

# MODEL KARAKTERISTIK RESPIRASI PADA SISTEM PEMATANGAN BUATAN (*ARTIFICIAL RIPENING*) BUAH KLIMAKTERIK BERDASARKAN PERSAMAAN LOGISTIK

(*Modeling Characteristic of Respiration on Artificial Ripening System of Climacteric Fruit based on Logistic Equation*)

Kem Trimaya Vanani<sup>1</sup> dan Sutrisno<sup>2</sup>

## ABSTRACT

As perishable products, fruits have limited shelf life that could disturb the supply continuity on the market. A system consists of cold storage and artificial ripening chamber could be a solution to this problem. Then, a mathematical model of this system is needed to forecast optimum ripening time of fruits and to overcome the limited experiment time, expenses and technique.

Over the past years, respiration models were built mostly by exponential type of equations or air diffusion. This paper describes respiration models based on logistic growth model. The logistic model described a population growth in a sigmoid curve, which showed slow increase at first, then sharpen until it slowed down to certain position influenced by inhibition factor. The accumulation of carbon dioxide of respiration in closed chamber showed the same symptoms. The inhibition factor ( $\mu$ ) used in the models is adapted from inhibition constant of Lee et al. (1992) respiration model, which based on enzyme kinetics. The model has successfully estimated climacteric peak of Mas banana under three different length of cold storage, compared to secondary data.

**Keywords:** *Artificial Ripening, Characteristic of Respiration, Climacteric Fruits, Mathematical Model, Logistic Equation*

## PENDAHULUAN

Tingkat permintaan masyarakat dalam dan luar negeri terhadap buah-buahan segar cenderung meningkat selama beberapa tahun terakhir. Pada tahun 1999 jumlah ekspor buah dan sayuran Indonesia adalah 902.381.000 ton dengan nilai ekspor sebesar US\$ 374.641.000, meningkat dibandingkan dengan jumlah ekspor tahun 1998 yaitu 616.492.000 ton senilai US\$ 204.556.000 (FAO, 1999).

Sifat mudah rusak (*perishable*) buah-buahan menyebabkan umur simpannya (*shelf life*) terbatas, sehingga dapat mengganggu

kontinuitas pasokan. Sementara itu, pasar menginginkan buah dalam kondisi segar, matang seragam dan siap konsumsi. Oleh karena itu, diperlukan perencanaan terpadu antara tahap pasca panen dan distribusi hasil pertanian, serta teknologi penyimpanan yang sekaligus dapat menyeragamkan waktu kematangan buah. Hal ini dapat diwujudkan dengan sistem penyimpanan dingin dan pematangan buatan yang terintegrasi, untuk mengatur waktu penyimpanan dan pematangan buah agar sesuai dengan kondisi pasar (Sugiyono, 1999). Keterbatasan waktu, biaya dan teknik, menuntut adanya penyusunan model

1) Alumni Mahasiswa Teknik Pertanian, IPB

2) Staf Pengajar Jurusan Teknik Pertanian, IPB

matematika pendugaan karakter respirasi sistem tersebut untuk meramalkan waktu kematangan optimum buah yang diinginkan.

Produk pertanian masih melakukan kegiatan metabolik selama penyimpanan, seperti respirasi. Sebagian besar perubahan fisikokimiawi buah pasca panen berhubungan dengan respirasi seperti proses pematangan, pembentukan aroma dan kemanisan, pelunakan daging buah, penurunan nilai mutu, dan sebagainya (Pantastico, 1975). Proses respirasi dipengaruhi oleh faktor internal dan eksternal produk, diantaranya adalah suhu. Karakter perubahan pada laju reaksi akibat suhu biasanya ditentukan oleh nilai kuosien suhu ( $Q_{10}$ ), yaitu kebalikan rasio laju reaksi pada suatu tingkat suhu ( $T_1$ ) terhadap laju reaksi saat suhu naik  $10^\circ\text{C}$  ( $T_1 + 10^\circ\text{C}$ ) (Kays, 1991 dan Nobel, 1991). Menurut Kays (1991), nilai  $Q_{10}$  pada kebanyakan produk adalah 2.0-2.5 saat suhu  $5^\circ\text{C}$  hingga  $25^\circ\text{C}$ .

Sementara itu dari pola respirasinya, buah dapat digolongkan menjadi klimakterik dan non klimakterik. Kenaikan tajam pada pola respirasi buah klimakterik dapat digunakan sebagai acuan waktu simpan dan pematangan. Oleh karena itu, khusus pada buah klimakterik dapat dilakukan percepatan pematangan atau pematangan buatan dengan bantuan faktor eksternal yang dapat mempengaruhi proses respirasi, seperti injeksi etilen atau asetilen. Menurut Pantastico (1986) dan Sugiyono (1999), praktek pematangan buatan dapat dilakukan dalam ruangan tertutup berisi komoditi buah dengan pengaturan suhu tertentu agar sesuai dengan kebutuhan proses pematangan. Pada sistem penyimpanan dan pematangan buatan dalam ruangan tertutup, respirasi buah akan mengakibatkan akumulasi gas hingga mencapai suatu keadaan stabil (*steady state*) dengan asumsi tidak terjadi difusi udara ke luar sistem.

Penelitian ini bertujuan untuk menyusun model matematika dari proses respirasi pada sistem penyimpanan dan pematangan buatan dengan berbagai tingkat suhu untuk menduga waktu kematangan buah, dan melakukan uji validasi model secara kualitatif menggunakan data sekunder melalui simulasi untuk beberapa kondisi penyimpanan dan pemeraman.

Telah banyak penelitian dilakukan untuk mengamati perilaku buah dan perubahan lingkungan yang terjadi selama pematangan buatan, diantaranya adalah Kader (1986) dan Esguerra *et al.* (1992). Demikian pula dengan penelitian terhadap pengendalian otomatis dan pengukuran parameter lingkungan selama pematangan buatan. Namun masih dirasakan perlu adanya pengembangan model matematika yang pendugaan karakteristik respirasi untuk memprediksi kematangan buah, khususnya pada sistem penyimpanan yang dilanjutkan dengan pematangan buatan (*artificial ripening*) dalam ruang tertutup.

Pengembangan tersebut dapat dilakukan dengan mengacu kepada hasil beberapa penelitian terdahulu, diantaranya adalah pengontrolan pematangan buatan dengan logika Fuzzy (Sugiyono, 1999) dan pengamatan pengaruh lama penyimpanan buah dan pentahapan suhu pada pematangan buatan.

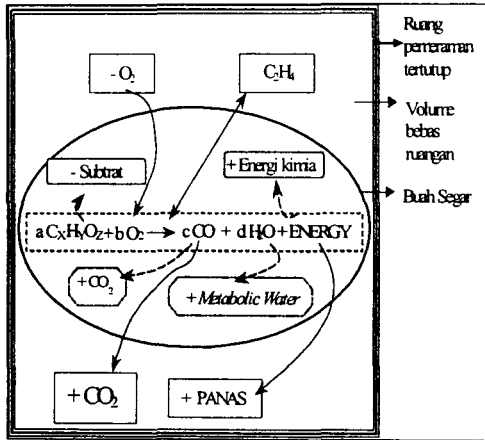
## PENDEKATAN TEORITIS

### Model Fisik

Pematangan buatan dilakukan dalam ruangan tertutup berisi komoditi buah dengan pengaturan suhu tertentu pada sistem agar sesuai dengan kebutuhan proses pematangan (Sugiyono, 1999). Percepatan pematangan dipacu dengan menginjeksikan sejumlah konsentrasi etilen (Satuhu, 1995). Pernyataan tersebut didukung oleh Pantastico *et al.* (1986) mengenai praktek pematangan

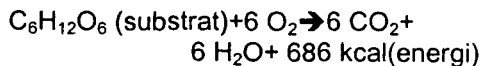
buatan secara komersial dan berskala besar.

Dengan memodifikasi model respirasi pada Kays (1991), maka model respirasi pada sistem penyimpanan dingin dan pematangan buatan (*artificial ripening*) dalam ruangan tertutup dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Model fisik proses respirasi sistem pematangan buatan pada ruang pemeraman tertutup

Pada sistem tersebut diatas, buah akan tetap melakukan proses metabolisme termasuk respirasi selama penyimpanan dan pematangan. Proses respirasi tersebut secara sederhana dapat digambarkan dengan rumus kimia sebagai berikut:



Proses respirasi akan mengoksidasi substrat untuk menghasilkan energi, air metabolik, dan karbondioksida. Hal tersebut akan mengakibatkan pengurangan substrat buah, penambahan kalor/panas dan perubahan komposisi gas dalam ruang pemeraman yang tertutup, yaitu penurunan konsentrasi  $O_2$  dan penambahan konsentrasi  $CO_2$ .

Namun hasil akhir dari proses respirasi sangat tergantung dari jenis

substrat yang digunakan yaitu karbohidrat, asam organik, atau pun lemak. Perbedaan hasil akhir tersebut menimbulkan nilai kuosien respirasi (RQ) yang berbeda sebagai gambaran perbedaan komposisi udara ( $CO_2$  dan  $O_2$ ) yang terjadi (Pantastico *et al.*, 1986 dan Kays, 1991). Kemudian suhu, kelembaban relatif dan komposisi udara di dalam ruang pemeraman akan mempengaruhi laju respirasi yang terjadi (Kader, 1986). Menurut Kays (1991), karakter perubahan pada laju reaksi akibat suhu biasanya ditentukan dengan nilai kuosien suhu ( $Q_{10}$ ), yaitu rasio laju reaksi tertentu pada suatu tingkat suhu ( $T_1$ ) terhadap laju reaksi tersebut saat suhu naik  $10^\circ C$  ( $T_1 + 10^\circ C$ ).

Sementara itu diasumsikan tidak akan terjadi difusi udara ke luar ruang, karena ruang pemeraman dianggap tertutup rapat. Hal tersebut akan menimbulkan akumulasi gas hingga mencapai suatu kondisi stabil (*steady state*). Asumsi ini didukung oleh pendapat Kays (1991) bahwa laju respirasi akan terhambat pada konsentrasi  $CO_2$  tinggi ataupun  $O_2$  rendah.

### Model Pertumbuhan Logistik

Menurut Purcell *et al.* (1987) dan Chapra *et al.* (1991), laju pertumbuhan populasi dapat didekati lebih baik dengan persamaan **model pertumbuhan logistik**, dibandingkan dengan model pertumbuhan eksponensial. Hal tersebut disebabkan bahwa pada kehidupan nyata pertumbuhan populasi tidak dapat bertambah semakin cepat dengan pertambahan waktu, melainkan akan dihambat dengan suatu faktor-faktor pembatas pertumbuhan seperti ruang hidup, makanan, maupun lingkungan. Model pertumbuhan logistik tersebut digolongkan ke dalam kelompok model pertumbuhan *sigmoidal* yang membentuk kurva S.

Hal serupa dapat dianalogikan dengan peristiwa penambahan konsentrasi gas CO<sub>2</sub> akibat respirasi produk segar pada ruangan tertutup. Akumulasi gas yang terjadi akan semakin meningkat dengan bertambahnya waktu, namun peningkatannya akan dihambat dengan suatu konsentrasi gas maksimum atau minimum yang dapat menimbulkan respirasi anaerob (Kays, 1991 dan Pantastico *et al.*, 1986).

Pada model pertumbuhan logistik laju pertumbuhan sebanding dengan besarnya populasi  $y$  maupun terhadap selisih  $L - y$ , dimana  $L$  adalah populasi maksimum yang dapat dicapai (Purcell, 1987), yaitu :

$$\frac{dy}{dt} = ky(L - y) \quad (1)$$

dimana nilai  $k$  tergantung dari faktor-faktor pembatas yang menahan laju pertumbuhan hingga suatu keadaan maksimal  $L$ .

Penyelesaian model diferensial logistik persamaan (1) dapat dilakukan secara analitis maupun numeris, tergantung dari parameter  $k$  yang berpengaruh.

### **Inhibition Constant dan Konsentrasi Gas Jenuh**

Analogi faktor pembatas pada model pertumbuhan logistik (1) dalam proses respirasi produk pertanian dinyatakan oleh Lee *et al.* (1991), bahwa akumulasi jumlah konsentrasi CO<sub>2</sub> dalam ruangan tertutup menghambat laju respirasi produk, yang dinyatakan dengan lambang  $K_i$  (*inhibition constant*). Berdasarkan hal tersebut diatas maka nilai  $K_i$  dapat digunakan untuk mewakili faktor penghambatan yang berpengaruh pada laju pertumbuhan spesifik  $k$  dari persamaan logistik (Persamaan 1).

Nilai  $K_i$  merupakan salah satu parameter dalam model respirasi buah dan sayuran segar untuk sistem ruangan tertutup berdasarkan prinsip

kinetika enzim yang dipublikasikan oleh Lee *et al.* (1992). Menurut Lee *et al.* (1991), laju respirasi produk segar tergantung pada konsentrasi O<sub>2</sub> dan CO<sub>2</sub>, dan dapat dinyatakan dengan persamaan tipe kinetika enzim yaitu :

$$R = \frac{V_m * [O_2]}{K_m + (1 + [CO_2] / K_i [O_2])} \quad (2)$$

dimana  $R$  adalah laju respirasi (mg/kg/jam), sedangkan  $V_m$  (mg/kg/jam),  $K_m$  (%O<sub>2</sub>), dan  $K_i$  (%CO<sub>2</sub>) adalah parameter yang khas pada tiap komoditi yang berbeda. Persamaan (2) diatas dapat dijadikan linear dengan membalikkan persamaan menjadi :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{V_m} + \frac{K_m}{V_m} * \frac{1}{[O_2]} + \frac{1}{K_i * V_m} * [CO_2] \quad (3)$$

sehingga parameter  $V_m$ ,  $K_m$ , dan  $K_i$  dapat diduga dengan analisa regresi berganda pada data percobaan.

Nilai konsentrasi gas CO<sub>2</sub> maksimum dugaan pada buah pisang didekati dengan hasil percobaan Efendi (1993) mengenai penyimpanan dan pematangan buah pisang, yaitu sekitar 20–25 % volume udara.

Laju produksi gas CO<sub>2</sub> atau O<sub>2</sub> (mg/kg/jam) selama respirasi pada ruang tertutup dapat diukur pula dengan persamaan berikut (Kays, 1991):

$$R = \frac{\Delta[Gas] * 10 * V * M_{gas}}{\Delta t * W * 22.4 * (1 + T / 273.15)} \quad (4)$$

dengan  $T$  adalah suhu (°C), sedangkan  $W$ ,  $V$ ,  $M$ -gas masing-masing adalah berat segar produk (kg), volume bebas ruangan (dm<sup>3</sup>), dan berat molekul gas (g).

### **Hubungan Linear Akumulasi CO<sub>2</sub> pada Penyimpanan Dingin**

Gane (1936) dalam Simmonds (1966) menyatakan bahwa laju respirasi (mgCO<sub>2</sub>/kg/jam) buah pisang

saat pra-klimakterik setelah melalui periode penyimpanan dingin dapat dinyatakan secara eksponensial terhadap suhu ( $^{\circ}\text{C}$ ) :

$$\log R = 0.843 + 0.0348 T \quad (5)$$

Persamaan (5) diatas dirumuskan dengan kondisi nilai kuosien suhu  $Q_{10}$  buah pisang adalah 2.23. Apabila laju respirasi pada suhu  $15^{\circ}\text{C}$  dihitung menggunakan persamaan (5) maka akan diperoleh nilai laju respirasi yang konstan pada setiap penyimpanan dengan suhu yang sama. Laju respirasi yang konstan ini menunjukkan bahwa hubungan konsentrasi gas terhadap waktu adalah linear. Selain itu Efendi (1993) pun menghasilkan persamaan regresi linear ( $R^2 = 0.988$ ) yang menghubungkan konsentrasi gas terhadap waktu pengamatan pada penyimpanan buah pisang Lampung.

## METODE PENELITIAN

### Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan di Lab TPPHP-TEP-FATETA-IPB, Bogor pada bulan Oktober 2001-Januari 2002.

### Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan untuk pemrograman adalah seperangkat PC (*Personal Computer*) dan software Microsoft Qbasic versi 1.1. Data-data yang digunakan untuk parameter model berasal dari penelitian-penelitian yang dilakukan oleh Efendi (1993) dan Herly (2002).

### Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan sebagai berikut :

- Pengamatan perilaku dan ciri khas proses respirasi buah pada sistem penyimpanan dingin dan pematangan buatan berdasarkan data sekunder.
- Penyusunan model fisik dan matematika, dengan menentukan komponen-komponen yang

- berpengaruh dan membatasi kinerja sistem yang diamati.
- Pembuatan program komputer, dengan menggunakan bahasa Basic dalam software Microsoft Qbasic versi 1.1. berdasarkan model matematika yang telah disusun.
- Analisa hasil pendugaan model dengan data percobaan sekunder. Perbandingan tersebut diplotkan dalam bentuk grafik.
- Analisa program simulasi  
Model matematika yang paling mendekati data percobaan digunakan untuk mensimulasikan pengaruh perubahan parameter-parameter dalam menduga pola respirasi.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Asumsi Model

Pengamatan ciri khas proses respirasi buah klimakterik pada sistem penyimpanan dingin dan pematangan buatan (*artificial ripening*) yang diamati berdasarkan hasil penelitian Efendi (1993), Sugiyono (1999), dan Herly (2002) telah menghasilkan asumsi-asumsi sebagai berikut:

- Laju perubahan konsentrasi gas  $\text{CO}_2$  dan  $\text{O}_2$  cenderung konstan selama periode penyimpanan dingin, kecuali pada beberapa jam di awal penyimpanan. Kelainan tersebut lebih disebabkan oleh transisi suhu ruang penyimpanan dari suhu lingkungan yang tinggi ke suhu rendah penyimpanan yang diinginkan.
- Secara keseluruhan pola hubungan konsentrasi  $\text{CO}_2$  terhadap waktu membentuk kurva seperti huruf S, yaitu menunjukkan laju yang lambat dan konstan diawal kemudian naik dengan cepat hingga mencapai titik tertentu dimana laju perubahan menjadi lambat kembali (Gambar 2.). Perilaku ini diasumsikan cocok dengan sifat model pertumbuhan logistik yang dapat digolongkan

- pada jenis kurva pertumbuhan *sigmoidal* (kurva bentuk-S).
3. Perlambatan laju respirasi yang terjadi pada saat-saat terakhir pematangan buatan dipengaruhi oleh suatu faktor penghambat yang berhubungan dengan waktu. Asumsi ini didukung oleh pendapat Lee *et al.* (1992) mengenai faktor penghambat  $K_i$  dalam model respirasi yang dirumuskannya.
  4. Pengaruh etilen tidak terlalu diperhitungkan pada model, karena diasumsikan konsentrasi etilen yang digunakan adalah konsentrasi optimum, mengingat Loesecke (1950) dalam Simmonds (1966) menyatakan bahwa konsentrasi etilen yang lebih tinggi dari optimum tidak banyak berpengaruh dalam percepatan pematangan.
  5. Laju respirasi pada model dipengaruhi oleh suhu ruang penyimpanan.
  6. Pengaruh kelembaban relatif ruangan tidak terlalu diperhitungkan karena diasumsikan kelembaban ruangan konstan pada kondisi optimum yang dianjurkan. Kondisi optimum kelembaban yang dianjurkan pada berbagai jenis buah adalah 85-90% RH (Pantastico *et al.*, 1986).

**Model Pendugaan Pola Respirasi**

Dengan mengacu pada pendekatan teoritis, maka telah disusun dua tipe model pendugaan pola respirasi pada sistem penyimpanan dingin dan pematangan buatan sebagai berikut :

**1. Model Tipe I**

Pada model tipe-I, asumsi yang digunakan adalah bahwa pola perubahan konsentrasi gas CO<sub>2</sub> yang membentuk kurva *S* (*sigmoidal*) sepenuhnya dapat didekati dengan model pertumbuhan logistik (1). Untuk mempermudah penyelesaian analitis

maka dilakukan pemisalan  $k = \mu/L$ , sehingga diperoleh persamaan baru :

$$\frac{dy}{dt} = \mu * y(1 - \frac{y}{L}) \tag{6}$$

$$\int_{y_0}^L \left( \frac{1}{L-y} + \frac{1}{y} \right) dy = \int_0^t \mu dt$$

$$\Leftrightarrow [-\ln(L-y)]_{y_0}^y + [\ln y]_{y_0}^y = [\mu t]_0^t$$

$$\Leftrightarrow -[\ln(L-y) - \ln(L-y_0)] + \ln y - \ln y_0 = \mu t$$

$$\Leftrightarrow \ln \frac{L-y_0}{L-y} + \ln \frac{y}{y_0} = \mu t$$

$$\Leftrightarrow \frac{y(L-y_0)}{y_0(L-y)} = e^{\mu t}$$

$$\Leftrightarrow y(L-y_0) = y_0 * L * e^{\mu t} - y_0 * y * e^{\mu t}$$

$$\Leftrightarrow y(L-y_0) + y_0 * y * e^{\mu t} = y_0 * L * e^{\mu t}$$

$$\Leftrightarrow y = \frac{y_0 * L * e^{\mu t}}{(L-y_0) + y_0 * e^{\mu t}}$$

Jika disederhanakan lebih lanjut akan menghasilkan persamaan berikut:

$$y = \frac{L * y_0}{y_0 + (L - y_0) * e^{-\mu t}} \tag{7}$$

atau 
$$y = \frac{L}{1 + \left( \frac{L}{y_0} - 1 \right) * e^{-\mu t}} \tag{8}$$

dengan parameter  $L$ ,  $y_0$  dan  $\mu$  pada persamaan (8), masing-masing mewakili dugaan konsentrasi CO<sub>2</sub> maksimum (%), konsentrasi CO<sub>2</sub> awal (%), dan konstanta pertumbuhan spesifik.

Parameter  $\mu$  dalam persamaan (8) didekati dengan nilai  $K_i$  yang diperoleh dari regresi linear berganda dari persamaan (3) terhadap data eksperimen. Nilai  $K_i$  sangat dipengaruhi oleh suhu (Lee *et al.*, 1992) sehingga perlu dicari nilai  $K_i$  pada berbagai tingkat suhu. Variasi nilai  $K_i$  terhadap suhu ini juga dapat didekati dengan memanfaatkan nilai kuosien suhu ( $Q_{10}$ ) yang sesuai pada berbagai jenis komoditi. Umumnya  $Q_{10}$  berkisar antara 2.0–2.5 (Kays, 1991 dan Nobel, 1991). Sedangkan nilai  $L$  (%) adalah dugaan konsentrasi CO<sub>2</sub> jenuh yang

berkisar antara 20-25% pada buah pisang (Efendi, 1993).

Sehingga secara keseluruhan model tipe I adalah sebagai berikut :  
 $0 < t < \text{waktu simpan} :$

$$Y_t = \frac{L}{1 + \left( \frac{L}{Y_0} - 1 \right) * e^{-\mu t}} \quad (9)$$

waktu simpan  $< t < \text{waktu peram} :$

$$Y_t = \frac{L}{1 + \left( \frac{L}{Y_{t-1}} - 1 \right) * e^{-\mu t}} \quad (10)$$

dengan  $Y_t$  adalah konsentrasi  $\text{CO}_2$  saat  $t$  (waktu pengukuran),  $L$  adalah dugaan konsentrasi  $\text{CO}_2$  jenuh,  $Y_{t-1}$  adalah konsentrasi  $\text{CO}_2$  pada pengukuran terakhir sebelum  $t$ , dan  $\mu$  adalah konstanta pertumbuhan spesifik, dimana nilainya tergantung pada suhu saat  $t$ .

## 2. Model Tipe II

Model tipe-II disusun berdasarkan asumsi bahwa pola respirasi sistem dapat dibagi menjadi dua persamaan berbeda yang saling berkaitan, yaitu respirasi selama periode penyimpanan dingin dan periode pematangan buatan.

### a. Periode penyimpanan dingin

Selama periode penyimpanan dingin terjadi hubungan yang cenderung linear pada perbandingan konsentrasi gas dengan waktu. Perbandingan data produksi  $\text{CO}_2$  dan konsumsi  $\text{O}_2$  terhadap waktu (Herly, 2002) menunjukkan regresi linear dengan kemiringan yang hampir sama.

Secara umum, produksi  $\text{CO}_2$  selama penyimpanan  $15^\circ\text{C}$  dapat dipenuhi oleh persamaan (11) berikut :

$$Y(t) = a_1 t + a_2 \quad (11)$$

dengan  $Y(t)$  adalah konsentrasi  $\text{CO}_2$  (%) saat  $t$ ,  $a_1$  adalah konstanta kemiringan garis (0.029 s.d. 0.035) dan  $a_2$  adalah konsentrasi awal  $\text{CO}_2$  (0.03 % s.d. 1 %).

Sedangkan persamaan konsumsi  $\text{O}_2$  adalah :

$$Z(t) = b_1 t + b_2 \quad (12)$$

dengan  $Z(t)$  adalah konsentrasi  $\text{O}_2$  (%) saat  $t$ ,  $b_1$  adalah konstanta kemiringan garis (-0.013 s.d. -0.018) dan  $b_2$  adalah konsentrasi awal  $\text{O}_2$  (21 % s.d. 20.3%).

Asumsi yang diambil berdasarkan pengamatan empiris tersebut diatas, didukung oleh pernyataan Gane (1936) dalam Simmonds (1966) dan Efendi (1993) mengenai hubungan linear konsentrasi gas saat penyimpanan dingin terhadap waktu.

### b. Periode Pematangan Buatan

Produksi  $\text{CO}_2$  selama pematangan buatan didekati dengan persamaan logistik yang sama dengan persamaan (8), dengan asumsi terjadi kecepatan produksi yang tinggi hingga mencapai suatu titik dimana kecepatannya melambat karena pengaruh faktor penghambat yaitu akumulasi  $\text{CO}_2$  yang tinggi dan konsentrasi  $\text{O}_2$  yang rendah. Namun pada model tipe-II ini, nilai  $t$  (waktu) yang digunakan dalam persamaan dimulai sejak inisiasi pematangan (saat injeksi etilen) dan  $y_0$  (konsentrasi awal gas) adalah konsentrasi gas terakhir pada  $t$  tersebut. Nilai  $\mu$  didekati dengan nilai  $K_i$  yang tergantung pada kuosien suhu ( $Q_{10}$ ) yang bervariasi pada beragam jenis komoditi buah klimakterik.

Sehingga secara keseluruhan model tipe II adalah sebagai berikut :

$0 < t < \text{waktu simpan} :$

$$Y_t = a_1 t + a_2 \quad (13)$$

waktu simpan  $< t < \text{waktu peram} :$

$$Y_t = \frac{L}{1 + \left( \frac{L}{Y_{t-1}} - 1 \right) * e^{-\mu t}} \quad (14)$$

dengan  $Y_t$  adalah konsentrasi  $\text{CO}_2$  saat  $t$  (waktu pengukuran),  $L$  adalah dugaan konsentrasi  $\text{CO}_2$  jenuh,  $Y_{t-1}$  adalah

konsentrasi CO<sub>2</sub> pada pengukuran terakhir sebelum  $t$ ,  $\mu$  adalah konstanta pertumbuhan spesifik, dan  $a_1$  adalah konstanta kemiringan garis (pisang Mas = 0.029 s.d. 0.035),  $a_2$  adalah konsentrasi awal CO<sub>2</sub> (pisang Mas = 0.03 % s.d. 1 %).

**Penghitungan Parameter  $\mu$  pada Model**

Pada kedua tipe model yang disusun dan dibandingkan, nilai  $\mu$  didekati dengan nilai konstanta penghambat (*inhibition constant*)  $K_i$ . Nilai  $\mu$  berbeda-beda pada tiap tahapan suhu pematangan (T) yaitu :

$$\mu_i = \frac{\Delta T_i * ((Q_{10} * \mu \text{ simpan}) - \mu \text{ simpan})}{10 + \mu \text{ simpan}}$$

dengan :

- $\mu_i$  = nilai  $\mu$  pada tahapan suhu ke-1 (non dimensi)
- $\Delta T_i$  = selisih suhu tahap ke-1 dengan suhu simpan (non dimensi)
- $Q_{10}$  = kuosien suhu untuk jenis buah yang diamati (non dimensi)
- $\mu \text{ simpan}$  = nilai  $\mu$  pada suhu simpan = nilai  $K_i$  (non dimensi)

Nilai  $K_i$  diperoleh dari regresi linear berganda persamaan (3) terhadap data percobaan penyimpanan buah pada suhu simpan yang diinginkan. Pada kasus ini digunakan data Efendi (1993) yaitu penyimpanan buah pisang pada suhu 15°C. Penghitungan nilai  $K_i$  dapat menggunakan program REGRESI.BAS. Data percobaan penyimpanan tersebut digunakan sebagai data masukan (*input*) program untuk mencari nilai regresinya.

Pada suhu tersebut diperoleh pendekatan nilai  $K_i$  adalah 3.11 %. Sedangkan nilai  $Q_{10}$  (kuoesien suhu) bervariasi pada beragam jenis buah. Pada kasus ini diambil nilai  $Q_{10}$  sebesar 2.23 untuk buah pisang (Gane, 1936 dalam Simmonds, 1986).

**Program Pendugaan Respirasi**

Dua program komputer (RIPE-I.BAS dan RIPE-II.BAS) telah dibuat untuk masing-masing tipe model pendugaan yang disusun dan sebuah program (REGRESI.BAS) untuk mencari nilai parameter  $V_m$ ,  $K_m$  dan  $K_i$  saat suhu simpan berdasarkan metode regresi linear berganda persamaan (3) dengan masukan data percobaan yang dibuat dalam format \*.CSV atau \*.TXT.

Nilai keluaran yang dihasilkan dapat langsung disimpan dalam bentuk tabel di file \*.TXT atau \*.CSV pada folder yang sama dengan program. Selanjutnya hasil keluaran tersebut dapat disimpan kembali pada file lain dengan nama yang berbeda. Jika pemakai program ingin menganalisa data output lebih lanjut, maka disarankan untuk menggunakan tipe \*.CSV sebagai file output, sedangkan file output tipe \*.TXT ditujukan untuk pembuatan laporan tertulis. Program RIPE-1. BAS dan RIPE-2. BAS masing-masing dibuat untuk mensimulasikan model pendugaan tipe-I dan tipe-II. Diagram alir ketiga program tersebut disajikan pada Gambar 6., Gambar 7. dan Gambar 8.

**Perbandingan Model-Model Respirasi yang Disusun**

Kedua tipe model I dan II disimulasikan dengan program komputer masing-masing dengan nama RIPE-I. BAS dan RIPE-II. BAS. Beberapa parameter input yang digunakan berasal dari data sekunder hasil percobaan Herly (2002) untuk sistem pematangan buatan dengan empat pentahapan suhu 18°C, 20°C, 22°C, dan 25°C. Sistem pematangan tersebut dibedakan dengan lama penyimpanan dinginnya yaitu 4, 7 dan 10 hari simpan.

Hasil dugaan konsentrasi CO<sub>2</sub> dan laju respirasi dari kedua tipe model tersebut dibandingkan secara kualitatif dengan data konsentrasi gas dan laju respirasi hasil percobaan Herly (2002). Pada Gambar 3. dan Gambar 4. terlihat



bahwa hasil dugaan model tipe-II terhadap produksi CO<sub>2</sub> lebih mendekati data percobaan dibandingkan dengan dugaan model tipe-I pada perlakuan lama waktu penyimpanan dingin yang berbeda.

Perbedaan model tipe I dan tipe II adalah pada pendugaan konsentrasi CO<sub>2</sub> periode penyimpanan dingin. Model tipe I menggunakan persamaan logistik (8) dengan nilai  $\mu$  didekati dengan parameter  $K_i$  pada suhu penyimpanan tersebut (15°C). Sedangkan model tipe II menggunakan pendekatan empiris berupa persamaan linear untuk menduga konsentrasi gas periode penyimpanan dingin. Hal tersebut mendukung pendapat terdahulu mengenai hubungan linear produksi maupun konsumsi gas pada penyimpanan dingin buah pisang dengan skala suhu 0-15°C (Gane,1936 dan Efendi,1993).

Pola laju respirasi produksi CO<sub>2</sub> model tipe II lebih mendekati data percobaan daripada model tipe I, apabila dibandingkan dengan regresi *moving average* data percobaan pada seluruh perbedaan lama penyimpanan dingin. Hal tersebut juga tampak pada hubungan laju konsumsi O<sub>2</sub> kedua tipe. Perbandingan pola tersebut disajikan pada Gambar 5. untuk perlakuan 7 hari penyimpanan dingin suhu 15°C pada buah pisang Mas.

## KESIMPULAN & SARAN

### Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Dua model deterministik pendugaan karakteristik respirasi buah klimakterik pada sistem penyimpanan dan pematangan buatan ruang tertutup telah disusun berdasarkan model pertumbuhan logistik. Model pendugaan tipe I mengasumsikan bahwa pola

respirasi selama periode penyimpanan dan pematangan buatan, kedua-duanya dapat didekati dengan persamaan logistik. Secara keseluruhan model tipe I adalah sebagai berikut,

**0 < t < waktu simpan :**

$$Y_t = \frac{L}{1 + \left( \frac{L}{Y_0} - 1 \right) * e^{-\mu t}}$$

**waktu simpan < t < waktu peram:**

$$Y_t = \frac{L}{1 + \left( \frac{L}{Y_{t-1}} - 1 \right) * e^{-\mu t}}$$

2. Model pendugaan tipe II mengambil pendekatan bahwa selama periode penyimpanan dingin terjadi hubungan linear antara perubahan konsentrasi gas terhadap waktu, sedangkan selama periode pematangan buatan terjadi pembentukan kurva berbentuk S (*sigmoidal*) yang dicoba didekati dengan persamaan logistik. Secara keseluruhan model tipe II adalah sebagai berikut,

**0 < t < waktu simpan :**

$$Y_t = a_1 t + a_2$$

**waktu simpan < t < waktu peram:**

$$Y_t = \frac{L}{1 + \left( \frac{L}{Y_{t-1}} - 1 \right) * e^{-\mu t}}$$

dengan  $Y_t$  adalah konsentrasi CO<sub>2</sub> (%) saat  $t$  (waktu pengukuran),  $L$  adalah dugaan konsentrasi CO<sub>2</sub> jenuh (%),  $Y_{t-1}$  adalah konsentrasi CO<sub>2</sub> pada pengukuran terakhir sebelum  $t$ ,  $\mu$  adalah konstanta pertumbuhan spesifik, dan  $a_1$  adalah konstanta kemiringan garis (pisang Mas = 0.029 s.d. 0.035),  $a_2$  adalah konsentrasi awal CO<sub>2</sub> (pisang Mas = 0.03 % s.d. 1 %).

7. Pada kedua tipe model yang disusun, nilai  $\mu$  didekati dengan nilai konstanta penghambatan (*inhibition constant*)  $K_i$  berdasarkan data sekunder. Nilai  $\mu$  berbeda-

beda pada tiap tahapan suhu pematangan (T) yaitu :

$$\mu_i = \Delta T_i * ((Q_{10} * \mu_{\text{simpan}}) - \mu_{\text{simpan}} + \mu_{\text{simpan}})$$

10

4. Hasil simulasi dengan penggunaan model tipe II menunjukkan bahwa waktu pematangan atau pencapaian puncak klimakterik pada pemeraman dengan pentahapan suhu yang menurun (dari suhu tinggi ke suhu rendah) diduga akan lebih cepat dibandingkan dengan pentahapan suhu pemeraman menaik.

#### DAFTAR PUSTAKA

- BPS. 1999. *Statistics Indonesia, Horticulture Statistics-Selected Tables*. [www.bps.go.id](http://www.bps.go.id).
- Chapra, S.C., dan R. P. Canale. 1991. *Metode Numerik untuk Teknik*. Penerjemah S. Sardy. Penerbit UI-Press, Jakarta.
- Efendi, R. 1993. *Pendugaan Masa Simpan Segar Pisang Lampung dalam Sistem Penyimpanan Atmosfer Termodifikasi*. Tesis. Program Pascasarjana. IPB. Bogor.
- Esguerra, E.B., K. Kawada, and H. Kitagawa. 1992. Ripening behaviour of 'Senorita' bananas at different temperatures. *ASEAN Food Journal*. 7 (2) : 79-85.
- FAO. 1999. *FAO Statistic Database Result*. [www.apps.fao.org](http://www.apps.fao.org).
- Fishman, S., V. Rodov, and S. Ben-Yehoshua. 1996. Mathematical model for perforation effect on oxygen and water vapor dynamics in modified atmosphere packages. *J. Food Science*. 61 (5):956-961.
- Kader, A. 1986. Biochemical & physiological. Basis for effects of controlled and modified atmosphere on fruits and vegetables. *J. Food Technol*. 90(5):99-104.
- Kays, S.Y. 1991. *Postharvest Physiology of Perishable Plant Product*. Avi Pub., Inc. New York, USA.
- Lee, D.S., P.E. Hagger, and K.L. Yam. 1992. Application of an enzyme kinetics based respiration model to closed system experiment for fresh produce. *J. Food Process Engineering*. 15: 143-157.
- Nobel, P.S. 1991. *Physicochemical and Environmental Physiology*. Academic Press, Inc. USA.
- Pantastico, Er.B, C.T. Phan, K. Ogata dan K. Chachin. 1986. *Respirasi dan puncak respirasi*. dalam Er.B. Pantastico (ed). *Fisiologi Pasca Panen*. Penerjemah Kamaryani. Gajah Mada University Press, Yogyakarta.
- Satuhu, S. 1995. *Teknik Pemeraman Buah*. Penebar Swadaya, Jakarta.
- Simmonds, N.W. 1966. *Bananas*. Longman Group Limited, London.
- Sugiyono. 1999. *Kajian Pengembangan Sistem Kontrol Otomatis Menggunakan Logika Fuzzy pada Pemeraman (Artificial Ripening) untuk Buah-buahan Tropika*. Skripsi. Jurusan Teknik Pertanian. Fakultas Teknologi Pertanian. IPB. Bogor.