

## ARTIKEL RISET

# Penentuan Parameter Difusi Gas Buah Tomat dengan Spektrometer Fotoakustik Laser $CO_2$ Menggunakan Pelacak Gas $SF_6$

M.A.J. Wasono\* and Y.A. Kholishoh

## Ringkasan

Telah dilakukan monitoring beberapa parameter difusi (waktu relaksasi, koefisien resistansi dan koefisien difusi) gas  $SF_6$  di dalam buah tomat (*Lycopersicon esculentum*) dengan menggunakan metode spektroskopi foto-akustik (SFA) laser  $CO_2$ . Gas  $SF_6$  menyerap paling kuat pada garis 10P16 dan etilen pada garis laser 10P14 dengan frekuensi resonansi sebesar  $1650 \pm 5 \text{ Hz}$ . Batas deteksi terendah (BDT) yang dihasilkan oleh SFA untuk gas  $SF_6$  diperoleh  $2,6 \pm 0,4 \text{ ppt}$  dan untuk etilen sebesar  $0,32 \pm 0,03 \text{ ppb}$ . Monitoring difusi gas  $SF_6$  pada buah tomat dan pengukuran emisi etilen dalam kurun waktu 15 hari menghasilkan pola karakteristik waktu relaksasi, koefisien resistansi dan koefisien difusi terhadap emisi etilen. Dalam proses pematangan, waktu relaksasi dan koefisien resistansi buah tomat mengalami penurunan masing-masing dari  $2,85 \pm 0,07 \text{ menit}$  ke  $0,86 \pm 0,01 \text{ menit}$  dan dari  $(5,95 \pm 0,27) \times 10^2 \text{ detik cm}^{-1}$  ke  $(1,53 \pm 0,06) \times 10^2 \text{ detik cm}^{-1}$ . Sedang koefisien difusi mengalami kenaikan dari  $(1,73 \pm 0,01) \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ detik}^{-1}$  ke  $(6,70 \pm 0,03) \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ detik}^{-1}$ . Dari hasil tersebut dapat direkomendasikan kepada pengelola pengendalian pematangan buah tomat untuk mendapatkan optimasi parameter difusi sehingga diperoleh pematangan sesuai dengan kebutuhan pasar.

**Kata Kunci** : Spektroskopi fotoakustik, waktu relaksasi, koefisien resistansi & difusi, buah tomat.

## Abstract

Monitoring of diffusion parameters (relaxation time, resistance coefficient and diffusion coefficient) has been carried out by  $SF_6$  gas in tomato fruit (*Lycopersicon esculentum*) using  $CO_2$  laser photoacoustic spectroscopy (PAS) method.  $SF_6$  gas absorbs the strongest on the 10P16 and ethylene lines on the 10P14 laser line with a resonant frequency of  $1650 \pm 5 \text{ Hz}$ . The lowest limit detection (LLD) produced by PAS for  $SF_6$  gas was  $2.6 \pm 0.4 \text{ ppt}$  and for ethylene was  $0.32 \pm 0.03 \text{ ppb}$ . Monitoring of diffusion of  $SF_6$  gas in tomatoes and measurement of ethylene emissions within 15 days resulted in a characteristic pattern of relaxation time, resistance coefficient and diffusion coefficient on ethylene emissions. In the ripening process, the relaxation time and the tomato resistance coefficient decreased respectively from  $2.85 \pm 0.07 \text{ minutes}$  to  $0.86 \pm 0.01 \text{ minutes}$  and from  $(5.95 \pm 0.27) \times 10^2 \text{ seconds cm}^{-1}$  to  $(1.53 \pm 0.06) \times 10^2 \text{ seconds cm}^{-1}$ . While the diffusion coefficient has increased from  $(1.73 \pm 0.01) \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ seconds}^{-1}$  to  $(6.70 \pm 0.03) \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ seconds}^{-1}$ . From the results, it can be recommended to the manager of control of ripening of tomatoes to get optimization of diffusion parameters so that maturation can be obtained according to market needs.

**Keywords**: Photoacoustic spectroscopy; relaxation time; resistance & diffusion coefficient; tomatoes fruit.

## PENDAHULUAN

Buah tomat (*Lycopersicon esculentum*) merupakan jenis buah yang diproduksi dalam skala besar dan

banyak dikonsumsi dalam kehidupan sehari-hari. Buah paska petik masih mengalami respirasi (butuh  $O_2$ ) dan mengeluarkan  $CO_2$  (Wasono dkk., 2002)[14]. Karakteristik transport gas pada buah belum terungkap secara detail a.l. disebabkan oleh keterbatasan detektor gas kelumit. Proses metabolisme ditentukan oleh sifat transport gas pada buah (Groot, 2002)[5].

\*Correspondence: [m.alijoko@ugm.ac.id](mailto:m.alijoko@ugm.ac.id)

Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara Bulaksumur, Sinduadi, Mlati, Kota Yogyakarta, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia

Full list of author information is available at the end of the article

†Equal contributor

Deteksi gas kelumit selama ini menggunakan kromatografi gas yang mempunyai kekurangan dalam hal sensitivitas, proses deteksi perlu waktu lama bisa order hari. Metode spektroskopi fotoakustik dengan sumber radiasi laser infra merah menawarkan kelebihan dalam hal sensitivitas yang tinggi hingga orde *ppb* (*part per billion*) dan dapat mendeteksi untuk sistem mengalir (*flowing*) serta waktu tanggap cepat berorder menit. Spektrometer fotoakustik menggunakan sumber radiasi laser  $CO_2$  yang memiliki jangkauan panjang gelombang *infrared* 9 – 11  $\mu m$  dan jarak garis 0,5 – 2  $cm^{-1}$  serta mempunyai kelebihan mampu membangkitkan daya laser 1 – 100 *Watt* hanya dengan lucutan gas relatif kecil (Harren dkk., 2000).

Pada penelitian ini digunakan gas  $SF_6$  sebagai pelacak (*tracer*) untuk menentukan koefisien difusi gas oksigen dan karbondioksida yang terjadi pada proses respirasi buah tomat. Gas  $SF_6$  secara fisika bersifat lambat dan inert, tidak dapat terbakar dan mempunyai serapan yang kuat pada garis 10P16 laser  $CO_2$  dengan koefisien serapan 564  $atm^{-1} cm^{-1}$ . Secara biologis gas tsb sensitif untuk dideteksi serta secara kimiawi bersifat non-toksik dan memiliki kestabilan kimia yang tinggi (Groot dkk., 2005; Pereira dkk., 2009; Sugiarto dan Wasono, 2010)[9][12].

### Disfusi Gas

Menurut hukum Fick pertama bahwa rapat aliran ( $J$ ) molekul yang berdifusi berbanding langsung dengan gradien konsentrasi (misal ke arah  $x$ ) dengan konstanta kesebandingan yang disebut koefisien difusi ( $D$ ) (Banks, 1985)[2].

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

$\frac{\partial C}{\partial x}$  merupakan gradien konsentrasi, yaitu perubahan konsentrasi per satuan panjang. Tanda negatif menunjukkan arah difusi searah dengan pengurangan konsentrasi. Sedang laju pertukaran gas atau laju difusi ( $\frac{dS}{dt}$ ) sebanding dengan rapat aliran ( $J$ ) dan luas penampang ( $A$ ) yang dilalui gas yang dapat dirumuskan

$$\frac{ds}{dt} = JA = -DA \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

Gradien konsentrasi tsb dapat didekati dengan mengambil  $\Delta C$  merupakan selisih konsentrasi di luar bahan ( $C_e^t$ ) dan konsentrasi gas di dalam bahan ( $C_i^t$ ) yang masing-masing disebut sebagai konsentrasi eksternal dan internal.

### Waktu tukar gas

Konsentrasi internal gas pelacak di dalam buah mengalami peluruhan secara eksponensial dengan waktu relaksasi gas  $\tau_f$  (Groot, 2002)[5]:

$$C_f = C_0 e^{\frac{-t}{\tau_f}} \quad (3)$$

dengan  $C_0 = C_f(t = 0)$ . Adapun waktu tukar gas atau waktu relaksasi merupakan waktu yang dibutuhkan buah sehingga konsentrasi gas pelacak internal  $C_f$  tinggal sebesar 1/e dari konsentrasi gas pelacak awal  $C_0$ . Nilai waktu tukar gas diperoleh dari persamaan

$$\ln \frac{C_f}{C_0} = \frac{-t}{\tau_f} \quad (4)$$

### Koefisien resistansi pada buah

Koefisien difusi pada buah menunjukkan laju pertukaran gas difusi. Koefisien difusi  $D$  ( $cm^2 detik^{-1}$ ) dalam hubungannya dengan resistansi bahan ( $\rho_s$ ) adalah:

$$D = \frac{\Delta x}{\rho_s} \quad (5)$$

maka persamaan (2.2) dapat ditulis

$$\frac{dS}{dt} = -A \frac{\Delta x}{\rho_s} \frac{\partial C}{\partial x} = -\frac{A \partial C}{\rho_s} \quad (6)$$

Persamaan diferensial difusi gas melalui kulit dari suatu volume tertutup adalah (Groot,2002)[5] :

$$\frac{ds}{dt} = -A_f \frac{C_f(t) - C_e(t)}{\rho_s} \quad (7)$$

dengan  $\frac{ds}{dt}$  adalah perubahan jumlah gas pelacak internal terhadap  $dt$  ( $m^3/s$ ),  $C_e(t)$  adalah konsentrasi gas pelacak eksternal,  $S_f$  adalah lus total permukaan kulit buah dan  $\rho_s$  adalah resistansi kulit terhadap difusi. Pada pengukuran yang dilakukan tidak ada nilai konsentrasi gas pelacak eksternal karena penyentoran gas pelacak yang bagus di dalam kolektor oleh udara tekan, maka  $C_e(t) = 0$ , sehingga (Groot, 2002)[5]

$$\frac{dS}{dt} = -A_f \frac{C_f(t)}{\rho_s} \quad (8)$$

Jumlah gas pelacak di dalam buah  $s$  terhubung dengan konsentrasi di dalam buah  $C_f$  sebagai:

$$s = \theta_f V_f C_f \quad (9)$$

dengan  $V_f$  adalah volume buah dan  $\theta_f$  adalah fraksi gas internal yang didapat dari

$$\theta_f = \frac{V_{meas} - m/d}{V_{meas}} \quad (10)$$

dengan  $V_{meas}$  adalah volume terukur buah,  $m$  massa buah dan  $d$  adalah kerapatan spesifik daging buah (Groot, 2002)[5]. Dengan demikian konsentrasi eksternal sebagai fungsi waktu diperoleh sebagai berikut,

$$C_f = C_0 e^{\frac{-A_f t}{\theta_f V_f \rho_s}} \quad (11)$$

dengan  $C_0$  adalah konsentrasi awal dari buah. Resistansi kulit terhubung dengan waktu tukar gas dapat ditentukan (Groot,2002)[5]

$$\rho_s = \frac{A_f \tau_f}{\theta_f V_f} \quad (12)$$

## METODE PENELITIAN

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut. Gas  $CO_2$ ,  $He$  dan  $N_2$  dengan konsentrasi 99% sebagai medium aktif laser. Gas  $N_2$  untuk membersihkan sel fotoakustik dan menentukan sinyal latar. Gas  $SF_6$  (*Sulfur Heksafluorida*) yang digunakan sebagai pelacak.  $KOH$  dan  $CaCl_2$  yang digunakan sebagai penyerap  $CO_2$  dan  $H_2O$ . Sampel buah tomat hijau yang diselidiki.

Adapun rangkaian alat penelitian pendeteksian gas difusi  $SF_6$  pada buah tomat menggunakan SFA laser  $CO_2$  intrakavitasi ditunjukkan pada Gambar 1.

### Proses Deteksi

Sampel buah tomat sebelumnya disimpan dalam kuvet volume 500ml yang tertutup kemudian dialiri gas  $SF_6$  standar 100 ppm dan dibiarkan selama 4-5 jam. Sesudah proses pemuatan tsb, sampel buah tomat dipindah ke kuvet lain volume 500ml yang menuju sel FA. Gas  $SF_6$  yang keluar dari buah (*discharge*) dimasukkan ke dalam sel FA dengan cara menyentorkan udara tekan dan dikenai radiasi laser  $CO_2$  termodulasi. Sinyal fotoakustik yang timbul di dalam sel FA ditangkap oleh mikrofon diperkuat oleh *lock-in* dan diubah menjadi data digital oleh ADC (*analog to digital converter*), kemudian dicatat dan direkam oleh komputer.

Pengukuran konsentrasi gas  $SF_6$  pada buah tomat utuh dilakukan melalui sebuah kuvet berkolektor seperti dapat dilihat pada Gambar 2. Kolektor disentor dengan udara tekan dengan tekanan 50 – 60 mb agar gas  $SF_6$  hasil emisi buah tomat dapat mengalir menuju sistem deteksi fotoakustik. Kolektor

ditempatkan pada diameter terbesar buah tomat menggunakan *wax* agar tidak ada udara keluar masuk. Emisi  $SF_6$  dari kolektor diukur selama 25 hingga 45 menit.

Diketahui bahwa  $SF_6$  juga mempunyai serapan pada garis 10P14 dan etilen juga mempunyai serapan pada garis 10P16, berlak persamaan (Wasono, 2002)[14]

$$\left(\frac{S}{I}\right)_{10P16} = FR(\alpha_{10P16etilen} C_{etilen} + \alpha_{10P16SF_6} C_{SF_6}) + B_{10P16} \quad (13)$$

$$\left(\frac{S}{I}\right)_{10P14} = FR(\alpha_{10P14etilen} C_{etilen} + \alpha_{10P14SF_6} C_{SF_6}) + B_{10P14} \quad (14)$$

dengan  $\left(\frac{S}{I}\right)_{10P16}$  merupakan sinyal ternormalisasi dari campuran kedua gas tersebut pada garis 10P16,  $\left(\frac{S}{I}\right)_{10P14}$  sinyal ternormalisasi campuran kedua gas tersebut pada garis 10P14,  $F$  konstanta sel yang didapatkan dari eksperimen ( $F$  teori  $3,7 \times 10^3$  Pacm/W),  $R$  konstanta mikrofon yang digunakan ( $R = 11mV/Pa$ ), dan  $\alpha$  koefisien serapan masing-masing gas untuk tiap-tiap garis laser.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada hasil pemaparan untuk  $SF_6$  standar diperoleh sinyal ternormalisasi pada garis 10P16 sebesar 11,9 mV/W dan pada garis 10P14 terbaca sinyal ternormalisasi 4,8 mV/W. Hal ini menunjukkan bahwa di garis 10P14 juga menyerap  $SF_6$ . Sementara pada hasil pemaparan untuk etilen standar diperoleh sinyal ternormalisasi pada garis 10P14 sebesar 0,278 V/W dan pada garis 10P16 terbaca sinyal ternormalisasi 0,028 V/W. Hal ini juga menunjukkan bahwa di garis 10P16 juga menyerap etilen.

### Difusi Gas $SF_6$ pada Buah Tomat

Waktu relaksasi merupakan waktu yang diperlukan buah tomat untuk mengosongkan gas  $SF_6$  yang telah berdifusi ke dalam buah tomat. Selanjutnya waktu relaksasi ini digunakan untuk menentukan koefisien resistansi kulit buah tomat. Gambar 3. menunjukkan karakteristik waktu relaksasi terhadap produksi etilen buah tomat. Diperoleh hasil bahwa selama proses pematangan, waktu tukar gas mengalami penurunan dari  $2,85 \pm 0,07$  menit ke  $0,86 \pm 0,01$  menit. Begitu pula dengan karakteristik koefisien resistansi terhadap produksi etilen yang ditunjukkan pada Gambar 4. mengalami penurunan dari  $(5,95 \pm 0,27) \times 10^2$  detik cm<sup>6</sup> ke  $(1,53 \pm 0,06) \times 10^2$  detik cm<sup>-1</sup>.

Hal ini dikarenakan koefisien resistansi berbanding langsung dengan waktu relaksasi, dimana dalam penelitian ini buah tomat yang diteliti menggunakan buah yang sama, sehingga tidak ada perubahan nilai besaran volume maupun luas permukaan. Dari karakteristik tersebut menunjukkan bahwa kulit buah tomat mengalami penurunan resistansi seiring proses pematangan.

Jika dibandingkan antara penurunan waktu relaksasi dan koefisien resistansi, penurunan koefisien resistansi lebih besar. Hal ini dikarenakan buah mengalami penurunan massa, sehingga fraksi gas antar sel meningkat seiring pematangan. Selanjutnya koefisien resistansi menurun dikarenakan berbanding terbalik dengan fraksi gas antar sel. Sementara penurunan massa secara kimiawi disebabkan proses respirasi yang menggunakan substrat-substrat (cadangan makanan) pada buah selama respirasi (Anna dkk., 2012).

Gambar 5 menunjukkan karakteristik koefisien difusi terhadap produksi etilen. Jika koefisien resistansi mengalami penurunan, maka koefisien difusi mengalami kenaikan yaitu dari  $(1,73 \pm 0,01) \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ detik}^{-1}$  ke  $(6,70 \pm 0,03) \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ detik}^{-1}$ . Koefisien difusi menunjukkan laju pertukaran gas, sehingga jika resistansi kulit buah menurun, maka laju pertukaran gas semakin cepat. Selama pematangan akan terjadi peningkatan laju respirasi (Murtadha dkk., 2012). Respirasi pada buah mengalami peningkatan  $\text{CO}_2$  pada saat pematangan dan kemudian pada saat pemasakan menjelang sempurna dan telah lewatnya pemasakan, maka aktivitas respirasi akan semakin menurun (Murtadha, 2012). Jika oksigen dalam buah telah habis maka selanjutnya akan terjadi pembusukan/fermentasi (Groot, 2002)[5]. Pada penelitian ini pengambilan data tidak mencapai masa masak yang sempurna, sehingga tidak terlihat pola penurunan laju respirasi.

Gambar 6 adalah aktivitas pematangan buah tomat berdasarkan perubahan warna kulit buah. Pada penelitian ini, pola pematangan buah diamati pada produksi etilen dan warna kulit buah. Produksi etilen pada buah menunjukkan pola buah klimakterik yaitu kecenderungan emisi etilen naik kemudian mencapai puncak dan turun (Wasono dkk, 2002)[14]. Pola produksi etilen dari hasil pengamatan ada dua data yang mengalami penyimpangan cukup jauh. Dikarenakan sampel buah yang diamati adalah sama, maka dicurigai penyimpangan tersebut berasal dari sampling (udara tekan, kuvet, *scrubber*) dan aliran gas yang kurang rapat atau terjadinya kebocoran. Dapat juga penyimpangan data berasal dari alat ukur SFA, yaitu menempelnya debu pada jendela  $\text{ZnSe}$  sehingga keluaran laser tidak optimal, atau pengaturan posisi

grating halus yang kurang tepat karena sangat sensitif terhadap getaran. Pada perlakuan normal, buah tomat hijau paska panen membutuhkan waktu 7 hari untuk matang (Saltveit, 2005)[11]. Pada penelitian ini buah tomat membutuhkan waktu 15 hari untuk menjadi merah-matang. Hal ini dikarenakan buah mengalami kedap udara selama perendaman gas  $\text{SF}_6$ , sehingga menghambat laju produksi etilen.

Sementara penyimpangan data pada pola waktu relaksasi, koefisien resistansi dan koefisien difusi, diasumsikan berasal dari ralat pengenceran yang dilakukan secara manual. Ralat pengenceran berasal dari pengambilan volume suntikan ke kuvet dua kali serta pengisian nitrogen pada kuvet dan *sample bag* dengan pengukuran laju melalui *flowmeter* yang kurang stabil.

## KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan sebagai berikut:

Waktu relaksasi buah tomat mengalami penurunan dari  $2,85 \pm 0,07 \text{ menit}$  ke  $0,86 \pm 0,01 \text{ menit}$  terhadap tingkat kematangan yang ditunjukkan oleh pola klimakterik produksi etilen. Koefisien resistansi buah tomat mengalami penurunan dari  $(5,95 \pm 0,27) \times 10^2 \text{ detik cm}^{-1}$  ke  $(1,53 \pm 0,06) \times 10^2 \text{ detik cm}^{-1}$  terhadap tingkat kematangan yang ditunjukkan oleh pola klimakterik produksi etilen. Koefisien difusi buah tomat mengalami kenaikan dari  $(1,73 \pm 0,01) \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ detik}^{-1}$  ke  $(6,70 \pm 0,03) \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ detik}^{-1}$  terhadap tingkat kematangan yang ditunjukkan oleh pola klimakterik produksi etilen.

Dengan metode spektrokopi fotoakustik laser yang digandeng dengan sistem gas mengalir dapat dipakai untuk memantau besaran difusi gas yang keluar masuk sampel buah. Hasil yang diperoleh dapat direkomendasikan kepada pengelola buah tomat pasca panen.

## PENULIS

- 1 M.A.J. Wasono

Dari :

(1) Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada

- 2 Y.A. Kholishoh

Dari :

(1) Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada

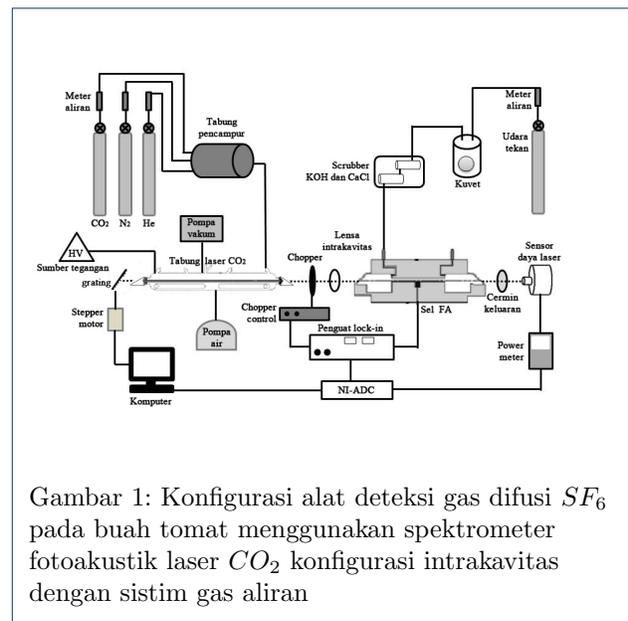
## Pustaka

- Amin, M.N., 2012, Kinerja Spektrometer Fotoakustik dalam Karakterisasi Scrubber Gas  $C_2H_4$ , Tesis, Jurusan Fisika FMIPA UGM, Yogyakarta.
- Banks, N.H, 1985, Estimating Skin Resistance to Gas Diffusion in Apples and Potatoes, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 36, No. 173, Hal. 1842-1850.
- Cameron, A.C. dan Yang, S.F., 1982, A Simple Method for the Determination of Resistance to Gas Diffusion in Plant Organs, *Plant Physiol*, 70, 21-23.
- Costa, J.M. dan Heuvelink, E., 2005, *Introduction: The Tomato Crop and Industry*, Heuvelink, E. Tomatoes, CABI Publishing, United Kingdom.
- Groot, T.T., 2002, *Trace Gas Exchange by Rice, Soil and Pears*, Ph.D Thesis, University of Nijmegen, The Netherlands.
- Harren, F.J.M., 1988, *The Photoacoustic Effect, Refined and Applied to Biological Problems*, Ph.D Dissertation, University of Catholic, Nijmegen, The Netherlands.
- Mayasari, M.H., 2010, Penentuan Koefisien Difusi Batang Padi terhadap Pertukaran Gas  $O_2$  dan  $CO_2$  Menggunakan Metode Spektroskopi Fotoakustik Laser  $CO_2$  dengan Gas  $SF_6$  Sebagai Pelacak, *Skripsi*, Jurusan Fisika FMIPA UGM, Yogyakarta.
- Mitrayana, Muslim dan Wasono, M.A.J., 2002, Spektrometer Fotoakustik Laser Intrakavitasi Berkepekaan Tinggi, *Prosiding Pertemuan dan Presentasi ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir P3TM-BATAN* Yogyakarta, 27 Juni 2002, 34-38.
- Pereira, T., Almeida, P.S.G., Azevedo, I.G., Cunha, M., Oliveira, J.G., Silva, M.G. dan Vargas, H., 2009, Gas Diffusion in 'Golden' Papaya Fruit at Different Maturity Stages, *Postharvest Biology and Technology*, 54, 123-130.
- Rahmawati, R.U., 2006, Penentuan Koefisien Resistansi Kulit Buah Apel Terhadap Difusi Gas  $SF_6$  Menggunakan Metode Spektroskopi Fotoakustik Laser  $CO_2$ , *Skripsi*, Jurusan Fisika FMIPA UGM, Yogyakarta.
- Saltveit, M.E., 2005, *Postharvest Biology and Handling*, Heuvelink, E. Tomatoes, CABI Publishing, United Kingdom
- Sugiarto, I.T. dan Wasono, M.A.J., 2010, Penentuan Koefisien Difusi Gas  $SF_6$  pada Tanah Sawah dengan Metode Spektroskopi Fotoakustik Laser  $CO_2$ , *Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi TELAHAH*, 27, 8-14.
- Syaikhu, A., 2017. Kinerja Spektrometer Fotoakustik Laser  $CO_2$  Konfigurasi Intrakavitasi dan Aplikasinya pada Deteksi Gas Etilen ( $C_2H_4$ ) Tomat

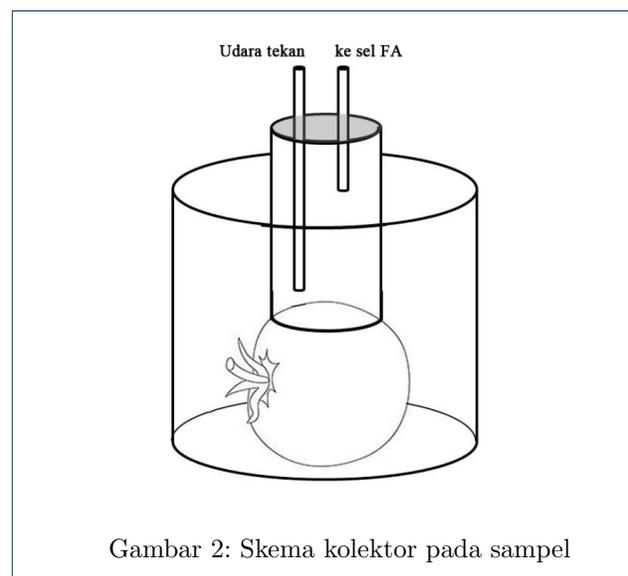
Berlapis Kitosan pada suhu Dingin. *Skripsi*, Jurusan Fisika FMIPA UGM, Yogyakarta.

- Wasono, M.A.J., Muslim dan Tranggono, S., 2002, Penerapan Spektrometer Fotoakustik Laser  $CO_2$  Semi Sealed-Off pada Penentuan Koefisien Resistensi Buah Tertentu Terhadap Difusi  $C_2H_4$  Menggunakan Gas  $SF_6$  sebagai Pelacak, *Prosiding Pertemuan dan Presentasi ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir P3TM-BATAN* Yogyakarta, 27 Juni 2002, 241-248.

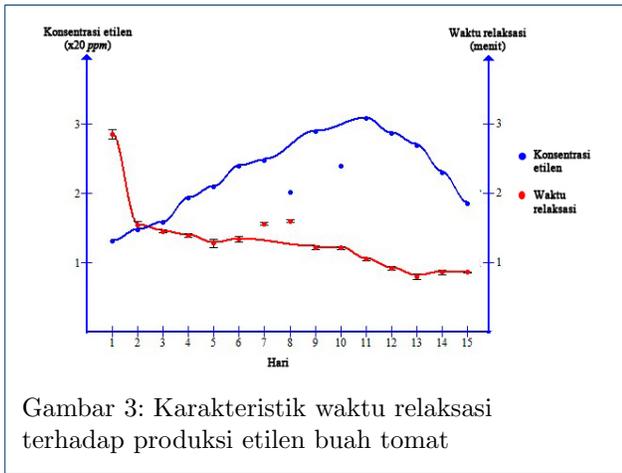
## DAFTAR GAMBAR



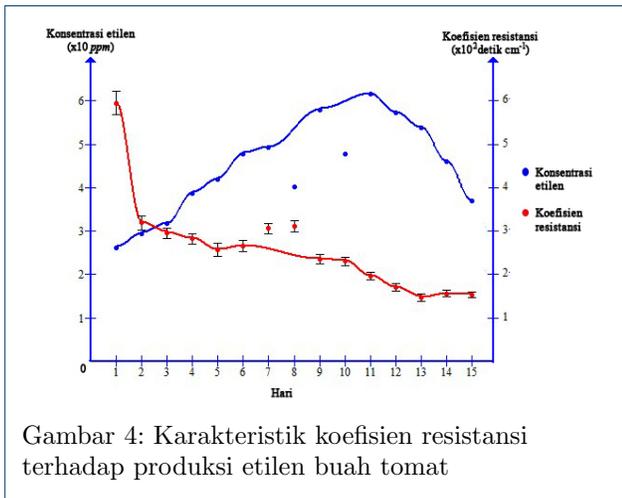
Gambar 1: Konfigurasi alat deteksi gas difusi  $SF_6$  pada buah tomat menggunakan spektrometer fotoakustik laser  $CO_2$  konfigurasi intrakavitasi dengan sistem gas aliran



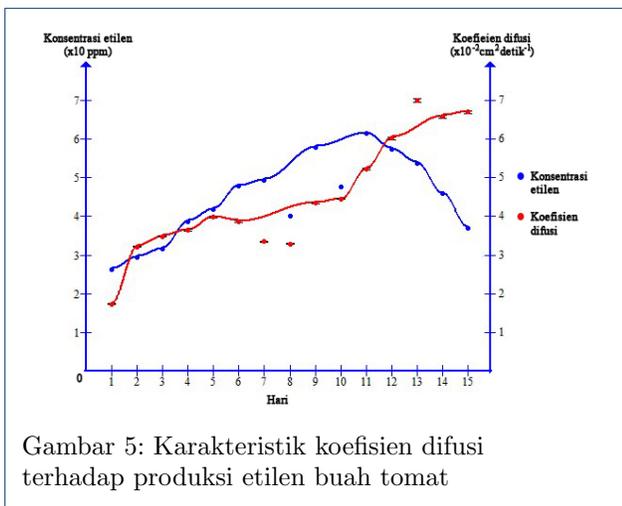
Gambar 2: Skema kolektor pada sampel



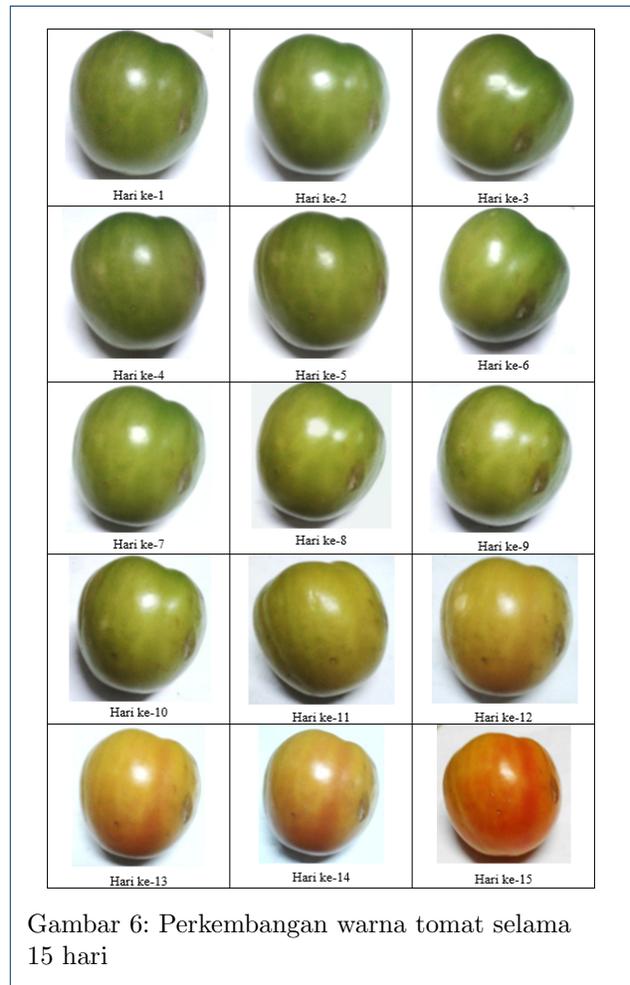
Gambar 3: Karakteristik waktu relaksasi terhadap produksi etilen buah tomat



Gambar 4: Karakteristik koefisien resistansi terhadap produksi etilen buah tomat



Gambar 5: Karakteristik koefisien difusi terhadap produksi etilen buah tomat



Gambar 6: Perkembangan warna tomat selama 15 hari