

PENGENDALIAN RESPIRASI UNTUK MEMPERTAHAKAN MUTU PASCA PANEN PRODUK SEGAR HORTIKULTURA

Respiration Control for Maintaining Post Harvest Quality of Fresh Horticultural Products

Sutrisno¹

ABSTRACT

The Public demand on fresh horticultural products is fairly high, and the data showed that for the past few years, the domestic and overseas demands for fresh tropical fruits have a tendency to increase. Fresh horticultural are perishable produces with limited of shelf life. Consequently, the continuity of fruit supply could be disturbed in terms of time, quantity, and quality. On the other hand, the modern market need the perfect delivery and want the fruits in the consumer hands in fresh, uniformly ripened, and ready to consume conditions. Biological products still carry out metabolic activity like respiration even after harvest. Most of the postharvest physico-chemical changes of fruits are related to respiration, such as maturity process, development of aroma and sweetness, softening of fruit meat, quality degradation, etc. Thus, controlling the respiration process could be done for maintaining the quality of fruits during post-harvest handling. Over the past years, the mathematical model for predicting and thus controlling respiration characteristics were already developed by many researchers. An application of the results of those research were also commercially used such as for Cold Storage, Modified Atmosphere Packaging (MAP), Artificial Ripening (AR) and Controlled Atmosphere Storage (CAS). This paper will reviewed the importance of controlling the respiration in relation to preserved the quality of fresh horticultural products during post-harvest handling.

Keywords : *Respiration, Modified Atmosphere Packaging/MAP, Controlled Atmosphere Storage/CAS, Cold Storage, Shelf life*

Diterima: 11 Juli 2007; Disetujui: 31 Agustus 2007

LATAR BELAKANG

Komoditas hortikultura, khususnya buah-buahan tropika, memiliki potensi yang sangat besar, baik untuk menambah devisa negara melalui ekspor, maupun dalam rangka pemenuhan status gizi masyarakat menuju Pola Pangan

Harapan yang telah dicanangkan pemerintah. Hal tersebut terlihat dari peningkatan permintaan buah-buahan di dalam dan luar negeri pada beberapa tahun terakhir. Sebagai penyedia sumber gizi masyarakat, produk hortikultura memegang peran amat penting karena kaya akan vitamin, mineral, serat dan

¹ Departemen Teknik Pertanian – FATETA IP, Kampus IPB Darmaga, PO Box 220, Bogor
Email : kensutrisno@yahoo.com

lainnya, yang amat dibutuhkan dalam menu makanan masyarakat.

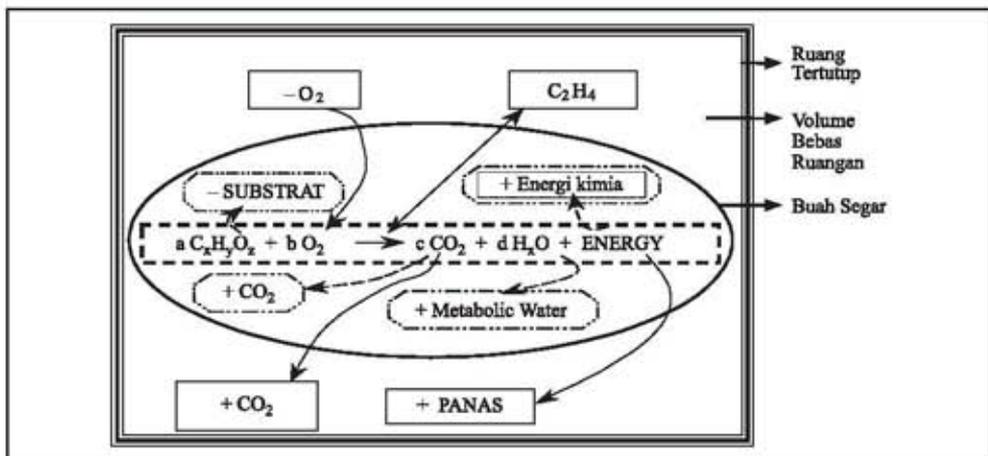
Namun demikian, kontinuitas pasokan untuk memenuhi kebutuhan konsumen dapat terganggu disebabkan oleh sifat mudah rusak (*perishable*) buah-buahan yang membatasi umur simpannya. Sedangkan sifat musiman beberapa buah-buahan menyebabkan ketersediaannya hanya terkonsentrasi pada saat musim panen saja. Padahal kontinuitas pasokan dan tingkat kematangan (mutu) buah yang baik, seragam dan terjadwal merupakan salah satu dari tuntutan konsumen modern saat ini. Oleh karena itu, pengendalian mutu dalam penanganan pasca panen produk hortikultra menjadi keharusan dalam rangka pemenuhan tuntutan pasar tersebut. Dari sisi agronomis (budidaya) telah banyak dilakukan penelitian untuk memperpanjang masa panen dengan berbagai perlakuan serta penemuan genetik dan varietas baru. Hal ini akan sangat efektif bila dari sisi pasca panen juga dilakukan usaha-usaha untuk memperpanjang umur simpan produk setelah dipanen, sehingga diharapkan akan dapat menjamin ketersediaan produk sepanjang tahun, tanpa terkendali musim.

Paper ini akan mereview beberapa hasil penelitian yang berkaitan dengan

masalah *respirasi* pada buah-buahan setelah dipanen sebagai salah satu parameter yang bisa dikontrol dalam rangka mempertahankan mutu produk hortikultra (khususnya buah-buahan) segar, memperpanjang masa simpan (*shelflife*) serta aplikasinya dalam pengontrolan jadwal penyimpanannya. Pembahasan lebih difokuskan dari sisi pengontrolan respirasi sebagai aktivitas fisiologik yang dapat diterapkan sebagai parameter teknik (*engineering parameter*) untuk mempertahankan mutu produk setelah panen.

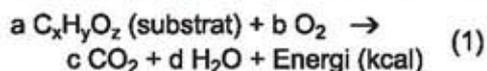
RESPIRASI DAN MUTU PRODUK

Setelah dipanen, buah-buahan sebagai bahan hidup masih tetap melakukan kegiatan metabolismenya walaupun telah dipisahkan dari tumbuhan induknya. *Respirasi* (pernapasan) merupakan salah satu kegiatan yang sangat penting diantara proses metabolisme lainnya. Walaupun merupakan suatu proses fisiologik yang sangat rumit, namun secara sederhana respirasi dapat dijelaskan sebagai suatu proses oksidasi dari *substrat* dengan menggunakan oksigen (O_2) dari udara, serta melepaskan karbondioksida (CO_2),



Gambar 1. Model fisik proses respirasi pada ruang tertutup (Kays, 1991).

air (H₂O) dan sejumlah energi, seperti dijelaskan pada Pers. 1, dan prosesnya diilustrasikan pada Gambar 1.



Selama proses respirasi akan terjadi beberapa perubahan fisik, kimia dan biologik misalnya pematangan, pembentukan aroma dan kemanisan, berkurang atau terbentuknya warna tertentu, berkurangnya keasaman, melunaknya buah-buahan akibat degradasi pektin pada kulit buah, berkurangnya bobot karena kehilangan air, dan sebagainya. Bila respirasi ini berlanjut terus, maka buah-buahan akan mengalami kelayuan dan akhirnya mengalami kebusukan yang ditandai dengan hilangnya nilai gizi dan faktor mutu buah-buahan tersebut. Komoditas dengan laju respirasi tinggi akan memiliki umur simpan lebih pendek dibanding yang memiliki laju rendah (Saltveit, 1996), dengan demikian maka usaha mempertahankan mutu dan memperpanjang umur simpan pada dasarnya adalah menekan laju respirasi tersebut serendah mungkin tanpa mengganggu proses metabolismenya (Kays, 1991). Sedangkan menurut Tucker (1993), mutu konsumsi (*eating quality*) produk buah-buahan biasanya juga sejalan dengan laju respirasinya. Untuk produk yang tergolong pada kelompok klimakterik (*climacteric*), maka diketahui bahwa mutu konsumsi maksimum akan terjadi di sekitar puncak klimakterik (*climacteric peak*).

Dengan prinsip dasar itulah maka aktivitas respirasi dapat dijadikan indeks yang amat baik untuk mengetahui perubahan mutu produk setelah panen. Sedangkan pengontrolan kecepatan respirasi dapat dilakukan berdasarkan kaidah-kaidah reaksi kimial biasa, dimana beberapa faktor yang mempengaruhi kecepatan reaksi tersebut adalah faktor internal atau substrat dari

produk (I_p), dan faktor eksternal atau lingkungan (E_p) terutama suhu, kelembaban, komposisi gas di lingkungan penyimpanannya, sehingga respirasi (R_s) merupakan fungsi dari kedua faktor tersebut

$$R_s \equiv f \{ I_p, E_p \} \quad (2)$$

Sedangkan faktor eksternal yang amat dominan adalah suhu (Alvares dan Thorne, 1981), sehingga secara lebih sederhana R_s dapat dihitung sebagai fungsi dari suhu (T)

$$R_s \equiv f \{ T \} \quad (3)$$

Berdasarkan formula-formula dasar tersebut diatas, telah banyak dikembangkan model-model matematika untuk memprediksi laju respirasi dalam suatu proses penanganan pasca panen produk segar hortikultura. Dalam bahasan berikut akan disampaikan beberapa model persamaan respirasi yang digunakan pada pengontrolan penyimpanan dingin, MAP, CAS dan pematangan buatan (*Artificial Ripening*).

APLIKASI DALAM PENANGANAN PASCA PANEN

A. Penyimpanan Dingin dan Pematangan Buatan (*Artificial Ripening*)

Suhu yang sangat berpengaruh terhadap reaksi-reaksi kimia-biologi, khususnya pada bahan hidup seperti produk segar hortikultura, telah dimanfaatkan secara maksimal dalam sistem penyimpanan dingin. Perubahan kecepatan respirasi akibat pengaruh suhu dinyatakan sebagai *quotient suhu* (Q_{10}), yang menunjukkan rasio kecepatan respirasi pada suhu T_1 dan pada $T_1 + 10^\circ C$ (Kays, 1991). Aturan Van't Hoff menyatakan bahwa kecepatan reaksi biologi, salah satunya adalah respirasi, akan meningkat 2-3 kali setiap peningkatan suhu $10^\circ C$. Walaupun

penyimpanan dingin ini sudah biasa digunakan, namun harus dilakukan dengan suhu yang tepat karena adanya kemungkinan kerusakan komoditi akibat suhu rendah (*chilling injury*), terutama bagi produk yang berasal dari daerah tropis.

Pematangan buatan (*artificial ripening*) adalah salah satu metode penanganan pasca panen yang dapat digunakan untuk mengontrol serta menjadwalkan tingkat kematangan serta menjamin keseragaman kualitas buah. Metode ini menggunakan fenomena pengaruh suhu dan pemberian etilen terhadap kenaikan pola respirasi sebagai acuan waktu simpan dan pematangan, terutama untuk kelompok buah-buahan klimakterik, dengan jalan percepatan pematangan dengan bantuan faktor eksternal yang dapat memicu proses respirasi, yakni kenaikan suhu dan injeksi etilen atau asetilen.

Model Pendugaan Karakteristik Respirasi Pada Pematangan Buatan

Dalam penerapannya untuk pengontrolan, maka karakteristik respirasi pada sistem pematangan buatan dapat diprediksi dengan suatu model matematika, menggunakan faktor-faktor eksternal sebagai parameter bebas. Hasil simulasi model digunakan untuk menentukan waktu pematangan atau pencapaian puncak klimakterik (*climacteric peak*) pada pemeraman sehingga *setting* kontrol sudah diketahui untuk tiap jenis komoditi/buah yang akan dimatangkan. Model matematika respirasinya disusun dengan memodifikasi model respirasi pada Kays (1991), yakni sistem penyimpanan dingin dan pematangan buatan dalam ruangan tertutup seperti pada Gambar 1 (Vanani, 2002). Berdasarkan Pers.1, maka akan terjadi 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 . Dengan mengasumsikan tidak akan terjadi difusi udara ke luar ruang, akan menimbulkan akumulasi gas hingga mencapai suatu kondisi respirasi yang 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

Model pertumbuhan logistik dapat digunakan untuk menduga laju pertumbuhan suatu populasi (Chapra *et al.*, 1991), dimana 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. Berbeda halnya dengan model pertumbuhan eksponensial yang mengasumsikan bahwa pertumbuhan akan terus bertambah dengan bertambahnya waktu. Model pertumbuhan logistik tersebut digolongkan ke dalam kelompok model pertumbuhan *sigmoidal* yang membentuk kurva S.

Peristiwa penambahan konsentrasi gas CO_2 akibat respirasi buah segar pada ruangan tertutup dapat dianalogikan dengan asumsi model pertumbuhan logistik di atas, dimana peningkatan akumulasi gas CO_2 akan dihambat oleh konsentrasi gas maksimum yang dapat menimbulkan respirasi anaerob (Kays, 1991 dan Pantastico *et al.*, 1986). Pada model ini, laju pertumbuhan sebanding dengan besarnya populasi y maupun terhadap selisih $L - y$, dimana L adalah populasi maksimum yang dapat dicapai, yaitu :

$$\frac{dy}{dt} = ky (L - y) \quad (4)$$

nilai tergantung dari faktor-faktor pembatas yang menahan laju pertumbuhan hingga suatu keadaan

maksimal L . Dalam hal respirasi ini, maka L dan y adalah konsentrasi gas CO_2 yang ada dalam ruangan simpan. Penyelesaian model persamaan diferensial (4) dapat dilakukan secara analitis maupun numeris, tergantung dari parameter k yang berpengaruh.

Analogi faktor pembatas pada model pertumbuhan logistik (4) dalam proses respirasi produk pertanian dinyatakan oleh Lee et al. (1992), bahwa akumulasi jumlah konsentrasi CO_2 dalam ruangan tertutup menghambat laju respirasi produk, yang dinyatakan dengan lambang K_i (*inhibition constant*). 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), dimana laju respirasi produk segar tergantung pada konsentrasi O_2 dan CO_2 , dan dapat dinyatakan dengan persamaan tipe kinetika enzim, yaitu :

$$R = \frac{V_m * [O_2]}{K_m + (1 + [CO_2/K_i])[O_2]} \quad (5)$$

R adalah laju respirasi (mg/kg/jam), sedangkan V_m (mg/kg/jam), K_m (% O_2), dan K_i (% CO_2) adalah parameter yang khas pada tiap komoditi yang berbeda. Pers. 5 diatas dapat dilinearkan menjadi:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{V_m} + \frac{K_m}{V_m} \frac{1}{[O_2]} + \frac{1}{K_i V_m} [CO_2] \quad (6)$$

sehingga parameter V_m , K_m , dan K_i dapat diduga dengan analisa regresi berganda pada data percobaan. Dari hasil percobaan Efendi (1993), nilai dugaan konsentrasi gas CO_2 maksimum untuk buah pisang adalah sekitar 20–25 % volume udara. Laju produksi gas CO_2 atau O_2 (mg/kg/jam) selama respirasi dapat diukur dengan persamaan berikut (Kays, 1991):

$$R = \frac{\Delta [gas] * 10 * V * M \text{ gas}}{\Delta t * W * 22.4 * (1 + T/273.15)} \quad (7)$$

T adalah suhu (C), sedangkan W , V , M -gas masing-masing adalah berat segar produk (kg), volume bebas ruangan (dm^3), dan berat molekul gas (g).

Gane (1936) dalam Simmonds (1966) menyatakan bahwa laju respirasi (mg CO_2 /kg/jam) buah pisang saat praklimakterik setelah melalui periode penyimpanan dingin dapat dinyatakan secara eksponensial terhadap suhu (C):

$$\log R = 0.843 + 0.0348 T \quad (8)$$

dengan kondisi nilai kuosien suhu (Q_{10}) buah pisang adalah 2.23. Apabila laju respirasi pada suhu 15 C dihitung menggunakan persamaan (8) maka akan diperoleh nilai yang konstan pada setiap penyimpanan dengan suhu yang sama, menunjukkan bahwa hubungan konsentrasi gas terhadap waktu adalah linear. Hal ini didukung oleh Efendi (1993) yang menghasilkan persamaan regresi linear ($R^2 = 0.988$) dalam menghubungkan konsentrasi gas terhadap waktu pengamatan pada penyimpanan buah pisang Lampung.

Hasil Penyusunan Model Matematika

Pada pengujian sistem pematangan buatan tanpa bahan dan dengan buah pisang Raja Sereh (*Musa paradisiaca L.*) diambil pendekatan teori bahwa selama periode penyimpanan dingin terjadi hubungan linear antara perubahan konsentrasi gas terhadap waktu, dengan pertimbangan bahwa pada penyimpanan dingin kecepatan respirasi sangat rendah sehingga diasumsikan mendekati 0. Sedangkan selama periode pematangan buatan terjadi pembentukan kurva berbentuk S (*sigmoidal*) menggunakan persamaan logistik (Vanani, 2002), sehingga secara keseluruhan model matematika yang disusun adalah sebagai berikut,

selama penyimpanan dingin :

$$Y_p = a_1 t + a_2 \quad (9)$$

dan selama periode pematangan :

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

Y_t adalah konsentrasi CO₂ (%) saat t (waktu pengukuran), L adalah dugaan konsentrasi CO₂ maksimum yang dapat dicapai (%), Y_{t-1} adalah konsentrasi CO₂ pada pengukuran terakhir sebelum t , μ adalah konstanta pertumbuhan spesifik, dan a_1 adalah konstanta kemiringan garis (pisang Mas = 0.029 s.d. 0.035), a_2 adalah konsentrasi awal CO₂ (pisang Mas = 0.03 % s.d. 1 %). Nilai μ didekati dengan nilai konstanta penghambatan (K_i : *inhibition constant*) berdasarkan data sekunder. Nilai berbeda-beda pada tiap tahapan suhu pematangan (T) yaitu :

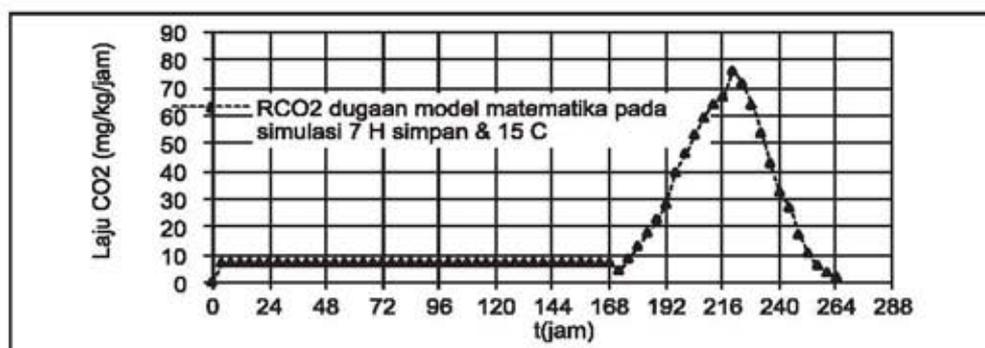
$$\mu_i = \Delta T_i * \left[\frac{(Q_{10} * \mu_{simpan}) - \mu_{simpan}}{10} + \mu_{simpan} \right] \quad (11)$$

dengan μ_i = nilai μ pada tahapan suhu ke- i (non dimensi); ΔT_i = selisih suhu tahap ke- i dengan suhu simpan (non dimensi); Q_{10} = kuosien suhu untuk jenis buah yang diamati (non dimensi); μ_{simpan} = nilai μ pada suhu simpan = nilai K_i (non dimensi). Hasil simulasi pemeraman pisang dengan menggunakan model tersebut disajikan pada Gambar 2. Dengan membuat plot karakteristik penyimpanan dan pemeraman seperti ini, maka pendugaan waktu pasokan, yakni pada saat buah dengan kualitas konsumsi (*eating quality*),

misalnya kemanisan, kekerasan maksimum yang ditunjukkan dengan grafik puncak klimakterik, dapat diprogram dengan baik.

B. Pengemasan Dengan Atmosfir Termodifikasi (MAP)

Prinsip kerja MAP masih menggunakan skema pada Gambar 1, tetapi ruang simpan tertutup dan *impermeable* digantikan dengan bahan kemas yang *permeable* terhadap gas dan uap air. Teknik MAP adalah suatu sistem penyimpanan dengan mengatur komposisi udara dalam ruang mikro penyimpanan (kemasan) sehingga berbeda dengan komposisi udara biasa untuk menekan respirasi serendah mungkin. Pada kemasan MA ini akan terjadi suatu sistem dinamik akibat respirasi dari produk dan penyerapan/pengeluaran gas secara simultan melalui bahan kemasan, dimana pada suatu titik tertentu laju penyerapan O₂ ke dalam kemasan dan migrasi CO₂ keluar kemasan akan sama. Kondisi konsentrasi kesetimbangan dari gas ini harus dipertahankan pada tingkat yang konstan untuk menekan aktivitas respirasi serendah mungkin sehingga produk menjadi lebih awet (Tomkins, 1962 dalam Henig 1975). Mekanisme pindah massa dan panas tersebut dapat dianalisis secara analitik dalam suatu model matematik untuk pendugaan kondisi



Gambar 2. Perbandingan laju produksi CO₂ (%) hasil dugaan model matematika pada simulasi masa simpan 7 hari dan suhu 15 C

komposisi gas sesaat dalam kemasan. Teknik ini dengan cepat dapat memperkirakan komposisi gas dalam kemasan sehingga merupakan suatu metoda yang efisien dalam merancang kemasan dan kondisi penyimpanan untuk bermacam komoditas.

Penyusunan Model Konsentrasi Gas pada MAP

Dua proses utama yang mempengaruhi perubahan jumlah Q (dalam satuan ml) dari suatu gas di dalam kemasan yang berisi buah-buahan segar akibat aktivitas fisiologik (respirasi, transpirasi, pancaran uap air), dengan total laju yang disimbolkan sebagai f (dalam satuan ml/jam); dan perpindahan gas-gas melalui film kemasan dengan laju yang disimbolkan sebagai F (dalam satuan ml/jam), dapat digambarkan dengan formula

$$\frac{dQ}{dt} = f + F \tag{12}$$

dimana pada beberapa percobaan atau penelitian, wadah kemasan selalu dianggap *impermeabel* (Fishman, 1996). Jumlah gas dipengaruhi oleh produk dengan konsentrasi parsial C (dalam satuan %), dan volume bebas V (dalam satuan ml), sehingga:

$$Q = V * C \tag{13}$$

Adapun laju respirasi didefinisikan sebagai R(O₂) atau R(CO₂), yaitu jumlah konsumsi O₂ atau produksi CO₂ per berat produk selama satuan waktu tertentu. Dengan mengalikan R(O₂) atau R(CO₂) terhadap berat buah maka akan menghasilkan kontribusi respirasi pada perubahan jumlah gas dalam volume bebas, sehingga

$$O_2 : f = - R(O_2) * W \tag{14}$$

$$CO_2 : f = R(CO_2) * W \tag{15}$$

dimana W berat produk (kg), R(O₂) laju konsumsi O₂, R(CO₂) laju produksi CO₂. Apabila kemasan adalah suatu lapisan

multi *layer* yang dianggap identik dengan hubungan seri elemen listrik, maka nilai permeabilitas kumulatifnya dapat dihitung dengan persamaan berikut (Brown, 1992)

$$\frac{L_t}{P_t} = \frac{L_1}{P_1} + \frac{L_2}{P_2} + \frac{L_3}{P_3} + \dots + \frac{L_n}{P_n} = \frac{1}{\text{permeance}} \tag{16}$$

L_t tebal total wadah (mil), P_t permeabilitas total terhadap suatu gas (ml.mil/m².jam atm), L_{1,2,...,n} tebal tiap lapisan ke-1,2,...,n (mil), dan P_{1,2,...,n} permeabilitas tiap lapisan ke-1,2,...,n (ml.mil/m².jam.atm), *Permeance* adalah permeabilitas total dibagi tebal total (ml/m² jam.atm). Kondisi gas di dalam kemasan suatu saat akan mencapai kondisi kesetimbangan, dimana laju konsumsi O₂ dan produksi CO₂ akibat respirasi adalah sama dengan laju perpindahan O₂ dan CO₂ melalui kemasan film dan wadah keluar.

Hasil Pemodelan

Model pendugaan konsentrasi O₂ dan CO₂ dalam MAP untuk wadah kemasan yang *permeabel* terhadap gas, memiliki nilai koefisien permeabilitas terhadap gas O₂ dan CO₂, sehingga Pers.13 dapat ditambahkan suatu parameter wadah (F_w) menjadi :

$$\frac{dQ}{dt} = f + F_f + F_w \tag{17}$$

Sedangkan flux (J), adalah total jumlah gas yang melalui kemasan (film dan wadah) dikalikan dengan luasannya (S), dengan persamaan sebagai berikut:

$$F = F_f + F_w = J_f * S_f + J_w * S_w \tag{18}$$

dimana F adalah total perembesan gas (ml/kg), F_f perembesan gas dari film (ml/kg), F_w perembesan gas dari wadah (ml/kg), J_f flux film (ml/m².jam), J_w flux wadah (ml/m².jam), S_f luas area film (m²), dan S_w luas area wadah (m²). Kesetimbangan difusi flux dari gas melalui kemasan mengikuti persamaan berikut:

$$J_f = \frac{-P_f(C - C_g)}{T_f} \text{ dan } J_w = \frac{-P_w(C - C_g)}{T_w} \tag{19}$$

dimana: P_f permeabilitas film (ml.mil/ m^2 .jam.atm), P_w permeabilitas wadah (ml.mil/ m^2 .jam.atm), T_f ketebalan film (mil), T_w ketebalan wadah (mil), C konsentrasi gas di dalam kemasan (%), dan C_a konsentrasi gas di atmosphere (%). Dengan menggabungkan (18) dan (19), maka diperoleh:

$$F = (C - C_a) \left[\frac{S_f P_f}{T_f} + \frac{S_w P_w}{T_w} \right] \quad (20)$$

Selanjutnya untuk memudahkan penulisan, maka yang berkaitan dengan O_2 disimbolkan dengan y dan yang berhubungan dengan CO_2 disimbolkan dengan z , sehingga menjadi:

$$K(y) = \left[\frac{S_f P_f(y)}{T_f} + \frac{S_w P_w(y)}{T_w} \right] \quad (21)$$

$$K(z) = \left[\frac{S_f P_f(z)}{T_f} + \frac{S_w P_w(z)}{T_w} \right] \quad (22)$$

dimana: $K(y)$ permeabilitas efektif terhadap O_2 (ml/jam.atm) dan $K(z)$ permeabilitas efektif terhadap CO_2 (ml/jam.atm).

Dengan menggabungkan (13), (14), (17), dan (20), (21) maka diperoleh perubahan konsentrasi O_2 dalam kemasan yaitu :

$$V \frac{dy}{dt} = -R(y)W + (y_a - y)K(y) \quad (23)$$

Saat terjadi kesetimbangan $dy/dt = 0$, sehingga

$$y = y_s = y_a - \frac{WR(y)}{K(y)} \quad (24)$$

Dengan mengintegrasikan persamaan (23) pada kondisi awal $y(0)=y_a$, $t=0$, hingga pada kondisi setimbang $y_a=y(t)$, $t = t$, maka diperoleh:

$$y(t) = y_a - \frac{WR(y)}{K(y)} \left[1 - \exp \left[-\frac{K(y)}{V} t \right] \right] \quad (25)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = y_a - \frac{WR(y)}{K(y)}$$

$$y_a - y_s = \frac{WR(y)}{K(y)} \quad (26)$$

Dengan memasukkan persamaan (26) ke dalam (25) maka diperoleh konsentrasi sesaat dari O_2 yaitu :

$$y(t) = y_s + (y_a - y_s) \exp \left[-\frac{K(y)}{V} t \right] \quad (27)$$

Sama seperti pada pendugaan O_2 , dengan menggabungkan (13), (15), (17), (20) dan (22), maka konsentrasi CO_2 sesaat dan konsentrasi kesetimbangannya adalah

$$z(t) = z_s - (z_a - z_s) + (z_a - z_s) \exp \left[-\frac{K(z)}{V} t \right] \quad (28)$$

$$z(t) = z_s + (z_a - z_s) \exp \left[-\frac{K(z)}{V} t \right] \quad (29)$$

dimana W berat produk (kg), $R(y)$ laju konsumsi O_2 (ml/kg.jam), $R(z)$ laju produksi CO_2 (ml/kg.jam), y_a konsentrasi O_2 di udara (21%), z_a konsentrasi CO_2 di udara (0.03%), y_s konsentrasi kesetimbangan O_2 (%), z_s konsentrasi kesetimbangan CO_2 (%), $y(t)$ konsentrasi sesaat O_2 dalam kemasan (%), dan $z(t)$ konsentrasi sesaat CO_2 dalam kemasan (%).

Dengan demikian persamaan (27) dan (29) digunakan untuk menduga konsentrasi O_2 dan CO_2 sesaat dalam MAP dengan periode waktu tertentu. Nilai permeabilitas wadah yang digunakan diambil dari pustaka dan pengaruh suhu penyimpanan terhadap permeabilitas diasumsikan tidak ada. Apabila wadah kemasan yang dipakai lebih dari satu lapis, maka nilai permeabilitas wadah dihitung terlebih dahulu secara seri. Bila nilai permeabilitas merupakan selang nilai, maka dipakai nilai yang paling besar. Contoh hasil simulasi disajikan pada Gambar 3 dan 4, masing-masing untuk buah pisang Lampung yang dikemas dengan PE 0.0276 m^2 dan suhu 15°C, dan sayuran tomat yang dikemas dengan SF (*stretch film*). Dari hasil simulasi, model dapat digunakan untuk menduga konsentrasi sesaat dan konsentrasi kesetimbangan O_2 dan CO_2 dalam MAP.

Pencapaian konsentrasi kesetimbangan menggambarkan kesesuaian pemilihan jenis kemasan, dimana ini akan sangat berhubungan dengan umur simpan dan perubahan mutu produk dalam kemasan selama penyimpanan dengan MAP.

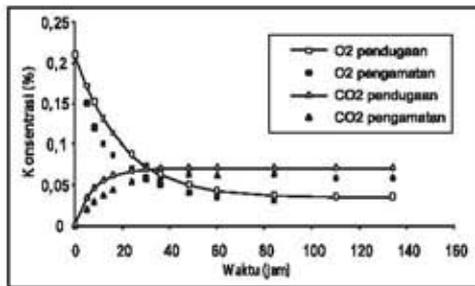
C. Penyimpanan Dengan Atmosfir Terkontrol (CAS)

Pada penyimpanan dengan teknik atmosfir terkendali (CAS), kondisi ruang penyimpanan, khususnya suhu dan komposisi gas, dikontrol secara aktif, akurat dan ketat pada level tertentu dengan tujuan untuk menekan respirasi pada kondisi yang paling minimum. Ruang penyimpanan harus kedap terhadap gas, sedangkan untuk mengatur komposisi pada level yang dikehendaki dilengkapi dengan sistem injeksi penyerapan gas,

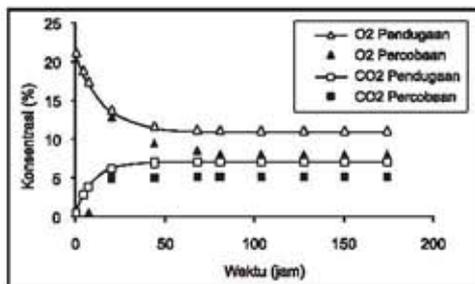
seperti ditunjukkan pada Gambar 5, yang merupakan modifikasi dari Gambar 1. Sesuai dengan persamaan respirasi (Pers. 1), konsentrasi gas O₂ dalam ruangan akan terus menurun, sedangkan gas CO₂ akan menaik secara dinamik, dan ini harus dikontrol pada level yang dikehendaki. Penyimpanan dengan CAS biasanya bekerja pada level CO₂ tinggi dan O₂ rendah dibandingkan dengan udara normal, dan biasanya dikombinasikan dengan suhu rendah agar penurunan laju respirasi lebih efektif.

Penyusunan Model Pengendalian Komposisi Gas Dalam CAS

Dengan tetap menggunakan Pers.1 sebagai landasan utama, analisis pengendalian respirasi diilustrasikan pada Gambar 5. Pengaruh laju respirasi (R) dalam ruang kedap gas yang berisi produk dengan jumlah tertentu, serta adanya pemasukan gas ([A1] dan [B1]) akan mempengaruhi konsentrasi O₂ dan CO₂. Dinamika perubahan komposisi gas dalam ruangan ini dapat diduga secara matematis, dengan modifikasi model persamaan matematik dari Bartsch (1993), yang akan dijelaskan sebagai berikut :



Gambar 3. Pendugaan konsentrasi O₂ dan CO₂ pisang lampung dalam kemasan PE 0.0276 m² T=15 °C.



Gambar 4. Perbandingan antara perhitungan konsentrasi O₂ dan CO₂ pada pengemasan tomat pada suhu 15 °C, luas kemasan SF 0.0358 m², wadah polystyrene dengan volume bebas 404 ml.

(1) Pengendalian O₂

Penurunan konsentrasi O₂ karena digunakan untuk proses respirasi produk dapat dihitung dengan formula berikut :

$$V \frac{d[A]}{dt} + \{(C-1)R\}[A] = -R \quad (30)$$

$$[A] = [A_0] + \frac{1}{(C-1)} \exp\left[-\frac{(C-1)R}{V}t\right] - \frac{1}{(C-1)} \quad (31)$$

Pada saat tercapai kesetimbangan, maka C = 1.0, sehingga

$$V \frac{d[A]}{dt} = -R \quad (32)$$

$$[A] = [A_0] - \frac{R}{V}t \quad (33)$$

Pada kondisi O₂ meningkat karena

adanya injeksi oksigen dari luar, dimana secara bersamaan juga masih terjadi respirasi, dapat didekati dengan formula berikut :

$$V \frac{d[A]}{dt} + \{P + (C-1)R\}[A] = P[A_1] - R \quad (34)$$

$$[A] = \left[[A_0] - \frac{P[A_1] - R}{P + (C-1)R} \right] \exp - \left[\frac{P + (C-1)R}{V} t \right] + \frac{P[A_1] - R}{P + (C-1)R} \quad (35)$$

Dan saat tercapai keseimbangan nilai C = 1.0, sehingga

$$V \frac{d[A]}{dt} + \{P\}[A] = P[A_1] - R \quad (36)$$

$$[A] = \left[[A_0] - \frac{P[A_1] - R}{P} \right] \exp - \left[\frac{P}{V} t \right] + \frac{P[A_1] - R}{P} \quad (37)$$

(2) Pengendalian CO2

Berlawanan dengan oksigen, maka didalam ruang CAS akan terjadi penambahan gas CO₂ sebagai hasil dari aktivitas respirasi, dan untuk menjaga kelebihan akumulasi gas CO₂ dalam ruangan, dilakukan penyerapan dengan sistem atau bahan tertentu, misalnya larutan Ca(OH)₂. Pada saat terjadi peningkatan konsentrasi gas CO₂ sebagai

akibat dari respirasi dapat didekati dengan rumus :

$$V \frac{d[B]}{dt} + \{(C-1)R\}[B] = CR \quad (38)$$

$$[B] = \left[[B_0] - \frac{C}{(C-1)} \right] \exp - \left[\frac{(C-1)R}{V} t \right] + \frac{C}{(C-1)} \quad (39)$$

Pada saat kesetimbangan, dimana C = 1.0, maka

$$V \frac{d[B]}{dt} = CR \quad (40)$$

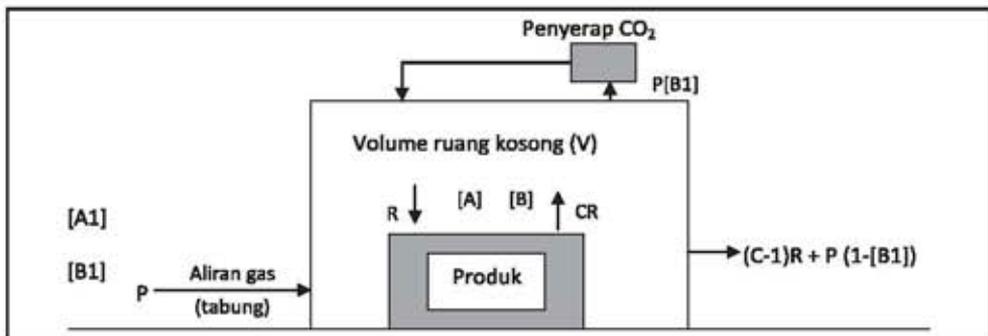
$$[B] = [B_0] - \frac{CR}{V} t \quad (41)$$

Pada saat konsentrasi gas CO₂ menurun karena dilakukan penyerapan, dimana pada saat yang sama juga masih terjadi respirasi, maka

$$V \frac{d[B]}{dt} + \{U + (C-1)R\}[B] = U[B_1] + CR \quad (42)$$

$$[B] = \left[[B_0] - \frac{U[B_1] + CR}{U + (C-1)R} \right] \exp - \left[\frac{U + (C-1)R}{V} t \right] + \frac{U[B_1] + CR}{U + (C-1)R} \quad (43)$$

Untuk C = 1.0 karena terjadi kesetimbangan, maka



- Dimana :
- [A] : konsentrasi O₂ dalam ruangan, desimal
 - [B] : konsentrasi CO₂ dalam ruangan, desimal
 - [A1] : konsentrasi O₂ dari luar, desimal
 - [B1] : konsentrasi CO₂ dari luar, desimal
 - P : laju aliran gas dari luar, m³jam⁻¹
 - C : koefisien respirasi, volume CO₂ yang diproduksi per volume O₂ yang dikonsumsi
 - V : ruang kosong dalam chamber per ton produk, m³T⁻¹
 - R : laju konsumsi O₂ karena respirasi, m³T⁻¹jam⁻¹
 - P : laju pemasukan O₂ dari luar, m³T⁻¹jam⁻¹
 - U : laju penyerapan CO₂ per ton produk, m³T⁻¹jam⁻¹
 - T : waktu penyimpanan, jam
 - o : subskrip yang menunjukkan nilai awal parameter, t = 0

Gambar 5. Kondisi ruang penyimpanan dengan aktivitas respirasi produk dan pemasukan gas O₂ serta penyerapan gas CO₂

$$V \frac{d[B]}{dt} + U[B] = U[B_0] + CR \quad (44)$$

$$[B] = \left[[B_0] - \frac{U[B_0] + CR}{U} \right] \exp\left[-\frac{U}{V}t\right] + \frac{U[B_0] + CR}{U} \quad (45)$$

Hasil Simulasi Pengontrolan

Komposisi Gas dalam Sistem CAS

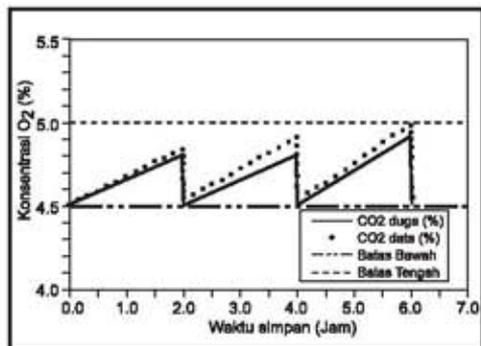
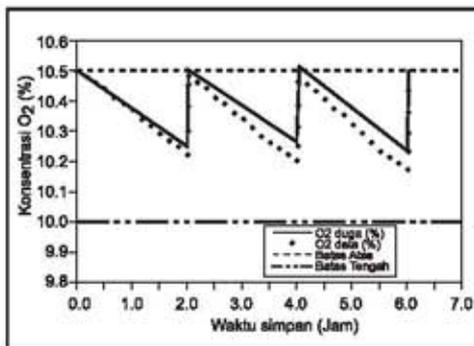
Dengan menggunakan formula persamaan Bartsch (1993) yang dimodifikasi, yakni Pers. 31 dan 39 untuk model persamaan konsentrasi gas dalam ruang CAS dan Pers. 35 dan 43 untuk model pengendalian respirasi, maka Sutrisno *et. al.* (1999) dan Sumardi (1999), telah membangun sistem penyimpanan dengan CAS skala laboratorium untuk penyimpanan buah durian. Beberapa contoh hasil perhitungan simulasi dengan persamaan diatas dan verifikasi data hasil percobaan disajikan pada Gambar 6, yakni untuk pengontrolan gas O₂ dan CO₂ dalam ruang CAS. Dari gambar tersebut terlihat bahwa hasil perhitungan dan percobaan cukup dekat, dimana setelah diuji secara statistik juga memperoleh konfirmasi akurasi yang cukup baik. Dari penelitian ini juga diketahui bahwa durian dapat disimpan dengan kondisi CAS (komposisi gas O₂ 10 ± 0.5 %, gas CO₂ 5 ± 0.5 % dan suhu penyimpanan 10°C) hingga 45 hari dengan kondisi mutu produk yang masih dapat diterima oleh konsumen.

PENUTUP

Dari analisis dan uraian di atas, maka dapat disimpulkan bahwa aktivitas respirasi memegang peranan yang amat vital pada penanganan pasca panen produk segar hortikultura. Dari beberapa hasil penelitian diatas terbukti bahwa pengendalian respirasi melalui pengontrolan suhu dan komposisi gas dalam ruang simpan dapat digunakan untuk mengendalikan perubahan mutu produk setelah pemanenan. Indonesia sebetulnya memiliki potensi besar pada produk hortikultura ini, khususnya buah-buahan tropika, tetapi sampai saat ini data-data dasar tentang respirasi untuk produk unggulan ini masih sangat terbatas. Oleh sebab itu diharapkan ke depan penelitian untuk memperoleh data-data dasar ini perlu ditingkatkan karena dengan data dasar tersebut akan bisa digunakan untuk menyusun program-program penanganan pasca panen lebih lanjut.

UCAPAN TERIMAKASIH

Sebagian besar isi tulisan ini disarikan dari hasil riset yang didanai oleh berbagai sumber, yakni RUT IV dan RUT IX dari Dewan Riset Nasional, Penelitian Dasar dan Hibah Penelitian Due-Like



Gambar 6. Contoh hasil simulasi pengontrolan komposisi gas CO₂ dan O₂ pada penyimpanan buah durian dengan CAS pada suhu 10°C (Sumardi, 1999)

Departemen Teknik Pertanian-Fateta IPB dari Depdiknas, serta **Penelitian INCENTIVE** dari Kantor Menteri Negara Riset dan Teknologi. Untuk itu penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada lembaga tersebut serta kepada seluruh anggota peneliti yang terlibat.

DAFTAR PUSTAKA

- Bartsch, J.A. 1993. Controlled Atmosphere Storage System for Fruit and Vegetables. Dept.of Agric. And Biol. Eng. Cornell Univ. Ithaca, New York. USA
- Brown, W. E. 1992. Plastic in Food Packaging Properties, Design, and Fabrication. Marcel Dekker, Inc. New York. USA.
- Chapra, S.C., dan R. P. Canale. 1991. Metode Numerik untuk Teknik. Penerjemah S. Sardy. Penerbit UI-Press, Jakarta.
- Effendi, R. 1993. Pendugaan Masa Simpan Segar Pisang Lampung dalam Sistem Penyimpanan Atmosfir Termodifikasi [Tesis]. Bogor: Sekolah Pascasarjana. IPB.
- Fishman, S., V.Rodov, and S. Ben-Yenhoshua. 1995. Model for gas exchange dynamics in modified atmosphere packages of fruits and vegetables. J.of Food Science. Vol 60 (5): 1078-1082.
- Henig, Y.S. 1995. Computer analysis of the variables affecting respiration and quality of produce packaged in polymeric films. J. Food Sci. 40:1033-1035
- 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.
- 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.
- Salveit, M.E. 1996. Physical and Physiological Change in Minimally Processed Fruits and Vegetables. In : Phytochemistry of Fruits and Vegetables. F.A. Tomas-Barberan (ed), Oxford Univ. Press.
- 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.
- Sumardi. 1999. Pengembangan Model Penyimpanan Buah Tropika Dalam Atmosfir Terkendali (CA) Kasus Durian. Disertasi. Program Pasca Sarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Sutrisno dan Vanani, K. T. 2000. Pengembangan Sistem Otomatisasi Pematangan Buatan (*Artificial Ripening*) Untuk Buah Tropika. Paper disajikan pada Seminar Perteta di Universitas Andalas. Padang.
- Tucker, G.A. 1993. Introduction. Di dalam : Seymour GB, Taylor JE, Tucker GA, editor. Biochemistry of Fruits Ripening. Chamman dan Hall. London, Glasgow, Newyork, Tokyo, Melbourne, Madras. P.1-51.
- Vanani, K.T. 2002. Rancang Bangun dan Analisis Model Karakteristik Respirasi pada Sistem Pematangan Buatan (*Artificial Ripening*) Buah Tropika. Skripsi. Jurusan Teknik Pertanian. Fakultas Teknologi Pertanian. IPB. Bogor.