

## BAB II

### DASAR TEORI

#### 2.1. Prinsip Dasar Spektroskopi Fotoakustik

Dalam spektroskopi fotoakustik fasa gas, suatu gelombang elektromagnetik (misal cahaya laser) sebagai sumber radiasi dengan intensitas termodulasi dilewatkan pada sel fotoakustik yang berisi molekul-molekul gas penyerap. Bila molekul-molekul gas menyerap energi foton, maka molekul gas yang menduduki tingkat energi dasar  $E_0$  akan tereksitasi ke tingkat energi yang lebih tinggi  $E_1$ .

Molekul-molekul gas pada keadaan tereksitasi adalah tidak stabil dan cenderung akan kembali ke keadaan stabil (tingkat energi dasar) dengan melepaskan energi sebesar  $hf$  melalui proses de-eksitasi.

$$hf = E_1 - E_0 \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

dengan

$h$  : tetapan Planck =  $6,634 \cdot 10^{-34}$  J.s.

$f$  : frekuensi foton ( $s^{-1}$ ) untuk penyerapan tenaga radiasi oleh cuplikan.

Proses de-eksitasi molekul tersebut berlangsung melalui berbagai cara seperti pada gambar 2-1. (Zharov and Lethokov, 1985; Rosencweig, 1980)

##### 1. Proses fotokimia

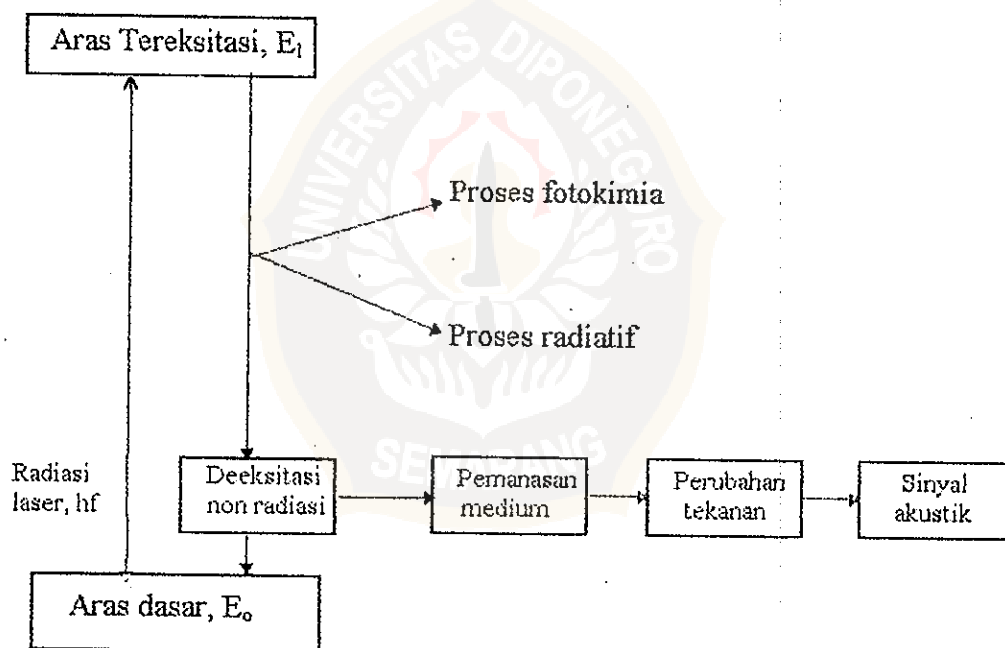
Pada proses ini, molekul-molekul mulai bereaksi secara kimia atau terjadi pengaturan ikatan kimia.

## 2. Proses radiatif (de-eksitasi radiasi)

Molekul-molekul gas menuju ke tingkat dasar dengan melepaskan kembali energi foton yang diserap dalam bentuk radiasi.

## 3. Proses termal (de-eksitasi non radiasi)

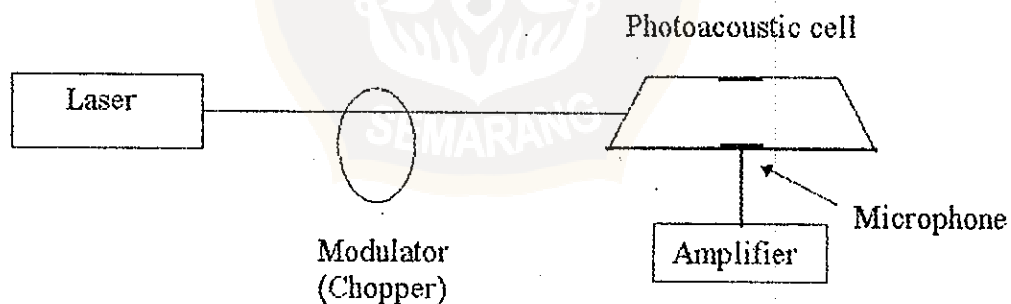
Pada proses ini molekul-molekul gas kembali ke keadaan dasar dalam bentuk energi kinetik melalui tumbukan antar molekul-molekul gas sehingga mengakibatkan pemanasan medium gas.



Gambar 2-1. Proses deeksitasi dari molekul tereksitasi

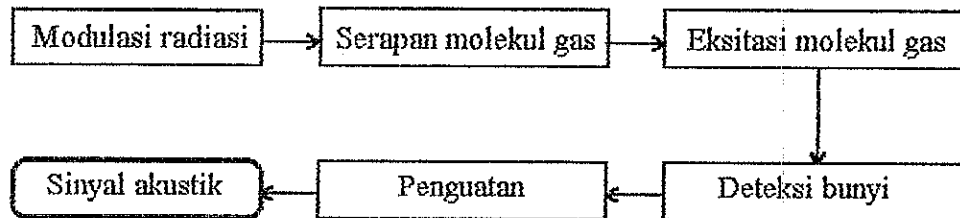
Proses de-eksitasi dari molekul-molekul dalam spektroskopi fotoakustik ini (dengan radiasi laser CO<sub>2</sub> yang memancarkan radiasi infra merah pada  $\lambda$  sekitar 10  $\mu\text{m}$ ) yang paling dominan adalah de-eksitasi non radiasi, dimana pada de-eksitasi non radiasi ini terjadi benturan antar molekul sehingga memungkinkan terjadinya pemanasan medium di dalam sel. Pada volume tetap pemanasan suhu ini mengakibatkan perubahan tekanan di dalam sel. Jika sumber radiasi yang datang pada gas cuplikan intensitasnya dimodulasi secara periodik, maka akan didapatkan perubahan tekanan dalam sel secara periodik pula yang membangkitkan bunyi pada frekuensi yang sama dengan frekuensi radiasi termodulasi. Bunyi yang terbentuk ini dapat dideteksi menggunakan mikrofon, kemudian diberi penguat dan diubah menjadi sinyal listrik yang ditampilkan pada osiloskop.

Secara sederhana dapat digambarkan seperti pada gambar 2-2.



Gambar 2-2. Diagram spektroskopi fotoakustik gas

Terbentuknya sinyal akustik dapat digambarkan secara sederhana seperti terlihat pada gambar 2-3 di bawah.



Gambar 2-3. Tahap-tahap pembentukan sinyal akustik

## 2.2. Sinyal Fotoakustik

Perubahan tekanan secara periodik yang timbul dalam sel fotoakustik akibat radiasi laser akan menimbulkan sinyal akustik. Besarnya sinyal akustik yang dihasilkan sebanding dengan daya radiasi dan jumlah cuplikan gas penyerap. (Bicanic, 1987)

Menurut Lambert Beer, bahwa daya radiasi yang menembus cuplikan sepanjang  $L$  diberikan oleh persamaan berikut :

$$D_{\text{trans}} = D_0 e^{-\beta L} \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

dengan :

$D_{\text{trans}}$  : Daya laser yang berhasil ditransmisikan menembus gas cuplikan (Watt).

$D_0$  : Daya radiasi yang datang (Watt).

$L$  : Panjang kolom sel (cm).

$\beta$  : Koefisien serapan cuplikan tiap satuan panjang ( $\text{cm}^{-1}$ ).

Dengan demikian daya yang diserap gas cuplikan  $D_{\text{abs}}$  adalah,

$$D_{\text{abs}} = D_0 - D_{\text{trans}}$$

$$D_{\text{abs}} = D_0 (1 - e^{-\beta l}) \quad \dots\dots\dots (2-3)$$

Apabila serapan gas ( $\beta$ ) cukup kecil ( $\beta \ll 1$ ), persamaan (2-3) bisa diubah menjadi

$$D_{\text{abs}} = D_0 \beta L \quad \dots\dots\dots (2-4)$$

Koefisien serapan linier molekul gas dapat juga dinyatakan dengan

$$\beta = k P = \sigma C_g N_m \quad \dots\dots\dots (2-5)$$

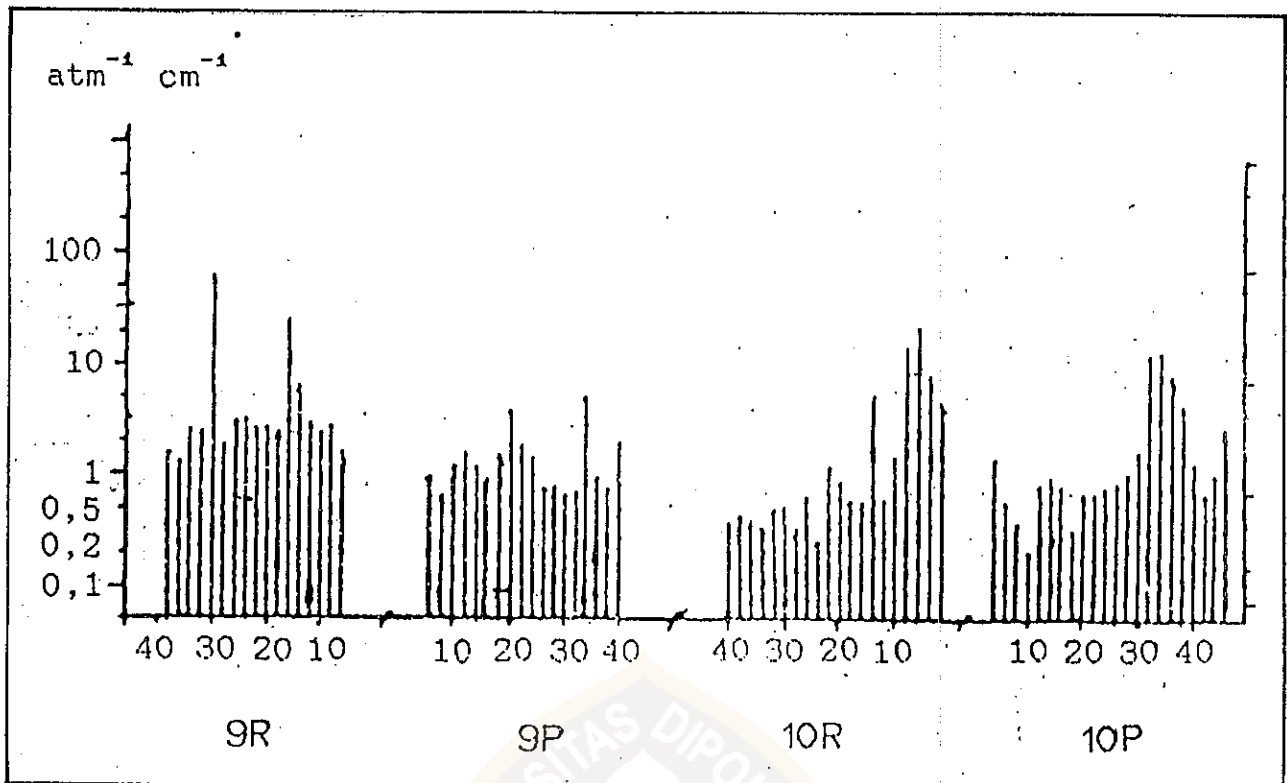
$k$  : Tetapan serapan linier gas pada tekanan atmosfer ( $\text{atm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ )

$\sigma$  : Luas tampang serapan ( $\text{m}^2/\text{molekul}$ )

$P$  : Tekanan gas (atm)

$C_g$  : Konsentrasi gas

$N_m$  : Jumlah molekul campuran persatuan volume ( $\text{molekul}/\text{cm}^3$ ).



Gambar 2-4. Spektrum koefisien serapan linier gas amonia untuk emisi laser  $\text{CO}_2$

Besarnya sinyal akustik  $S_a$  (mV) yang terbentuk sebanding dengan daya yang berhasil diserap molekul  $D_{\text{abs}}$  serta kepekaan sistem deteksi  $R$ , sehingga :

$$S_a = D_{\text{abs}} R \quad \dots\dots\dots (2-6)$$

Dengan substitusi persamaan (2-6) ke persamaan (2-4) dan (2-5) didapatkan

$$S_a = D_0 \sigma C_g N_m R L \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

dengan  $R$  menyatakan kepekaan sistem deteksi sel fotoakustik (mV/Watt).

Kepekaan sistem deteksi menunjukkan efisiensi perubahan daya laser yang diserap menjadi sinyal akustik.

### 2.3. Sinyal Tambahan

Dalam proses gejala fotoakustik sering disertai timbulnya sinyal tambahan yang tidak diinginkan. Adanya sinyal tambahan ini akan mempengaruhi kepekaan sel untuk menghasilkan sinyal akustik yang sesungguhnya. Sinyal tambahan tersebut dikenal sebagai sinyal latar (*background*) dan sinyal derau (*noise*).

#### 2.3.1. Sinyal Latar (*Background*)

Timbulnya sinyal akustik yang berasal bukan dari hasil serapan energi sumber radiasi oleh molekul gas yang dianalisa disebut sebagai sinyal latar. Sinyal latar ini bersumber dari hasil serapan energi sumber radiasi oleh jendela dan dinding sel fotoakustik, akibat tabung sel terbuat dari bahan yang memiliki kemampuan untuk menyerap panas.

##### 2.3.1.1. Sinyal Latar Jendela

Bila cahaya laser dilewatkan ke dalam sel fotoakustik, maka ada sebagian cahaya yang diserap oleh jendela sel. Hal ini mengakibatkan timbulnya panas di dalam jendela sel. Panas yang berkembang di dalam jendela sel dipindahkan ke gas yang ada di dekatnya. Bila intensitas berkas laser yang datang termodulasi oleh chopper maka pertambahan suhu di dalam jendela sel akan mengakibatkan kenaikan suhu dan tekanan gas yang ada di dekat jendela. Perubahan tekanan tersebut merupakan sinyal akustik tambahan dari jendela yang bertindak sebagai sinyal latar. Besar sinyal latar dari

jendela sel sebanding dengan intensitas cahaya yang datang dan parameter jendela seperti koefisien serapan jendela terhadap radiasi.

Sinyal latar jendela dapat diperkecil dengan cara memilih jendela dari bahan yang mempunyai koefisien serapan lemah.

### **2.3.1.2. Sinyal Latar Dinding**

Sinyal latar juga bisa ditimbulkan oleh serapan cahaya oleh dinding sel sehingga timbul panas pada dinding sel. Panas yang berhubungan dalam dinding dipindahkan ke gas di sekitarnya dan akhirnya membentuk sinyal latar. Proses pembentukan sinyal latar dinding dan faktor yang mempengaruhi sama dengan proses pembentukan sinyal latar jendela. Untuk sel fotoakustik dengan diameter kecil, sinyal latar dinding menjadi sangat dominan. Sinyal latar dinding dapat ditimbulkan akibat radiasi cahaya yang mengenai dinding, karena cahaya yang masuk dari dalam sel tidak pada sumbu sel.

Sinyal latar dinding dapat diperkecil dengan cara mengurangi energi cahaya yang diserap dinding, yaitu memilih bahan dinding yang mempunyai koefisien serapan lemah. Disamping cara di atas, sinyal latar dapat diperkecil dengan cara menghaluskan permukaan sebelah dalam dan memperkecil cahaya yang jatuh pada dinding dengan cara memperbesar diameter sel.



### 2.3.1.3. Sinyal Latar Gas Asing

Selain sinyal latar yang berasal dari jendela dan dinding sel, sinyal latar dapat juga terjadi akibat serapan cahaya oleh gas asing atau pengotor yang memiliki spektrum serapan yang sama dengan spektrum serapan gas yang akan dianalisa. Gas pengotor yang terdapat dalam sel dapat ditimbulkan oleh gas-gas yang tidak terkontrol di dalam komponen gas yang dianalisa sehingga menimbulkan keracunan di dalam sel.

Sinyal latar akibat keracunan gas ini, dapat diperkecil dengan cara memilih bahan dinding sel yang tidak menyerap gas (misal stainless steel, teflon, dan kuarsa) atau dapat pula digunakan gas netral yang tidak beresonansi dengan radiasi laser, seperti Helium, Nitrogen, dan Argon, dan menghindari sel agar tidak terisi oleh gas-gas asing.

### 2.3.2. Sinyal Derau (*Noise*)

Sinyal derau merupakan sinyal yang berasal dari derau akustik, derau gerakan molekul gas dan derau elektronik. Derau akustik ditimbulkan oleh getaran gedung, getaran modulator mekanik dan bunyi lingkungan di sekitar percobaan (*ambient acoustic*). Modulator yang stabil pada frekuensi tinggi sangat diperlukan, karena dapat memperkecil tingkat sinyal derau. Untuk memperkecil getaran gedung dan getaran modulator dapat dilakukan dengan memilih posisi penempatan sel yang tepat.

Derau mikrofon adalah sebagai akibat dari hasil tangkapan gerak molekul gas. Sedangkan derau elektronik lebih dominan dihasilkan oleh penguat yang dihubungkan ke mikrofon. Derau pada penguat muncul pada frekuensi rendah dan frekuensi tinggi.

#### **2.4. Peningkatan kepekaan sistem fotoakustik**

Spektrometer fotoakustik merupakan jenis spektroskopi yang banyak digunakan karena instrumentasinya yang sederhana serta memungkinkan dilakukan secara otomatis. Sel fotoakustik berkepekaan tinggi merupakan alat utama untuk analisa gas. Munculnya sinyal latar dan derau merupakan masalah utama untuk mewujudkan instrumentasi spektroskopi fotoakustik berkepekaan tinggi. Untuk meningkatkan kepekaan sistem spektroskopi fotoakustik dapat dilakukan dengan cara :

- memperkecil sinyal latar dan derau.
- meningkatkan intensitas berkas laser yang datang ke sel.
- bila intensitas berkas laser tidak dapat ditingkatkan, maka interaksi cahaya laser gas dapat ditingkatkan dengan cara merancang sel sedemikian rupa sehingga menghasilkan konfigurasi optik yang optimum.

Konfigurasi optik menggambarkan lintasan cahaya di dalam sel fotoakustik yang menyatakan perpindahan energi dari sumber cahaya kepada gas untuk menghasilkan sinyal akustik di dalam sel. Bila konfigurasi optik di dalam sel optimum, maka cahaya yang diserap oleh gas akan bertambah.

#### **2.5. Faktor kualitas**

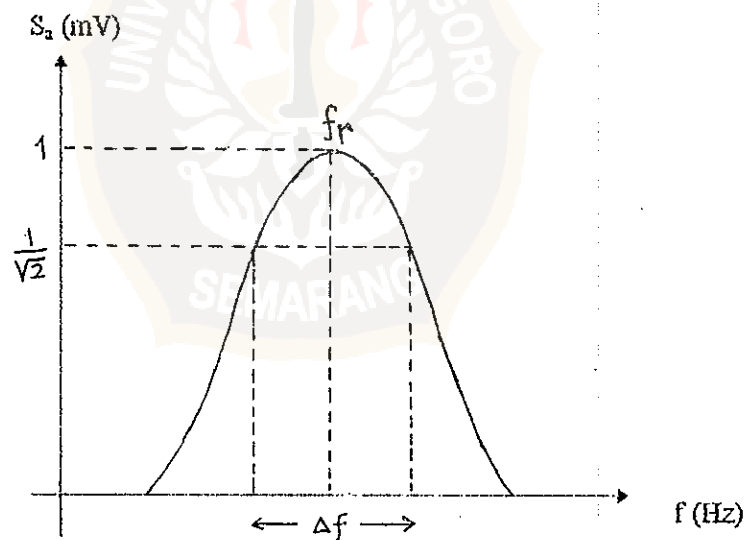
Kepekaan dari suatu sel fotoakustik merupakan parameter yang sangat penting dari kinerja sel. Tingginya kepekaan suatu sel dapat diketahui dengan menggunakan

parameter faktor kualitas ( $Q$ ). Faktor kualitas ini juga merupakan ukuran ketidakrugian energi (*energi lossless*) pada pembentukan gelombang akustik, yaitu perbandingan antara energi yang tersedia dengan kehilangan energi pada pembentukan gelombang akustik. Faktor kualitas didefinisikan sebagai perbandingan frekuensi resonansi ( $f_r$ ) dengan lebar pita resonansi ( $\Delta f$ ).

Dapat dituliskan seperti pada persamaan (2-8)

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f} \quad \dots\dots\dots (2-8)$$

$\Delta f$  diukur pada saat tinggi sinyal resonansi sama dengan  $1/\sqrt{2}$  amplitudo sinyal maksimum.



Gambar 2-5. Faktor kualitas suatu resonator.

Faktor kualitas Q dari suatu resonator juga dipengaruhi oleh ukuran diameter dan panjang dari resonator (Harren, 1988)

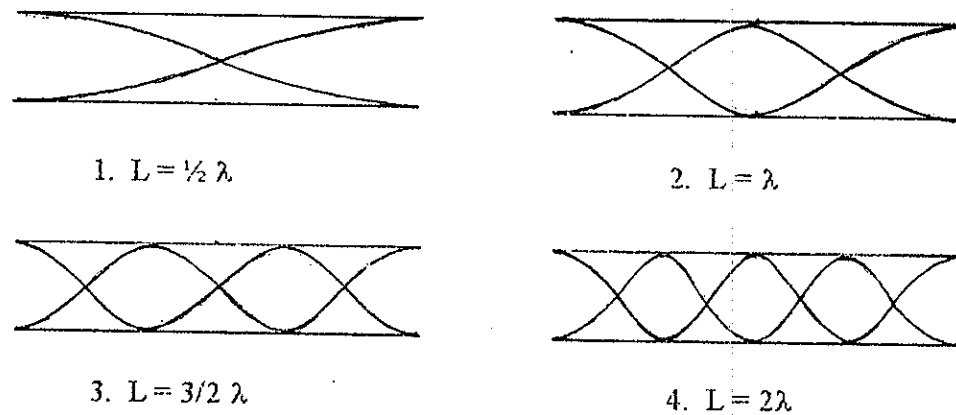
Dari tabel 2-1 dapat dilihat faktor kualitas Q untuk berbagai diameter resonator dengan panjang resonator 300 mm pada penelitian pelacakan gas  $C_2H_4$  (etana)

Tabel 2-1. Faktor kualitas pada resonator panjang 300 mm untuk berbagai diameter pada sampel gas etana ( $C_2H_4$ )

Diameter (mm)	Faktor Kualitas (Q)
6	16,4
9	28,7
12	34,0
15	46,6

## 2.6. Resonansi

Resonansi merupakan peristiwa ikut bergetarnya suatu benda karena pengaruh getaran gelombang elektromagnetik dari luar. Molekul-molekul gas yang dikenai radiasi elektromagnetik (radiasi laser) menimbulkan resonansi di dalam sel fotoakustik (resonator). Pada jenis resonator terbuka, resonansi yang terjadi terlihat seperti gambar 2-6.



Gambar 2-6. Panjang gelombang dan panjang resonator terbuka

Perbandingan frekuensi-frekuensi yang terjadi :

$$f_0 : f_1 : f_2 = 1 : 2 : 3 \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

(bilangan bulat) (Hallyday; Resnick, 1993)

Gelombang bunyi adalah gelombang longitudinal yang dapat dijalarakan di dalam benda padat, cair dan gas. Pada gas dengan tekanan udara tertentu laju penjalaran gelombang bunyi  $c$  adalah

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

(Rossing, 1989)

$\rho$  adalah rapat jenis gas.

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad \dots\dots\dots (2-11)$$

$\gamma$  : perbandingan panas jenis gas

$c_p$  : kapasitas panas jenis gas pada tekanan konstan

$c_v$  : kapasitas panas jenis gas pada volume konstan.

