

# Penentuan Waktu Relaksasi Pertukaran Gas, Koefisien Difusi dan Resistensi Buah Tomat terhadap $C_2H_4$ Menggunakan Spektrometer Fotoakustik Laser $CO_2$ dengan Pelacak Gas $SF_6$

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

## Ringkasan

Telah dilakukan studi metode penentuan waktu relaksasi, koefisien resistansi dan koefisien difusi pertukaran gas  $SF_6$  di dalam buah tomat (*Lycopersicon esculentum*) dengan metode spektroskopi fotoakustik laser  $CO_2$  yang bersifat tidak mengganggu dan tidak merusak sampel buah. Gas  $SF_6$  menyerap paling kuat pada garis laser 10P16 dan gas  $C_2H_4$  pada garis laser 10P14 dengan frekuensi resonansi sebesar  $(1650 \pm 5) Hz$ . Batas deteksi terendah yang dihasilkan oleh spektrometer tsb untuk gas  $SF_6$  diperoleh  $(2,6 \pm 0,4) ppt$  dan untuk gas  $C_2H_4$  sebesar  $(0,32 \pm 0,03) ppb$ . Sesudah diketemukan parameter difusi utk gas pelacak  $SF_6$ , maka dapat ditentukan parameter difusi untuk hormon pematangan buah, gas  $C_2H_4$ . Sifat-sifat Metode pemantauan difusi gas  $SF_6$  pada buah tomat serta pengukuran emisi gas  $C_2H_4$  dalam kurun waktu 15 hari menghasilkan pola karakteristik waktu relaksasi & koefisien resistansi serta koefisien difusi terhadap emisi etilen. Diperoleh hasil pola emisi  $C_2H_4$  menunjukkan kurva sesuai dengan yang dimiliki buah klimakterik. Hasil pemantauan gas  $SF_6$  ditemukan kecenderungan waktu relaksasi dan koefisien resistensi buah terhadap gas  $SF_6$  menurun secara eksponensial dengan berjalannya waktu umur buah tomat. Adapun koefisien difusi mengalami kenaikan secara eksponensial juga. Dari hasil perolehan transportasi gas didalam buah tomat menentukan metabolisme yang berkaitan langsung dengan penyimpanan buah Hal ini 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 resistensi & difusi, tomat

## Abstract

It Has been studied a method of determining the relaxation time, the coefficient of resistance and the diffusion coefficient of  $SF_6$  gas exchange in tomato fruits (*Lycopersicon esculentum*) with  $CO_2$  laser photoacoustic spectroscopy method that is not intrusive and does not damage the fruit samples.  $SF_6$  gas absorbs the most strongly in the 10P16 laser line and  $C_2H_4$  gas in the 10P14 laser line with a resonant frequency of  $(1650 \pm 5) Hz$ . The lowest limit detection produced by the spectrometer for the  $SF_6$  gas was obtained  $(2.6 \pm 0.4) ppt$  and for  $C_2H_4$  gas was  $(0.32 \pm 0.03) ppb$ . After diffusion parameters have been found for  $SF_6$  tracer gas, diffusion parameters can be determined for fruit maturation hormone,  $C_2H_4$  gas. Characteristics The  $SF_6$  gas diffusion monitoring method in tomatoes and measurement of  $C_2H_4$  gas emissions over a period of 15 days produce a characteristic pattern of relaxation time and coefficient of resistance and diffusion coefficient of ethylene emission. The results obtained from the  $C_2H_4$  emission pattern show that the curves correspond to those of climacteric fruits. The results of  $SF_6$  gas monitoring found the tendency of relaxation time and the coefficient of resistance of fruit to  $SF_6$  gas decreased exponentially with the passage of time of tomatoes. The diffusion coefficient is experiencing an exponential increase as well. From the results of the acquisition of gas transportation in tomatoes determine the metabolism directly related to fruit storage. It can be recommended to quality control of fruit ripening tomatoes to get the optimization parameters in order to obtain maturation diffusion line with market requirements.

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

## PENDAHULUAN

Karakteristik transportasi pertukaran gas pada buah belum diketahui secara mendalam disebabkan antara lain oleh keterbatasan detektor gas kelumit disamping metode deteksinya. Proses metabolisme yang menentukan umur penyimpanan buah ditentukan oleh sifat transport gas pada buah [1].

Deteksi gas kelumit selama ini menggunakan kromatografi gas yang mempunyai kekurangan dalam hal sensitivitas, proses deteksi perlu waktu lama sampai order hari. Metode spektroskopi fotoakustik dengan sumber radiasi laser infra merah menawarkan kelebihan dalam hal sensitivitas yang tinggi hingga orde *ppb* (*partperbillion*) dan dapat mendeteksi untuk sistem mengalir (*flowing*) serta waktu tanggap berorder menit. Spektrometer fotoakustik berbasis laser  $CO_2$  memiliki jangkauan panjang gelombang *infrared* 9 – 11  $\mu m$  dan mampu membangkitkan daya laser 1 – 100 *Watt* (Harren dkk., 2000).

Penelitian ini menggunakan gas  $SF_6$  sebagai pelacak (*tracer*) untuk menentukan koefisien difusi gas oksigen dan karbondioksida yang terjadi pada proses respirasi buah tomat. 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 ( $D$ ) [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 persamaan (2)

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

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.

Konsentrasi internal gas pelacak di dalam buah mengalami peluruhan secara eksponensial dengan

waktu relaksasi gas  $\tau_f$  [1]

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

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 dapat diperoleh dari gradien persamaan linear berikut,

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

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) dapat ditulis

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

Persamaan diferensial difusi gas melalui kulit dari suatu volume tertutup adalah [1]

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

dengan  $\frac{dS}{dt}$  adalah perubahan jumlah gas pelacak internal terhadap  $dt$  ( $m^3/s$ ),  $C_e(t)$  adalah konsentrasi gas pelacak eksternal,  $A_f$  adalah luas 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 [1]

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

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

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

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

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

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

†Equal contributor

dengan  $V_{meas}$  adalah volume terukur buah,  $m$  massa buah dan  $d$  adalah kerapatan spesifik daging buah [1]. Dengan demikian konsentrasi eksternal sebagai fungsi waktu diperoleh sebagai berikut,

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

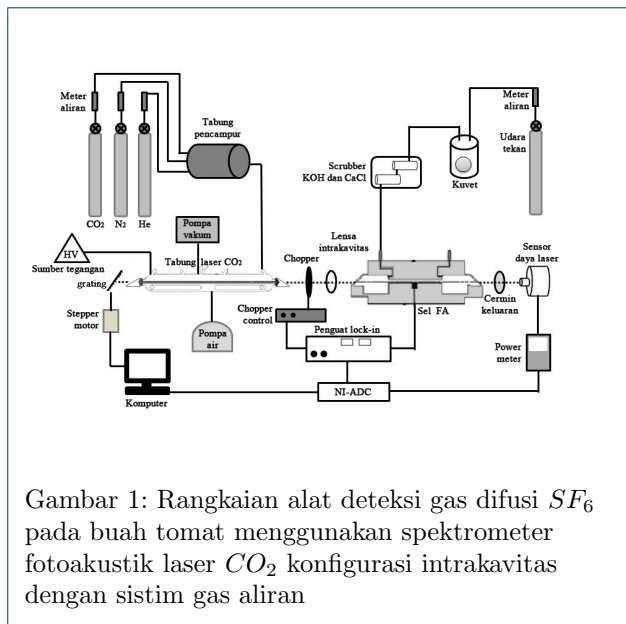
dengan  $C_0$  adalah konsentrasi awal dari buah. Hubungan resistansi kulit dengan waktu tukar gas dapat ditentukan [1] sebagai berikut,

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

## 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 masing-masing untuk menyerap  $CO_2$  dan  $H_2O$ . Buah tomat hijau sebagai sampel yang diteliti.

Rangkaian alat penelitian pemantauan gas difusi  $SF_6$  pada buah tomat menggunakan spektrometer fotoakustik laser  $CO_2$  intrakavitas ditunjukkan pada Gambar 1.



**Proses Deteksi.** Sampel buah tomat sebelumnya disimpan dalam kuvet volume 500 ml 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 500 ml yang menuju sel FA. Gas  $SF_6$  yang keluar dari buah mengalami pelucutan dimasukkan ke dalam sel FA dengan cara menyentorkan udara tekan dan kemudian 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. 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, berlaku persamaan [3]

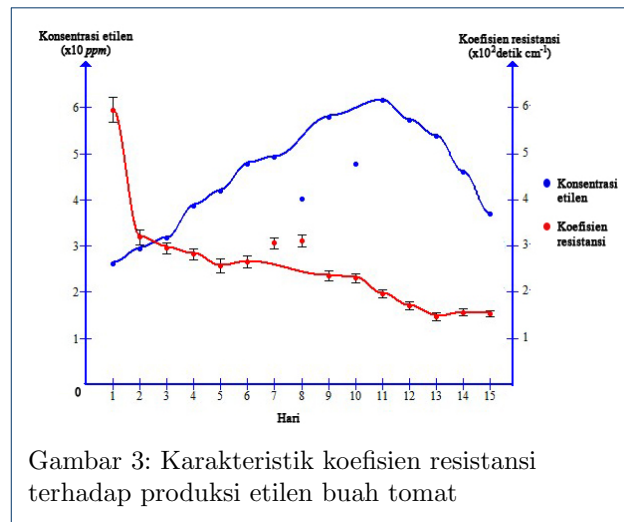
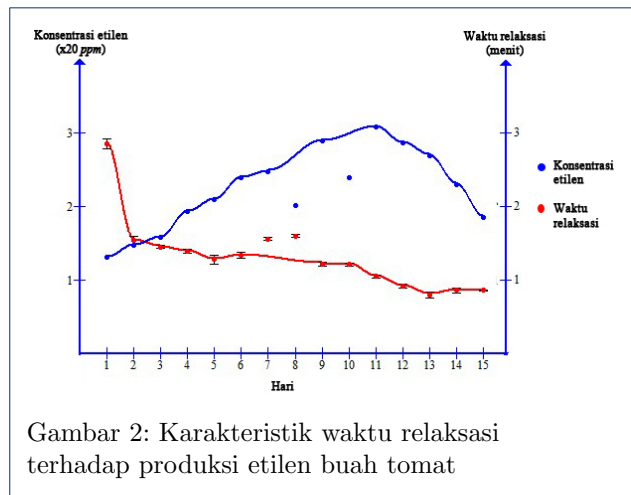
$$\left(\frac{S}{I}\right)_{10P16} = FR(\alpha_{10P16 \text{ etilen}} C_{\text{etilen}} + \alpha_{10P16 SF6}) + B_{10P16} \quad (13)$$

$$\left(\frac{S}{I}\right)_{10P14} = FR(\alpha_{10P14 \text{ etilen}} C_{\text{etilen}} + \alpha_{10P14 SF6}) + B_{10P14} \quad (14)$$

dengan  $\left(\frac{S}{I}\right)_{10P16}$  merupakan sinyal ternormalisasi dari campuran kedua gas tersebut pada garis  $\left(\frac{S}{I}\right)_{10P14}$  sinyal ternormalisasi campuran kedua gas tersebut pada garis 10P14,  $F$  konstanta sel yang didapatkan dari eksperimen ( $F$  teori  $3,7 \times 10^3 Pa \cdot cm/W$ ),  $R$  daya tanggap mikrofon yang digunakan ( $R = 11 mV/Pa$ ), dan  $\alpha$  koefisien serapan masing-masing gas untuk tiap-tiap garis laser,  $B_{10P}$  merupakan sinyal latar masing-masing garis laser. Dengan substitusi 2 persamaan tsb diperoleh hasil konsentrasi  $SF_6$  &  $C_2H_4$ .

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari pemayaran gas pelacak  $SF_6$  standar diperoleh hasil 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  $SF_6$ . Sedang pemayaran 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

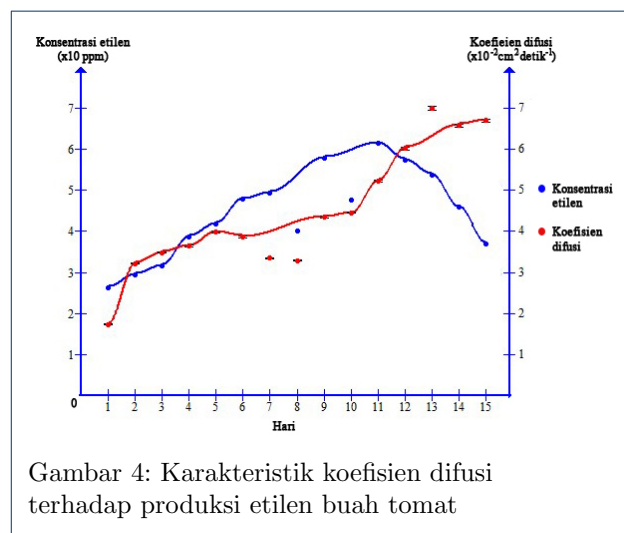


bahwa di garis 10P16 juga menyerap etilen, sehingga metode penentuan konsentrasi sangat teliti dengan menggunakan 2 persamaan kedua gas tsb yang menyerap pada kedua garis laser tsb.

**Difusi Gas SF<sub>6</sub> pada Buah Tomat.** Karakteristik waktu relaksasi terhadap produksi etilen buah tomat dapat dilihat pada Gambar 2, menunjukkan 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 3 mengalami penurunan dari  $(5,95 \pm 0,27) \times 10^2 \text{ detik cm}^{-1}$  ke  $(1,53 \pm 0,06) \times 10^2 \text{ detik cm}^{-1}$ . 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. Dari tinjauan fisika, secara prinsip spektrometer fotoakustik laser CO<sub>2</sub> ini mampu mendeteksi konsentrasi gas tsb sampai orde *sub – ppb* dengan waktu order menit sehingga perubahan mendadak konsentrasi dalam selang waktu yang singkat dapat diamati. Namun dalam penelitian ini, perubahan konsentrasi dalam pertukaran gas berlangsung secara teratur oleh karena tidak diberi perlakuan dari luar yang menjadikan perubahan mendadak konsentrasi, maka pengamatan dilakukan tiap hari hanya sekali. Dengan cara ini sudah bisa menggambarkan pola perkembangan perubahan waktu relaksasi pertukaran gas, koefisien difusi serta resistansi buah terhadap tingkat kematangan buah tomat.

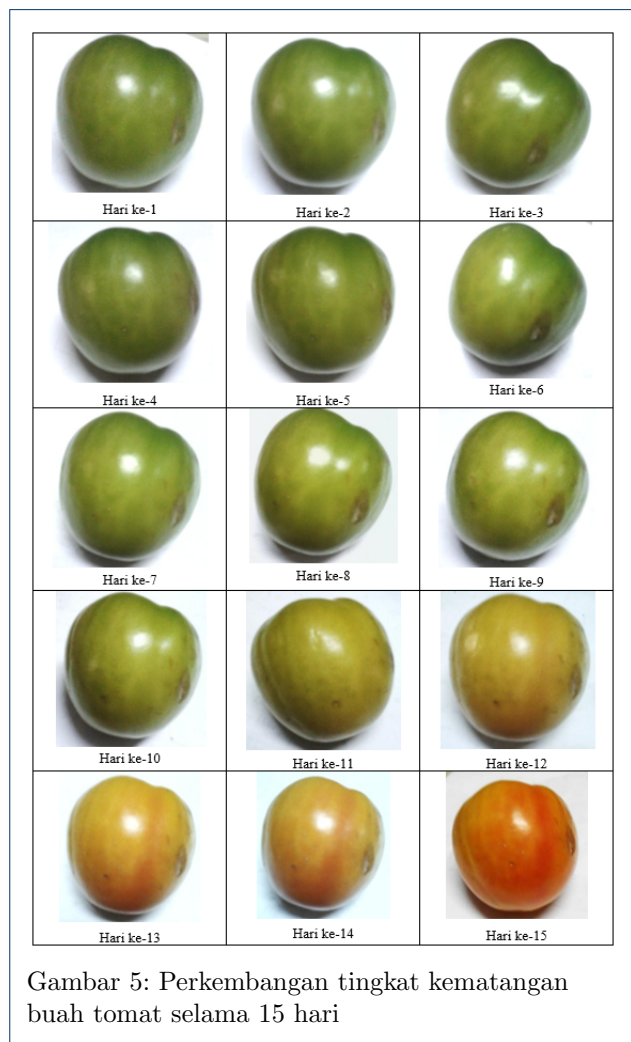
Jika dibandingkan antara penurunan waktu relaksasi dan koefisien resistansi, penurunan koefisien

resistansi lebih besar. Hal ini dikarenakan buah mengalami penurunan massa, sehingga fraksi gas antar sel meningkat seiring perubahan pematangan. Koefisien resistansi menurun dikarenakan besaran tsb 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 4 menunjukkan hasil karakteristik koefisien difusi terhadap produksi etilen. Berbeda dengan koefisien resistansi, koefisien difusi mengalami kenaikan dari  $(1,73 \pm 0,01) \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ detik}^{-1}$  ke  $(6,70 \pm 0,03) \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ detik}^{-1}$ . 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  $CO_2$  pada saat pematangan dan kemudian pada saat kemasakan menjelang sempurna dan telah lewatnya kemasakan, maka aktivitas respirasi akan semakin menurun (Murtadha, 2012). Jika oksigen dalam buah telah habis maka selanjutnya akan terjadi pembusukan/fermentasi [1]. Pada penelitian ini pengambilan data tidak mencapai masa masak yang sempurna, sehingga tidak terlihat pola penurunan laju respirasi. Gambar 5 menunjukkan tingkat kematangan 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 [3]. Pola produksi etilen dari hasil pengamatan ada dua data yang mengalami penyimpangan cukup jauh. Padahal sampel buah yang diamati 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  $ZnSe$  sehingga keluaran laser tidak optimal, atau pengaturan posisi grating halus yang kurang tepat karena sangat sensitif terhadap getaran. Pada perlakuan normal, buah tomat hijau pasca panen membutuhkan waktu 7 hari untuk matang [4]. Pada penelitian ini buah tomat membutuhkan waktu 15 hari untuk menjadi merah-matang. Hal ini dikarenakan buah mengalami kedap udara selama perendaman gas  $SF_6$ , 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 penelitian ini dapat disimpulkan bahwa dengan metode spektroskopi fotoakustik laser  $CO_2$  terungkap dengan mudah cara mendeteksi sekaligus memantau pertukaran gas yang terjadi didalam buah tomat menggunakan gas  $SF_6$  sebagai pelacak. Hasil koefisien difusi & resistensi buah tomat terhadap gas  $SF_6$  dapat dipakai untuk menentukan koefisien difusi & resistensi hormon pematangan buah, gas  $C_2H_4$ .

Pola emisi  $C_2H_4$  yang dihasilkan oleh buah tomat telah sesuai dengan karakteristik buah klimakterik. Waktu relaksasi pertukaran gas didalam buah tomat dan koefisien resistensinya mengalami penurunan secara eksponensial dengan bertambahnya tingkat kematangan. Akan tetapi koefisien difusi buah tomat mengalami kenaikan dengan bertambahnya tingkat kematangan buah.

Dengan demikian metode spektroskopi 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, Universitas Gadjah Mada

2 Y. A. Kholishoh

Dari :

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

**Pustaka**

1. Groot TT. Trace Gas Exchange by Rice, Soil and Pears [Thesis]. University of Nijmegen; 2002.
2. BANKS NH. Estimating Skin Resistance to Gas Diffusion in Apples and Potatoes. *J Exp Bot.* 1985;36(12):1842–1850. Available from: <https://doi.org/10.1093/jxb/36.12.1842>.
3. Wasono MAJ, Muslim, Tranggono S. Penerapan Spektrometer Fotoakustik Laser CO<sub>2</sub> Semi Sealed-Off pada Penentuan Koefisien Resistensi Buah Tertentu Terhadap Difusi C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> Menggunakan Gas SF<sub>6</sub> sebagai Pelacak. In: Pros. Pertem. dan Present. ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetah. dan Teknol. Nukl. Yogyakarta: P3TM-BATAN; 2002. p. 241–248.
4. Saltveit ME. Postharvest Biology and Handling. In: Heuvelink E, editor. Tomatoes. United Kingdom: CABI Publishing; 2005. .