

## ANALISIS VENTILASI ALAMIAH UNTUK MODIFIKASI RUMAH KACA STANDARD PEAK TIPE CURAM

### *An Analysis of Natural Ventilation for Modification of the Steep-type Standard Peak Greenhouse*

Herry Suhardiyanto<sup>1</sup>, Meiske Widyarti<sup>2</sup>, Fiendy Chrisfian<sup>3</sup>, lin Sundani Muliawati<sup>4</sup>

#### ABSTRACT

*In tropical region, greenhouses are built to protect plant from heavy rain and insects. However, climatic conditions in the tropics are often ignored by greenhouse designers. In such hot and humid environment, natural ventilation is the most important factors to be considered. There is no cost required to operate the natural ventilation, but it needs an accurate openings design. This paper deals with a modification analysis of the steep-type standard peak greenhouse where inside air temperature was very high. A computer program has been developed to calculate neutral pressure plane and natural ventilation rate. It was used in simulation to predict natural ventilation rate in five alternatives of modified and two alternatives of newly designed greenhouse. An alternative of modified greenhouse design was selected according to the highest natural ventilation rate at the lowest cost.*

#### Keywords :

#### PENDAHULUAN

Alasan penggunaan rumah kaca di daerah tropika terutama adalah untuk melindungi tanaman dari hujan lebat, serangga, angin kencang, dan faktor-faktor eksternal lainnya. Penggunaan rumah kaca di daerah tropika tersebut perlu menggunakan rancangan khusus sesuai dengan kondisi iklim yang panas dan lembab. Meniru rancangan rumah kaca yang umum digunakan di daerah subtropika adalah tidak tepat dan seringkali berakibat terlalu tingginya suhu udara di dalamnya. Untuk di daerah tropika seperti Indonesia, bentuk rumah kaca yang paling banyak digunakan yaitu

bentuk *semi-monitor* dan *standard peak*. Selain bentuk, dimensi rumah kaca juga merupakan faktor perancangan yang penting untuk diperhatikan.

Ventilasi merupakan faktor penting untuk mencegah tingginya suhu udara di dalam rumah kaca. Dari alternatif sistem ventilasi yang ada, ventilasi alamiah merupakan sistem ventilasi yang paling murah karena memanfaatkan mekanisme pertukaran udara melalui bukaan ventilasi rumah kaca akibat perbedaan tekanan yang tidak memerlukan biaya untuk membuatnya bekerja. Ventilasi alamiah terjadi karena perbedaan tekanan udara di dalam dan di luar rumah kaca yang timbul akibat faktor angin dan termal, baik

<sup>1,2</sup> Staf Pengajar Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB

<sup>3,4</sup> Alumnus Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB

sendiri-sendiri maupun bersama-sama. Besarnya efek angin dan termal menentukan besarnya laju pertukaran udara yang melalui bukaan ventilasi rumah kaca (Kozai dan Sase, 1978). Parameter rancangan rumah kaca yang mempunyai pengaruh besar terhadap laju ventilasi antara lain adalah luas dan posisi bukaan ventilasi dinding dan atap, panjang, lebar, dan tinggi rumah kaca, panjang bentang, serta jumlah span. Rumah kaca yang dirancang dengan baik untuk daerah tropika mempunyai ciri antara lain terjadi pertukaran udara secara lancar sehingga suhu di dalam rumah kaca tidak terlalu tinggi.

Di Kampus IPB Darmaga terdapat rumah kaca *standard peak* tipe curam yang kurang optimal pemanfaatannya karena suhu udara di dalamnya terlalu tinggi. Hal ini antara lain karena volume udara di antara kedua atap yang curam tersebut ternyata cukup besar dan terperangkap tanpa pertukaran udara yang berarti sehingga menjadi semacam kantong udara panas. Menurut penelitian terdahulu, suhu udara di dalam rumah kaca pada saat radiasi matahari tinggi dapat mencapai nilai 43°C (Widyarti *et al.*, 2004). Dalam penelitian tersebut, laju ventilasi alamiah pada rumah kaca telah dianalisis dan diketahui bahwa efek termal lebih dominan dibandingkan efek angin. Dalam analisis tersebut juga diperoleh informasi bahwa bukaan dinding rumah kaca lebih banyak berfungsi sebagai inlet udara luar yang masuk ke dalam rumah kaca. Namun alternatif metode untuk mencegah terlalu tingginya suhu udara di dalam rumah kaca tersebut belum dikaji. Modifikasi atas rancangan rumah kaca tersebut perlu dilakukan berdasarkan hasil analisis laju ventilasi alamiah. Hal ini diharapkan dapat mencegah terlalu tingginya suhu udara di dalam rumah kaca tersebut.

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengembangkan program komputer untuk perhitungan bidang tekanan

netral dan laju ventilasi alamiah pada rumah kaca;

2. Melakukan analisis dan simulasi bidang tekanan netral dan laju ventilasi alamiah untuk berbagai alternatif rancangan rumah kaca *standard peak* tipe curam;
3. Membandingkan alternatif rancangan rumah kaca *standard peak* tipe curam berdasarkan laju ventilasi alamiah dan biaya yang diperlukan untuk memodifikasi dan membangun rumah kaca baru.

## PENDEKATAN TEORITIS

### 1. Bidang Tekanan Netral

Dalam perhitungan laju ventilasi karena efek termal, perlu diketahui posisi bidang tekanan netral pada rumah kaca. Pada bukaan rumah kaca terdapat suatu bidang dimana tidak terjadi aliran udara karena tekanan statik di dalam dan di luar rumah kaca mempunyai nilai yang sama besarnya (Brockert dan Albright, 1987). Bidang tekanan netral adalah suatu bidang dimana tekanan udara karena faktor termal mempunyai nilai yang sama antara luar dan dalam rumah kaca. Posisi bidang tekanan netral merupakan batas antara bagian bukaan dimana terjadi aliran udara masuk (*inlet*) dan bagian bukaan dimana terjadi aliran udara keluar (*outlet*). Menurut Bruce (1978) ketinggian bidang tekanan netral dapat dihitung dengan persamaan :

$$\sum_{j=1}^n \int_{A_j} \frac{|\bar{h} + h|^3}{h - \bar{h}} \cdot dA = 0 \quad (1)$$

dimana,  $n$  adalah jumlah bukaan ventilasi,  $A_j$  adalah luas bukaan ( $m^2$ ),  $h$  adalah tinggi bukaan dari lantai ke sumbu tengah ( $m$ ),  $\bar{h}$  adalah tinggi bidang tekanan netral dari lantai ( $m$ ). Untuk rumah kaca *standard peak* yang akan dimodifikasi, persamaan (1) dapat ditulis sebagai

berikut :

$$\begin{aligned}
 & kL_1 \left[ \left( \bar{h} + \frac{d_1}{2} \right)^{\frac{3}{2}} - \left| \frac{d_1}{2} - \bar{h} \right|^{\frac{3}{2}} \right] \\
 & + kL_3 \left[ \left( \bar{h} + \frac{d_3}{2} \right)^{\frac{3}{2}} - \left| \frac{d_3}{2} - \bar{h} \right|^{\frac{3}{2}} \right] \\
 & - \frac{3}{2} L_2 d_2 \left( H - \bar{h} \right)^{\frac{1}{2}} = 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

dimana,  $d_1$  adalah tinggi ventilasi 1 yaitu dinding (m),  $d_2$  adalah lebar ventilasi 2 yaitu atap horizontal (m),  $k$  adalah persentase luasan efektif kaca,  $L$  adalah panjang ventilasi (m),  $H$  adalah tinggi ventilasi atap dari sumbu tengah ventilasi dinding (m). Selanjutnya, iterasi dilakukan dengan memasukkan dugaan awal nilai  $h$  sehingga diperoleh nilai  $h$  baru dengan persamaan :

$$\bar{h}_{baru} = \bar{h}_{awal} - \frac{y \bar{h}}{y'(\bar{h})} \tag{3}$$

Iterasi dilakukan terus menerus dan dihentikan bila memenuhi syarat:

$$\frac{\bar{h}_{baru} - \bar{h}_{awal}}{\bar{h}_{baru}} < 0.0001 \tag{4}$$

## 2. Perbedaan Tekanan

Aliran udara melintasi bukaan rumah kaca terjadi karena adanya perbedaan tekanan udara di dalam dan di luar rumah kaca ( $P$ ). Menurut Kozai dan Sase (1978) besarnya perbedaan tekanan udara dinyatakan dalam persamaan:

$$\Delta P = P_s - P_t + P_w \tag{5}$$

dimana,  $P_s$  adalah tekanan statik pada lantai sebagai ketinggian acuan ( $\text{kg/m}^2$ ),  $P_t$  adalah tekanan akibat efek termal ( $\text{kg/m}^2$ ),  $P_w$  adalah tekanan akibat efek angin ( $\text{kg/m}^2$ ). Selanjutnya, Kozai dan

Sase (1978) menyatakan bahwa besarnya tekanan statik ( $P_s$ ) pada lantai sebagai ketinggian acuan adalah:

$$P_s = \frac{\bar{h} \rho_o (T - T_o)}{273,2 + T} \tag{6}$$

dimana,  $\bar{h}$  adalah ketinggian bidang tekanan netral (m),  $\rho_o$  adalah kerapatan udara luar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $T_i$  adalah suhu udara dalam rumah kaca ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_o$  adalah suhu udara di luar rumah kaca ( $^{\circ}\text{C}$ ). Besarnya tekanan udara akibat efek termal ( $P_t$ ) sebagaimana dinyatakan oleh Kozai dan Sase (1978) adalah:

$$P_t = \frac{h_v \rho_o (T - T_o)}{273,2 + T} \tag{7}$$

dimana,  $h_v$  adalah ketinggian ventilasi dari lantai ke sumbu tengah (m),  $\rho_o$  adalah kerapatan udara luar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $T_i$  adalah suhu udara dalam rumah kaca ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_o$  adalah suhu udara di luar rumah kaca ( $^{\circ}\text{C}$ ). Efek termal timbul karena perbedaan suhu udara di dalam dan di luar rumah kaca. Gelombang panjang yang terperangkap di dalam rumah kaca akan meningkatkan suhu udara dan menurunkan kerapatan udara di dalam rumah kaca. Perbedaan kerapatan menyebabkan perbedaan tekanan antara udara di dalam dan di luar rumah kaca sehingga terjadi aliran udara keluar masuk rumah kaca melalui bukaan (Brockett dan Albright, 1987). Menurut Kozai dan Sase (1978) besarnya tekanan udara akibat efek angin ( $P_w$ ) adalah:

$$P_w = \frac{C_p \rho_o v^2}{2g} \tag{8}$$

dimana,  $C_p$  adalah koefisien tekanan angin,  $\rho_o$  adalah kerapatan udara luar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $v$  adalah kecepatan angin (m/s),  $g$  adalah gravitasi bumi ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ).

Koefisien tekanan  $C_p$  menunjukkan sebaran tekanan di setiap bukaan ventilasi untuk arah angin yang tegak lurus dengan luas bukaan. Nilai koefisien tekanan tersebut diperoleh dari Kozai dan Sase (1978) yaitu sama dengan nilai yang digunakan dalam Widyarti *et al.* (2004).

### 3. Laju Ventilasi Alami

Laju ventilasi alamiah diketahui sesudah laju massa aliran udara per satuan waktu yang melewati seluruh bukaan ( $G$ ) diperoleh. Menurut Kozai dan Sase (1978)  $G$  (kg/s) dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$G = -c_d A \sqrt{2g\rho_o |\Delta P|} \quad \text{untuk } \Delta P < 0 \quad (9)$$

$$G = c_d A \sqrt{2g\rho_i |\Delta P|} \quad \text{untuk } \Delta P = 0 \quad (10)$$

dimana,  $c_d$  adalah *coefficient of discharge*,  $A$  adalah luas bukaan ( $m^2$ ),  $g$  adalah gravitasi bumi ( $9.8 \text{ m/s}^2$ ),  $\rho_o$  adalah kerapatan udara luar ( $kg/m^3$ ),  $\rho_i$  adalah kerapatan udara di dalam rumah kaca ( $kg/m^3$ ),  $\Delta P$  adalah perbedaan tekanan ( $kg/m^3$ ). *Coefficient of discharge* ( $c_d$ ) menyatakan perbandingan antara luasan efektif yang merupakan bidang normal tegak lurus aliran dengan luasan bukaan. Nilai  $c_d$  yang digunakan dalam perhitungan adalah 0.44 untuk ventilasi dinding dan 0.29 untuk ventilasi atap (Kozai dan Sase, 1978). Laju ventilasi alamiah dinyatakan sebagai laju pertukaran udara ( $Q$ ) dan dihitung dengan persamaan :

$$Q = \frac{3600S}{\rho_o V} \quad (11)$$

dimana,  $Q$  adalah laju pertukaran udara (kali/jam),  $S$  adalah total laju aliran udara yang masuk rumah kaca ( $kg/s$ ),  $\rho_o$  adalah kerapatan udara di luar rumah kaca ( $kg/m^3$ ),  $V$  adalah volume rumah kaca ( $m^3$ ).

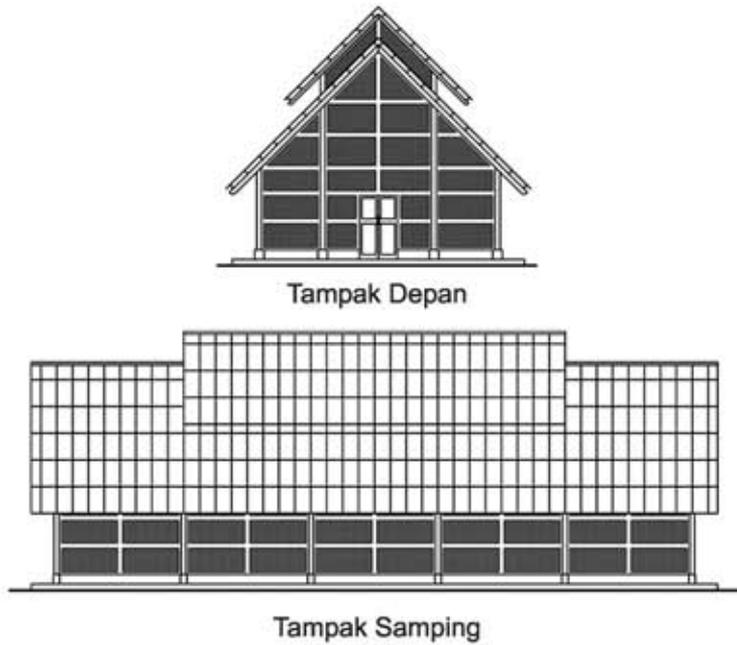
## BAHAN DAN METODE

### 1. Rumah Kaca

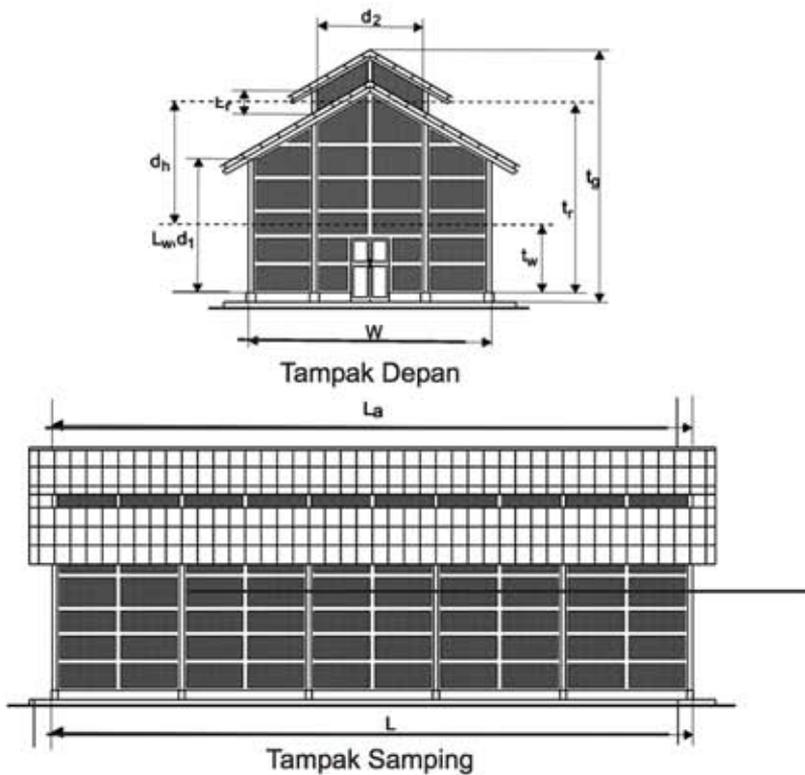
Rumah kaca yang digunakan dalam penelitian ini adalah rumah kaca *standard peak* tipe curam. Tampak depan dan tampak samping rumah kaca tersebut disajikan pada Gambar 1. Rumah kaca tersebut memiliki panjang 20,00 m, lebar 7,50 m, dan tinggi bubungan 7,35 m. Tinggi ventilasi dinding, ventilasi atap, dan panjang ventilasi atap masing-masing sebesar 2,40 m, 0,47 m, dan 12,00 m. Sudut kemiringan atap rumah kaca adalah  $45^\circ$ . Rumah kaca tersebut menggunakan baja WF (*Wide Flange*) 150 sebagai tiang utama. Ventilasi dinding dan ventilasi atapnya berupa *screen* atau kaca kaku dengan ukuran lubang  $1 \text{ mm}^2$ , sedangkan atapnya menggunakan bahan kaca dengan ketebalan 8 mm.

### 2. Alternatif Modifikasi Rumah Kaca

Rancangan modifikasi rumah kaca dilakukan berdasarkan kondisi rumah kaca *existing* dengan membuat beberapa alternatif perubahan dimensi rumah kaca tersebut. Alternatif-alternatif tersebut diambil dengan beberapa prinsip, yaitu: 1) secara teknis mungkin diimplementasikan, 2) tinggi rumah kaca dan sudut kemiringan atap sama untuk seluruh alternatif, 3) alternatif rancangan rumah kaca baru dibuat sama dengan rancangan modifikasi yang menghasilkan laju ventilasi terbesar. Berdasarkan prinsip-prinsip tersebut modifikasi rancangan rumah kaca dilakukan dengan menambah ketinggian ventilasi dinding, menambah panjang ventilasi atap, dan mengubah sudut kemiringan atap. Berdasarkan pertimbangan aspek arsitektural dan fungsional, kemiringan atap pada rancangan modifikasi rumah kaca maupun rancangan baru ditetapkan  $30^\circ$ . Ketinggian bubungan untuk semua rancangan rumah kaca modifikasi maupun baru adalah yang sama dengan rumah kaca *existing*. Skema dimensi



Gambar 1. Rumah kaca *standard peak* tipe *curam existing* yang digunakan sebagai bahan analisis modifikasi.



Gambar 2. Skema dimensi pada rumah kaca modifikasi

rumah kaca modifikasi disajikan pada Gambar 2, sedangkan skema berbagai alternatif rancangan modifikasi rumah kaca maupun rancangan baru disajikan pada Gambar 3. Ukuran rumah kaca *existing* dan beberapa modifikasinya disajikan pada Tabel 1.

### 3. Analisis dan Pengukuran

Analisis ditujukan untuk memperoleh rancangan rumah kaca berdasarkan nilai laju ventilasi alamiah dan biaya yang diperlukan untuk memodifikasi atau membangun rumah kaca baru. Analisis yang dilakukan adalah meliputi perhitungan ketinggian bidang tekanan netral, perhitungan laju ventilasi alamiah, dan perhitungan biaya yang diperlukan untuk memodifikasi atau membangun rumah kaca baru. Ketinggian bidang tekanan netral dihitung berdasarkan persamaan (1) sampai dengan (4). Dengan diperolehnya angka ketinggian bidang tekanan netral tersebut maka bagian bukaan ventilasi rumah kaca yang berfungsi sebagai inlet maupun outlet dapat diketahui. Selanjutnya, laju ventilasi alamiah dihitung berdasarkan persamaan (5) sampai dengan (11). Laju ventilasi alamiah merupakan laju volume udara per satuan waktu, tetapi lazim dinyatakan dalam berapa kali volume udara rumah kaca berganti setiap jam. Analisis biaya meliputi komponen biaya bahan dan upah yang harus dikeluarkan untuk memodifikasi atau membangun rumah kaca baru. Agar dapat dilakukan perbandingan dengan baik, didalam angka biaya pembangunan rumah kaca baru sudah termasuk asumsi perolehan dana bila bahan konstruksi rumah kaca *existing* tersebut dijual.

Untuk setiap alternatif modifikasi rumah kaca dilakukan simulasi laju ventilasi alamiah dan perhitungan biaya yang diperlukan untuk memodifikasi atau membangun rumah kaca baru. Hasil simulasi dijadikan acuan dalam memilih alternatif rancangan yang paling tepat.

Rancangan rumah kaca yang tepat dipilih berdasarkan hasil simulasi laju ventilasi alamiah paling tinggi dan hasil analisis biaya modifikasi atau pembangunan yang paling rendah. Dari simulasi yang dilakukan, ternyata rancangan modifikasi tipe B memberikan hasil laju ventilasi alamiah terbesar, sehingga rancangan rumah kaca baru disamakan dengan rancangan modifikasi tipe B. Ada dua alternatif rancangan rumah kaca baru yaitu: (1) rumah kaca baru tipe I dengan ukuran baja *Wide Flange* (WF) yang sama dengan ukuran baja rumah kaca *existing* (tipe A), (2) rancangan rumah kaca baru tipe II dengan dengan ukuran baja WF lebih kecil dari pada ukuran baja rumah kaca *existing*.

Pengukuran yang dilakukan adalah meliputi dimensi rumah kaca dan parameter-parameter lingkungan yang menentukan laju ventilasi alamiah, yaitu kecepatan angin, suhu udara, kelembaban udara. Kecepatan angin, suhu udara, dan kelembaban udara diukur dengan menggunakan *weather station* (RM Young, 26700).

### 4. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di rumah kaca *standard peak* tipe curam yang terletak di Kebun Percobaan Cikabayan, Kampus IPB, Darmaga, Bogor, Jawa Barat pada bulan Maret sampai April 2003. Analisis biaya menggunakan data harga pada bulan April 2005.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Bidang Tekanan Netral dan Laju Ventilasi Alamiah

Perhitungan bidang tekanan netral ( $\bar{h}$ ) dilakukan menggunakan program komputer yang dikembangkan dengan bahasa *Visual Basic 6.0*. Hasil perhitungan menyatakan bahwa bidang tekanan netral rumah kaca *existing* berada pada ketinggian 3,038 m dari

Tabel 1. Dimensi rancangan modifikasi rumah kaca

Dimensi rumah kaca	Simbol/satuan	Existing	Tipe B	Tipe C	Tipe D	Tipe E	Tipe F
Tinggi ventilasi dinding (lantai-sumbu tengah)	$t_w$ (mm)	1400	2190	2025	1925	1825	1675
Tinggi ventilasi atap (lantai-sumbu tengah)	$t_r$ (mm)	4830	5560	5400	5300	5200	5050
Tinggi ventilasi atap (sumbu tengah-vent.dinding)	$d_h$ (mm)	3670	3607	3775	3875	3975	4125
Tinggi ventilasi dinding, lebar ventilasi 1 (dinding)	$L_w, d_1$ (mm)	2400	3980	3650	3450	3250	2950
Tinggi ventilasi atap	$L_r$ (mm)	470	470	800	1000	1200	1500
Volume rumah kaca	$V$ (m <sup>3</sup> )	690,99	821,75	795,35	779,35	763,35	739,35
Tinggi bidang tekanan netral	$h$ (mm)	3038	3947	3930	3961	4012	4120
Panjang dinding rumah kaca	$L$ (m)	20	20	20	20	20	20
Lebar ventilasi 2 (atap)	$d_2$ (m)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Tinggi dinding batako	$t$ (cm)	20	20	20	20	20	20
Panjang atap rumah kaca	$L_a$ (m)	12	20	20	20	20	20
Lebar rumah kaca	$W$ (m)	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Tinggi rumah kaca	$t_g$ (m)	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35
Sudut kemiringan atap	$\alpha$	45°	30°	30°	30°	30°	30°

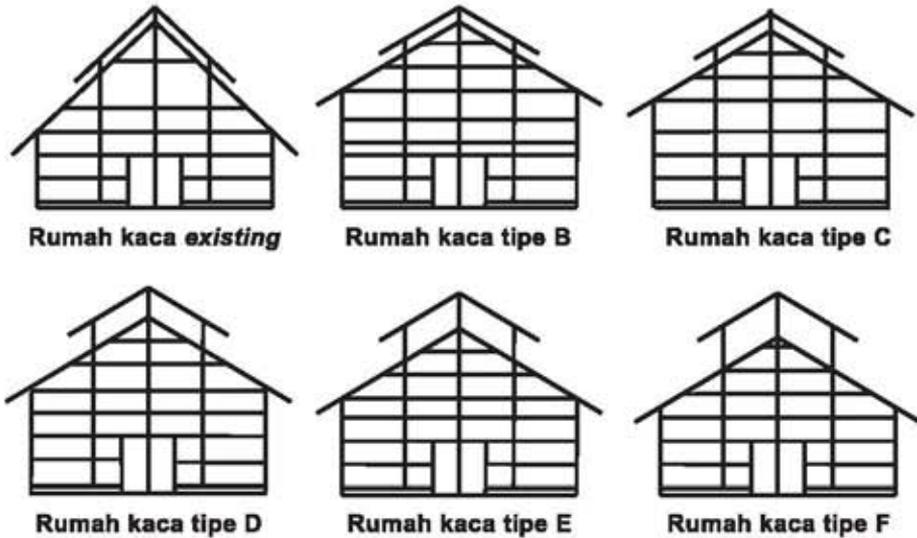
lantai, sedangkan bidang tekanan netral pada rancangan rumah kaca tipe B, C, D, E, dan F berturut-turut adalah pada ketinggian 3,947 m, 3,930 m, 3,961 m, 4,012 m, 4,120 m dari lantai. Posisi bidang tekanan netral dan arah aliran udara pada rumah kaca *existing* dan tipe B dapat dilihat pada Gambar 4.

Sesuai pengertian bidang tekanan netral, posisi di bawah bidang tersebut berfungsi sebagai *inlet* karena pada posisi tersebut tekanan udara di luar rumah kaca lebih besar dibandingkan dengan tekanan udara di dalam rumah kaca, sedangkan posisi di atas bidang tersebut berfungsi sebagai *outlet* karena pada

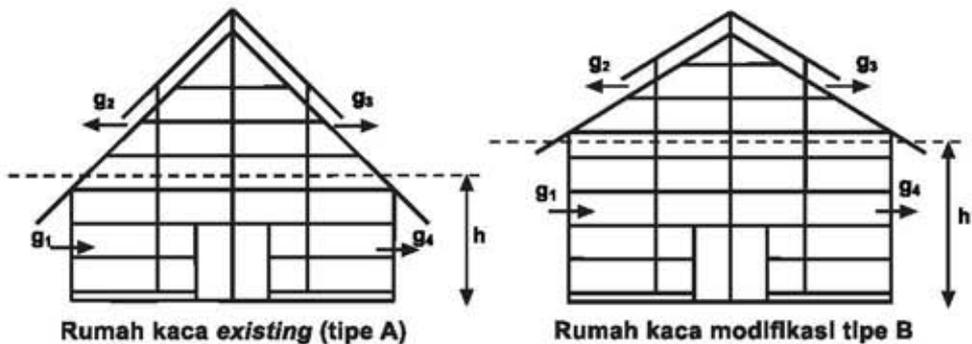
posisi tersebut tekanan udara di luar rumah kaca lebih kecil dibandingkan tekanan udara di dalam rumah kaca (Brockert dan Albright, 1987). Hal ini sejalan dengan hasil perhitungan laju ventilasi alamiah sebagaimana skema dan arah alirannya yang disajikan dalam Gambar 5. Nilai laju aliran udara yang positif (+) yaitu pada ventilasi dinding

arah angin datang ( $g_1$ ) menunjukkan arah aliran masuk ke rumah kaca dan nilai negatif (-) untuk ventilasi pada dinding yang berseberangan dengan arah angin datang ( $g_4$ ) dan atap ( $g_2$  dan  $g_3$ ) menunjukkan arah aliran keluar dari rumah kaca.

Laju ventilasi alamiah menggambarkan pertukaran udara



Gambar 3. Tampak depan dari berbagai alternatif modifikasi rancangan rumah kaca yang menjadi bahan analisis.

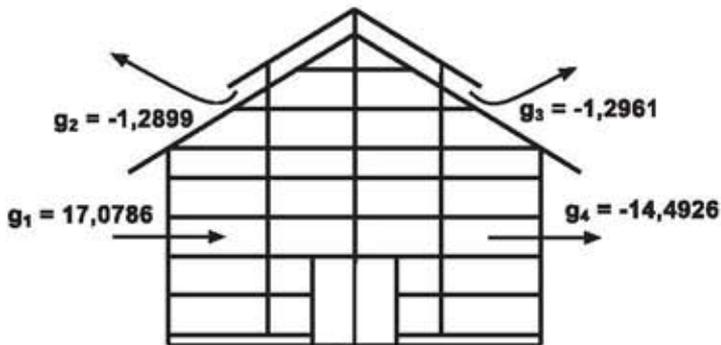


- Keterangan**
- $g_1$  : Ventilasi pada dinding
  - $g_2$  : Ventilasi pada atap
  - $g_3$  : Ventilasi pada atap
  - $g_4$  : Ventilasi pada dinding
  - $h$  : Tinggi bidang tekanan netral

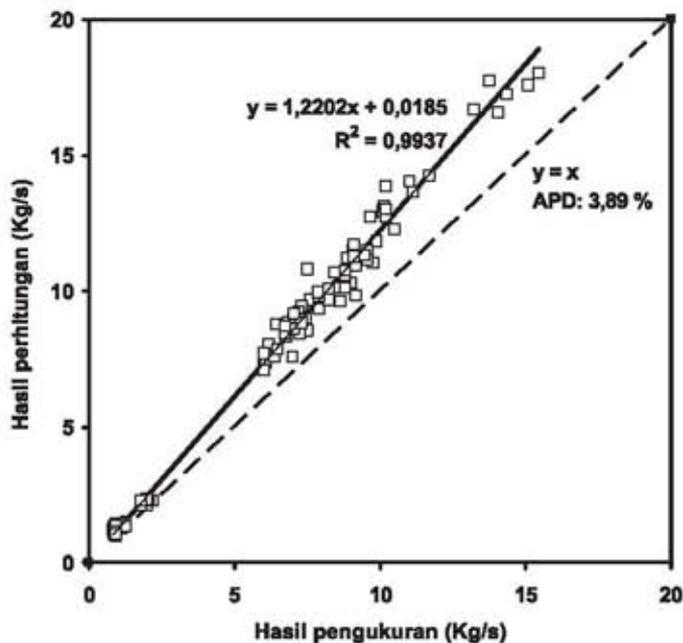
Gambar 4. Posisi bidang tekanan netral pada rumah kaca *existing* (tipe A) dan rumah kaca modifikasi tipe B.

melalui bukaan pada rumah kaca per satuan waktu. Bila pertukaran udara tidak berjalan lancar maka perbedaan suhu udara di dalam dengan di luar rumah kaca dapat menjadi sangat tinggi. Laju ventilasi alamiah dihitung menggunakan program komputer dengan bahasa *Visual Basic 6.0* berdasarkan persamaan (5) sampai dengan (11). Hasil perhitungan laju ventilasi alamiah dan

perbandingannya dengan hasil pengukuran disajikan pada Gambar 6. Dalam gambar tersebut terlihat bahwa garis regresi bagi kedua variabel tersebut ( $y = 1,2202x + 0,0185$ ) dengan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,9937 mendekati garis  $y = x$ . Gambar tersebut mengungkapkan bahwa hasil perhitungan mendekati hasil pengukuran dengan *Average Percentage of Deviation (APD)*



Gambar 5. Arah dan laju aliran udara (kg/s) karena ventilasi alamiah pada rumah kaca tipe B untuk kondisi tanggal 25 Maret 2003, pukul 09:00, kecepatan angin 2,1 m/s.



Gambar 6. Perbandingan hasil perhitungan menggunakan program komputer dengan hasil pengukuran laju ventilasi alamiah melalui dinding.

Tabel 2. Contoh hasil simulasi laju ventilasi alamiah (Sabtu, 5 April 2003)

Pukul	Rancangan rumah kaca	v (m/s)	$g_1$ (kg/s)	$g_2$ (kg/s)	$g_3$ (kg/s)	$g_4$ (kg/s)	Q (kall/jam)
9:00	Existing	1,6	11,1858	-1,5223	-1,5382	-8,1144	50,97
	Tipe B		19,2053	-1,4539	-1,4612	-16,2902	73,61
	Tipe C		18,3329	-2,3627	-2,3757	-13,5946	72,60
	Tipe D		17,9093	-2,8190	-2,8359	-12,2543	72,38
	Tipe E		17,4805	-3,1869	-3,2085	-11,0852	72,13
	Tipe F		16,7700	-3,5259	-3,5565	-9,6876	71,44
10:30	Existing	1,9	10,0053	-1,3663	-1,3705	-7,2745	46,25
	Tipe B		17,1745	-1,2908	-1,3015	-14,5822	66,76
	Tipe C		16,3904	-2,0978	-2,1169	-12,1757	65,83
	Tipe D		16,0087	-2,5032	-2,5281	-10,9774	65,61
	Tipe E		15,6226	-2,8301	-2,8619	-9,9306	65,37
	Tipe F		14,9837	-3,1320	-3,1769	-8,6748	64,74
12:00	Existing	1,3	11,0558	-1,5198	-1,5212	-8,0148	50,99
	Tipe B		18,9871	-1,4419	-1,4435	-16,1018	73,64
	Tipe C		18,1299	-2,3431	-2,3458	-13,4411	72,65
	Tipe D		17,7149	-2,7953	-2,7989	-12,1206	72,45
	Tipe E		17,2947	-3,1597	-3,1643	-10,9707	72,21
	Tipe F		16,5969	-3,4949	-3,5013	-9,6008	71,55
13:30	Existing	3,2	10,6473	-1,4578	-1,4669	-7,7226	49,13
	Tipe B		18,2782	-1,3833	-1,3929	-15,5020	70,93
	Tipe C		17,4455	-2,2481	-2,2652	-12,9322	69,94
	Tipe D		17,0405	-2,6824	-2,7049	-11,6533	69,72
	Tipe E		16,6307	-3,0326	-3,0612	-10,5369	69,47
	Tipe F		15,9523	-3,3558	-3,3961	-9,2003	68,80
15:00	Existing	2,2	11,3229	-1,5593	-1,5634	-8,2003	52,44
	Tipe B		19,4435	-1,4795	-1,4837	-16,4803	75,72
	Tipe C		18,5632	-2,4042	-2,4118	-13,7473	74,69
	Tipe D		18,1364	-2,8684	-2,8783	-12,3897	74,47
	Tipe E		17,7044	-3,2425	-3,2551	-11,2068	74,22
	Tipe F		16,9877	-3,6023	-3,6199	-9,7655	73,52

sebesar 3,98%. Program komputer tersebut dapat digunakan dalam simulasi laju ventilasi alamiah untuk keperluan perancangan rumah kaca.

## 2. Simulasi

Simulasi dilakukan untuk memprediksi laju ventilasi alamiah pada rancangan

rumah kaca modifikasi maupun baru menggunakan data kondisi lingkungan sebagai parameter input. Hasil simulasi tipikal disajikan dalam Tabel 2. Dalam Tabel 2 dapat dilihat bahwa ketika kecepatan angin kurang dari 2 m/s maka laju ventilasi alamiah cenderung lebih dipengaruhi oleh perbedaan suhu udara

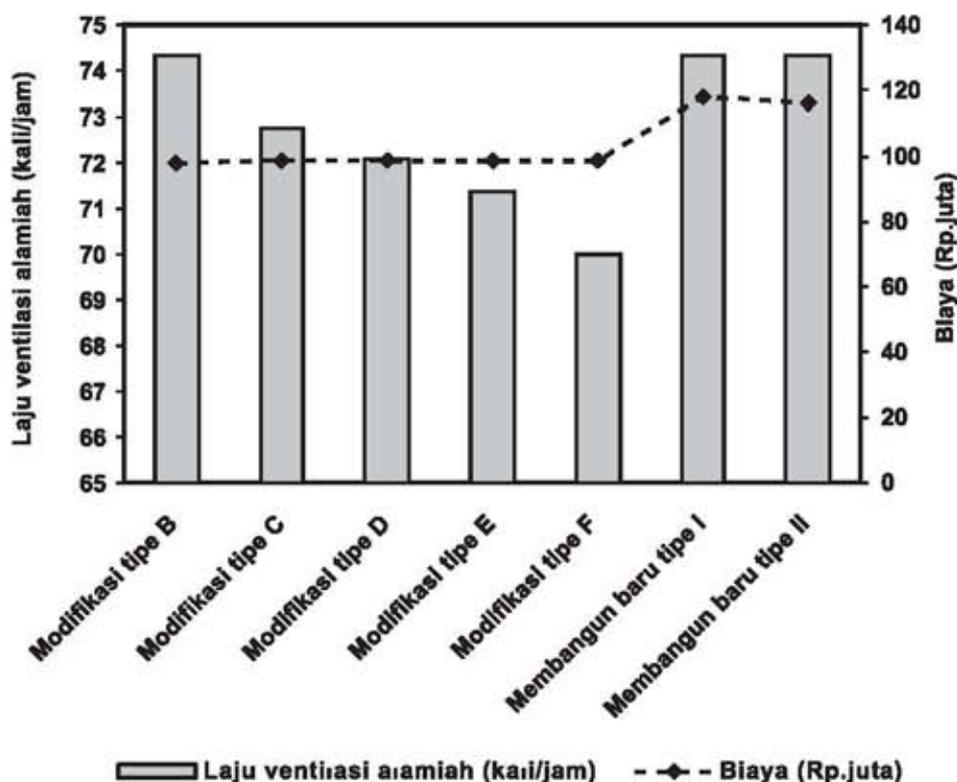
di dalam dan di luar bangunan. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Kozal dan Sase (1978). Selanjutnya, Lee *et al.* (2000) menyatakan bahwa semakin besar kecepatan angin maka laju ventilasi alamiah akan semakin besar pula. Jumlah pergantian udara tersebut tergantung pada sisi-sisi ventilasi, letak ventilasi, besar bukaan ventilasi, dan jumlah span. Ventilasi alamiah dicapai dengan adanya pertukaran udara melalui bukaan rumah kaca yang terjadi karena variasi tekanan di dalam dan di luar rumah kaca.

### 3. Rancangan Modifikasi Rumah Kaca Terpilih

Laju ventilasi alamiah pada rumah kaca rancangan modifikasi maupun baru dan biaya yang diperlukan disajikan pada Gambar 7. Rancangan rumah kaca modifikasi tipe B memiliki nilai laju ventilasi

alamiah yang paling besar dibandingkan dengan alternatif modifikasi lainnya, yaitu berdasarkan ketinggian rumah kaca dan kemiringan atap yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa rancangan rumah kaca tipe B dapat dipilih sebagai rancangan yang tepat berdasarkan besarnya nilai laju ventilasi alamiah.

Selain memiliki nilai laju ventilasi alamiah yang paling besar dibandingkan dengan rancangan modifikasi rumah kaca lainnya, rancangan modifikasi tipe B memerlukan biaya yang relatif lebih kecil untuk memodifikasi rumah kaca. Apabila dibandingkan dengan alternatif membangun rumah kaca baru menggunakan rancangan modifikasi tipe B ternyata diperlukan biaya yang lebih besar. Oleh karena itu, rumah kaca modifikasi tipe B merupakan alternatif rancangan yang paling tepat.



Gambar 7. Grafik hubungan laju ventilasi alamiah dan biaya.

**KESIMPULAN**

1. Metode perhitungan laju ventilasi alamiah dan asumsi yang digunakan dalam pengembangan program komputer ternyata cukup memadai untuk digunakan lebih lanjut dalam perancangan rumah kaca di daerah beriklim tropika basah.
2. Pada berbagai alternatif rancangan rumah kaca yang dikaji, ternyata laju ventilasi alamiah lebih dipengaruhi oleh ventilasi dinding daripada ventilasi atap.
3. Dengan memodifikasi rumah kaca menjadi sesuai rancangan modifikasi tipe B, yaitu dengan mengubah kemiringan atap yang semula curam ( $45^\circ$ ) menjadi lebih landai ( $30^\circ$ ), menambah tinggi ventilasi dinding yang semula 2,4 m menjadi 3,98 m, menambah panjang ventilasi atap yang semula 12 m menjadi 20 m, memungkinkan tercapainya laju ventilasi alamiah yang paling besar (74,34 kali/jam) dibandingkan dengan alternatif rancangan modifikasi yang lain.
4. Rancangan modifikasi rumah kaca tipe B membutuhkan biaya paling kecil yaitu pada tingkat harga bulan April 2005 sebesar Rp. 97.836.890,71 dibandingkan alternatif modifikasi rumah kaca maupun pembangunan rumah kaca baru.
5. Rancangan modifikasi rumah kaca tipe B dipilih karena merupakan rancangan yang memungkinkan laju ventilasi alamiah paling besar dan membutuhkan biaya yang paling murah.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Brockett, B.L. and Albright, L.D. 1987. *Natural ventilation in single airspace buildings. J. of Agricultural Engineering Research* (37) : 141-154.
- Bruce, J.M. 1978. *Natural convection through openings and its application in cattle building ventilation. J. of Agricultural Engineering Research* (23) : 151-167.
- Kozai, T., and Sase, S. 1978. *A simulation of natural ventilation for a multi-span greenhouse. Acta Horticulturae* (87) : 39-49.
- Lee, Short, T.H., Sase, S., Okushima, L., and Qiu, G.Y. 2000. *Evaluation of structural characteristic of naturally ventilated multi-span greenhouse using computer simulation. JARQ* 34 (4) : 247-256.
- Widyarti, M., H. Suhardiyanto, dan I.S. Mullawati. 2004. Analisis laju ventilasi alam pada *single-span greenhouse*, Cikabayan, Kampus IPB Darmaga. *Jurnal Keteknik Pertanian* 18 (1) : 26-37.