

## TEKNIK FOTOAKUSTIKS

Abd Rahman Ismail, Mohd Annuar Abd Latif, Che Mazlan Saad

Jabatan Fizik, Fakulti Sains,  
Universiti Teknologi Malaysia.

### Synopsis

Kesan fotoakustiks terbentuk apabila sesuatu sampel menyerap haba secara berkala. Ini menyebabkan terbentuknya fluktuasi tekanan pada sampel dan media disekeliling sampel itu. Fluktuasi tekanan ini bergantung kepada sifat-sifat terma, optik dan fizikal sampel dan media disekeliling sampel itu. Pengukuran fluktuasi tekanan ini membolehkan kita menentukan sifat-sifat terma, optik dan fizikal sampel bahan.

Magnitud kesan fotoakustiks adalah teramat lemah. Kajian yang telah dibuat menumpukan perhatian terhadap teori kesan fotoakustiks dan merekabentuk instrumentasi yang dapat mengesan fluktuasi tekanan yang lemah yang dihasilkan oleh CdS dan Karbon. Penyelidikan ini telah berjaya mengesan kesan fotoakustiks pada peringkat fluktuasi tekanan yang sangat kecil iaitu di sekitar  $10^{-4}$  Pa.

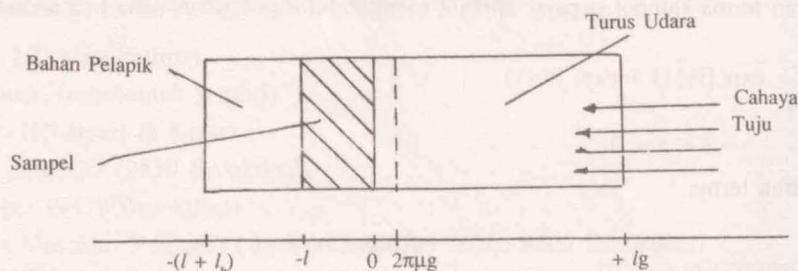
### Pengenalan

Pada tahun 1880 *Alexander Graham Bell* telah mendapati bahawa isyarat bunyi boleh didengar apabila sampel pepejal yang diletakkan dalam sel tertutup disinari oleh cahaya matahari yang diganggu secara berkala. *Tyndell* dan *Rontgen* juga mendapati isyarat akustiks boleh dihasilkan apabila digunakan sampel udara. Model-model secara teori telah dihasilkan oleh *Parker*, *Rosencwaig* dan *Gherso*, *McDonald* dan *Wetsel* dan beberapa penyelidik yang lain untuk menerangkan fenomena isyarat akustiks oleh sampel apabila sampel disinarkan dengan cahaya yang berkala. Kesan fotoakustiks adalah penghasilan dan pemerhatian gelombang akustiks di dalam satu media disebabkan oleh penyerapan gelombang elektromagnet termodulasi.

Kajian fotoakustiks ke atas bahan pepejal dilakukan dengan meletakkan sampel pepejal tersebut di dalam satu sel tertutup yang mengandungi turus udara di mana diletakkan satu mikrofon yang sensitif. Sampel disinarkan dengan cahaya yang dimodulasi. Magnitud dan fasa isyarat akustiks yang dihasilkan bergantung kepada sifat pepejal tersebut. Magnitud kesan fotoakustiks yang dihasilkan adalah terlalu lemah, disekitar  $10^{-4}$  Pa ( $\sim 10^{-9}$  atm). Ini adalah kerana hanya sebahagian kecil sahaja daripada sinaran berkala ditukar kepada tenaga akustiks. Fluktuasi tekanan akustiks menyebabkan getaran pada diafram mikrofon yang kemudiannya ditukar kepada denyut voltan elektrik. Perubahan voltan output lawan masa adalah analog dari perubahan tekanan akustiks lawan masa yang dihasilkan oleh sampel. Magnitud dan fasa kesan fotoakustiks menggambarkan sifat terma, optik dan fizikal sampel. Sifat terma bahan boleh dikaji kerana kesan fotoakustiks bergantung pada nilai kekonduksian terma sesuatu bahan itu. Sifat optik boleh dilihat kerana pekali penyerapan optik bergantung kepada jarak gelombang yang tersinar pada bahan tersebut. Bidang sifat optik bahan lebih dikenali sebagai spektroskopi fotoakustiks, kebaikan timbul dengan penggunaan teknik spektroskopi fotoakustiks kerana teknik ini tidak memerlukan sifat pembalikan yang baik dan permukaan yang licin jika dibandingkan dengan teknik lain. Spektroskopi fotoakustiks juga boleh digunakan dalam bidang kaji hayat dan perubatan. *Moller et al* telah menunjukkan bahawa spektroskopi fotoakustiks boleh digunakan untuk penilaian sebaran protein. Teknik PA juga boleh digunakan dalam bidang pengkajian sifat fizikal bahan seperti ketebalan filem nipis dan pengesanan keretakan di subpermukaan sesuatu sampel. Pengesanan keretakan ini boleh digunakan dalam pengawasan kualiti semasa membuat chip semikonduktor.

### Teori Rosenchaig Gersho

Pertimbangkan keratan rentas satu dimensi sel fotoakustiks mudah berbentuk selinder seperti di bawah:



Rajah 1

Katakan cahaya monokromatik dengan panjang gelombang  $\lambda$  yang dipenggal (*chopped*) secara sinusoidal berkeamatan  $I$  apabila ia kena pada sampel.

$$I = 0.5I_0 (1 + \cos \omega t)$$

dengan  $I_0 =$  Fluks cahaya monokromatik tuju ( $W/cm^2$ ).

Mana-mana cahaya yang diserap oleh sampel ditukarkan sebahagian ataupun sepenuhnya kepada haba melalui proses ternyahuja tanpa sinaran (*nonradiative deexcitation processes*). Sampel akan menghasilkan dan mengalirkan haba keruang udara apabila sampel tersebut disinari oleh cahaya berkala. Pengaliran haba yang berkala keruang udara dalam sel menyebabkan tekanan satu lamina nipis turus udara (sepanjang  $2\pi\mu g$ ) yang bersebelahan dengan sampel turun-naik (fluktuasi). Fluktuasi tekanan lamina nipis udara ini akan dikesan oleh mikrofon dalam bentuk isyarat akustiks.

Jadi isyarat akustiks dalam sel fotoakustiks dihasilkan dari pengaliran haba berkala oleh sampel keruang udara apabila sampel dipanaskan secara sinusiod oleh cahaya monokromatik yang berkala. Seterusnya hanya satu lamina nipis udara ( $\sim 0.2$  cm untuk penggalan berfrekuensi 100Hz) bersebelahan kepada sampel memberi gerakbalas terma akibat dari pengaliran haba secara berkala keruang udara.

#### Menerbitkan Variasri Tekanan Akustiks Sampel $\Delta P (t)$

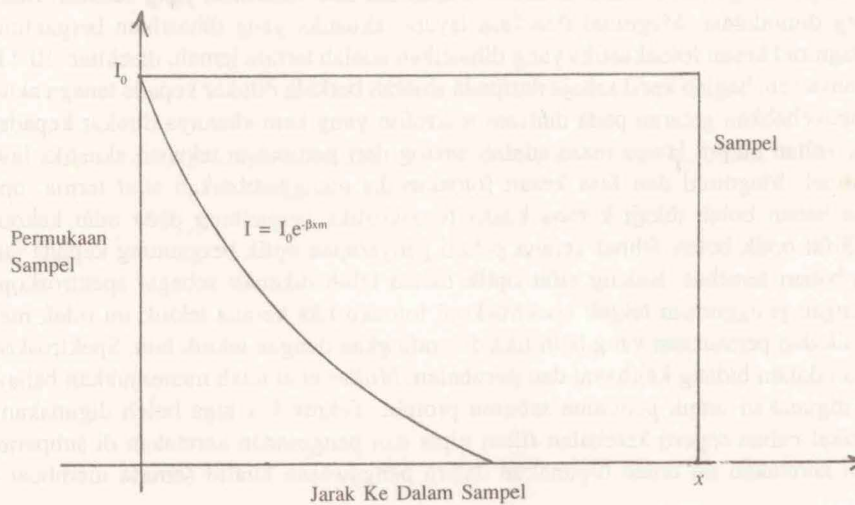
Keamatan cahaya tuju pada mana-mana titik dalam sampel diberikan oleh persamaan:

$$I = I_0 \exp - (\beta x m)$$

dengan  $\beta =$  pekali penyerapan sampel ( $cm^{-1}$ ).

$M =$  fungsi modulasi  
 $= 0.51 (1 + \cos \omega t)$

Graf di bawah menunjukkan keamatan cahaya dalam sampel.



Rajah 2

Keamatan akan berkurang secara eksponen apabila jarak ke dalam sampel bertambah ( $x$  bertambah positif). Persamaan pembauran terma sampel pepejal apabila mengambil kira agihan haba boleh ditulis sebagai

$$\frac{\delta^2 \phi}{\delta x^2} = \frac{1 \delta \phi \beta I_0}{\alpha_s \delta t 2 k_s} \exp(\beta x) (1 + \exp(j\omega t))$$

$$-1 < x < 0$$

dengan  $\alpha =$  pembauran terma

$$= k/\infty$$

$\beta =$  pekali penyerapan sampel

$$\omega = 2\pi f$$



f = frekuensi penggalan  
 x = jarak ke dalam sampel  
 φ = suhu ambient

Subskrip s untuk sampel, b untuk bahan pelapik dan g untuk gas/ udara.  
 Untuk bahan pelapik dan gas (udara) persamaan pembauran terma diberikan sebagai:

$$\frac{\delta^2 \phi}{\delta x^2} = \frac{1 \delta \phi}{\alpha_b \delta t} \quad -1 - 1_b < x < -1 \quad \dots (2)$$

$$\frac{\delta^2 \phi}{\delta x^2} = \frac{1 \delta \phi}{\alpha_g \delta t} \quad 0 < x < x l_g \quad \dots (3)$$

Penyelesaian persamaan 1, 2 dan 3 memberikan variasi suhu dalam sel fotoakustiks sebagai fungsi masa dan kedudukan.

$$T(x,t) = \text{Re}(\phi(x,t)) + \Phi$$

Φ = suhu bilik

Risencwaig dan Gersho telah menerbitkan persamaan variasi tekanan akustiks sampel sebagai:

$$\Delta P = \frac{\beta l_0 \in P_0}{2\sqrt{2} k_s L_g U_g \theta_0 (\beta^2 - \sigma_s^2)} \times \left[ \frac{(\nu - 1)(b + 1)e^{\sigma_s l_s} - (\nu + 1)(b - 1)e^{-\sigma_s l_s} + 2(b - r)e^{-\beta l_s}}{(g + 1)(b + 1)e^{\sigma_s l_s} - (g - 1)(b - 1)e^{-\sigma_s l_s}} \right] \times e^{i(\omega t - \frac{\pi}{4})}$$

Persamaan yang kompleks ini boleh diterjemahkan secara fizikal iaitu amplitud variasi tekanan gas bergantung kepada keamatan cahaya tuju, sifat-sifat terma sampel dan udara juga fakta-fakta terperinci mengenai proses pembauran terma yang bertanggungjawab kepada pengaliran haba keruang udara.

Beberapa andaian yang dibuat dalam teori ini ialah:

- Udara dalam sampel dan bahan pelapik tidak memainkan peranan penting dalam penghasilan isyarat akustiks.
- Pengembangan dan pengecutan terma sampel pepejal serta getaran mekanikal sampel dianggap kecil dan boleh diabaikan.

### Instrumentasi dan Kaedah Penyelidikan

Perubahan tekanan akustiks yang dihasilkan oleh sampel disebabkan pemanasan berkala mempunyai magnitud  $10^{-4}$  Pa ( $\sim 10^{-9}$  atm diperolehi secara simulasi komputer). Tekanan ini sangat kecil, maka alat radas yang digunakan mestilah benar-benar peka.

Alat radas yang kami gunakan dalam penyelidikan ini ialah:

- Spot light (250 watt Philips)
- Sample holder. (rekabentuk sendiri)
- Mikrofon (4165 Bruel & Kjeur)
- AC & DC amplifier (9550 Brookdeal)
- Light chopper (9479 Brookdeal)
- Penganalisa Masukan Terkunci ( lock-in amplifier (LIA) 9505 Brookdeal)
- Osilloscope (PM3232 Philips)
- Sampel a) arang b) hablur Cds

Peralatan di atur seperti dalam gambarajah 1. Gelombang elektromagnet yang dihasilkan oleh spotlight dengan jarak gelombang  $\lambda$  di antara 380-760 nm, dipenggal oleh bilah-bilah chopper yang menghasilkan gelombang termodulasi. Gelombang termodulasi ini boleh divariasi dalam julat 0.5-3 kHz oleh light chopper. Hanya 75% dari kuasa sebenar spotlight yang ditukar kepada tenaga terma. Oleh yang demikian keamatan cahaya tersebut ialah 1.47 watt/cm<sup>2</sup>. Keamatan cahaya ini menerusi tingkap kaca di mana kehilangan sebanyak 0.5 watt/meter. kelvin sebelum sampai ke sampel. Luas permukaan tingkap yang digunakan ialah 7.06 cm<sup>2</sup>, maka keamatan yang benar-benar sampai ke sampel ialah 10.356 watt/cm<sup>2</sup>.

Hasil daripada pemanasan sampel yang berkala ini akan menghasilkan kesan piston di turus udara. Mikrofon dengan sensitiviti 47.9 mV/Pa yang bekerja dalam lebar jalur frekuensi 4-10 kHz akan mengesan perubahan tekanan tersebut. Mikrofon mesti diatur pada kedudukan tertentu untuk mendapatkan isyarat yang maksimum. Ini boleh diperolehi dengan menentukan jarak pembauran terma yang diberikan oleh persamaan

$$\mu_g = (1/\omega \alpha_g)^{0.5}$$

dengan  $\alpha_g$  = pembauran terma udara

$\omega$  = chopping frequency.

Aamodt et al telah menemukan isyarat maksimum terjadi pada  $L = 1.4\mu g$ . Isyarat yang dikesan ini akan dituras pada lebar jalur frekuensi yang tertentu dan digandakan oleh AC & DC amplifier. Amplifier ini berfungsi untuk menggandakan isyarat yang bercampur dengan hingar ke tahap mengatasi swahingar (*selfnoise*) yang terdapat dalam penganalisis masukan terkunci.

Gelombang isyarat yang dimasukkan ke dalam LIA akan dibersihkan di mana hingar dan intereferen diasingkan dari isyarat PA. Pengasingan ini boleh dilaksanakan dengan menggunakan turas di mana gelombang isyarat yang termodulasi akan dibandingkan dengan gelombang rujukan yang dikeluarkan dari light chopper. Hingar dan intereferen diasingkan kerana sifatnya yang tidak berkala, ini dilakukan oleh komponen phase-sensitive detector yang terdapat di dalam LIA. Isyarat yang dikeluarkan ini akan ditayangkan di osiloskop.

Semasa melakukan ujikaji ini sampel diletakkan dihadapan mikrofon. Sel yang digunakan diperbuat daripada silinder kaca yang dibalut dengan aluminium fold yang bertujuan untuk: (lihat Rajah 2)

- i. Cahaya dari sumber tidak akan disebarkan keluar melalui dinding sel.
- ii. Mengelakkan cahaya dari luar memasuki turus udara sel. Selinder kaca ini dibuat supaya kedap udara di mana O-ring digunakan untuk mengelakkan kebocoran tekanan berlaku.

#### Data dan Hasil Penyelidikan

Fakta-fakta yang menentukan bahawa isyarat yang dihasilkan adalah isyarat akustiks ialah:

- a. Gelombang yang dihasilkan di osiloskop adalah gelombang berkala.
- b. Frekuensi gelombang yang dihasilkan sama dengan frekuensi rujukan.
- c. Isyarat akan hilang bila cahaya ditiadakan.
- d. Untuk memastikan bahawa isyarat tersebut adalah benar-benar dari sampel kami telah menanggalkan kabel dari setiap komponen elektronik dan didapati isyarat tersebut hilang.

	Sampel	Frekuensi	Amplitud
a	CdS	75 Hz	0.60 Volt
b	Cds	85 Hz	0.22 Volt
c	Karbon	85 Hz	0.75 Volt
d	Udara	85 Hz	0.11 Volt

Dua olahan boleh dibuat daripada data di atas:

- i. Frekuensi sama bagi sampel berbeza.

Pada frekuensi 85 Hz, amplitud bagi gelombang yang dihasilkan oleh CdS, Karbon dan udara adalah 0.22 V, 0.75 V dan 0.11 V masing-masing. Didapati Karbon menunjukkan amplitud yang paling tinggi, diikuti oleh CdS dan udara. Amplitud gelombang ini mempunyai korelasi dengan pekali penyerapan sampel. Jasad hitam (karbon) mempunyai pekali penyerapan tinggi diikuti oleh CdS dan udara. Teori *Rosenzweig* dan *Gersho* menyatakan bahawa variasi tekanan akustiks sampel bertambah apabila pekali penyerapan sampel besar. Jadi boleh dikatakan data yang dapati bertepatan dengan teori tersebut.



ii. Frekuensi berbeza bagi sampel sama (CdS).

Amplitud gelombang yang dihasilkan oleh CdS bertambah dengan pertambahan frekuensi. Apabila cahaya dipenggal dengan frekuensi yang tinggi maka jarak pembauran terma sampel berkurang. Oleh itu amplitud gelombang pada frekuensi 85 Hz kecil dari amplitud gelombang pada frekuensi 75 Hz. Perkara ini boleh difahami kerana jarak pembauran terma sesuatu sampel itu bergantung pada  $f$  iaitu frekuensi penggalan.

### Huraian

Isyarat akustiks yang dihasilkan diruang udara hasil dari penyerapan cahaya berkala oleh sampel dikesan oleh mikrofon yang merupakan isyarat sinkronisasi dan kemudian digandakan oleh amplifier. Apa yang menjadi masalah ialah terdapatnya isyarat hingar wujud bersama isyarat akustiks. Terdapat beberapa komponen yang menjadi sumber kepada isyarat hingar ini. Isyarat hingar mekanikal dihasilkan oleh bilah-bilah copper dan kipas dari pendingin hawa yang menyebabkan getaran dan dikesan oleh mikrofon. Untuk mengurangkan fenomena ini komponen yang memegang mikrofon diletakkan di atas penyerap getaran (kami gunakan sponge).

Komponen elektronik dengan sendirinya juga menghasilkan isyarat hingar, ini akan disuperimposkan lagi isyarat yang tidak dikehendaki. Dua jenis hingar dihasilkan ialah dari fluktuasi voltan dan arus yang menghasilkan beberapa jenis hingar seperti "white noise, flicker noise, therma noise" dan lain-lain lagi.

Menggunakan LIA isyarat hingar akan dikurangkan dan isyarat yang bersih diperolehi. Ini dilakukan oleh komponen penuras dalam LIA. Sistem isyarat yang bercampur dengan hingar dengan lebar jalur  $B_1$  dan ketumpatan spektrum  $W_n$ . Nisbah SNR (*signal to noise ratio*) diberikan oleh persamaan;

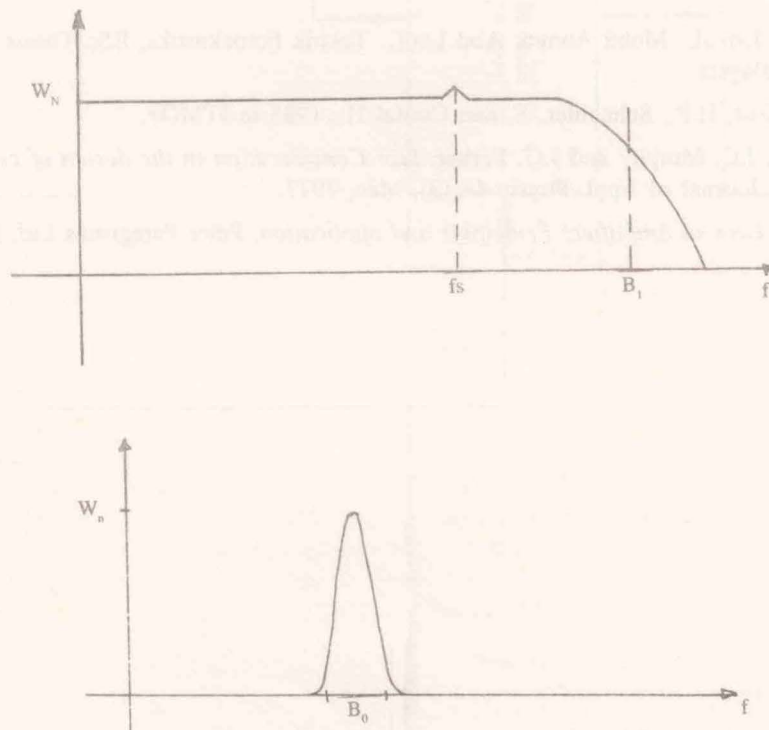
$$SNR_1 = s^2(t) / W_n B_1$$

dan selepas penuras

$$SNR_0 = s^2(t) / W_n B_0$$

dengan  $B_0$  merupakan lebar jalur isyarat.<sup>6</sup>

Ini akan memberikan SNR yang tinggi bererti isyarat yang hampir bersih diperolehi. Bagi mengelakkan hingar intereferen, penetapan frekuensi copper dielakkan daripada menggunakan frekuensi 50 Hz ataupun harmoniknya



Rajah 3

## Rumusan dan Cadangan

Kesimpulan yang boleh dibuat di sini ialah kebenaran teori yang dibuat oleh *Rosencwaig - Gersho* dan juga kejayaan merekabentuk sel yang boleh mengesan isyarat PA. Walau bagaimanapun pengkajian ini boleh diteruskan lagi dengan menggunakan interface komputer di mana isyarat dianalog terus ke komputer dan pengoperasian terhadap data boleh dibuat seperti mengira magnitud isyarat PA, keamatan cahaya, dan memplotkan graf dari data tersebut.

Pengkajian ini boleh diteruskan lagi kepada aspek yang lebih kompleks seperti menggunakan sumber cahaya yang panjang gelombang berbeza. Ini adalah kerana pekali penyerapan sampel bergantung kepada panjang gelombang. Oleh itu spektrum penyerapan sampel boleh dilihat apabila panjang gelombang sumber cahaya divariasikan.

Kita juga boleh menentukan pengkajian sifat subpermukaan sampel dengan mevariasikan frekuensi chopper, di mana jarak peresapan terma dalam sampel boleh dilihat (rujuk persamaan pembauran terma). Dari persamaan ini menunjukkan semakin tinggi frekuensi chopper semakin pendek jarak peresapan terma. Oleh itu kita boleh melihat sifat yang terdapat pada jarak yang hampir ke permukaan sampel. Implikasi daripada teknik ini kita boleh menentukan keretakan sesuatu bahan.

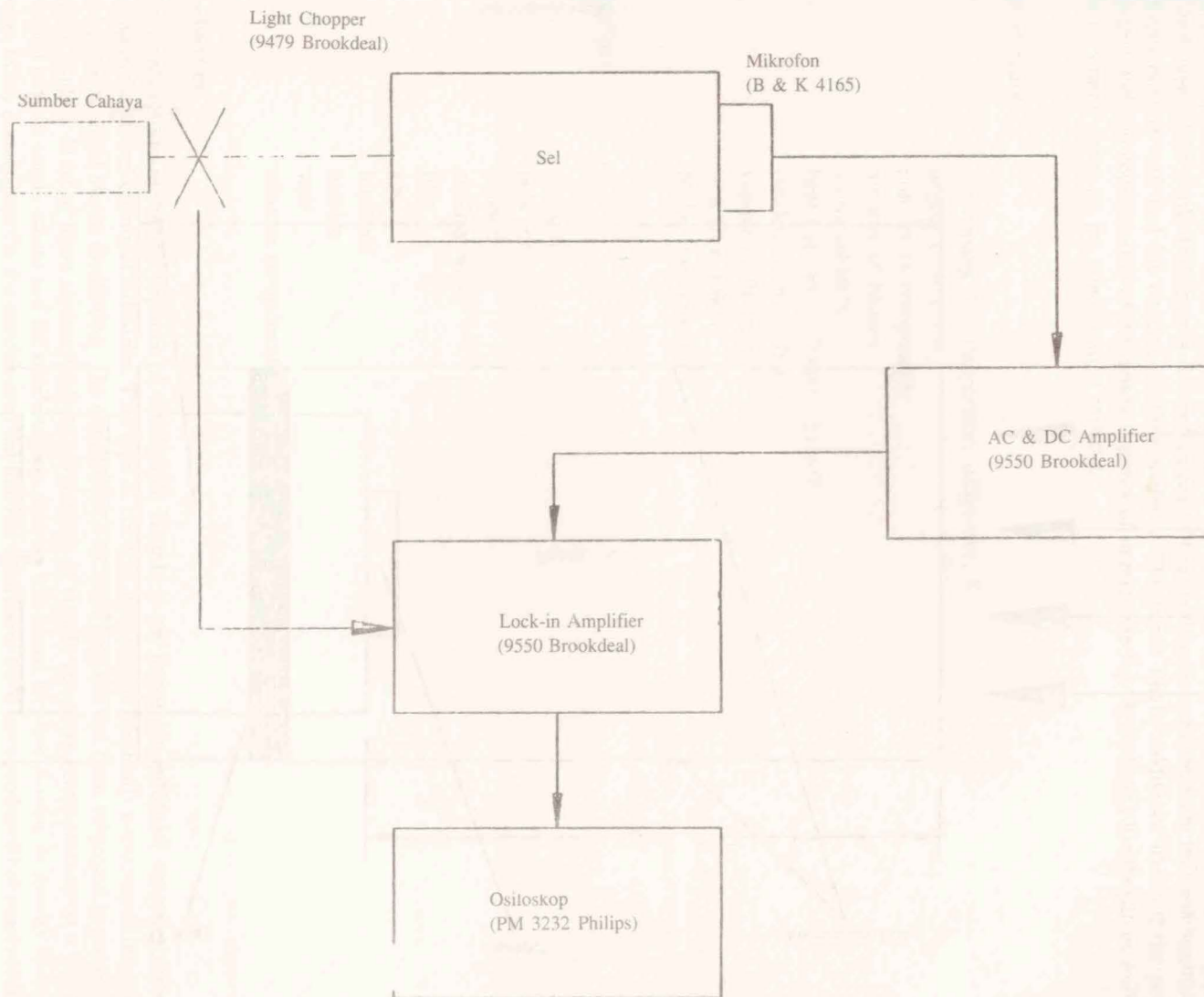
Rekabentuk sel fotoakustik boleh diubahsuaikan lagi. Untuk mendapatkan sel yang efektif, kedudukan sampel daripada mikrofon mestilah boleh diubah-ubah supaya dapat mengesan isyarat akustiks yang maksimum.

## Penghargaan

Kami ingin menyampaikan penghargaan kami kepada En. Samad Solbai, Fakulti Kejuruteraan Jentera, di atas kerjasama yang diberikan semasa melakukan penyelidikan ini.

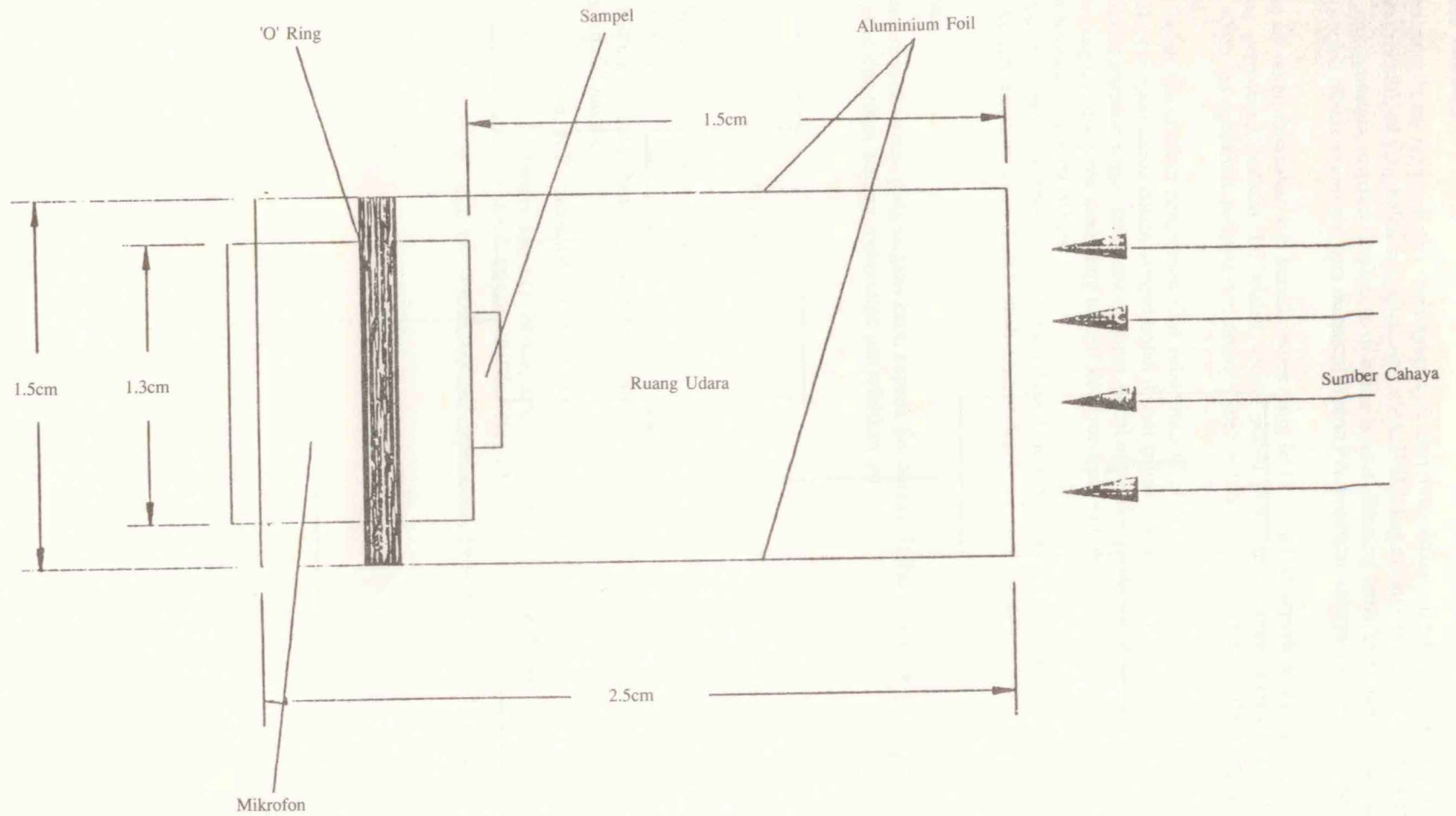
## Rujukan

1. Allan Rosencwaig dan Allen Gersho, *Theory of the photoacoustics effect with solid*, J. Appl. Physics 47 (1), January 76.
2. Che Mazlan Saad, *Theory and Application of Photoacoustics*, MSc Thesis (1985), Universiti Teknologi Malaysia.
3. Abd Rahman Ismail, Mohd Annuar Abd Latif, *Teknik Fotoakustiks*, BSc Thesis (1988), Universiti Teknologi Malaysia.
4. Moller, U., Kost, H.P., Schneider, S. dan Coufal H., 1985 in ITMOP.
5. L.C. Aamodt, J.C. Murphy and J.G. Parker, *Size Consideration in the design of cell for photoacoustics spectroscopy*, Journal of Appl. Physic 48 (3), Mac, 1977.
6. M.L. Meade, *Lock-in Amplifier: Principles and application*, Peter Peregrinus Ltd, London, 1983.



Susunan Alat Radas





Sel Fotoakustik  
(diperbuat dari silinder kaca)