusakan genetik dan dapat menimbulkan tumor ganas.

Diantara senyawa radioaktif, uranium mempunyai peran istimewa karena penggunaannya dalam pemisahan inti. Hal praktis yang terpenting adalah pemusnahan buangan radioaktif secara aman. Sinar α plutonium yang di alam hanya terdapat dalam jumlah yang sangat kecil, dalam sirkulasi bahan bakar nuklir terjadi pada penembakan atom uranium dengan neutron. Karena waktu paruhnya yang panjang (24065 tahun) maka potensi bahayanya juga khusus. Setelah pemasukan ke dalam tubuh konsentrasi tertinggi ditemukan dalam hati dan tulang.

Stronsium (radiostronsium), pemancar sinar β dengan waktu paruh 28 tahun adalah produk yang paling berbahaya pada ledakan bom atom. Karena sifat kimianya yang berdekatan dengan kalsium, zat ini akan tertanam dalam tulang, yang khususnya berbahaya bagi remaja karena pada usia inilah terjadi pertumbuhan tulang yang ekstrim. Kerusakan parah akibat penyinaran akut (sekali) setelah periode laten beberapa jam sampai beberapa hari akan menyebabkan sakit kepala, lelah, muntah, perdarahan, dan diare. Pada dosis penyinaran yang mematikan, kematian akan terjadi setelah 10 hari. Pada pasien yang hidup, pada saat berikutnya akan terjadi trombopenia dan neutropenia, anemia, hemoragia, dan demam. Kerusakan lanjut yang mungkin timbul adalah terutama banyaknya kasus leukemia. Pada beban penyinaran berulang walaupun hanya sedikit efek akan berakumulasi. Karena itu pemeriksaan kedokteran nuklir dan rontgen hanya boleh dilakukan berdasarkan indikasi yang sudah jelas.

Terapi tumor ganas dengan isotop radioaktif merupakan varian dari terapi sinar biasa.

Disini jaringan bukan disinari dari luar, akan tetapi sumber penyinaran dimasukkan ke dalam tubuh. Kerja maupun efek samping yang timbul sama. seperti setelah penyinaran rontgen akan tetapi dalam kasus-kasus tertentu dengan radioisotop akan dapat dilakukan penyinaran dengan lebih terarah.

Iod radioaktif (sinar β dan γ dengan waktu paruh 8 hari), senyawa ini dapat digunakan untuk penyinaran tumor kelenjar tiroid, karena kelenjar tiroid ini mempunyai afinitas yang

tinggi terhadap iod dan dengan demikian dalam waktu singkat sebagian besar iod akan disimpan.

Indeks Radioaktif

Pelepasan zat radioaktif ke lingkungan dapat menyebabkan radiasi terhadap manusia. Radiasi dapat terjadi dengan berbagai model pemaparan, yang dapat digolongkan ke dalam 2 kelas, yaitu :

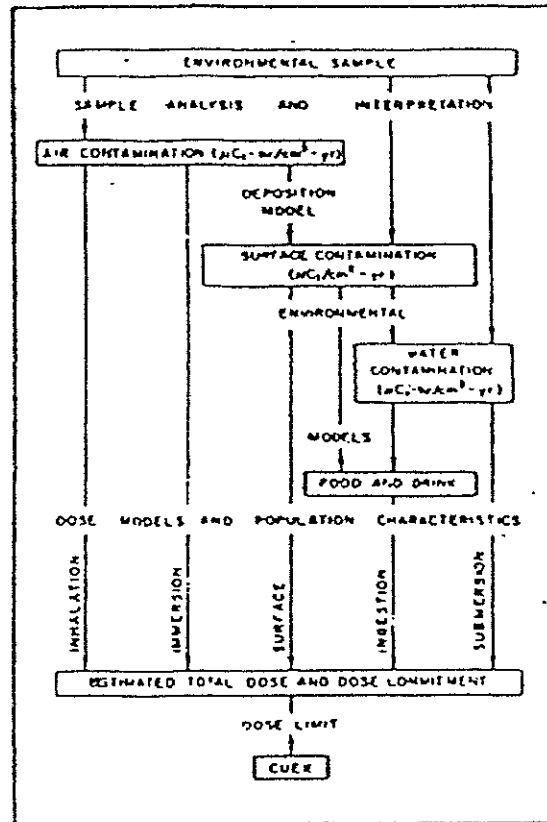
1. Internal (sumber radiasi masuk ke dalam tubuh, melalui inhalasi dan ingestion)
2. Eksternal (sumber radiasi di luar tubuh, misalnya kontak dengan lingkungan yang terkontaminasi, masuk ke dalam air yang terkontaminasi dan pemaparan terhadap permukaan yang terkontaminasi).

Dalam setiap model pemaparan harus diperhatikan berapa banyak dosis yang diperbolehkan untuk dilepaskan, sehingga tidak terjadi pembebanan lingkungan

Konsep CUEX (Cumulative Exposure index) atau indeks pemaparan kumulatif dapat digunakan untuk menghitung dosis radiasi terhadap manusia sebagai Akibat dari pelepasan radioaktif ke lingkungan. Secara definisi, CUEX dapat diartikan sebagai petunjuk numerik yang menggambarkan angka relatif (dosis taksiran terukur dibagi dosis maksimum) untuk pengukuran radioaktifitas lingkungan, yang dihitung dari dosis total pada manusia untuk seluruh radionuklida dan kedua model pemaparan. Tujuan pengembangan konsep ini adalah untuk mengukur pelepasan radionuklida pada waktu tertentu di dalam media sampel lingkungan yang cocok. Pengukuran dapat dilakukan terhadap udara, air atau permukaan tanah. Karena standar yang dianjurkan ditulis dalam bentuk unit dosis, maka konsep CUEX menambahkan faktor model lingkungan dan model dosis untuk merubah pengukuran konsentrasi radionuklida di lingkungan menjadi pengukuran radiasi pada manusia.

Gambar 1 menunjukkan struktur umum konsep CUEX, Mulai dari bagian atas gambar, sampel lingkungan dianalisis untuk mengukur pemasukan radionuklida ke dalam lingkungan pada waktu tertentu. Input tersebut diukur dalam unit $\mu \text{ Ci-hr/cm}^3\text{-yr}$ untuk kontaminasi air dan udara, sedangkan untuk mengukur kontaminasi permukaan ditulis dalam unit $\mu \text{ Ci/cm}^2\text{-yr}$

Kontribusi dari kelima model pemaparan terhadap dosis total dapat dilihat pada bagian bawah gambar .



Gambar 9.1. Konsep CUEx

Cara perhitungan CUEx

Indeks paparan kumulatif (CUEx) untuk radionuklida yang dilepaskan ke lingkungan dapat dihitung sebagai berikut :

$$CUEx_j = \sum_{i=1}^n \frac{E_{ik}}{DLEC_{ijk}}$$

dimana:

CUEx_j = petunjuk numerik yang menggambarkan angka relatif (dosis taksiran terukur dibagi dosis maksimum) untuk pengukuran radioaktifitas lingkungan yang dihitung dari dosis total pada manusia untuk seluruh radionuklida dan kedua model paparan.

E_{ik} = konsentrasi pada waktu tertentu (μ Ci-hr/cm³-yr) untuk radionuklida ke-i dalam medium sampling lingkungan ke-k

$DLEC_{ijk}$ = konsentrasi pada waktu tertentu dari radionuklida ke-i (μ Ci-hr/cm³-yr) yang berada pada medium sampling lingkungan ke-k yang diukur untuk dosis organ ke-j, melalui semua model pemaparan. Sama dengan dosis maksimum tahunan untuk organ tersebut.

Perhitungan CUEX dengan keadaan pemaparan seperti di atas melibatkan nilai DLEC (konsentrasi dosis maksimum) dan E (konsentrasi radionuklida pada waktu tertentu dalam sampel medium lingkungan untuk setiap radionuklida).

Aplikasi CUEX

Pelepasan radioaktif bervariasi dari pabrik nuklir tertentu ke pabrik lainnya dan dari tempat tertentu ke tempat lainnya, faktor-faktor lingkungan juga mempengaruhi penyebaran dan bioakumulasi radioaktif yang berbeda untuk setiap situasi. Sama halnya dengan faktor demografi yang mempengaruhi dosis terhadap manusia, oleh karena itu penting untuk menghitung DLEC bagi setiap tipe pelepasan pada tempat-tempat tertentu.