

jTEP

JURNAL KETEKNIKAN PERTANIAN

P-ISSN No. 2407-0475 E-ISSN No. 2338-8439

Vol. 4, No. 1, April 2016



Publikasi Resmi
Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia
(Indonesian Society of Agricultural Engineering)
bekerjasama dengan
Departemen Teknik Mesin dan Biosistem - FATETA
Institut Pertanian Bogor



Jurnal Keteknikan Pertanian (JTEP) terakreditasi berdasarkan SK Dirjen Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset dan Teknologi Nomor I/E/KPT/2015 tanggal 21 September 2015. Selain itu, JTEP juga telah terdaftar pada Crossref dan telah memiliki Digital Object Identifier (DOI) dan telah terindeks pada ISJD, IPI, Google Scholar dan DOAJ. Sehubungan dengan hal itu, naskah yang masuk ke redaksi mengalami peningkatan. Untuk itu mulai edisi ini redaksi memandang perlu untuk meningkatkan jumlah naskah dari 10 naskah menjadi 15 naskah, tentunya dengan tidak menurunkan kualitas naskah yang dipublikasikan. Jurnal berkala ilmiah ini berkiprah dalam pengembangan ilmu keteknikan untuk pertanian tropika dan lingkungan hayati. Jurnal ini diterbitkan dua kali setahun baik dalam edisi cetak maupun edisi *online*. Penulis makalah tidak dibatasi pada anggota **PERTETA** tetapi terbuka bagi masyarakat umum. Lingkup makalah, antara lain: teknik sumberdaya lahan dan air, alat dan mesin budidaya pertanian, lingkungan dan bangunan pertanian, energi alternatif dan elektrifikasi, ergonomika dan elektronika pertanian, teknik pengolahan pangan dan hasil pertanian, manajemen dan sistem informasi pertanian. Makalah dikelompokkan dalam *invited paper* yang menyajikan isu aktual nasional dan internasional, *review* perkembangan penelitian, atau penerapan ilmu dan teknologi, *technical paper* hasil penelitian, penerapan, atau diseminasi, serta *research methodology* berkaitan pengembangan modul, metode, prosedur, program aplikasi, dan lain sebagainya. Penulisan naskah harus mengikuti panduan penulisan seperti tercantum pada website dan naskah dikirim secara elektronik (*online submission*) melalui <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>.

Penanggungjawab:

Ketua Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia
Ketua Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB

Dewan Redaksi:

Ketua : Wawan Hermawan (Institut Pertanian Bogor)
Anggota : Asep Sapei (Institut Pertanian Bogor)
Kudang B. Seminar (Institut Pertanian Bogor)
Daniel Saputra (Universitas Sriwijaya, Palembang)
Bambang Purwantana (Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta)
Y. Aris Purwanto (Institut Pertanian Bogor)
M. Faiz Syuaib (Institut Pertanian Bogor)
Salengke (Universitas Hasanuddin, Makasar)
Anom S. Wijaya (Universitas Udayana, Denpasar)

Redaksi Pelaksana:

Ketua : Rokhani Hasbullah
Sekretaris : Lenny Saulia
Bendahara : Hanim Zuhrotul Amanah
Anggota : Usman Ahmad
Dyah Wulandani
Satyanto K. Saptomo
Slamet Widodo
Liyantono
Sekretaris : Jokho Budhiyawan
Diana Nursolehat

Penerbit: Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA) bekerjasama dengan Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.

Alamat: Jurnal Keteknikan Pertanian, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Kampus Institut Pertanian Bogor, Darmaga, Bogor 16680.
Telp. 0251-8624 503, Fax 0251-8623 026,
E-mail: jtep@ipb.ac.id atau jurnaltep@yahoo.com
Website: web.ipb.ac.id/~jtep atau <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>

Rekening: BRI, KCP-IPB, No.0595-01-003461-50-9 a/n: Jurnal Keteknikan Pertanian

Percetakan: PT. Binakerta Makmur Saputra, Jakarta

Ucapan Terima Kasih

Redaksi Jurnal Keteknikan Pertanian mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bestari yang telah menelaah (*me-review*) Naskah pada penerbitan Vol. 4 No. 1 April 2016. Ucapan terima kasih disampaikan kepada: Prof.Dr.Ir. Hasbi, MS (Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya), Prof.Dr.Ir. Daniel Saputra, MS (Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya), Prof.Dr.Ir. Thamrin Latief, M.Si (Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya), Dr.Ir. Hersyamsi, M.Agr (Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya), Ir. Dody Tooy, PhD. (Universitas Sam Ratulangi), Dr.Ir. Lady Corrie Ch Emma Lengkey, M.Si (Universitas Sam Ratulangi), Prof.Dr.Ir. Ade M. Kramadibrata (Universitas Padjadjaran), Dr. Suhardi, STP.,MP (Universitas Hasanuddin), Ir. I Made Anom S. Wijaya, M.App.Sc.,Ph.D (Universitas Udayana), Dr.Ir. Sandra, MP (Universitas Brawijaya), Dr.Ir. Nursigit Bintoro, M.Sc (Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada), Prof.Dr.Ir. Sutrisno, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fateta-IPB), Prof.Dr.Ir. Hadi K. Purwadaria, M.Sc (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fateta-IPB), Dr.Ir. Dyah Wulandani, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fateta IPB), Dr.Ir. I Wayan Budiastra (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fateta IPB), Dr.Ir. Usman Ahmad, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fateta IPB), Dr.Ir. Emmy Darmawati, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fateta IPB), Dr.Ir. M. Yanuar J. Purwanto, MS (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fateta-IPB), Dr. Yudi Chadirin, STP.,M.Agr (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fateta-IPB), Dr.Ir. Arief Sabdo Yuwono, M.Sc (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fateta-IPB). Dr. Rudiyanto, STP.,M.Si (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fateta-IPB), Dr.Ir. Akhiruddin Maddu, M.Si (Departemen Fisika, FMIPA-IPB).

Technical Paper

Model Arrhenius untuk Pendugaan Laju Respirasi Brokoli Terolah Minimal

Arrhenius Model to Predict Respiration Rate of Minimally Processed Broccoli

Nurul Imamah, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.
Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680. Email: nurulauriga@yahoo.com
Rokhani Hasbullah, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.
Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680. Email: rokhani.h@gmail.com
Lilik Pujantoro Eko Nugroho, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor.
Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680. Email: lilikyp@yahoo.com

Abstract

Minimally processed broccoli are perishable product because it still has some metabolism process during the storage period. One of the metabolism process is respiration. Respiration rate is varied depend on the commodity and storage temperature. The purpose of this research are: to review the respiration pattern of minimally processed broccoli during storage period, to study the effect of storage temperature to respiration rate, and to review the correlation between respiration rate and temperature based on Arrhenius model. Broccoli from farming organization "Agro Segar" was processed minimally and then measure the respiration rate. Closed system method is used to measure O₂ and CO₂ concentration. Minimally processed broccoli is stored at a temperature of 0°C, 5°C, 10°C and 15°C. The experimental design used was completely randomized design of the factors to analyze the rate of respiration. The result shows that broccoli is a climacteric vegetable. It is indicated by the increasing of O₂ consumption and CO₂ production during senescence phase. The respiration rate increase as high as the increasing of temperature storage. Models Arrhenius can describe correlation between respiration rate and temperature with R²= 0.953-0.947. The constant value of activation energy (E_a) and pre-exponential factor (R₀) from Arrhenius model can be used to predict the respiration rate of minimally processed broccoli in every storage temperature

Keywords: *minimally processed broccoli, respiration rate, Arrhenius model*

Abstrak

Brokoli terolah minimal merupakan produk yang mudah rusak (*perishable*). Hal tersebut terjadi karena jaringan tumbuhan masih melakukan kegiatan metabolisme selama penyimpanan. Salah satu proses metabolisme yang terjadi adalah respirasi. Besarnya laju respirasi bervariasi tergantung jenis komoditi dan sangat dipengaruhi oleh suhu penyimpanan. Penelitian ini bertujuan mengkaji pola respirasi brokoli terolah minimal selama penyimpanan, mengkaji pengaruh suhu terhadap laju respirasi dan menganalisis hubungan laju respirasi dengan suhu penyimpanan berdasarkan model Arrhenius. Brokoli yang diperoleh dari kelompok tani "Agro Segar" diolah secara minimal untuk kemudian diukur laju respirasinya. Metode sistem tertutup digunakan untuk mengukur konsentrasi O₂ dan CO₂. Brokoli terolah minimal disimpan pada suhu 0°C, 5°C, 10°C, dan 15°C. Rancangan percobaan yang digunakan adalah rancangan acak lengkap dengan 4 taraf perlakuan. Hasil penelitian menunjukkan brokoli merupakan jenis sayuran klimakterik yang ditandai dengan adanya peningkatan konsumsi O₂ dan produksi CO₂ pada fase pelayuan. Laju respirasi meningkat seiring dengan meningkatnya suhu penyimpanan. Hubungan laju respirasi dengan suhu penyimpanan terbukti dapat dijelaskan menggunakan model Arrhenius yang memiliki nilai R² = 0.953-0.947. Nilai konstanta energi aktivasi (E_a) dan faktor preeksponensial (R₀) dari model Arrhenius dapat digunakan untuk memprediksi laju respirasi brokoli terolah minimal pada setiap suhu penyimpanan.

Kata kunci: Brokoli terolah minimal, laju respirasi, model Arrhenius

Diterima: 22 Desember 2015; Disetujui: 25 Maret 2016.

Pendahuluan

Brokoli (*Brassica oleracea* L. var *Italica*) merupakan salah satu sayuran yang mengandung banyak nutrisi. Saat ini permintaan terhadap sayuran

segar yang praktis dan siap dikonsumsi semakin meningkat (Silva *et al.* 2011). Untuk memenuhi kebutuhan sayuran yang siap saji, maka perlu dilakukan pengolahan secara minimal. Melalui *minimally processed* ini diharapkan menjadi upaya

diversifikasi produk sehingga masih dapat dikonsumsi dalam kondisi segar.

Brokoli terolah minimal merupakan produk yang mudah rusak (*perishable*) karena masih melakukan kegiatan metabolisme selama penyimpanan. Salah satu proses metabolisme yang terjadi adalah respirasi. Produk dengan laju respirasi tinggi biasanya memiliki umur simpan lebih pendek dibanding yang memiliki laju respirasi rendah. Laju respirasi besarnya bervariasi tergantung jenis komoditi, akan tetapi sangat dipengaruhi oleh suhu penyimpanan. Penyimpanan pada suhu rendah dapat menekan aktivitas respirasi dan metabolisme, menunda proses peneakan, pematangan, pelunakan, perubahan warna dan tekstur, menekan kehilangan air dan pelayuan, serta mencegah kerusakan akibat aktivitas mikroba (Hasbullah 2009).

Data laju respirasi produk pada suhu tertentu umumnya sulit diperoleh pada literatur. Model matematika merupakan suatu model yang memuat konsep-konsep matematika seperti konstanta, variable, fungsi, persamaan, dan lain-lain. Model matematika dapat digunakan untuk memperoleh gambaran yang lebih jelas mengenai objek tanpa harus mengganggu keberadaan objek. Pengembangan model matematika merupakan suatu siklus fenomena yang berdasarkan konsep model verbal.

Pendugaan laju respirasi dengan menggunakan model matematika telah banyak dikembangkan untuk mencari korelasi laju respirasi dengan suhu penyimpanan yang berbeda. Sing *et al.* (2014) dan Mahajan dan Goswani (2001) mengembangkan model Arrhenius untuk memprediksi laju respirasi fungsi suhu pada komoditi hortikultura. Analisis model Arrhenius digunakan untuk mencari nilai energi aktivasi (E_a) dan faktor pre-eksponensial (R_0) yang nantinya dapat digunakan untuk memprediksi laju respirasi pada suhu tertentu.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pola respirasi brokoli terolah minimal yang disimpan pada suhu 0°C, 5°C, 10°C, dan 15°C, mengkaji pengaruh

suhu terhadap laju respirasi dan menganalisis hubungan laju respirasi dengan suhu penyimpanan berdasarkan model Arrhenius.

Bahan dan Metode

Bahan dan Alat

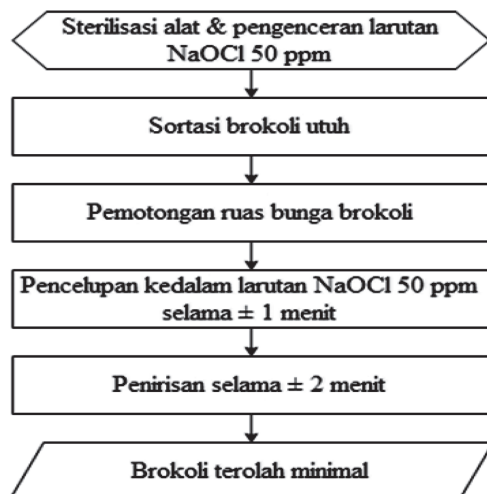
Bahan yang digunakan adalah Brokoli (*Brassica oleracea* L. var. *Italica*) yang diperoleh langsung dari kelompok tani “Agro Segar” di daerah Cipanas – Cianjur. Bahan lain yang digunakan adalah NaOCl (50 ppm) untuk proses sterilisasi bahan, alkohol 96% untuk sterilisasi alat dan air destilata. Alat yang digunakan adalah *Continuous Gas Analyzer* IRA-107 Shimadzu untuk menentukan komposisi gas CO₂, *Portable Oxygen Tester* POT-101 Shimadzu untuk menentukan komposisi gas O₂, stoples kaca (volume 3300 ml) sebagai *respiration chamber*, refrigerator, dan timbangan *mettler* PM-4800 untuk mengukur bobot bahan.

Pengolahan Brokoli Terolah Minimal

Brokoli segar disortasi untuk memisahkan bagian yang rusak saat transportasi. Pematangan ruas brokoli dilakukan secara hati-hati dengan pisau tajam yang telah disterilisasi. Brokoli dicelupkan kedalam larutan NaOCl 50 ppm selama ±1 menit untuk menginaktivasi mikroba (Jia *et al.* 2009). Setelah dicuci dilakukan penirisan selama ±2 menit. Diagram alir pengolahan brokoli terolah minimal disajikan pada Gambar 1 dan hasil pengolahan brokoli terolah minimal disajikan pada Gambar 2.

Pengukuran Laju Respirasi

Pengukuran laju respirasi yang digunakan adalah metode *closed system* (sistem tertutup) mengikuti Hasbullah (2007). Brokoli yang telah mengalami proses pengolahan minimal dilakukan penimbangan sebanyak 250±1 gram. Brokoli selanjutnya dimasukkan kedalam stoples kaca yang berfungsi sebagai *respiration chamber*. Stoples ditutup rapat



Gambar 1. Diagram alir pengolahan brokoli terolah minimal.



Gambar 2 Brokoli terolah minimal.

dengan lapisan lilin pada celah antara tutup dan ulir kaca untuk mencegah kebocoran. Penelitian dirancang dalam rancangan acak lengkap dengan 4 perlakuan suhu penyimpanan (0°C, 5°C, 10°C, dan 15°C) masing-masing 2 ulangan.

Data yang diperoleh pada pengukuran laju respirasi berupa perubahan konsentrasi gas CO₂ dan O₂. Untuk mengukur konsentrasi O₂ dan CO₂ dalam stoples, dibuat dua buah lubang pada bagian tutup stoples yang dihubungkan dengan selang plastik. Gas O₂ dianalisis menggunakan *Portable Oxygen Tester* POT-101 Shimadzu, sedangkan CO₂ dianalisis menggunakan *Continuous Gas Analyzer* IRA-107 Shimadzu. Pengukuran dilakukan pada jam ke-3 dan ke-6 selama 7 hari pengamatan. Laju respirasi dihitung menggunakan Persamaan 1 dan nilai RQ dihitung menggunakan Persamaan 2.

$$R_i = \frac{V}{W} \frac{dx_i}{dt} \quad (1)$$

$$RQ = \frac{\text{laju produksi CO}_2}{\text{laju konsumsi O}_2} \quad (2)$$

R_i = laju respirasi (ml/kg jam)

V = volume bebas stoples (ml)

W = berat bahan (kg)

dx_i = perbedaan konsentrasi gas (desimal)

dt = perbedaan waktu pengukuran (jam)

RQ = *Respiratory Quotient*

*subskrip i = 1 adalah laju konsumsi O₂; i = 2 adalah laju produksi CO₂

Model Arrhenius

Pengaruh suhu terhadap laju respirasi selanjutnya dicari dengan persamaan Arrhenius yaitu dengan cara melihat regresi hubungan antara suhu dan laju respirasi. Hasil dari penyusunan model (prediksi) akan dibandingkan dengan hasil pengukuran respirasi (observasi). Validitas model ditentukan dari besarnya nilai koefisien determinasi (R²). Dalam analisis regresi, koefisien determinasi adalah ukuran dari *goodness-of-fit* dan mempunyai nilai antara 0 dan 1, apabila nilai mendekati 1 menunjukkan ketepatan yang lebih baik.

$$R_i = Ro_i \exp\left(\frac{-E_{ai}}{RT}\right) \quad (3)$$

Dimana:

R_i = laju respirasi (ml/kg.jam)

Ro_i = faktor pre-eksponensial (ml/kg.jam)

Ea_i = energi aktivasi (kJ/mol)

T = suhu mutlak (°C+273)

R = konstanta gas (8.314 J/mol K)

*subskrip i = 1 menyatakan laju konsumsi O₂; i = 2 menyatakan laju produksi CO₂

Laju respirasi adalah peubah tak bebas, sedangkan peubah bebasnya adalah suhu. Semakin tinggi suhu, maka akan semakin tinggi pula laju reaksi, dengan kata lain semakin tinggi suhu (T) maka akan semakin tinggi pula nilai laju respirasi (R_i). Hubungan ini

berdasarkan pada teori aktivasi, bahwa suatu reaksi perubahan akan mulai berlangsung jika diberikan sejumlah energi minimum yang disebut sebagai energi aktivasi (E_a) (Hariyadi 2004) yang dinyatakan dalam persamaan Arrhenius. Persamaan 3 kemudian dilogaritma naturalkan menjadi Persamaan 4, agar dapat dicari hubungannya dengan menggunakan grafik.

$$\ln Ro_i = \ln R_i - \frac{E_{ai}}{R} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (4)$$

Grafik hubungan antara ln R_i vs 1/T dibuat untuk mencari nilai regresi liniernya. Nilai energi aktivasi dihitung dari nilai *intercept* dikalikan dengan nilai konstanta gas (R = 8.314 J/mol K). Nilai ln Ro_i merupakan anti ln dari nilai *slope* yang diperoleh.

Rancangan Percobaan dan Analisis Data

Rancangan percobaan yang digunakan pada tahap 1 adalah Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan 2 kali ulangan. Faktor yang digunakan yaitu suhu penyimpanan dengan 4 taraf perlakuan. Model linear dari rancangan acak lengkap dapat dilihat pada Persamaan 5.

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

$$i = 1,2,3,4 ; j = 1,2$$

Dimana

Y_{ij} : parameter pengamatan pada suhu penyimpanan taraf ke-i ulangan ke-j

μ : rata-rata umum

α_i : pengaruh suhu penyimpanan taraf ke-i

ε_{ij} : pengaruh acak (galat) pada suhu penyimpanan taraf ke-i ulangan ke-j

Data yang diperoleh dianalisis dengan analisis sidik ragam pada tingkat kepercayaan 95%. Jika terdapat pengaruh perlakuan, maka akan dilakukan pengujian lanjut dengan menggunakan *Duncan Multiple Range Test* (DMRT).

Hasil dan Pembahasan

Pengaruh Suhu Terhadap Laju Respirasi Brokoli Terolah Minimal

Pengukuran laju respirasi dilakukan pada lima tingkatan suhu yang berbeda yaitu 0°C, 5°C, 10°C, dan 15°C. Pengukuran dilakukan selama tujuh hari, namun khusus untuk suhu 15°C hanya dapat bertahan enam hari. Hasil pengukuran perubahan laju respirasi dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Berdasarkan Gambar 3 dan 4, laju respirasi brokoli terolah minimal secara signifikan dipengaruhi oleh suhu penyimpanan. Konsumsi O₂ dan produksi CO₂ yang lebih kecil terjadi pada penyimpanan suhu rendah dibandingkan dengan suhu yang lebih tinggi. Adapun hasil analisis sidik ragam menunjukkan

Table 1. Laju respirasi dan nilai *Respiratory Quotient* (RQ) pada berbagai suhu penyimpanan'

Suhu (°C)	Laju respirasi (ml/kg jam)					
	Hari ke-1			Hari ke-3		
	Konsumsi O ₂	Produksi CO ₂	RQ	Konsumsi O ₂	Produksi CO ₂	RQ
0	21.9±2.8a	22.9±0.3a	1.0	11.5±0.7a	17.5±1.7a	1.5
5	46.4±12.0b	44.5±4.8ab	1.0	17.9±2.8a	23.1±1.7a	1.3
10	70.3±7.8c	70.2±0.6bc	1.0	44.9±4.2b	51.2±14.4b	1.1
15	90.7±1.4d	83.3±10.1c	0.9	80.7±4.2c	82.7±24.5b	1.0

Keterangan : Angka pada kolom yang sama yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda nyata pada taraf uji 5% (uji selang berganda Duncan)

bahwa suhu penyimpanan berpengaruh nyata terhadap laju respirasi brokoli terolah minimal (Tabel 1). Pada suhu 0°C kisaran laju respirasi yang diukur pada konsumsi O₂ rata-rata adalah 21.93 ml/kg.jam dan produksi CO₂ adalah 22.93 ml/kg.jam pada hari pertama. Hal sebaliknya terjadi pada suhu yang lebih tinggi (15°C), brokoli yang disimpan memiliki laju respirasi paling tinggi, berkisar antara 90.7 ml/kg.jam untuk O₂ serta 83.3 ml/kg.jam untuk CO₂ pada hari pertama penyimpanan. Hasil ini sejalan dengan penelitian Aminudin (2010) pada brokoli utuh, laju respirasi brokoli yang digambarkan sebagai laju produksi CO₂ (mg/kg jam) pada suhu penyimpanan 5°C, 10°C, 15°C, 20°C, dan 27°C adalah berturut-turut (mg/kg jam) 23.3, 47.7, 67.5, 78.7, dan 105.2.

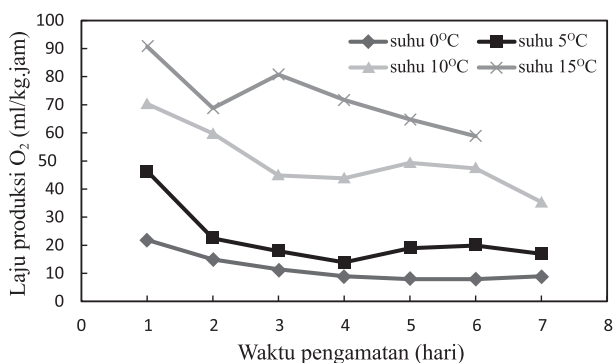
Perubahan konsentrasi gas didalam stoples selama penyimpanan diakibatkan oleh aktivitas brokoli yang dipengaruhi oleh suhu. Rata-rata laju konsumsi O₂ dan produksi CO₂ selama penyimpanan secara umum terlihat menurun. Hal ini diduga karena penurunan suhu akan mengakibatkan aktivitas enzim menurun hingga reaksi kimia berlangsung lebih lambat. Tan *et al.* (2007) menyatakan bahwa pada reaksi biokimia yang banyak melibatkan kerja enzim, kecepatan reaksi dipengaruhi oleh suhu. Jika suhu ditingkatkan (dalam batas tertentu) maka kecepatan reaksi meningkat, sementara jika suhu diturunkan maka reaksi yang berlangsung akan berjalan semakin lambat.

Suhu 15°C menunjukkan peningkatan konsumsi O₂ dan produksi CO₂ ketiga. Hal tersebut menunjukkan bahwa brokoli termasuk pada golongan sayuran klimaterik karena adanya peningkatan respirasi yang

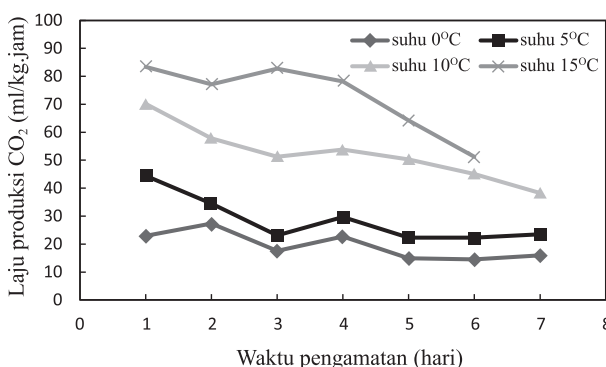
mencolok. Makhlof *et al.* (1989) mengemukakan bahwa brokoli dapat diklasifikasikan sebagai sayuran klimaterik sejak bunga berubah menjadi kuning sebagai hasil dari peningkatan laju respirasi dan produksi etilen. Proses klimaterik ini terjadi saat brokoli mengalami fase pelayuan (*senescence*) yang diikuti fase pembusukan (*deterioration*). Tingginya nilai laju respirasi pada suhu 15°C inilah yang mengakibatkan umur simpannya lebih pendek dibanding pada penyimpanan suhu lain.

Pola respirasi pada penyimpanan suhu 0, 5, dan 10°C menunjukkan laju respirasi yang semakin konstan selama penyimpanan. Kecenderungan konstan ini dapat memberi petunjuk bahwa brokoli yang disimpan pada ketiga suhu tersebut menunjukkan laju respirasi yang seimbang antara konsumsi O₂ dan produksi CO₂. Dengan pola respirasi yang konstan pada nilai laju respirasi yang rendah, suhu 0, 5 dan 10°C dapat dijadikan rekomendasi suhu optimum untuk penyimpanan brokoli terolah minimal untuk memperpanjang masa simpan produk.

Intensitas respirasi dianggap sebagai ukuran laju jalannya metabolisme. Oleh karena itu, laju respirasi dapat dijadikan petunjuk yang baik untuk mengetahui daya simpan produk hortikultura setelah dipanen. Komoditas dengan laju respirasi tinggi akan memiliki umur simpan lebih pendek dibanding yang memiliki laju respirasi rendah (Saltveit 1997). Semakin tinggi laju respirasi maka semakin cepat pula perombakan substrat menjadi energi yang mengarah pada kemunduran dari produk tersebut. Brokoli merupakan jenis sayuran yang memiliki tingkat laju respirasi yang sangat tinggi. Pada penelitian ini digunakan produk



Gambar 3. Laju respirasi (konsumsi O₂) pada berbagai suhu penyimpanan.



Gambar 4. Laju respirasi (produksi CO₂) pada berbagai suhu penyimpanan.

Tabel 2. Nilai $\ln R_1$, $\ln R_2$, dan $1/T$ untuk berbagai suhu penyimpanan.

Suhu penyimpanan (°C)	R_1	R_2	$\ln R_1$	$\ln R_2$	$1/T$
0	21.93	22.93	3.09	3.13	3.66E-03
5	46.35	44.46	3.84	3.79	3.60E-03
10	70.28	70.18	4.25	4.25	3.53E-03
15	90.71	83.33	4.51	4.42	3.47E-03

Tabel 3. Nilai E_{a_i} , Ro_i , dan R^2 untuk O_2 dan CO_2 .

Laju respirasi	E_{a_i} (kJ/mol)	Ro_i (ml/kg jam)	R^2
Konsumsi O_2	61.3	1.35E+13	0.953
Produksi CO_2	56.8	1.89E+12	0.947

brokoli terolah minimal yang tentunya memiliki laju respirasi yang jauh lebih tinggi dari produk utuh.

Tabel 3 menunjukkan laju respirasi pada hari kesatu dan ketiga serta nilai *Respiratory Quotient* (RQ) yang merupakan perbandingan antara konsumsi O_2 dan produksi CO_2 . Nilai RQ dapat digunakan untuk mendeduksi sifat substrat yang digunakan dalam proses respirasi, sejauh mana respirasi telah berlangsung dan sejauh mana proses tersebut bersifat aerobik dan anaerobik. Nilai RQ brokoli terolah minimal yang diamati hampir seluruhnya bernilai satu, hal ini menunjukkan bahwa proses metabolisme berlangsung secara normal menggunakan substrat karbohidrat, protein atau lemak dengan ketersediaan oksigen yang cukup. Kader *et al.* (1987) mengemukakan bahwa batas untuk proses respirasi normal ditunjukkan dengan nilai RQ antara 0.7-1.3. Namun suhu 0°C pada hari ketiga memiliki nilai RQ rata-rata sebesar 1.5 yang memungkinkan telah terjadi kondisi respirasi anaerobik. Kondisi anaerobik ini terjadi ketika konsumsi O_2 sangat rendah dan produksi CO_2 sangat tinggi, karena suhu rendah mampu menekan proses respirasi sehingga ketersediaan O_2 sangat sedikit (Hansen *et al.* 2001). Hal ini akan menyebabkan terjadinya gangguan fisiologis pada brokoli terolah minimal, seperti *off-odours*, *off-flavor*, kelayuan, dan pembusukan.

Model Arrhenius Laju Respirasi Brokoli Terolah Minimal

Suhu merupakan salah satu faktor eksternal yang mempengaruhi respirasi dan memiliki pengaruh sangat nyata. Respirasi merupakan reaksi enzimatik dan setiap reaksi yang melibatkan enzim didalamnya tentu akan sangat berhubungan dengan sifat enzim yaitu akan sangat aktif pada suhu tinggi dan akan menurun keaktifannya pada suhu rendah. Mahajan dan Goswani 2001 menyatakan bahwa pengaruh suhu terhadap laju respirasi dicari dengan persamaan Arrhenius yaitu dengan cara melihat regresi hubungan antara suhu dan laju respirasi. Data laju respirasi yang diperoleh digunakan untuk perhitungan model Arrhenius. Nilai R_i diubah menjadi $\ln R_i$ (Tabel 2) dihubungkan dengan suhu penyimpanan dalam

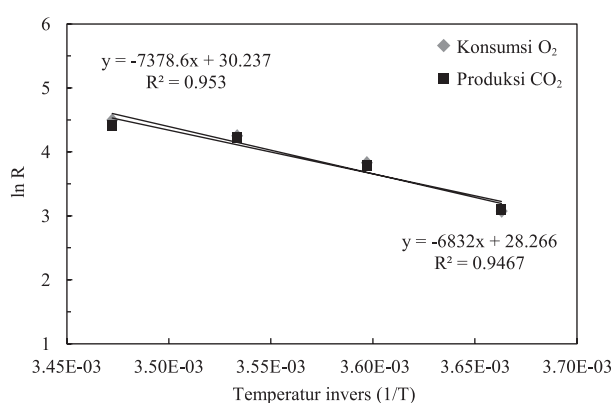
Kelvin (K) yang diplotkan secara berturut-turut sebagai ordinat dan absis yang ditunjukkan pada Gambar 5.

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara $\ln R_i$ dengan kebalikan suhu absolut, dimana hasil regresi linier ini digunakan untuk mencari nilai E_{a_i} dan nilai Ro_i (faktor pre-eksponensial). Garis linier yang diperoleh untuk menunjukkan koefisien laju respirasi konsumsi O_2 dan produksi CO_2 terbukti memiliki tingkat validasi yang tinggi dengan nilai koefisien determinasi (R^2) untuk O_2 sebesar 0.953 dan CO_2 sebesar 0.947.

Slope dari persamaan linier (Gambar 5) merupakan nilai E_{a_i}/R sehingga nilai E_{a_i} dapat ditentukan, sedangkan $\ln Ro_i$ diperoleh pada saat $1/T$ 0. Untuk hasil perhitungan nilai E_{a_i} , Ro_i dan R^2 dapat dilihat pada Tabel 3.

Nilai energi aktivasi (E_{a_i}) yang diperoleh masih dalam batas normal yang direkomendasikan untuk energi aktivasi sayuran. Exama *et al.* 1993 mengemukakan bahwa E_a normal untuk sayuran dan buah berkisar antara 29-93 kJ/mol. Hasil yang sama dijelaskan oleh Torrieri *et al.* (2010) pada tanaman dengan genus yang sama yaitu *Brassica rapa* var. *sylvestris* memiliki nilai E_a sebesar 70 ± 8 kJ/mol dan 69 ± 9 kJ/mol berturut-turut untuk O_2 dan CO_2 .

Dari nilai E_{a_i} dan Ro_i dibuat persamaan Arrhenius yang selanjutnya digunakan untuk memprediksi laju respirasi pada setiap suhu. Grafik laju respirasi (konsumsi O_2 dan produksi CO_2) hasil pendugaan (prediksi) dibandingkan dengan nilai laju respirasi hasil perhitungan (observasi). Hasil tersebut dapat

Gambar 5. Hubungan $\ln R_i$ dengan $1/T$.

juga digunakan untuk melihat akurasi dari model yang telah dibuat.

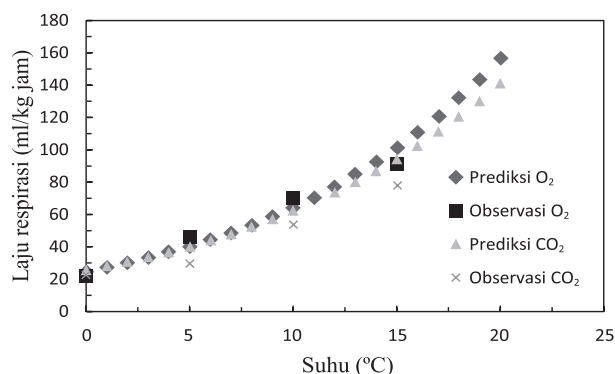
Grafik (Gambar 6) menunjukkan bahwa hasil prediksi laju respirasi menggunakan model Arrhenius memiliki tingkat signifikansi yang tinggi. Hal tersebut dibuktikan dengan terlihatnya titik yang hampir berhimpitan antara nilai observasi dan prediksi. Titik yang berhimpitan ini menandakan bahwa nilai laju respirasi hasil prediksi tidak berbeda jauh dengan nilai yang dihasilkan pada pengukuran langsung (observasi) laju respirasi brokoli terolah minimal.

Simpulan

Hasil penelitian menunjukkan brokoli merupakan jenis sayuran klimaterik yang ditandai dengan adanya peningkatan konsumsi O₂ dan produksi CO₂ pada fase pelayuan. Laju respirasi pada suhu 0°C sebesar 21.93 ml/kg.jam dan 22.93 ml/kg.jam berturut-turut untuk O₂ dan CO₂. Sementara pada suhu yang lebih tinggi (27°C), berkisar antara 190.99 ml/kg.jam untuk O₂ serta 198.17 ml/kg.jam untuk CO₂. Hal tersebut membuktikan bahwa laju respirasi dipengaruhi oleh suhu penyimpanan, dimana suhu rendah secara signifikan dapat menurunkan nilai laju respirasi. Nilai konstanta E_a dan R₀ dari model Arrhenius dapat digunakan untuk memprediksi laju respirasi pada brokoli terolah minimal untuk setiap suhu penyimpanan. Model Arrhenius memberikan nilai validasi dengan R² mendekati 1 (0.953-0.947), sehingga model tersebut dapat direkomendasikan untuk memprediksi laju respirasi brokoli terolah pada berbagai suhu penyimpanan.

Daftar Pustaka

Aminudin. 2010. Kajian pola respirasi dan mutu brokoli selama penyimpanan dengan beberapa tingkatan suhu [tesis]. Bogor (ID). IPB.
Exama, J.P., Arul J., Lencki R.W., Lee L.Z., Toupin C. 1993. Suitability of plastic film for modified atmosphere packaging of fruit and vegetable. *J of Food Science*. 58: 1365-1370.



Gambar 6. Perubahan nilai laju respirasi (O₂ dan CO₂) prediksi dan observasi terhadap berbagai suhu penyimpanan pada hari kesatu.

Hariyadi, P. 2004. Prinsip-prinsip pendugaan masa kedaluwarsa dengan metode accelerated shelf life test. Pelatihan Pendugaan Waktu Kedaluwarsa (Self Life). Bogor, 1–2 Desember 2004. Pusat Studi Pangan dan Gizi Institut Pertanian Bogor. Bogor.
Hasbullah, R. 2007. Teknik pengukuran laju respirasi produk hortikultura pada kondisi atmosfer terkendali bagian 1: metode sistem tertutup. *Jurnal Keteknik Pertanian*. 21(4): 419-427.
Hasbullah, R. 2009. Buah-buahan/sayuran terolah minimal dengan kemasan modified atmosphere packaging [internet]. Bogor (ID): IPB [diunduh 2015 Ags 13]. Tersedia pada http://web.ipb.ac.id/rokhani/artikel_files/page0002.html.
Hansen, M.E., Sørensen H., Cantwell M. 2001. Changes in acetaldehyde, ethanol and amino acid concentrations in broccoli florets during air and controlled atmosphere storage. *J Postharvest Bio and Techno*. 22:227–237. 10.1016/S0925-5214(01)00093-X.
Jia, C., Xu C., Wei J., Yuan J., Yuan G., Wang B., Wang Q. 2009. Effect of modified atmosphere packaging on visual quality and glucosinolates of broccoli florets. 114:28–37. doi: 10.1016/j.foodchem.2008.09.009.
Kader, A.A. 1987. Respiration and gas exchange of vegetables. Ch. 3. In Post Harvest Physiology of vegetable. J. Weichmann, p. 25. Marcel Dekker Inc., New York.
Mahajan, P.V., Goswami T.K. 2001. Enzyme Kinetics Based Modelling of Respiration Rate for Apple. *J. agric. Engng Res*. 79:399–406. doi: 10.1006/jaer.2001.0718.
Makhlouf, J.F., Castaigne J., Arul C., Willemot dan A. Gosselin. 1989. Long-term storage of broccoli under controlled atmosphere. *J Hort Science*. 24: 637-639
Salveit, M.E. 1997. A summary of CA and MA recommendations for harvested vegetable, in: Salveit, M.E. (Ed), CA97 proceedings. Vegetable and ornamentals. Univ. Calif. *J Postharvest Hort*. 4(18): 98-117.
Silva, E.D.O., Bastos, Wurlitzer, Barros, Mangan. 2011. *Minimal processing fruit and vegetables*. 8: 217-228.
Singh, R., Giri S.K., Rao K.V.R. 2014. Respiration rate model for mature green capsicum (*Capsicum annum* L.) under closed aerobic atmospheric conditions. *J. Food Sci. Technol* 6:110–115. DOI: 10.17508/CJFST.2014.6.2.07.
Tan, B.S.C., Perth S., Haynes Y.S., Phillips D.R. 2007. Post-harvest handling of Brassica vegetables. 44/94. ISSN 0726-934X.
Torrieri, E., Perone N., Cavella S., Masi P. 2010. Modelling the respiration rate of minimally processed broccoli (*Brassica rapa* var. sylvestris) for modified atmosphere package design. *J of Food Science and Technology*. 45:2186–2193. doi: 10.1111/j.1365-2621.2010.02387.x.