

DETEKSI FOTOAKUSTIK NH₃ DALAM CUPLIKAN UDARA MENGUNAKAN SEL BENTUK PISANG BERSUMBER LASER CO₂

Asep Sutiadi¹, *Muslim, MAJ Wasono*

INTISARI

Dipaparkan spektrometer fotoakustik (FA) sel bentuk pisang (*banana cell*) untuk mendeteksi gas polusi kelumit senyawa NH₃ di udara. Sehingga spektrometer FA tersebut memenuhi syarat untuk deteksi gas NH₃ tingkat rendah. Sumber radiasi yang digunakan adalah laser CO₂ pandu gelombang yang dapat ditala, dimodulasi secara mekanis dari luar dengan *chopper* bercelah susun dua berjumlah 25/30; pengontrol *chopper* dihubungkan ke penguat *lock-in*.

Sel pisang dioperasikan pada ragam longitudinal terendah dengan frekuensi resonansi sebesar 1799 Hz. Faktor kualitas (Q) dan konstanta kinerja sel (F) bentuk pisang secara eksperimen ditemukan besarnya masing-masing $(20,0 \pm 2,0)$ dan (1855 ± 193) Pa cm/W. Batas deteksi terendah (BDT) sistem untuk cuplikan NH₃ dicapai nilai sebesar $(6,0 \pm 0,9)$ ppb.

Kata-kata Kunci: Spektrometer fotoakustik, Sel bentuk pisang, Laser CO₂ pandu gelombang, gas polusi NH₃.

PHOTOACOUSTIC DETECTION OF NH₃ IN AIR USING BANANA CELL WITH CO₂ LASER SOURCE

ABSTRACT

Description of a banana cell photoacoustic spectrometer (BCPAS) for detection of NH₃ in air is presented. So that the BCPAS meets the requirement for detecting low level NH₃ pollutant. The radiation probe source is a tunable CO₂ waveguide laser which is modulated externally using a mechanical chopper with two arrays of slits numbering 25/30; the chopper's controller is connected to a lock-in amplifier.

The banana cell has been operation in its fundamental longitudinal mode characterized by a resonance frequency of 1799 Hz. The quality factor and performance constant of banana cell have been found experimentally to be $(20,0 \pm 2,0)$ and (1855 ± 193) Pa cm/W, respectively. The detection limit for NH₃ sample investigated is found to be $(6,0 \pm 0,9)$ ppb.

Key Words: Spectrometer photoacoustic, Banana photoacoustic cell, CO₂ waveguide laser, NH₃ gas pollutant.

¹ Jurusan Pendidikan Fisika FPMIPA UPI Bandung, email: kangaseps@yahoo.com

1 PENDAHULUAN

Gas NH_3 merupakan senyawa pengotor beracun yang cukup berperan dalam menghambat proses fotosintesis, penyebab berkurangnya karbohidrat dan dapat menghambat pertumbuhan⁽¹⁾. Endapannya di atmosfer terus meningkat dan dapat menyebabkan proses nitrifikasi, yaitu konversi katalitik dari NH_3 menjadi NO_x ⁽²⁾.

Dalam penyelidikan komposisi cuplikan gas berkonsentrasi rendah, metode spektroskopi fotoakustik (SFA) inframerah memiliki sensitivitas pengukuran lebih baik dan aspek operasional lebih praktis dibandingkan dengan metode konvensional lainnya⁽³⁾.

Deteksi fotoakustik (FA) didasarkan pada efek FA, yaitu timbulnya gelombang akustik apabila suatu cuplikan gas dikenai radiasi gelombang elektromagnet pada frekuensi modulasi (audio). Dalam teknik SFA bila efek kejenuhan (*saturation*) dapat dihindari, maka amplitudo sinyal yang dihasilkan akan sebanding lurus dengan daya radiasi yang diserap oleh molekul-molekul gas cuplikan⁽¹⁾. Untuk serapan radiasi lemah dan daya radiasi tidak terlalu tinggi ($< 100 \text{ W}$), sinyal FA berbanding lurus dengan daya radiasi dan konsentrasi gas cuplikan yang menyerap radiasi tersebut⁽³⁾.

Dalam penelitian ini serapan cuplikan gas NH_3 diukur pada garis 10R14 radiasi laser CO_2 jenis pandu gelombang sistem mengalir dengan nilai koefisien serapan (α_{10R14}) sebesar $7,86 \text{ atm}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ⁽⁴⁾. Sel FA yang digunakan adalah sel bentuk pisang (*banana cell*)⁽⁵⁾ dari bahan teflon tipe PTFE yang telah dimodifikasi dan dioperasikan pada ragam longitudinal terendah dengan frekuensi resonansi $f_{\text{res}} = 1799 \text{ Hz}$

2 TEORI

Secara umum teori pembangkitan sinyal FA dibangun oleh tiga aspek, yaitu serapan radiasi inframerah yang menghasilkan laju produksi sumber panas, pembangkitan bunyi dalam gas dan deteksi sinyal akustik⁽⁶⁾.

Kaitan antara laju produksi panas H dengan jumlah molekul penyerap N adalah

$$H = N \sigma I_0 \exp [i (\omega t - \theta)] \quad (1)$$

σ menyatakanampang lintang serapan; ω , θ dan I_0 berturut-turut adalah frekuensi sudut, sudut fase dan daya radiasi laser.

Persamaan yang menghubungkan tekanan akustik p dengan sumber panas H adalah⁽⁷⁾

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = - \left[\frac{\gamma - 1}{c^2} \right] \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

dengan c adalah kecepatan bunyi, γ adalah menyatakan nisbah panas jenis pada tekanan tetap (C_p) terhadap panas jenis gas pada volume tetap (C_v).

Apabila sel FA berbentuk selinder dan dikenakan syarat batas pada dinding sel adalah tegar dan komponen kecepatan akustik normal yang tegak lurus terhadap dinding sama dengan nol, maka frekuensi resonansi sel FA dapat dinyatakan sebagai berikut^(7,3)

$$\omega_j = c \sqrt{\left(\pi n_z / L \right)^2 + \left(\pi \alpha_{mn} / R \right)^2} \quad (3)$$

atau

$$f_{mnz} = c \left[\left(\frac{\alpha_{mn}}{2R} \right)^2 + \left(\frac{n_z}{2L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$f_{mnz} = \omega_{mnz} / 2\pi$ adalah frekuensi resonansi, $m, n, n_z = 0, 1, 2, 3, \dots$ adalah bilangan alam yang mencirikan swanilai ragam akustik radial, azimuthal dan longitudinal; c , R dan L berturut-turut adalah laju bunyi, jari dan panjang resonator.

Besarnya sinyal akustik yang ditangkap mikrofon tergantung pada kepekaan mikrofon, geometri sel, parameter gas dan daya yang diserap oleh gas⁽³⁾. Berdasar hukum Lambert-Beer bila serapan yang terjadi sangat lemah, maka diperoleh besar sinyal akustik (S) berbanding lurus terhadap konstanta sel (F), daya tanggap mikrofon (R), daya laser (I), dan konsentrasi cuplikan (C). Apabila diketahui sinyal latar B , maka sinyal akustik ternormalisasi dapat dituliskan sebagai berikut⁽⁸⁾.

$$[S/I - B] = \alpha F R C \quad (5)$$

dengan α adalah koefisien serapan molekul gas dalam $\text{atm}^{-1}\text{cm}^{-1}$. Berdasar pers. (5), yaitu berlakunya kesebandingan antara sinyal akustik dengan konsentrasi molekul penyerap,

maka detektor dapat dipakai untuk melacak gas kelumit sekaligus menentukan konsentrasinya, bila α telah diketahui nilainya.

3 METODE PENELITIAN

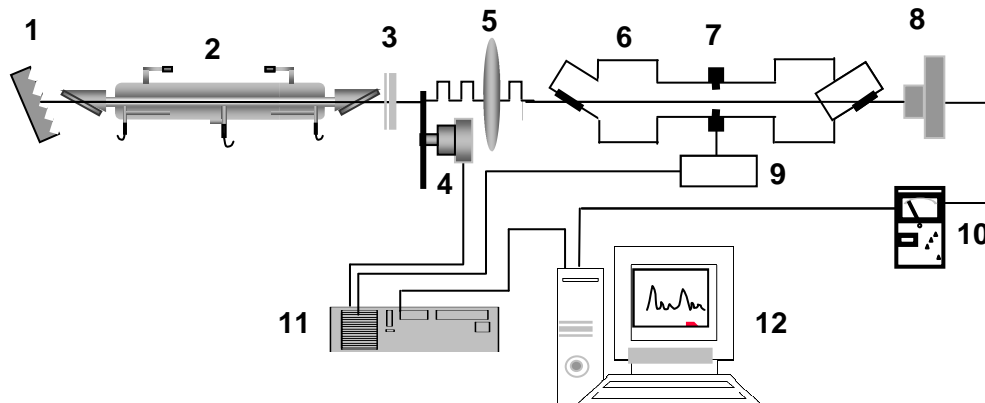
3.1 Bahan dan Alat

Bahan yang diselidiki adalah cuplikan udara di lingkungan peternakan sapi UGM, yaitu untuk mengukur konsentrasi gas NH_3 dalam cuplikan tersebut. Sebagai gas penyidik (*fingerprnt*) dibuat campuran gas NH_3 murni dengan konsentrasi sebesar 10 ppm yang diperoleh melalui perbandingan volume pada tekanan atmosfer. Bahan lainnya adalah bahan gas lucutan berupa gas He, N_2 dan CO_2 .

Alat yang digunakan antara lain tabung laser CO_2 jenis pandu gelombang sistem mengalir (buatan bengkel Universitas Katolik Nijmegen, Belanda), sel bentuk pisang (buatan bengkel FMIPA UGM), *chopper* bercelah susun dua berjumlah 25/30 model SR 540, penguat *lock-in* SRS 530, meter daya OPHIR AN/2, komputer pentium I dan mikrofon jenis EK-3033-00.

3.2 Rangkaian Alat dan Proses Deteksi

Dalam eksperimen ini, rangkaian alat yang digunakan ditunjukkan dalam Gb.1.



Gambar 1 Rangkaian alat sistem fotoakustik; 1. *Grating*; 2. Tabung laser CO_2 ; 3. Cermin keluaran; 4. *Chopper*; 5. Lensa; 6. Sel Pisang; 7. Mikrofon; 8. Detektor daya; 9. Penguat mikrofon; 10. Meter daya; 11. Penguat *lock-in*; 12. Komputer

Radiasi laser CO_2 yang kontinu dengan panjang gelombang (9-10) μm dimodulasi secara mekanis dengan frekuensi yang dapat

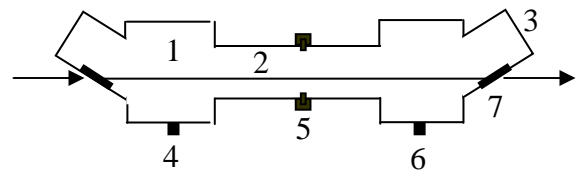
diatur menggunakan *chopper*. Frekuensi yang dipilih disesuaikan dengan frekuensi resonansi akustik yang terjadi di dalam sel pisang. Radiasi laser CO_2 yang sudah dimodulasi tersebut dilewatkan ke dalam sel pisang yang berisi cuplikan gas NH_3 . Sinyal yang terbentuk dideteksi oleh mikrofon yang dipasang di tengah-tengah antara ujung-ujung resonator. Oleh karena sinyal yang ditangkap oleh mikrofon sangat kecil, maka berkas radiasi laser dibuat fokus dengan menggunakan lensa sehingga titik fokusnya tepat di bawah mikrofon dan diperkuat menggunakan penguat *lock-in*. Untuk mendeteksi sinyal FA diperlukan sinyal referensi yang berasal dari *chopper*. Deteksi sinyal FA memerlukan syarat bahwa hanya sinyal akustik yang mempunyai frekuensi sama dengan sinyal referensi saja yang dapat diperkuat *lock-in*. Untuk menormalisasi sinyal akustik, maka sinyal keluaran penguat *lock-in* direkam oleh komputer secara bersamaan dengan daya keluaran laser yang dideteksi oleh meter daya. Normalisasi diperlukan karena daya keluaran laser tidak konstan.

Tabung Laser CO_2 Jenis Pandu Gelombang Sistem Mengalir. Komposisi medium aktif laser CO_2 yang digunakan

adalah He : N₂ : CO₂ = 65% : 22% : 13%. Komposisi gas tersebut identik dengan 86 mm He, 25 mm N₂ dan 95 mm CO₂ pada skala laju aliran gas lucutan, menghasilkan daya laser berkisar antara (0,1 – 1,4) W dengan jumlah spektrum 22 garis yang teragih ke dalam 3 grup garis spektrum laser 10P, 10R dan 9P. Pemilihan garis-garis laser dilakukan dengan motor penggerak model 18011 *oriel encoder mike* yang memiliki jangkauan 25 mm; digunakan untuk mengendalikan *grating* yang terdiri dari 150 garis/mm. Identifikasi jenis garis laser digunakan *CO₂-laser spectrum analyzer*. Tabung lucutan mempunyai panjang 45 cm, diameter dalam tabung pandu gelombang adalah 3 mm dan diameter luarnya 7 mm. Pemompaan laser dilakukan dengan lucutan elektrik pada tegangan dan arus operasi masing-masing 9,23 kV dan 12,53 mA.

Sel FA Bentuk Pisang. Sel FA bentuk pisang terdiri dari bagian-bagian penting antara lain resonator, *buffer*, mikrofon dan jendela (Gb. 2). Sel FA merupakan bagian terpenting dalam sistem SFA karena di dalam sel inilah terbentuknya sinyal fotoakustik dari gas yang menyerap radiasi laser yang dilewatkan ke dalamnya. Resonator sel pisang dibuat dari bahan teflon tipe PTFE. Geometri sel untuk keperluan eksperimen ini dipilih panjang resonator 100 mm dengan jari $r_{res} = 5$ mm, panjang *buffer* 50 mm dengan jari $r_{buffer} = 15$ mm, panjang sel lengkung 50 mm dengan jari = 5 mm. Dimensi luar sel pisang memiliki panjang 310 mm dengan diameter 70 mm. Mikrofon jenis EK-3033-00 dengan kepekaan 22 mV/Pa pada daerah frekuensi sekitar 1 kHz dipasang melingkar di tengah resonator dengan sudut 120°. Jendela Brewster dari bahan ZnSe dengan transmisi 85% dipasang pada sudut Brewster.

Metode Deteksi Fotoakustik dan Penentuan Konsentrasi NH₃ dalam cuplikan Udara. Persyaratan gas yang dapat dideteksi oleh metode SFA adalah gas tersebut mempunyai pola serapan karakteristik yang berada dalam daerah panjang



Gambar 2 Sel bentuk pisang; 1. *Buffer*; 2. Resonator; 3. Sel lengkung; 4,6. Tempat masuk dan keluaran gas; 5. Mikrofon; 7. Jendela *Brewster*

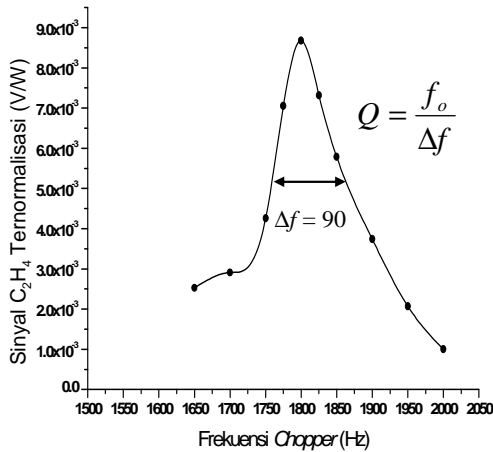
gelombang laser⁽⁴⁾. Dalam hal ini spektrum vibrasi NH₃ dapat dipadankan dengan daerah panjang gelombang (9 – 11) μm dari emisi laser CO₂⁽²⁾. Sebelum alat dipakai untuk melakukan pengukuran cuplikan udara yang akan diselidiki, terlebih dahulu sel FA dikalibrasi dengan 10 ppm campuran gas standar NH₃ dalam N₂ yang disuntikkan ke dalam sel pisang. Spektrum serapan direkam pada grup garis laser 10R. Dengan menggunakan pers. (5), yaitu hubungan linear antara sinyal akustik ternormalisasi oleh daya laser dengan konsentrasinya, maka dapat dihitung nilai batas deteksi terendah (BDT) sistem dan konstanta kinerja sel pisang (F). Apabila konsentrasi NH₃ yang disuntikkan divariasikan, maka dengan menggunakan nilai F tersebut koefisien serapan α secara eksperimen dapat ditentukan. Tetapan F dan α yang dihitung dari eksperimen berguna saat menentukan konsentrasi suatu gas kelumit cuplikan udara yang belum diketahui. Spektrum serapan cuplikan udara pada garis 10R14 yang terukur dapat digunakan untuk menentukan konsentrasi NH₃ dalam udara tersebut. Dengan memasukkan harga F dan α yang telah diperoleh dari gas standar NH₃, maka konsentrasi dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$C_{\text{cuplikan}} = \frac{(S/I)_{\text{cuplikan}} - (B)_{10R14}}{F_{\text{exp}} \alpha_{\text{exp}} R} \quad (6)$$

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

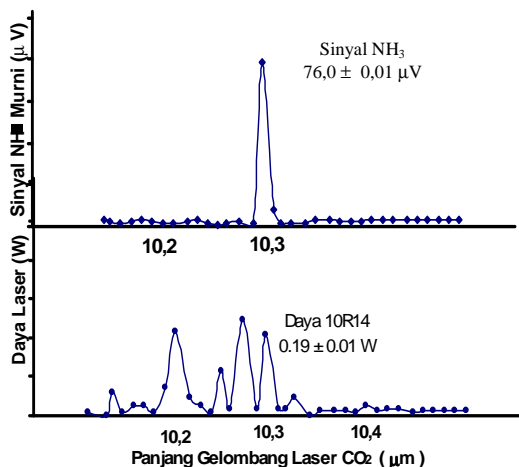
Unjuk kerja dan mutu spektrometer fotoakustik yang dibuat antara lain ditentukan oleh spektrum dan stabilitas daya laser CO₂ sebagai sumber radiasinya⁽⁸⁾. Hasil pengukuran kurva resonan dengan sel bentuk pisang

(Gb. 3) diperoleh frekuensi resonansi eksperimen (f_o) = (1799 ± 4) Hz dengan lebar pita resonansi Δf = (90 ± 8) Hz, sehingga dicapai faktor kualitas eksperimen Q_{eksp} = (20,0 ± 2,0). Lebar puncak kurva resonansi yang semakin sempit menunjukkan nilai Q yang semakin tinggi atau semakin kecil disipasi energi akustiknya⁽⁷⁾.



Gambar 3 Kurva resonansi

Kalibrasi sistem SFA dilakukan dengan menyuntikkan 10 ml gas NH₃ murni 10 ppm ke dalam sel pisang bervolume 86,35 ml kemudian *grating* diputar dengan laju relatif kecil di sekitar grup garis laser 10R. Hasil rekaman komputer untuk spektrum gas NH₃ dan daya laser dapat dilihat pada Gb. 4.



Gambar 4 Spektrum serapan NH₃ dalam N₂

Dari hubungan antara sinyal akustik ternormalisasi terhadap variasi konsentrasi yang disuntikkan ke dalam sel juga diketahui linear (tidak ditampilkan), diperoleh α_{eksp} =

(8,30 ± 0,06) atm⁻¹cm⁻¹ dengan kepekaan (6,6 ± 0,6) ppb. Waktu tanggap ukur diperoleh dengan cara menyuntikkan 10 ml NH₃ murni 10 ppm ke dalam sel pisang yang dialiri N₂ dengan laju konstan 1 liter normal/jam, dicapai τ_{eksp} = (1,15 ± 0,01) menit.

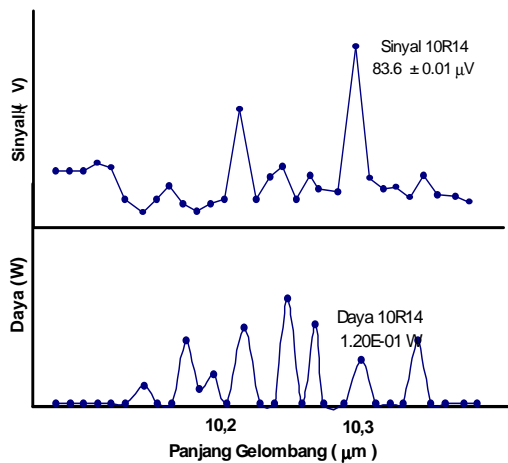
Kepekaan sistem spektrometer fotoakustik sel pisang dibatasi oleh derau yang timbul. Pengukuran derau dilakukan dengan cara menutup sumber radiasi laser, sehingga ditemukan rapat derau sebesar (1,92 ± 0,10) $\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$. Adapun sinyal latar akibat pemanasan dinding resonator dan jendela sel pada garis 10R14 diketahui sebesar (15,0 ± 1,5) $\mu\text{V}/\text{W}$. Hasil-hasil pengukuran besaran fisika metode SFA dengan menggunakan sel pisang ditampilkan dalam tabel 1.

Tabel 1 Hasil beberapa besaran fisika spektroskopi fotoakustik sel bentuk pisang ragam longitudinal terendah

Besaran Fisika	Simbol parameter	Nilai
Sensitivitas mikrofon	R	22 mV/Pa
Frekuensi resonansi	f_{res}	(1799 ± 4) Hz
Faktor kualitas sel	Q	(20,0 ± 2,0)
Kestabilan daya laser garis 10R14	I	(0,18 ± 0,01) W
Rapat derau	N	(1,92 ± 0,1) $\mu\text{V}/\text{Hz}^{1/2}$
Sinyal latar	B	(15,0 ± 1,5) $\mu\text{V}/\text{W}$
Sinyal akustik NH ₃ ternormalkan pada garis 10R14	$S/I - B$	(0,39 ± 0,04) mV/W
Sinyal per derau BDT sistem	S/N BDT	(200 ± 23) (6,0 ± 0,9) ppb
Konstanta sel	F	(1855 ± 193) Pa cm/W
linearitas: Koef serapan NH ₃ BDT linearitas	α_{eksp} BDT	(8,30 ± 0,06) atm ⁻¹ cm ⁻¹ (6,6 ± 0,6) ppb
Waktu tanggap ukur	τ	(1,15 ± 0,01) menit

Pengamatan Spektrum Udara eternakan Sapi. Dari rekaman spektrum serapan cuplikan udara di lingkungan peternakan sapi (Gb. 5) diperoleh serapan sinyal paling tinggi pada garis laser 10R14 dan 10R20. Sinyal pada garis laser 10R20 adalah serapan uap air⁽⁴⁾, tetapi karena tidak diketahui gas penyidiknya, pada penelitian ini hal tersebut tidak diselidiki. Sinyal akustik sesungguhnya (S_s) pada garis 10R14 adalah (0,69 ± 0,09)

mV/W. Apabila diketahui dari eksperimen sebelumnya, yaitu $F = (1855 \pm 193)$ Pa cm/W dan $\alpha_{\text{eksp}} = (8,30 \pm 0,06)$ atm⁻¹cm⁻¹, maka konsentrasi terukur dari 10 ml cuplikan udara peternakan sapi di dalam sel adalah $(2,0 \pm 0,2)$ ppm. Uji standar baku mutu udara lingkungan yang dikeluarkan oleh Departemen KLH menyatakan bahwa ambang batas udara tercemar amonia (NH₃) adalah 5 ppm.



Gambar 5 Spektrum serapan udara radiasi laser CO₂ di lokasi peternakan sapi UGM

4 KESIMPULAN

1. Metode SFA yang mengkombinasikan sel pisang dengan sumber kontinu laser CO₂ yang dimodulasi dari luar dan penguat *lock-in* merupakan salah satu metode pengukuran konsentrasi gas polusi yang cukup efektif dan peka. Metode ini dapat digunakan untuk analisis kuantitatif komponen cuplikan gas berkonsentrasi rendah tanpa merusak cuplikan gas tersebut. Sel pisang dalam penelitian ini digunakan untuk mengamati sinyal fotoakustik yang ditimbulkan oleh gas amonia (NH₃) dengan sumber radiasi laser CO₂ jenis pandu gelombang sistem mengalir pada frekuensi resonansi 1799 Hz dengan batas deteksi minimal orde ppb.
2. Kepekaan sel pisang (resonan) dapat diselidiki menggunakan parameter faktor kualitas Q dan batas deteksi terendah (BDT). Namun demikian kepekaan sistem dibatasi oleh munculnya sinyal derau dan sinyal latar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Prof. Dr. M.W. Sigrist (IQE, Switzerland) yang telah mengizinkan penggunaan dan pemodifikasian sel pisang; Dr. Stefan Persijn (KUN, The Netherlands) yang menyediakan waktu untuk berdiskusi dan membantu pengadaan mikrofon; Pak Rusfitri dan Pak Sukardi (Lab atom dan inti FMIPA UGM) yang membantu perancangan sel bentuk pisang.

DAFTAR PUSTAKA

- ¹ Bicanic, D.D., 1987. *Some Applications of Photoacoustic and Related Sensing Methode Relevant to Agricultural in General*, Sylabus, AUW, The Netherlands
- ² Sauren, J.J.A.M., 1992. *Amonia Monitor Based on Intermodulated CO₂ Laser Photoacoustic Stark Spectroscopy*, Disertasi Doktor, LU Wageningen
- ³ Harren, F., Cotti, G., Oomens and Hekker, 2000. *Photoacoustic Spectroscopy in Trace Gas Monitoring*, in Encyclopedia of Appl. Phys, ed. RA. Meyers, JWS, Chicester
- ⁴ Persijn, S., 2001. *Photoacoustic trace gas sensing: application to fruit and insects*, Disertasi Doktor, KUN, Nijmegen, Belanda
- ⁵ Naegele, M. and Sigrist, M.W., 2000. Mobile Laser Spectrometer with Novel Resonant Multipass Photoacoustic Cell for Trace Gas Sensing, *Appl. Phys B*, Vol. 70.
- ⁶ Meyer, P.L., and Sigrist, M.W., 1990. Atmospheric Pollution Monitoring using CO₂ Laser Photoacoustic Spectroscopy and Other Techniques, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 61, No. 7.
- ⁷ Morse, P.M. dan Ingard, K.U., 1968. *Theoretical Acoustic*, Mc Graw Hill Book Company, New York.
- ⁸ Wasono, M.A.J., 1998. *Konstruksi dan Kinerja Spektrometer Fotoakustik Laser CO₂ Untuk memonitor Emisi Etilen Dalam Metabolisme Buah Tropis Pasca Panen*, Disertasi Doktor, Univ. Gadjah Mada, Yogyakarta