

## PENDEKATAN TERMODINAMIKA SUATU ALTERNATIF MENGAJARKAN KESETIMBANGAN KIMIA DI SMA

Oleh

Togu Gultom

### Abstrak

Semua proses yang terjadi di alam ini bertendensi untuk memperoleh kestabilan yang maksimum, yaitu suatu keadaan kesetimbangan. Suatu aspek penting dalam kesetimbangan adalah kedudukan kesetimbangan. Kedudukan kesetimbangan menentukan jumlah hasil reaksi yang dapat diperoleh secara kuantitatif.

Pendekatan kinetika untuk mengajarkan kesetimbangan kimia kurang berhasil menjelaskan beberapa konsep maupun prinsip kesetimbangan secara kuantitatif. Pendekatan ini memang cukup berhasil untuk menjelaskan hal-hal yang kualitatif. Sedangkan pendekatan termodinamika dapat menjelaskannya dengan cukup mudah. Dengan pendekatan termodinamika, dibutuhkan kesiapan matematika yang lebih mapan, sebab pendekatan ini menggunakan alur berfikir secara matematis.

### Pendahuluan

Semua proses perubahan yang terjadi di alam ini bertendensi untuk memperoleh kestabilan yang maksimum, yaitu suatu keadaan kesetimbangan di mana proses tadi "berhenti". Suatu proses perubahan akan "berhenti" bila sistem mencapai kesetimbangan. Tercapainya keadaan ini bukan berarti bahwa tidak ada proses perubahan lagi, reaksi masih berjalan tetapi kecepataannya dalam kedua arah sama besar. Mengingat keadaannya yang dapat dikontrol dengan baik dan teliti, banyak sifat-sifat kimia yang dapat dipelajari pada keadaan setimbang tersebut. Oleh sebab itu, konsep dan prinsip kesetimbangan kimia harus diajarkan dengan benar dan mudah dipahami.

Dalam pengajaran ilmu kimia di SMA, kesetimbangan kimia pada umumnya didekati dari aspek kinetiknya. Menurut pendekatan kinetika ini, sesuai dengan **Hukum Aksi Massa** bahwa keadaan setimbang dicapai bila kecepatan reaksi pembentukan zat-zat produk sama dengan kecepatan reaksi pembentukan zat-zat reaktan dan konsentrasi zat-zat tidak

mengalami penambahan ataupun pengurangan (Purbianto dan Ananto, 1986: 148). Dengan menggunakan pendekatan ini banyak peristiwa kesetimbangan kimia yang dapat dijelaskan terutama secara kualitatif. Namun demikian, pendekatan ini kurang berhasil menjelaskan beberapa peristiwa yang kuantitatif, umpamanya bagaimana pengaruh perubahan suhu terhadap keadaan kesetimbangan, secara kuantitatif tidak dapat dijelaskan. Demikian juga tentang konsep besarnya harga konstante kesetimbangan reaksi, para guru SMA sering mengalami kekeliruan.

Untuk itu diajukan suatu alternatif, yakni dengan menggunakan pendekatan termodinamika untuk mengajarkan kesetimbangan kimia di SMA. Pendekatan ini cukup berhasil dalam mengatasi permasalahan yang dijumpai pada pendekatan kinetika. Diakui bahwa menggunakan pendekatan termodinamika membutuhkan dasar matematika yang cukup. Namun demikian, melihat bobot materi matematik pada kurikulum SMA saat ini penguasaan matematik dianggap sudah cukup menunjang untuk itu. Sejalan dengan itu, dengan dipindahkannya pokok bahasan energetika pada semester tiga pada kurikulum SMA tahun 1984, maka dasar-dasar yang mengawali kesetimbangan dengan pendekatan termodinamika sudah cukup memadai sebab pendekatan ini memang menggunakan dasar-dasar energetika sebagai persyaratannya. Apabila dirasa masih ditemui kekurangan dalam hal matematika, maka perlu dijalin kerja sama dengan guru matematik.

Dengan demikian, yang menjadi permasalahan dalam tulisan ini ialah bagaimanakah pendekatan termodinamika digunakan untuk mengajarkan kesetimbangan kimia di SMA?

Tujuan dalam tulisan ini ialah memecahkan masalah yang dihadapi pada guru kimia di SMA untuk mengajarkan kesetimbangan kimia, dengan memberikan suatu alternatif cara mengajarkan kesetimbangan kimia yang didekati dari aspek termodinamikanya. Dengan harapan, pendekatan termodinamika ini akan menjawab permasalahan yang dihadapi pendekatan kinetika.

### **Energi Bebas (G)**

Persoalan kesetimbangan kimia dan tetapan kesetimbangan kimia selain dapat ditinjau dari pendekatan kinetika

dengan hukum aksi, juga dapat ditinjau dari hukum-hukum termodinamika. Untuk itu perlu ditinjau bagaimana hubungan antara energi bebas (G) maupun potensial kimia ( $\mu$ ) terhadap tetapan kesetimbangan kimia (K). Hubungan antara energi bebas (G) dengan entalpi (H) dan entropi (S) pada temperatur (T) dan tekanan tetap dinyatakan dengan  $G = H - TS$ .

Harvey dan Porter (1963) mengatakan bila suatu sistem mengalami suatu proses dan menyerap sejumlah kalor  $dq$  pada temperatur T, apabila proses spontan maka entropi dari sistem akan naik sebesar  $ds$ . Sebagai akibat dari kenaikan entropi ini maka ungkapan rumusnya menjadi:

$$ds > \frac{dq}{T}$$

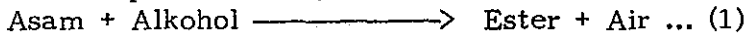
Lebih lanjut dikatakan bagi proses spontan selalu berupa proses penurunan energi bebas sehingga bagi proses spontan berlaku hubungan

$$dG < 0$$

Bila proses spontan dibiarkan berjalan terus, suatu saat akan berjalan makin lambat dan kemudian seakan-akan berhenti. Keadaan yang dicapai adalah keadaan yang setimbang (Atkins, 1978: 249). Sebagai contoh diambil suatu reaksi kimia antara alkohol dengan asam dengan pertolongan katalis tertentu. Pada awal reaksi terjadi perubahan alkohol dan asam menjadi ester dan air. Proses ini akan berjalan terus hingga tercapai suatu kesetimbangan, di mana pembentukan ester dari asam dan alkohol diimbangi dengan reaksi hidrolisis ester menjadi asam dan alkohol. Dengan perkataan lain, pada kesetimbangan tidak lagi terjadi perubahan yang efektif dari asam dan alkohol menjadi ester dan air ataupun reaksi sebaliknya, sehingga jumlah atau konsentrasi masing-masing zat akan tetap.

Menurut apa yang telah diuraikan di atas, dapat dilihat bahwa suatu proses spontan pada temperatur dan tekanan tetap dicirikan oleh penurunan energi bebas dari sistem. Jika tercapai keadaan kesetimbangan, energi bebas sistem akan mencapai harga yang terendah. Secara matematik, tiap perubahan kecil keadaan dengan energi bebas minimum diberikan oleh persamaan  $dG = 0$ ;  $dG$  adalah perubahan energi bebas sistem secara keseluruhan. Untuk memperjelas pengertian di atas dapat diikuti uraian berikut. Menurut Barrow (1979),

harga energi bebas sebanding dengan jumlah zat. Sehingga, apabila sejumlah kecil reaktan (pereaksi) berubah menjadi hasil reaksi maka zat pereaksi akan kehilangan energi besarnya sebesar  $dG$  (dengan tanda negatif), sebaliknya zat hasil reaksi akan menerima penambahan energi bebas sebesar  $dG$  (dengan tanda positif). Jadi, untuk reaksi kimia berikut:



perubahan energi bebasnya adalah:

$$dG = dG_{\text{as}} + dG_{\text{alk}} + dG_{\text{est}} + dG_{\text{air}} \dots (2)$$

Pada awal reaksi di mana konsentrasi asam dan alkohol tinggi sedangkan konsentrasi ester dan air rendah maka berlaku hubungan:

$$-(dG_{\text{as}} + dG_{\text{alk}}) > + (dG_{\text{est}} + dG_{\text{air}}) \dots (3)$$

Dengan demikian, energi bebas sistem akan berharga negatif. Hal ini berarti bahwa reaksi (1) berlangsung ke arah kanan. Sebaliknya, bila dimulai dari ester dan air, maka akan berlaku hubungan

$$-(dG_{\text{as}} + dG_{\text{alk}}) < + (dG_{\text{est}} + dG_{\text{air}}) \dots (4)$$

dalam hal ini sistem mempunyai harga energi bebas negatif. Dengan demikian, reaksi tidak dapat berlangsung secara spontan.

Bila tercapai kesetimbangan akan berlaku ungkapan

$$-(dG_{\text{as}} + dG_{\text{alk}}) = + (dG_{\text{est}} + dG_{\text{air}})$$

dengan demikian harga  $dG = 0$ .

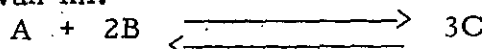
Dari uraian di atas dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

apabila harga  $dG > 0$  ; ,maka reaksi tidak dapat berlangsung secara spontan dan bila harga  $dG = 0$ , reaksi dikatakan mencapai kesetimbangan dan bila harga  $dG < 0$  maka reaksi berlangsung secara spontan.

### Kesetimbangan Kimia

suatu aspek penting dalam kesetimbangan adalah kedudukan kesetimbangan. Kedudukan kesetimbangan menentukan jumlah hasil reaksi yang dapat diperoleh dari suatu reaksi dan dinyatakan secara kuantitatif dengan tetapan kesetimbangan. Besaran ini penting sekali dipelajari terutama dalam proses-proses teknologi (Atkins, 1978).

Untuk membahas penggunaan termodinamika dalam mempelajari kesetimbangan kimia, diambil reaksi sederhana di bawah ini:



Andaikan bahwa pada suatu saat tertentu, dalam campuran reaksi didapatkan  $n_A$  mol zat A,  $n_B$  mol zat B dan  $n_C$  mol zat C. Jika sebagai akibat reaksi, jumlah mol zat A berubah dengan  $dn_A$ , jumlah mol zat B dengan  $dn_B$  dan jumlah mol zat C dengan  $dn_C$ , maka berdasarkan stoikiometri reaksi, berlaku hubungan:

$$dn_B = 2 dn_A \text{ dan } dn_C = -3 dn_A \dots (5)$$

Menurut Wall (1965), energi bebas sistem pada saat itu adalah jumlah energi bebas masing-masing komponen, yaitu:

$$G = G_A + G_B + G_C$$

Oleh karena itu, perubahan energi bebas sistem sebagai akibat terjadinya suatu perubahan kimia dalam sistem, merupakan jumlah perubahan energi bebas komponen-komponennya. Jadi:

$$dG = dG_A + dG_B + dG_C \dots (6)$$

perubahan energi bebas dari masing-masing komponen adalah  $dG_A = \mu_A dn_A$ ;  $dG_B = \mu_B dn_B$ ;  $dG_C = \mu_C dn_C \dots (7)$

Bila persamaan ini disubstitusikan ke dalam persamaan (5) dengan mengingat hubungan  $dn_A$ ,  $dn_B$  dan  $dn_C$  maka ungkapan perubahan energi bebas sistem dapat ditulis sebagai berikut

$$\begin{aligned} dG_A &= \mu_A dn_A \\ dG_B &= 2 \mu_B dn_A \\ dG_C &= -3 \mu_C dn_A \end{aligned}$$

sehingga akan diperoleh:

$$dG = \mu_A dn_A + 2 \mu_B dn_A + -3 \mu_C dn_A$$

$$dG = (\mu_A + 2 \mu_B - 3 \mu_C) dn_A$$

Telah disebutkan syarat agar suatu perubahan atau reaksi dapat berjalan secara spontan maka reaksi harus menurunkan energi bebas sistem, artinya  $dG < 0$ . Dengan demikian, dapat dituliskan

$$(\mu_A + 2 \mu_B - 3 \mu_C) dn_A < 0 \dots (8)$$

Sekarang mari kita tinjau beberapa keadaan dari sistem yang memenuhi pertidaksamaan tersebut.

Pertama, bila  $\mu_A + 2\mu_B > 3\mu_C$ , maka agar pertidaksamaan itu terpenuhi haruslah  $dn_A < 0$ , yaitu jumlah pereaksi berkurang. Ini berarti bahwa reaksi seperti tertulis di atas akan berjalan ke kanan.

Kedua, bila  $\mu_A + 2\mu_B < 3\mu_C$ , agar pertidaksamaan itu terpenuhi maka haruslah  $dn_A > 0$ , yaitu jumlah pereaksi bertambah. Ini berarti bahwa reaksi seperti tertulis di atas akan berjalan ke kiri.

Ketiga, keadaan setimbang akan tercapai bila energi bebas sistem telah mencapai harganya yang terendah, yakni  $dG = 0$ . Syarat setimbang ini dapat ditulis sebagai

$$(\mu_A + 2\mu_B - 3\mu_C) dn_A = 0$$

Agar persamaan ini dipenuhi untuk semua kemungkinan harga  $dn_A$ , maka pada keadaan setimbang ini harus berlaku

$$\mu_A + 2\mu_B = 3\mu_C \dots (9)$$

Dari syarat kesetimbangan ini jelaslah bila keadaan awal sistem adalah  $\mu_A + 2\mu_B = 3\mu_C$ , maka reaksi berlangsung ke kanan, hal ini berarti potensial kimia zat A dan zat B masing-masing turun, sedangkan potensial kimia zat C akan naik, hingga keadaan persamaan  $\mu_A + 2\mu_B = 3\mu_C$  tercapai. Proses sebaliknya terjadi bila keadaan awal adalah

$$\mu_A + 2\mu_B < 3\mu_C$$

Sekarang perhatikan keadaan campuran reaksi di atas setelah mencapai keadaan setimbang, di mana potensial kimia masing-masing komponen memenuhi hubungan

$$\mu_A + 2\mu_B = 3\mu_C$$

Andaikan bahwa sejumlah 1 mol zat A dan 2 mol zat B masing-masing pada keaktifan keadaan setimbang diubah menjadi 3 mol zat C pada keaktifan keadaan setimbang. Perubahan energi bebas sistem pada proses ini adalah:

$$G = G(3 \text{ mol C, a setimbang}) - G(1 \text{ mol A, a setimbang}) - G(2 \text{ mol B, a setimbang}).$$

Ungkapan ini dapat ditulis sebagai  $\Delta G = 3\mu_C - \mu_A - 2\mu_B = 0$  karena harga masing-masing potensial kimia adalah harganya pada keadaan kesetimbangan. Potensial kimia masing-masing zat dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\mu_A = \mu_A^\circ + RT \ln a_A$$

$$\mu_B = \mu_B^\circ + RT \ln a_B$$

$$\mu_C = \mu_C^\circ + RT \ln a_C$$

Dengan memasukkan ungkapan ini pada persamaan di atas akan diperoleh:

$$3(\mu_C^\circ + RT \ln a_C) - (\mu_A^\circ + RT \ln a_A) - 2(\mu_B^\circ + RT \ln a_B) = 0$$

$$3\mu_C^\circ + 3RT \ln a_C - \mu_A^\circ - RT \ln a_A - 2RT \ln a_B - 2\mu_B^\circ = 0$$

$$3\mu_C^\circ - \mu_A^\circ - 2\mu_B^\circ = RT \ln a_A + 2RT \ln a_B - 3RT \ln a_C$$

$$(3\mu_C^\circ - \mu_A^\circ - 2\mu_B^\circ) = -RT(3 \ln a_C - \ln a_A - 2 \ln a_B)$$

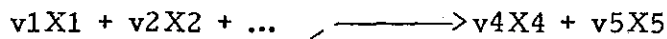
Bila diperhatikan, ruas kiri dari persamaan ini adalah perubahan energi bebas standar bila 1 mol zat A dan 2 mol zat B berubah menjadi 3 mol zat C.

Karena  $\Delta G^\circ = 3\mu_C^\circ - \mu_A^\circ - 2\mu_B^\circ$ , maka persamaan tersebut di atas dapat ditulis sebagai berikut:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln \frac{a_C^3}{a_A a_B^2}; \text{ bila ungkapan } \frac{a_C^3}{a_A a_B^2} = K_a, \text{ maka}$$

akan diperoleh persamaan  $G^\circ = -RT \ln K_a$ . Persamaan ini berlaku secara umum untuk reaksi-reaksi yang berada dalam kesetimbangan.

Bila suatu reaksi yang umum antara zat-zat X1, X2 ... berubah menjadi X4, X5 ... persamaan reaksinya dapat ditulis sebagai berikut:



maka perubahan energi bebas standarnya adalah:

$$\Delta G^\circ = v_4 \mu_4^\circ + v_5 \mu_5^\circ + \dots - v_1 \mu_1^\circ - v_2 \mu_2^\circ - \dots$$

Ungkapan tetapan kesetimbangannya adalah:

$$K = \frac{a_4^{v_4} a_5^{v_5}}{a_1^{v_1} a_2^{v_2}}$$

Persamaan  $\Delta G^\circ = -RT \ln K_a$  merupakan salah satu persamaan yang penting dalam termodinamika kesetimbangan kimia karena hubungan ini memungkinkan penentuan perubahan energi bebas standar dari harga tetapan kesetimbangan apabila reaksi telah mencapai kesetimbangan. Seperti diketahui perubahan energi bebas tidak dapat ditentukan secara langsung seperti halnya perubahan entalpi ( $\Delta H$ ).

Dengan memperhatikan persamaan  $\Delta G^\circ = -RT \ln K_a$ , maka secara umum dapat disebutkan, bila  $\Delta G^\circ < 0$  maka harga  $K > 1$ . Ini berarti bahwa reaksi akan berjalan memberat ke hasil reaksi. Makin negatif harga  $\Delta G^\circ$  makin besar pula harga  $K$ , sebaliknya makin positif harga  $\Delta G^\circ$  menunjukkan reaksi semakin memberat pada bagian pereaksi. Namun, perlu diingat bahwa walaupun suatu reaksi mempunyai harga perubahan energi bebas standar ( $\Delta G^\circ$ ) negatif ini tidak berarti bahwa reaksi tersebut telah berjalan. Keterangan mengenai perubahan energi bebas standar yang negatif hanya menunjukkan bila reaksi berlangsung dan mencapai kesetimbangan maka letak kesetimbangan akan memberat ke hasil reaksi (Barrow, 1979).

### Pengaruh Temperatur Terhadap Kesetimbangan

Moore (1983) mengatakan bahwa harga tetapan kesetimbangan selalu tetap pada temperatur tetap. Bila temperatur diubah maka harga tetapan kesetimbangan juga akan berubah. Hubungan antara tetapan kesetimbangan ( $K$ ) terhadap temperatur dinyatakan dengan ungkapan,

$$\frac{d \ln K}{dT} = \frac{H^\circ}{RT^2}$$

Dari persamaan  $dG = V dp - S dT$  dapat diperoleh ungkapan perubahan energi bebas terhadap perubahan temperatur pada tekanan tetap sebagai

$$\left( \frac{\partial G}{\partial T} \right)_p = -S$$

Oleh karena yang terpenting untuk suatu reaksi kimia adalah perubahan energi bebas dari produk terhadap reaktan, maka ungkapan di atas dapat dirumuskan menjadi

$$\left( \frac{\partial \Delta G}{\partial T} \right)_p = -S$$



Untuk mempermudah pengertian ketergantungan antara  $G$  terhadap  $T$ , maka faktor  $S$  harus dihilangkan dari persamaan

$$\left( \frac{a\Delta G}{aT} \right)_p = -S$$

Sebelumnya harus diketahui bahwa pada temperatur tertentu, perubahan energi bebas suatu zat dihubungkan dengan perubahan entalpi dan perubahan entropi dengan persamaan

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

Apabila diubah susunannya, maka akan diperoleh persamaan

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T}$$

Persamaan ini digunakan untuk mengeliminasi faktor  $S$  dari persamaan  $\left( \frac{a\Delta G}{aT} \right)_p = -\Delta S$ , sebagai berikut:

$$\left( \frac{a\Delta G}{aT} \right)_p = \frac{-\Delta H + \Delta G}{T}$$

Bila dinyatakan secara terpisah dan kemudian disusun kembali akan diperoleh persamaan

$$\frac{d\Delta G}{dT} - \frac{\Delta G}{T} = -\frac{\Delta H}{T}$$

Pengintegralan dari persamaan  $\frac{d\Delta G}{dT} - \frac{\Delta G}{T} = -\frac{\Delta H}{T}$ , memberikan hasil  $\frac{T(d - \Delta G/T)}{T}$ , sehingga persamaan menjadi

$$T \frac{d(\Delta G/T)}{dT} = -\frac{\Delta H}{T}$$

Apabila reaksi dianggap dalam keadaan standar maka persamaan menjadi:  $T \frac{d(\Delta G^\circ/T)}{dT} = -\frac{\Delta H^\circ}{T}$ . Seperti diketahui

dari persamaan  $\Delta G = -RT \ln K$  atau  $\frac{\Delta G^\circ}{T} = -R \ln K$

maka  $\frac{d\Delta G^\circ}{dT} = -dR \ln K$ . Jadi apabila persamaan ini disubstitusikan pada persamaan di atas akan diperoleh:

$$\frac{T(-dR \ln K)}{dT} = \frac{-\Delta H^\circ}{T}$$

$$-dR \ln K = \frac{-\Delta H^\circ}{T}$$

$$\frac{dR \ln K}{dT} = \frac{\Delta H^\circ}{T^2}$$

$$\frac{d \ln K}{dT} = \frac{\Delta H^\circ}{RT^2}$$

Kadang-kadang persamaan ini dituliskan dalam bentuk

$$\frac{d \ln K}{d 1/T} = \frac{-\Delta H^\circ}{R}$$

atau

$$\frac{d \log K}{d 1/T} = \frac{-\Delta H^\circ}{2,303R}$$

Dengan menganggap bahwa  $H^\circ$  bukan fungsi temperatur, maka bentuk integral persamaan di atas adalah

$$\log K = \frac{-\Delta H^\circ}{2,303R} \cdot \frac{1}{T} + C$$

Namun apabila persamaan di atas diintegrasikan pada dua suhu tertentu akan diperoleh:

$$\int_{K_1}^{K_2} d \ln K = \frac{\Delta H^\circ}{R} \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T^2}$$

$$\ln \frac{K_2}{K_1} = \frac{\Delta H^\circ}{R} \left( -\frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_1} \right)$$

$$\log \frac{K_2}{K_1} = \frac{\Delta H^\circ}{2,303R} \left( \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right)$$

Menurut prinsip Le Chatelier, bila kesetimbangan diganggu, maka kesetimbangan akan berpindah sedemikian rupa sehingga melawan perubahan yang diterapkan. Bila suhu kesetimbangan dinaikkan, perubahan ini tidak dapat dicegah, akan tetapi terjadi pergeseran kesetimbangan sedemikian rupa sehingga lebih banyak kalor yang diperlukan untuk memanaskan campuran reaksi sampai mencapai suhu yang lebih tinggi, yakni suhu yang diperlukan bila campuran inert (Adamson, 1973). Dengan perkataan lain, bila suhu dinaikkan maka kesetimbangan akan bergeser ke arah yang menyebabkan penyerapan kalor. Dengan demikian dapat disimpulkan, kenaikan tem dari suatu reaksi akan mengakibatkan kesetimbangan bergeser ke kanan bagi reaksi endoterm. Sebaliknya, untuk reaksi eksoterm kenaikan temperatur mengakibatkan kesetimbangan bergeser ke kiri.

Berdasarkan uraian di atas dapat dilihat beberapa keuntungan pendekatan termodinamika dalam mengajarkan kesetimbangan kimia sebagai berikut. Pertama, dengan menggunakan pendekatan termodinamika para siswa dapat menggunakan cara berpikir matematis sebab dasar utama pengembangan termodinamika adalah matematik. Untuk ini Harvey

dan Porter (1963) mengatakan:

"The science of Thermodynamics concerns the chemical is developed matematically on the basis of number postulates which have been throughly supported by experiment."

Kedua, dengan menggunakan pendekatan termodinamika dapat ditunjukkan dengan mudah arah pergeseran keseimbangan dengan memperhatikan besarnya  $G^\circ$  suatu reaksi. Besarnya harga perubahan energi bebas standar dapat digunakan sebagai alat meramalkan memberatnya keseimbangan, sesuai dengan hubungan  $G^\circ = -RT \ln K$ . Bila harga  $G^\circ < 0$  berarti harga  $K > 1$  yang berarti keseimbangan memberat ke arah hasil reaksi, sebaliknya bila harga  $G^\circ > 0$  berarti harga  $K < 1$  yang berarti keseimbangan memberat ke arah zat-zat pereaksi.

Ketiga, dengan pendekatan termodinamika dapat dengan mudah dijelaskan bahwa penambahan katalis tidak mempengaruhi letak keseimbangan, akan tetapi penambahan katalis hanya mempercepat tercapainya keadaan kesetimbangan. Untuk ini Adamson (1973) mengatakan bahwa salah satu sumbangan yang terpenting dari termodinamika pada pelajaran keseimbangan kimia adalah suatu kesimpulannya yang menyatakan bahwa perubahan energi bebas dari suatu reaksi kimia hanya ditentukan oleh keadaan awal dan akhir reaksi, di mana hal ini tidak dipengaruhi jalannya reaksi. Dengan demikian, posisi keseimbangan tidak dipengaruhi oleh katalis.

Keempat, salah satu faktor yang sangat berhasil dijelaskan pendekatan termodinamika adalah pengaruh temperatur terhadap keseimbangan yang dijelaskan secara kuantitatif dengan menggunakan persamaan Van't Hoff. Pendekatan kinetika hanya mampu menjelaskan pengaruh perubahan suhu terhadap keseimbangan secara kualitatif.

## Penutup

Dari uraian di atas dapat ditunjukkan bahwa untuk mengajarkan keseimbangan kimia dapat didekati dari aspek kinetika maupun dari aspek termodinamika. Walaupun pendekatan termodinamika membutuhkan latar belakang matematik yang cukup dalam, namun dengan pendekatan termodinamika konsep maupun prinsip keseimbangan kimia dapat diajarkan

dengan mudah dan benar. Oleh sebab itu, sebaiknya untuk mengajarkan kesetimbangan kimia di SMA sudah saatnya dimulai dengan menggunakan pendekatan termodinamika.

### Daftar Pustaka

- Adamson, W.A. 1973. *A Textbook of Physical Chemistry*. New York: Academic Press.
- Atkins, P.W. 1978. *Physical Chemistry*. Oxford: Oxford University Press.
- Barrow, M.G. 1979. *Physical Chemistry*. Tokyo: McGraw Hill Kogakusha Ltd.
- Castellan, W.G. 1977. *Physical Chemistry*. Tokyo: Addison Wesley Company.
- Harvey, B.K. dan Porter, B.G. 1963. *Introduction to Physical Inorganic Chemistry*. London: Addison Wesley Pub Coy.
- Moore, J.W. 1983. *Basic Physical Chemistry*. London: Prentice Hall International Inc.
- Wall, T.F. 1965. *Chemistry Thermodynamics*. Tokyo: Freeman and Company.

## **GLOBALISASI MASALAH PENIPISAN LAPISAN OZON DAN USAHA-USAHA PENANGGULANGANNYA**

Oleh  
**A K Prodjosantoso**

### **Abstrak**

Ozon merupakan komponen atmosfer yang jumlahnya sangat sedikit. Kehidupan manusia sangat tergantung pada lapisan ozon. Ozon mempunyai kemampuan untuk menyerap radiasi sinar-ultra violet dengan panjang gelombang kurang lebih 320 nm yang dipancarkan oleh matahari. Sinar ultra-violet dapat mematikan manusia dan merusakkan unsur-unsur kehidupan lainnya.

Penggunaan senyawa-senyawa kimiawi, seperti CFC dan Halon, dapat merusakkan ozon. Perusakan ini menyebabkan lapisan ozon menjadi semakin tipis. Penipisan lapisan ozon merupakan masalah yang bersifat global.

Untuk mencegah berlanjutnya proses penipisan lapisan ozon, perlu dilakukan usaha-usaha bersama antarnegara. Usaha-usaha tersebut di antaranya telah tertuang dalam hasil pertemuan Montreal.

### **Pendahuluan**

Penanggulangan masalah lingkungan telah lama dilakukan oleh manusia. Namun sebaliknya, selama ini manusia juga menciptakan masalah-masalah lingkungan baru. Beberapa masalah lingkungan dapat mendatangkan bencana yang hebat, sedangkan beberapa masalah lingkungan yang lain tidak besar pengaruhnya terhadap kehidupan manusia. Terdapat kecenderungan bahwa pada saat ini masalah lingkungan menjadi masalah yang bersifat global (Stanley, 1984: 2). Masalah lingkungan tidak hanya dirasakan oleh negara tertentu saja, tetapi juga dirasakan oleh negara-negara lain di muka bumi. Juga terdapat kecenderungan, bahwa masalah lingkungan lebih berat dirasakan oleh negara yang sedang berkembang dibandingkan dengan negara yang sudah berkembang atau maju (Onogawa, 1989: 1). Kegiatan-kegiatan yang berhubungan dengan penyebab masalah lingkungan terdapat di mana-

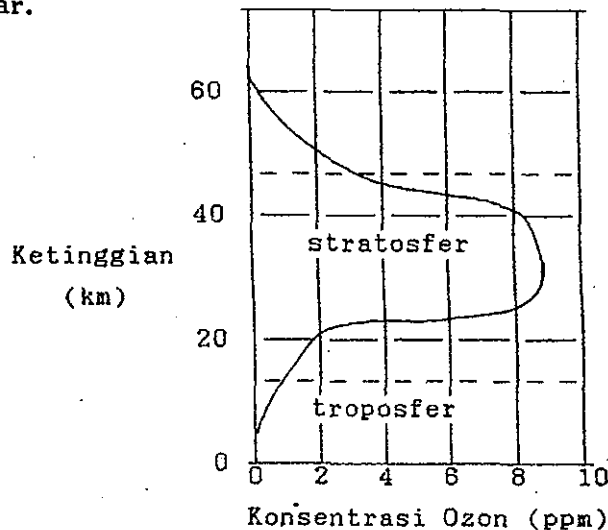
mana. Penipisan lapisan ozon merupakan salah satu contoh masalah lingkungan yang bersifat global. Mengapa penipisan lapisan ozon merupakan masalah global? Bagaimana usaha-usaha yang dapat dilakukan untuk menanggulangi penipisan lapisan ozon?

### Globalisasi Masalah Penipisan Lapisan Ozon

Pada tahun 1974, Prof. Rolland melontarkan pandangannya tentang penipisan lapisan ozon dan kemungkinan akibat-akibat negatif terhadap manusia dan ekosistemnya di alam (Molina and Rowland, 1974: 810). Pandangan ini menggugah para pengamat, ilmuwan, peneliti, dan praktisi pada waktu itu untuk kembali mempelajari masalah lapisan ozon.

#### Keberadaan dan Fungsi Lapisan Ozon

Ozon merupakan komponen atmosfer yang sangat sedikit jumlahnya. Bila lapisan ozon yang ada di atas permukaan bumi sampai pada ketinggian 60 km dimampatkan, maka hanya akan diperoleh lapisan ozon yang tebalnya kurang lebih 3 mm dengan berat 3.000 juta ton. Sebagian besar ozon terdapat pada ketinggian antara 10 sampai 50 km (pada lapisan stratosfer) di atas permukaan bumi (Spedding, 1974: 29). Distribusi ozon di atmosfer dapat dipelajari melalui gambar.



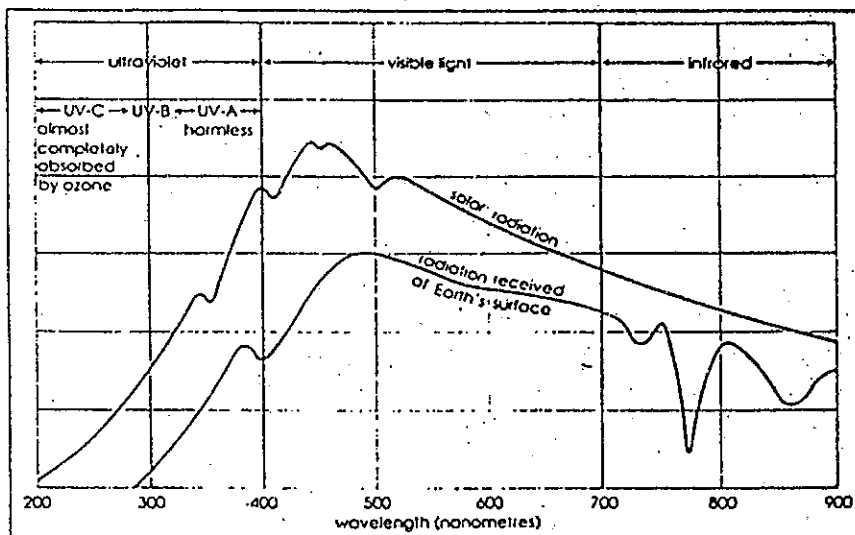
Gambar 1. Konsentrasi Ozon pada Berbagai Ketinggian

Menurut Moore dan Moore (1976: 184), kehidupan manusia sangat tergantung pada lapisan ozon yang jumlahnya relatif sangat sedikit. Ozon mempunyai kemampuan untuk menyerap radiasi sinar ultra violet dengan panjang gelombang kurang lebih 320 nm yang dipancarkan oleh matahari.

Sinar ultra violet dengan panjang gelombang antara 200-280 nm (UV-C), dapat mematikan manusia dan unsur-unsur kehidupan lainnya. Sebelum sampai ke bumi sinar ultra violet ini telah banyak diserap oleh lapisan ozon.

Sinar UV dengan panjang gelombang 280-320 nm (UV-B) sebagian besar diserap oleh lapisan ozon, namun beberapa tetap dapat menerobos lapisan tersebut. Sinar UV ini dapat mematikan hampir semua bentuk-bentuk kehidupan. Bahkan pada tingkat yang rendah, telah dapat merusakkan mata dan menyebabkan kanker kulit. Meningkatnya radiasi sinar UV ini juga dapat menghambat reproduksi pada tanaman, seperti kentang dan algae. Terhambatnya reproduksi algae sangat berpengaruh pada perkembangan habitat hewan laut. Sinar ultra violet dengan gelombang lebih besar dari 320 nm (UV-A) relatif tidak berbahaya dan sinar ini diabsorbsi oleh lapisan ozon dalam jumlah sedikit.

Hubungan antara panjang gelombang sinar matahari dengan jumlah radiasi yang sampai ke permukaan bumi dapat dipelajari pada Gambar 2.



Gambar 2. Panjang gelombang radiasi sinar matahari dan jumlah radiasi yang mencapai bumi

Sinar matahari terdiri atas sinar dengan panjang gelombang antara 100 sampai dengan 3000 nm, tetapi sebagian besar sinar tersebut tidak pernah mencapai permukaan bumi. Ozon bekerja seolah-olah sebagai payung yang dapat menahan jalannya sinar ultra violet sehingga segala bentuk kehidupan yang ada di bumi terlindungi dari bahaya radiasi sinar ultra violet tersebut.

### **CFC dan Halon**

Apakah yang dimaksud dengan senyawaan CFC (*chloro-fluorocarbon*) dan Halon (*bromofluorocarbon* atau *bromochlorofluorocarbon*) serta bagaimana penggunaan keduanya dalam kehidupan sehari-hari? Kedua pertanyaan tersebut merupakan pertanyaan yang sederhana dan perlu jawaban sehubungan dengan timbulnya masalah sebagai akibat penggunaan CFC dan Halon oleh masyarakat.

Senyawaan CFC yang pertama kali dikenal masyarakat adalah CFC-11 ( $\text{CFCl}_3$ ). Senyawaan ini ditemukan pada tahun 1928 oleh seorang ahli dari Amerika, T. Midgley. Senyawaan ini ditujukan sebagai pengganti senyawaan ammonium yang digunakan sebagai pendingin pada alat-alat pendingin yang ternyata tidak cukup aman bagi kesehatan. Senyawaan CFC merupakan senyawaan yang pada saat itu dianggap sebagai pengganti senyawaan ammonium yang sangat tepat karena senyawa ini sama sekali tidak berbahaya, tidak beracun, dan tidak mudah terbakar. Sampai tahun 1950, CFC dipakai pada hampir semua alat-alat pendingin, seperti: almari pendingin (*refrigerator*) dan penyejuk ruangan (*air conditioner*). Penggunaan senyawaan jenis ini kemudian berkembang dengan cepat, terutama setelah diketemukan senyawaan-senyawaan jenis CFC yang lain. Senyawaan CFC mudah dicairkan dengan penekanan dan dapat melarutkan berbagai senyawaan organik. Karena sifatnya yang demikian, maka CFC digunakan pula sebagai zat pendorong pada kosmetika (misalnya parfum), cat semprot, dan lain-lain. Senyawaan CFC juga digunakan sebagai zat pembuih untuk *poli-urethane* dan sebagai zat pembersih untuk komponen-komponen elektronik yang rumit seperti *Integrated Circuits* (IC) (Onogawa, 1989: 2). Beberapa senyawaan CFC dan Halon yang direkomendasikan bisa digunakan dalam keperluan sehari-hari dapat dilihat pada Tabel 1.



**Tabel 1**  
Senyawaan-senyawaan CFC dan Halon yang Direkomendasikan bisa Digunakan sebagai Hasil Perjanjian Montreal

Kode	Rumus Molekul	Umur (Th)	TD	NRP	Penggunaan
CFC-11	$\text{CFCl}_3$	71	23,7	1,0	Pembuih
CFC-12	$\text{CF}_2\text{Cl}_2$	150	-29,8	1,0	Pendingin
CFC-113	$\text{CF}_2\text{ClCFCl}_2$	117	47,5	0,8	Pelarut senyawa pembersih
CFC-114	$\text{CF}_2\text{ClCF}_2\text{Cl}$	320	3,6	1,0	Campuran
CFC-115	$\text{CF}_3\text{CF}_2\text{Cl}$	550	-39,1	0,6	Campuran
HALON-1211	$\text{CF}_2\text{ClBr}$			3,0	
HALON-1301	$\text{CF}_3\text{Br}$		-57,8	10,0	
HALON-2402	$\text{CF}_2\text{BrCF}_2\text{Br}$		47,2	**	

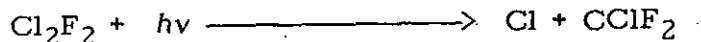
TD : Titik didih

NRP : Nilai relatif potensinya terhadap penipisan ozon dibandingkan dengan potensi CFC-11

\*\* : belum diketemukan

### Mekanisme Penipisan Lapisan Ozon

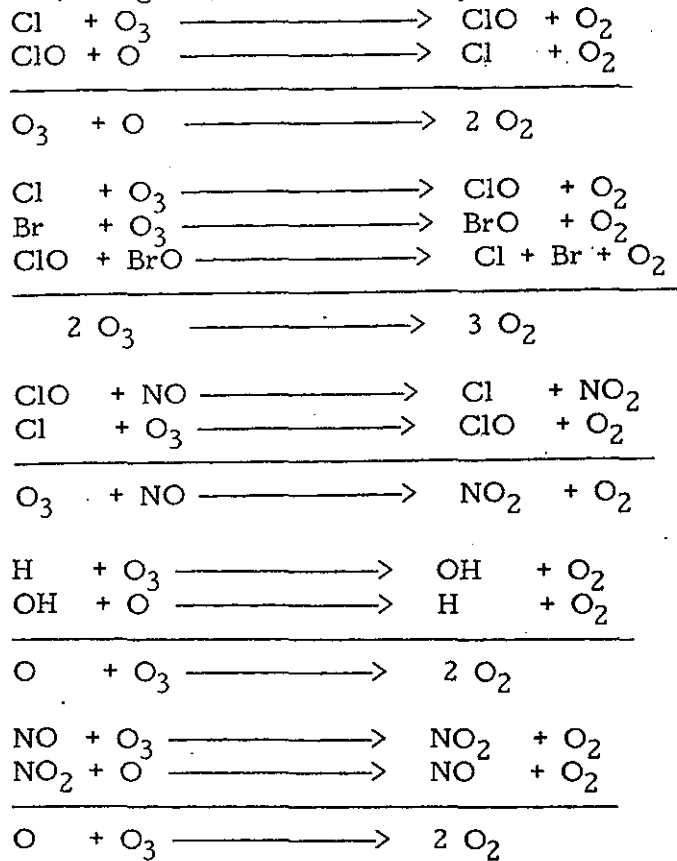
Senyawaan CFC merupakan senyawaan yang stabil dan tidak dapat dengan mudah diuraikan baik secara khemis, fisis, maupun biologis. Senyawaan CFC yang terbuang dari permukaan bumi akan bergerak ke atas menerobos lapisan troposfer dan singgah pada lapisan stratosfer selama 10 tahun atau lebih. Pada lapisan stratosfer, CFC dipecah oleh radiasi sinar UV dan terurai melepaskan atom-atom klor (Stanley, 1984: 349).



Atom-atom klor yang dilepaskan ini bereaksi dengan molekul ozon dan merusaknya.

Kemungkinan-kemungkinan reaksi perusakan ozon dapat dipelajari pada reaksi-reaksi berikut ini (Moore dan Moore,

1976: 190; Onogawa, 1989: 3; Stanley, 1984: 349):



Beberapa jenis CFC (seperti yang tercantum dalam tabel 1) dapat diklasifikasikan menjadi tiga kelompok berdasarkan struktur molekulnya dan tingkah lakunya di atmosfer, yaitu:

### 1. PFC (Perfluorocarbon) atau Fluorokarbon Super Keras

Molekul PFC hanya tersusun oleh fluorin dan karbon. Ikatan antara C - F sangat kuat sehingga senyawaan ini tahan akan reaksi kimia dan tahan akan panas serta sinar. Senyawa ini tidak akan terurai walaupun berada pada lapisan stratosfer, namun akan terdegradasi oleh sinar matahari bila berada pada bagian atas atmosfer seperti pada ketinggian 70 km. Umur PFC di atmosfer kurang lebih 1000 tahun. Senya-

waan ini tidak mempunyai potensi menipiskan lapisan ozon, tetapi dapat menyebabkan efek rumah kaca (*Greenhouse Effect*). Beberapa senyawaan turunan PFC (antara lain: PFC-14 atau disebut juga  $CF_4$ ) biasanya digunakan dalam industri elektronik.

## 2. CFC (*Chlorofluorocarbon*) atau Fluorokarbon Keras

Molekul klorofluorokarbon tersusun oleh klorin, fluorin, dan karbon. Senyawa ini sulit terurai di troposfer, tetapi dapat terurai dengan sempurna di stratosfer setelah memakan waktu kurang lebih 10 tahun. Lapisan ozon terusak sebagian oleh CFC. Banyak fluorokarbon jenis ini (misalnya: CFC-11, 12, 113, 114, dan 115) digunakan secara luas sekarang.

## 3. HFC (*Hydrofluorocarbon*) dan HCFC (*Hydrochlorofluorocarbon*) atau Fluorokarbon Lunak

Penambahan atom hidrogen ke dalam molekul PFC atau CFC dapat *melunakkan* senyawa tersebut. Senyawa tersebut menjadi lebih mudah terurai daripada fluorokarbon yang tidak berisi hidrogen. Senyawaan HFC dan HCFC dapat terurai pada lapisan troposfer sehingga senyawaan ini tidak dapat mencapai stratosfer. Dengan demikian, senyawa ini hanya mempunyai kemungkinan kecil merusakkan lapisan ozon daripada CFC. Oleh karena itu, maka HFC lebih banyak dipakai sebagai pengganti CFC.

## Gambaran Keadaan Penipisan Lapisan Ozon

Jumlah total ozon di atmosfer telah diukur dari beberapa tempat dan selama beberapa tahun dengan menggunakan berbagai teknik. Analisis statistik data yang diperoleh dari berbagai tempat di muka bumi menunjukkan bahwa jumlah ozon di atmosfer mengalami perubahan.

Molina dan Rowland (1974: 810-812), Cicerone, Stolarski dan Walters (1974: 1165-1167), serta Wofsy, McElroy dan Sze (1975: 535-537) melaporkan bahwa telah terjadi pengurangan jumlah ozon sebesar 1% dari jumlah ozon keseluruhan pada saat terbentuknya bumi. Di samping itu, dilaporkan pula bahwa bila penggunaan CFC berlangsung terus menerus maka akan terjadi pengurangan jumlah ozon sebesar 10%-15% pada tahun 1990.

oleh *British Antartics Survey* untuk mengukur kadar ozon di atas Kutub Selatan setiap bulan Oktober semenjak tahun 1957. Pengukuran ini menunjukkan bahwa jumlah total ozon di atas Antartika mengalami penurunan 40% sejak tahun 1957 sampai dengan pertengahan 1970. Pada tahun 1979 pengukuran dan pengamatan ozon dibantu dengan penggunaan satelit. Dari pengamatan menggunakan satelit diperoleh data, bahwa ternyata telah terjadi kerusakan lapisan ozon mulai dari atas Kutub Selatan sampai 45°S. Kenyataan ini menimbulkan gambaran bahwa telah terjadi lubang, atau paling tidak telah terjadi penipisan, pada lapisan ozon di atas Kutub Selatan. Diduga kedalaman lubang ini setiap saat selalu bertambah. Hal tersebut terutama terjadi pada saat di Antartika mengalami musim semi (Onogawa, 1989: 4).

Akibat yang ditimbulkan oleh terjadinya penipisan lapisan ozon di atas Kutub Selatan dirasakan pula di wilayah lainnya. Penyebab menipisnya lapisan ozon tidak pula hanya ditimbulkan oleh penggunaan CFC dan Halon di sekitar Kutub Selatan, tetapi penggunaan senyawaan tersebut di wilayah lainnya juga mempunyai andil menipiskan lapisan ozon tersebut. Masalah penipisan lapisan ozon sekarang telah menjadi masalah seluruh negara di dunia. Masalah yang bersifat global demikian hanya bisa ditanggulangi secara global pula. Setiap negara mempunyai kewajiban yang sama untuk berusaha menanggulangi masalah penipisan lapisan ozon.

### **Usaha-Usaha Penanggulangan Berlanjutnya Penipisan Lapisan Ozon**

Berbagai keputusan politik beberapa negara telah ditujukan untuk mencegah berlanjutnya penipisan lapisan ozon. Pandangan Prof. Rolland (1974) tentang penipisan lapisan ozon dibahas secara mendalam oleh United Nations Environmental Program (UNEP) dan Coordinating Committee for Ozon Layer (CCOL) pada tahun 1977. Kegiatan ini kemudian diikuti dengan pengambilan keputusan untuk melakukan gerakan yang bertujuan mencegah berlanjutnya penipisan lapisan ozon (Onogawa, 1989: 1).

Penggunaan dan produksi CFC dan Halon di masa mendatang telah dibahas pada pertemuan beberapa negara di

Montreal. Hasil pertemuan (lihat tabel 2) tersebut diharapkan telah berlaku mulai tanggal 1 Juli 1989.

**Tabel 2**  
**Peraturan tentang Tingkat Penggunaan dan Produksi CFC dan Halon**

Periode CFC	01/07/89-30/06/93 setingkat th.1986	01/07/93 - 30/06/98 80% dr 1986	01/07/98-30/06/99 50% dari 1986
Periode Halon	01/01/92 - setingkat th.1986		

Untuk menjamin dilaksanakannya peraturan yang telah diputuskan oleh Pertemuan Montreal, dunia mengajukan tuntutan agar pelaksanaan pengurangan produksi CFC dipercepat. Tuntutan ini dipertegas Deklarasi Helsinki, yang dikeluarkan di Norwegia pada tanggal 2 Mei 1989. Deklarasi tersebut menyetujui;

- 1) diturunkannya sampai titik nol produksi dan penggunaan CFC secepat mungkin tetapi tidak lewat dari tahun 2.000. Untuk maksud tersebut, maka perlu diperketat pelaksanaan hasil Pertemuan Montreal.
- 2) diturunkannya sampai titik nol produksi dan penggunaan Halon dan mengontrol serta mengurangi senyawa lain yang dapat mengakibatkan penipisan lapisan ozon secepat mungkin dengan mempertimbangkan manfaat dan tingkat bahayanya.
- 3) diberikannya kepercayaan pada masing-masing negara (sesuai dengan peranan dan sumber daya yang dimilikinya) dalam mengembangkan temuan senyawaan kimia dan teknologi yang sesuai dengan keadaan lingkungan yang diharapkan.
- 4) diberikannya kemudahan bagi mengalirnya informasi ilmiah, penyebaran hasil penelitian, pelaksanaan kursus keterampilan dan kegiatan lain yang dapat meningkatkan kemampuan, mempercepat alih teknologi dan meningkatkan penggunaan peralatan-peralatan dengan biaya murah kepada negara berkembang.

Menurut deklarasi tersebut, kalangan industriawan juga harus berusaha sungguh-sungguh dalam penanggulangan peni-

pisan lapisan ozon. Beberapa produksinya (senyawaan CFC) harus segera dihentikan pada tahun 2.000. Dan juga, pihak yang menggunakan CFC dalam proses-proses tertentu harus bersedia mengurangi ketergantungannya terhadap CFC sedikit demi sedikit sampai tidak menggunakan sama sekali bahan tersebut pada tahun 2.000 atau sebelumnya.

Penggantian CFC dengan senyawa baru diharuskan memperhatikan sifat-sifat berikut, yaitu bahwa senyawa pengganti (Moore dan Moore, 1976: 191; Stanley, 1984: 349-350):

- 1) tahan terhadap pengaruh panas dan reaksi kimia,
- 2) tidak berbahaya, tidak beracun dan tidak mudah terbakar,
- 3) mudah berubah dari fase cair ke fase gas dan atau sebaliknya,
- 4) harganya relatif murah,
- 5) dapat melarutkan minyak.

Perkembangan usaha mencari alternatif pengganti CFC sedang berjalan dengan baik dan hasil-hasilnya selalu diinformasikan pada peneliti-peneliti berikutnya agar dapat dipakai sebagai bahan acuan. Beberapa peneliti meminta kepada para pemakai CFC untuk mencoba hasil temuannya dan melaporkan hasil-hasilnya.

Ide lain untuk menghindari terjadinya akibat buruk oleh karena penggunaan CFC adalah (Onogawa, 1989: 6):

- 1) menggunakan teknologi yang bebas CFC,
- 2) tidak memanfaatkan CFC dalam setiap proses.

Kedua ide tersebut pada saat ini sedang diteliti dan dikembangkan.

### **Kesimpulan**

Penipisan lapisan ozon merupakan masalah global. Masalah demikian tidak dapat hanya ditanggulangi oleh negara tertentu saja. Semua negara mempunyai kewajiban berusaha menanggulangi berlanjutnya penipisan lapisan ozon. Salah satu usaha yang dapat dilakukan adalah dengan menggunakan dalam jumlah sedikit atau tidak menggunakan sama sekali CFC dan Halon pada teknologi-teknologi yang dipakai dan dikembangkannya.

Usaha-usaha penanggulangan penipisan lapisan ozon yang bersifat internasional tertuang dalam hasil pertemuan di Montreal.

### Daftar Pustaka

- Fuad,A. 1976. *Prinsip-prinsip Masalah Pencemaran Lingkungan*. Jakarta: Ghalia Indonesia.
- Cicerone,R.J., Stolarski,R.S. dan Walters,S. 1974. *Science*, No.185. London.
- Manahan, Stanley E. 1984. *Environmental Chemistry*. Boston: Willard Grant Press.
- Molina,M.J. and Rowland,F.S. 1974. *Nature*. No.249. London.
- Moore,J.W. and Moore,E.A. 1976. *Environmental Chemistry*. New York: Academic Press.
- Onogawa,K. 1989. *Impact of Humans Activities on The Environment*. United Nations Environment Program.
- Soedjono D, 1979. *Pengamanan Hukum terhadap Pencemaran Lingkungan Industri*. Bandung: Penerbit Alumni.
- Sedding,D.J. 1974. *Air Pollution*. Oxford: Clarendon Press.
- Wofsy,S.C., McElroy,M.B. and Sze,N.D. 1975. *Science*, No.187. London.

