



**SIMULASI DISTRIBUSI SUHU DAN POLA ALIRAN UDARA RUMAH TANAMAN
Tipe Busur Termodifikasi Menggunakan Computational Fluid Dynamics
(SIMULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION AND AIRFLOW PATTERN ON A MODIFIED
ARCH GREENHOUSE USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)**

Titin Nuryawati¹⁾, Herry Suhardiyanto²⁾, Harmanto¹⁾, dan Yuli Suharnoto²⁾

¹⁾Balai Besar Pengembangan Mekanisasi Pertanian
Situgadung, P.O Box 2, Serpong 15310, Tangerang, Banten
Telp: 021-70936787
Email: bbpmektan@litbang.deptan.go.id.

²⁾Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor
Kampus IPB Darmaga, Jl. Raya Darmaga, Bogor 16680.
Telp: 0251-8627225.

Diterima :13 September 2011 ; Disetujui : 11 Oktober 2011

ABSTRAK

Aplikasi teknologi rumah tanaman dengan meniru konstruksi rumah tanaman di daerah subtropika ternyata tidak sesuai untuk daerah tropika. Hal tersebut ditunjukkan dengan tingginya suhu dan pola aliran udara yang tidak merata di dalam rumah tanaman. Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari ventilasi alamiah dalam rumah tanaman dan mengembangkan model simulasi distribusi suhu dan pola aliran udara dalam rumah tanaman tipe busur termodifikasi menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Penelitian dilakukan pada rumah tanaman tipe busur termodifikasi yang dilengkapi dengan bukaan atap dan samping dalam keadaan kosong tanpa tanaman. Data iklim dan karakteristik rumah tanaman digunakan sebagai input dan kondisi batas untuk mengembangkan model simulasi. Simulasi 2 dimensi dilakukan dalam keadaan tunak pada kondisi tidak ada kecepatan angin (0,0 m/detik), kecepatan angin sedang (0,5 dan 0,6 m/s) dan kecepatan angin tinggi (1,8 m/detik). Kecepatan angin yang melalui *screen* disimulasikan sebagai aliran yang melalui media berpori. Model CFD telah berhasil memprediksi distribusi suhu dan pola aliran udara dalam rumah tanaman. Hasil simulasi secara keseluruhan menunjukkan bahwa rumah tanaman memiliki gradien suhu secara vertikal dan ventilasi alamiah bekerja secara efektif. Hal ini dibuktikan dengan persentase *error* yang kecil dari perbedaan suhu antara hasil simulasi dengan hasil pengukuran (kurang dari 8%). Koefisien Variasi (CV) juga kecil yaitu 0,12, dengan Koefisien Keseragaman (CU) sebesar 89,76%.

Kata kunci: *Computational Fluid Dynamics* (CFD), distribusi suhu, rumah tanaman tipe busur termodifikasi, ventilasi, simulasi.

ABSTRACT

Greenhouse technology application by replicate the greenhouse construction in the subtropical region was not suitable for the tropics. This is indicated by a high temperature and airflow patterns are not evenly distributed in the greenhouse. The objectives of this research were to observe the natural ventilation on the greenhouse and develop a simulation of temperature distribution and the airflow pattern on the modified arch greenhouse using *Computational Fluid Dynamics* (CFD). The experiment was carried out in an empty modified arch greenhouse equipped with both top and side ventilations. Climate data and greenhouse characteristics were used as inputs and boundary condition to develop a simulation model. Two-dimensional simulation in a steady state with the condition of no wind speed (0.0 m/s), moderate wind speed (0.5 and 0.6 m/s) and high wind speed (1.8 m/s) were carried out. The wind speed through the insect-proof screen was simulated as a flow through porous media. The CFD model has succeeded in predicting the temperature distribution and airflow pattern of the greenhouse. The result of the model showed that the greenhouse has a gradient temperature vertically and the natural ventilation works effectively. It is proved that a small error percentage of difference temperatures between the simulation result and the observed data (less than 8%) were obtained. The coefficient variation was also small (0.12), with the coefficient of uniformity of 89.76%.

Key words: *Computational Fluid Dynamics* (CFD), temperature distribution, modified arch greenhouse, ventilation, simulation.

PENDAHULUAN

Budidaya tanaman hortikultura di ruang terbuka di daerah tropika mempunyai banyak kendala, yaitu suhu, kelembaban udara, curah hujan dan angin yang ekstrim. Selain itu serangan hama dan penyakit sangat mungkin terjadi karena kondisi lingkungan tersebut. Kondisi diatas berakibat kepada rendahnya kualitas produk yang dihasilkan dan ketersediaan produk yang tidak merata sepanjang tahun.

Pengembangan produk hortikultura perlu terus dilakukan untuk peningkatan nilai produksi, mutu dan ketersediaannya, mengingat bahwa produk hortikultura merupakan produk unggulan dalam ekspor non-migas. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan perluasan penggunaan rumah tanaman untuk budidayanya. Penggunaan rumah tanaman bermanfaat untuk melindungi tanaman dari hujan, angin dan hama, mengurangi intensitas radiasi matahari yang berlebihan, mengurangi penguapan air dari daun dan media, serta memudahkan perawatan tanaman (Suhardiyanto, 2009).

Pemilihan bentuk rumah tanaman yang digunakan pada suatu lahan tergantung pada keadaan lingkungan dan jenis tanaman yang dibudidayakan. Bentuk rumah tanaman yang umum digunakan di daerah tropis adalah bentuk (segi tiga) *venlo* dan bentuk *tunnel*. Bentuk busur (*arch*) dikembangkan bukan dengan pertimbangan untuk memaksimalkan cahaya matahari yang ditransmisikan, tetapi lebih merupakan pertimbangan biaya dan kemudahan instalasi.

Aplikasi teknologi rumah tanaman dengan meniru konstruksi rumah tanaman di daerah subtropika ternyata tidak sesuai untuk daerah tropika. Hal ini dapat dilihat dengan tingginya nilai suhu di dalam rumah tanaman. Pada rumah tanaman dengan konstruksi kaca dan besi dengan bentuk atap segi tiga (*standard peak*) di daerah Bogor, Jawa Barat, suhu di dalamnya dapat mencapai 44,5 °C (Asnawi, 2009). Untuk mengatasi masalah tersebut, maka dilakukan berbagai modifikasi rumah tanaman yang sesuai untuk daerah tropika, baik dari segi konstruksi maupun material yang digunakan. Modifikasi tersebut dapat berupa perubahan bentuk atap, penambahan bukaan atap, perubahan sudut kemiringan atap, dan penggunaan material plastik pada atap dan *screen* pada dinding.

Penggunaan *screen* dapat mengurangi jumlah serangan hama pengganggu yang masuk ke dalam rumah tanaman, akan tetapi

penggunaannya menurunkan laju ventilasi dan menaikkan suhu udara dalam rumah tanaman. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mempelajari karakteristik resistansi udara pada *screen* untuk memprediksi penurunan tekanan yang terjadi sebagai fungsi dari aliran kecepatan udara yang melewati *screen* (Miguel et al., 1997; Teitel, 2005; dan Katsoulas et al., 2006).

Kenyataan di lapangan menunjukkan bahwa rumah tanaman telah banyak digunakan di Indonesia, akan tetapi penelitian mengenai iklim mikro di dalamnya masih sedikit. Pengetahuan mengenai kondisi iklim mikro di dalam rumah tanaman berperan penting untuk penentuan jenis tanaman yang akan diproduksi dan desain sistem irigasi yang akan digunakan (Tanny, et al., 2003). Selain itu, bermanfaat juga untuk perbaikan desain (modifikasi) konstruksi rumah tanaman selanjutnya.

Penggunaan simulasi numerik dengan program komputer untuk memprediksi laju aliran udara dan distribusi suhu dalam rumah tanaman di daerah subtropika telah dilakukan oleh Bartzanas et al., 2002; Fatnassi et al., 2002; dan Fatnassi et al., 2003, selain itu terdapat juga berbagai simulasi yang dapat digunakan untuk memprediksi laju aliran udara dan distribusi suhu dalam rumah tanaman dengan menggunakan CFD seperti yang dilakukan oleh Fatnassi et al., (2006). Soni et al., (2005). dan Harmanto et al., (2006) telah mempelajari pengaruh berbagai macam ukuran *screen* untuk rumah tanaman di daerah tropika. Impron et al., (2007), telah mengembangkan model matematis untuk pendugaan iklim mikro dalam rumah tanaman yang dapat digunakan sebelum melakukan desain rumah tanaman di daerah tropis.

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis kinerja serta melakukan simulasi distribusi suhu dan pendugaan pola aliran udara dalam rumah tanaman tipe busur termodifikasi di daerah tropis menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Penelitian ini diharapkan dapat memberikan masukan dalam perbaikan desain rumah tanaman yang telah dilakukan.

BAHAN DAN METODE

Waktu dan Tempat

Penelitian dilaksanakan pada bulan Mei 2010. Tempat penelitian di PT East West Seed Indonesia (6° 30' 00" LS dan 107° 30' 00" BT, ketinggian 25 m dpl), Purwakarta, Jawa Barat Indonesia.



Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah rumah tanaman tipe busur termodifikasi dengan dimensi 9,6 x 15 x 6 m. Rangka utama dari besi pipa galvanis berdiameter 1,25" dan 1,5". Atap terbuat dari bahan plastik film *polyethylene* (LDPE) dengan pelapisan UV *absorbing* setebal 200 µm. Dinding *screen* dari bahan senyawa polyuretan dengan penambahan zat anti UV dengan ukuran 52 mesh (porositas 0,48) untuk dinding, dan 20 mesh (porositas 0,78) untuk bukaan atap. Lantai dari tanah dan orientasi rumah tanaman adalah Timur-Barat. Rumah tanaman tipe busur termodifikasi yang digunakan dalam penelitian seperti pada Gambar 1.



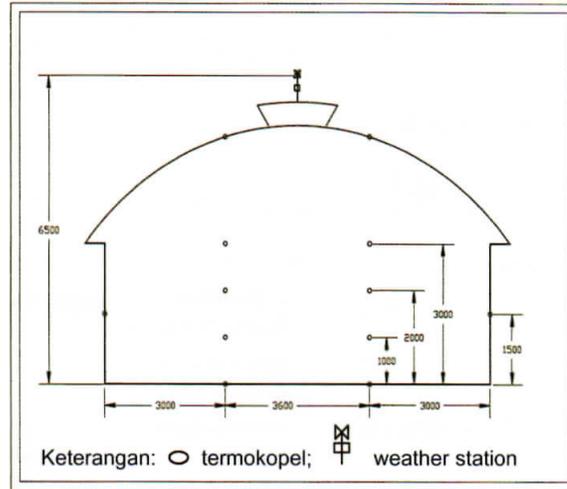
Gambar 1. Rumah tanaman tipe busur termodifikasi yang digunakan dalam penelitian

Peralatan yang digunakan adalah termokopel tipe J, *hybrid recorder* merk Yokogawa MV Advance IM MV1000-02E, *weather station* Davis tipe 6163, dan seperangkat komputer (PC) dengan spesifikasi CPU Intel © Core™ i7; 8GB RAM; dan 64-bit *Operating System*, dengan *software* SolidWorks®Office Premium 2010 X64 Edition SP 4,0.

Pengukuran Iklim Mikro dan Makro di sekitar Rumah Tanaman

Parameter iklim mikro rumah tanaman yang diukur adalah suhu udara dan suhu komponen rumah tanaman di bagian tengah rumah tanaman, karena keterbatasan alat pengukuran, maka pengukuran kecepatan angin di dalam rumah tanaman tidak dapat dilakukan. Pengukuran iklim makro di sekitar rumah tanaman yang diukur berupa suhu, kelembaban udara, tekanan udara, kecepatan angin, arah angin, radiasi matahari dan curah hujan.

Pengukuran dilakukan secara otomatis setiap 10 menit dari pukul 06:00 - 18:00 WIB, selama tiga hari berturut-turut (5 - 7 Mei 2010). Pengukuran iklim mikro dilakukan pada saat rumah tanaman dalam keadaan kosong tanpa tanaman. Skema titik pengukuran yang dilakukan seperti yang disajikan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Skema titik pengukuran dalam penelitian

Simulasi CFD

Pada simulasi CFD, pemecahan aliran fluida seperti udara digambarkan secara kuantitatif dalam besaran suhu dan kecepatan dengan bentuk persamaan differensial yang didasarkan pada analisis numerik metode volume hingga (*finite volume method*) khususnya persamaan Navier-Stokes. Bentuk persamaan matematika 2 dimensi dinyatakan sebagai berikut (Ferziger, J.H dan M. Peric, 1999):

• **Persamaan Kekekalan Massa**

Semua elemen fluida merupakan fungsi dari ruang dan waktu, maka massa jenis fluida ρ ditulis dalam bentuk ρ (x, y, z, t) dan komponen kecepatan fluida ditulis sebagai dx/dt=u, dy/dt=v, dan dz/dt=w. Bentuk persamaan matematis ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

dimana :

- ρ : massa jenis fluida (kg/m³)
- x, y, z : arah koordinat kartesian.

• **Persamaan Momentum**

Persamaan momentum dikembangkan dari persamaan Navier-Stokes dalam bentuk yang sesuai dengan metode *finite volume*.

Momentum arah x:

$$\rho \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + S_{x,u} \quad (2)$$

Momentum arah y:

$$\rho \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + S_{y,v} \quad (3)$$

dimana :

- μ : viskositas dinamik fluida (kg/m.s),
- g : percepatan gravitasi (m/s²) dan
- SMx, SMy, SMz : momentum yang berasal dari body per unit volume per unit waktu, masing-masing untuk koordinat x, y, dan z.

• **Persamaan Energi**

Persamaan energi diturunkan dari Hukum I Termodinamika dan secara matematik dengan memasukan fungsi disipasi ditulis sebagai berikut:

$$\rho \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] + 2\mu \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 \right] + \mu \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 \right] + S_i \quad (4)$$

dimana :

- T : suhu fluida (K),
- K : konduktivitas termal fluida (W/m.K), dan
- Si : energi yang ditambahkan per unit volume per unit waktu.

• **Persamaan Kesetimbangan**

Aliran fluida selalu mencari keseimbangan secara termodinamika jika ada gangguan. Jika dihubungkan dengan variabel ρ dan T, maka persamaan kesetimbangan untuk tekanan (P)

dan energi dalam (i) adalah sebagai berikut (Versteeg dan Malalasekera, 1995):

$$P = P(\rho, T) \quad (5)$$

$$i = i(\rho, T) \quad (6)$$

Untuk gas ideal, dimana: $P = \rho RT$ dan $i = C_v T$

Dengan menggunakan persamaan-persamaan diatas, data teknik yang dijadikan input diolah dan dikembangkan menjadi suatu model simulasi sehingga diperoleh suatu output yang diharapkan. Data teknik tentang rumah tanaman (Tabel 1), kondisi awal dan kondisi batas (Tabel 2) dijadikan sebagai input dalam simulasi. Simulasi dilakukan dengan model 2 dimensi (bidang XY), dengan asumsi yang digunakan dalam simulasi adalah:

- a) Simulasi dilakukan saat rumah tanaman kosong (tanpa tanaman),
- b) Udara bergerak dalam keadaan tunak,
- c) Udara lingkungan dianggap konstan, sehingga panas jenis, konduktivitas dan viskositas udara konstan selama simulasi,
- d) Distribusi suhu udara pada tiap komponen rumah tanaman (atap dan lantai) seragam,
- e) Rangka utama rumah tanaman dianggap tidak berperan besar dalam proses pindah panas dalam rumah tanaman, sehingga tidak dijadikan input dalam simulasi.

Simulasi dilakukan pada tiga kondisi yaitu: kondisi tidak ada kecepatan angin (0,0 m/detik); kondisi kecepatan angin sedang (0,5 dan 0,6 m/detik); dan kondisi kecepatan angin tinggi (1,8 m/detik).



Tabel 1. Karakteristik sifat bahan penyusun rumah tanaman

Komponen	Definisi	Karakteristik sifat bahan	Nilai	Satuan
Atap (Plastik LDPE)	Bahan padat	Kerapatan	930	kg/m ³
		Panas spesifik	2.600	J/kg.K
		Konduktivitas termal	0,33	W/mK
		Titik leleh	396,15	K
Lantai (tanah)	Bahan padat	Kerapatan	1.440	kg/m ³
		Panas spesifik	800	J/kg.K
		Konduktivitas termal	1,5	W/mK
		Titik leleh	1.923,15	K
Dinding (<i>screen</i> 52 mesh)	Media berpori	Porositas	0.48	-
		Permeabilitas	1.063 x 10 ⁻⁹	m ²
		A	0,00384	kg/m ⁴
		B	0,05	kg/s.m ³
Bukaan atap (<i>screen</i> 20 mesh)	Media berpori	Porositas	0,78	-
		Permeabilitas	2,301 x 10 ⁻⁹	m ²
		A	0,00384	kg/m ⁴
		B	0,05	kg/s.m ³

Tabel 2. Kondisi awal dan kondisi batas dalam simulasi

Simulasi	Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3	Kasus 4
Kondisi Awal				
Suhu lingkungan (°C)	25,2	30,6	34,7	34,0
RH lingkungan (%)	96	76	61	62
Kecepatan angin (m/detik)	0	0,5	0,6	1,8
Radiasi Matahari (W/m ²)	0	416	802	514
Waktu (WIB)	06:00	08:00	13:10	15:10
Kondisi Batas				
Suhu atap sebelah Utara (°C)	27,1	36,2	42,8	38,6
Suhu atap sebelah Selatan (°C)	26,5	35,5	41,5	35,4
Suhu lantai (°C)	25,2	33,9	37,9	37,4
Suhu dinding <i>screen</i> (°C)	25,0	33,4	37,7	35,1
Porositas <i>screen</i>	0,48	0,48	0,48	0.48

Validasi Model CFD

Validasi model dilakukan dengan membandingkan suhu udara hasil simulasi dengan suhu hasil pengukuran di lapang. Validasi pola aliran udara tidak dilakukan dikarenakan tidak dilakukan pengukuran. Keakuratan hasil simulasi dengan hasil pengukuran dinyatakan dalam persentase error.

Error dinyatakan dengan persamaan:

$$Error = \frac{(T_{simulasi} - T_{ukur})}{T_{ukur}} \times 100\% \quad (7)$$

Dimana :

$T_{simulasi}$: suhu hasil simulasi (°C)
 T_{ukur} : suhu hasil pengukuran (°C).

Distribusi suhu hasil simulasi juga divalidasi dengan menghitung koefisien keseragaman dan koefisien variasi. Apabila nilai koefisien keseragaman (CU) lebih dari 75% dan nilai koefisien variasi (CV) kurang dari 15%, maka dikatakan bahwa hasil simulasi telah baik. Persamaannya dinyatakan sebagai berikut:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (8)$$

$$CU = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \mu|}{\sum_{i=1}^n X_i} \right) \quad (9)$$

Dimana

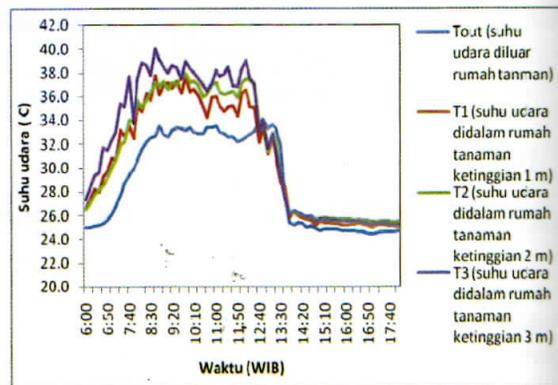
- CV : koefisien variasi (*coefficient of variation*),
 CU : koefisien keseragaman (*coefficient of uniformity*) (%),
 σ : standar deviasi,
 μ : rata-rata suhu hasil simulasi ($^{\circ}\text{C}$),
 X_i : suhu hasil pengukuran ($^{\circ}\text{C}$), dan
 N : jumlah data.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil Distribusi Suhu di dalam Rumah Tanaman Tipe Busur termodifikasi

Berdasarkan hasil pengukuran iklim makro di sekitar rumah tanaman, diperoleh bahwa suhu udara rata-rata harian adalah $30,5^{\circ}\text{C}$, dengan suhu terendah sebesar $23,0^{\circ}\text{C}$, dan suhu tertinggi sebesar $35,3^{\circ}\text{C}$. Kelembaban relatif udara rata-rata harian adalah 74,9%, dengan kelembaban udara terendah sebesar 57,0%, dan kelembaban udara tertinggi sebesar 96,0%. Radiasi matahari rata-rata harian adalah $378,7 \text{ W/m}^2$, dengan radiasi matahari tertinggi sebesar $1041,0 \text{ W/m}^2$. Sedangkan, kecepatan angin rata-rata harian adalah 1,6 m/detik dengan nilai tertinggi sebesar 7,2 m/detik.

Distribusi suhu udara di dalam rumah tanaman mempunyai pola bahwa suhu udara akan meningkat seiring dengan penambahan ketinggian seperti yang disajikan pada Gambar 3, Perbedaan suhu di dalam dan di luar rumah tanaman berkisar antara $2,2 - 5,5^{\circ}\text{C}$. Menurut Suhardiyanto (2009), ventilasi alamiah masih cukup efektif jika dapat mempertahankan kenaikan suhu udara di bawah 6°C , sehingga rumah tanaman tipe busur termodifikasi dengan kombinasi bukaan pada atap dan dinding yang ditutup dengan *screen* mempunyai kinerja yang cukup baik di daerah tropika.



Gambar 2. Distribusi suhu udara di luar dan di dalam rumah tanaman

Gradien suhu udara di dalam rumah tanaman secara vertikal pada ketinggian 1 - 3 m tidak terlalu besar, kisaran maksimum sebesar $2,3^{\circ}\text{C}$. Suhu udara harian rata-rata pada ketinggian 1 m adalah $30,8^{\circ}\text{C}$, pada ketinggian 2 m adalah $31,2^{\circ}\text{C}$, dan pada ketinggian 3 m adalah $32,0^{\circ}\text{C}$.

Simulasi Distribusi Suhu dalam Rumah Tanaman Menggunakan CFD

Pada Kasus 1 dengan kondisi lingkungan yang cukup stabil yaitu pada pagi hari dengan suhu lingkungan $25,2^{\circ}\text{C}$ dan tidak ada kecepatan angin menunjukkan bahwa suhu hasil simulasi di dalam rumah tanaman cukup seragam atau hampir sama dengan suhu di luar (Gambar 4). Gradien suhu sangat kecil dan cenderung meningkat dengan bertambahnya ketinggian, yaitu pada kisaran $25,39 - 25,44^{\circ}\text{C}$, dan mencapai $26,85^{\circ}\text{C}$ pada daerah dekat dengan atap.

Pada Kasus 2 dengan kondisi lingkungan yang mulai panas (pukul 08:00 WIB) dengan suhu lingkungan $30,6^{\circ}\text{C}$ dan kecepatan angin 0,5 m/detik menunjukkan bahwa suhu hasil simulasi di dalam rumah tanaman seragam atau hampir sama dengan suhu di luar (Gambar 5). Gradien suhu sangat kecil yaitu pada kisaran $30,6 - 30,9^{\circ}\text{C}$, dan mencapai $31,35^{\circ}\text{C}$ pada daerah dekat dengan atap.

Pada kasus 3 dengan kondisi lingkungan yang panas, dimana suhu lingkungan mencapai $34,7^{\circ}\text{C}$ dan radiasi matahari 802 W/m^2 , hasil simulasi menunjukkan bahwa suhu pada ketinggian 1 - 3 meter mempunyai suhu yang seragam ($34,7 - 34,9^{\circ}\text{C}$) dan baru meningkat

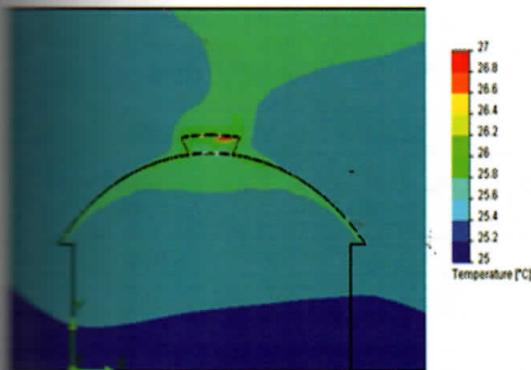


...arah di atas screen (>3,5 m). Suhu ... pada daerah dekat atap dapat mencapai ... (Gambar 6). Gradien suhu secara vertikal ... ketinggian 1-3 m sangat kecil dan baru ... gradien suhunya pada ketinggian ...

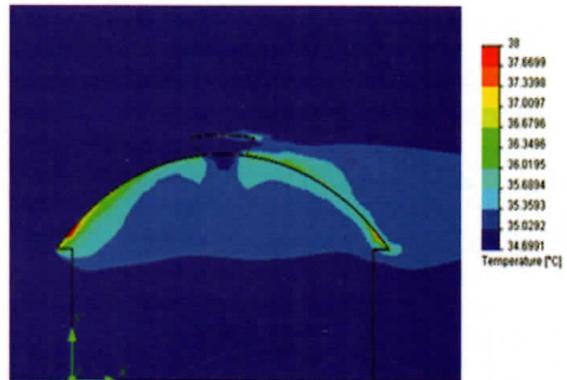
Pada Kasus 4, dengan input kondisi udara ... hari dengan suhu udara sebesar 34 °C, ... matahari 514 W/m² dan kecepatan angin ... menunjukkan bahwa suhu udara di ... rumah tanaman seragam dan sama ... suhu di luar rumah tanaman yaitu ... 34,00 - 34,33 °C (Gambar 7). Gradien ... di dalam rumah tanaman tidak ada pada ... hanya kecil sekali di dekat atap,

Perbedaan suhu udara hasil simulasi dan ... pengukuran pada Kasus 1, 2, 3 dan 4 ... dalam persentase error untuk ... seberapa akurat model pendugaan suhu ... yang telah dikembangkan. Error yang dihasilkan ... masing-masing kasus cukup kecil yaitu ... - 2,96% untuk Kasus 1, sebesar 3,77- ... untuk Kasus 2, sebesar 2,22-7,37% ... untuk Kasus 3, dan sebesar 1,16 - 7,72% untuk ... 4, sehingga dapat dikatakan bahwa ... simulasi telah cukup baik melakukan ... distribusi suhu di dalam rumah ... tanaman. Distribusi suhu hasil simulasi dan hasil ... pengukuran seperti pada Gambar 8.

Selain persentase error, nilai koefisien ... dan keragaman suhu hasil ... simulasi juga dilihat. Berdasarkan pada ... (12) - (14) diperoleh bahwa nilai ... variasi (CV) sebesar 0,12 dan nilai ... keseragaman (CU) sebesar 89,76%. ... dapat dinyatakan bahwa model ... simulasi distribusi suhu telah berhasil dengan ... dalam melakukan simulasi.



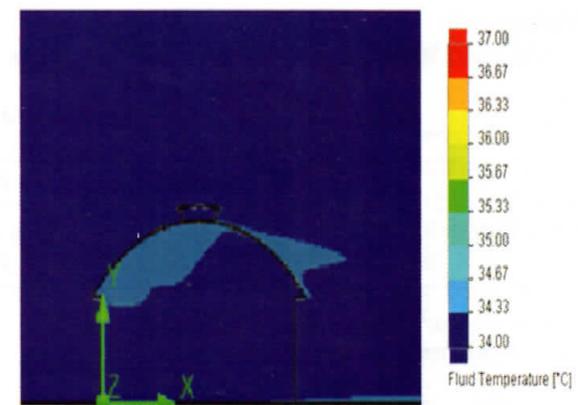
Gambar 3. Distribusi suhu di dalam rumah tanaman pada pagi hari (radiasi matahari dan kecepatan angin sangat rendah).



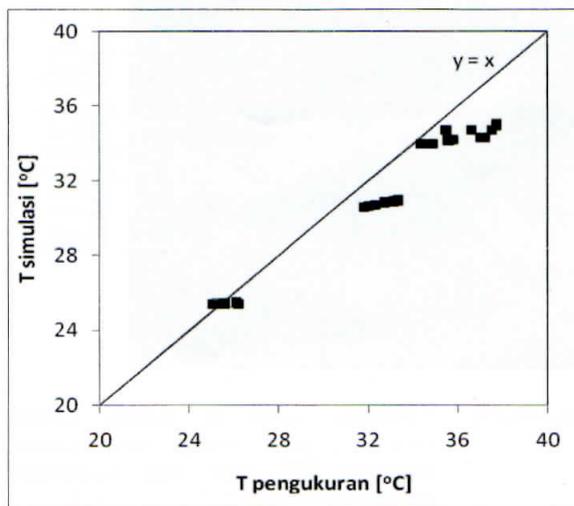
Gambar 4. Distribusi suhu di dalam rumah tanaman pada siang hari (radiasi matahari 802 W/m² dan kecepatan angin 0.6 m/detik).



Gambar 5. Distribusi suhu di dalam rumah tanaman pada pukul 08:00 WIB (radiasi matahari 418 W/m² dan kecepatan angin 0,5 m/detik).



Gambar 6. Distribusi suhu di dalam rumah tanaman pada kondisi sore hari (radiasi matahari 514 W/m² dan kecepatan angin 1,8 m/detik).



Gambar 7. Perbandingan suhu hasil pengukuran dengan suhu hasil simulasi

Pola Aliran Udara pada Ventilasi Alamiah dalam Rumah Tanaman

Pola aliran udara di dalam rumah tanaman saat tidak ada angin seperti ditunjukkan pada Gambar 9. Udara mengalir melalui dinding *screen* dan bergerak keatas dan keluar melalui bukaan pada atap. Fenomena ini disebut dengan *chimney effect*. Proses ini akan terjadi terus - menerus sampai pada saat tidak ada perbedaan suhu di dalam dan di luar rumah tanaman atau saat terjadi aliran angin yang cukup besar. Aliran udara yang terjadi di dalam rumah tanaman disebabkan adanya efek termal yaitu aliran udara yang terjadi karena perbedaan tekanan di dalam dan di luar rumah tanaman.

Pada Kasus 2 (Gambar 10) dan Kasus 3 (Gambar 11) dapat dilihat bahwa pola aliran udara yang terjadi sama dengan Kasus 1 yaitu

udara mengalir melalui dinding *screen* dan bergerak keatas dan keluar melalui bukaan pada atap. Menurut Bot (1983), pada waktu kecepatan angin kurang atau sama dengan 1,67 m/detik pertukaran udara dominan terjadi karena efek termal, sehingga *chimney effect* tetap terjadi pada Kasus 2 dan 3. Pada Kasus 4 (Gambar 12) dengan kecepatan udara di luar sebesar 1,8 m/detik, maka aliran udara di dalam rumah tanaman terjadi karena adanya dorongan angin, yaitu udara mengalir saja searah dengan arah angin melewati dinding *screen* dan tidak terjadi *chimney effect*. Berdasarkan Gambar 9 – Gambar 12, dapat dilihat bahwa dinding *screen* berfungsi sebagai *inlet* dan bukaan pada atap berfungsi sebagai *outlet*.

Sistem ventilasi alamiah banyak dipengaruhi oleh dua faktor penting yaitu perbedaan suhu (*bouyancy effect*) dan kecepatan (atau arah) angin. Laju aliran udara di dalam rumah tanaman mempunyai gradien penurunan kecepatan udara dengan bertambahnya ketinggian (Tabel 3). Laju ventilasi alamiah berbanding lurus dengan kecepatan udara di luar rumah tanaman dan perbedaan tekanan udara yang ditimbulkan oleh perbedaan suhu udara di dalam dan di luar rumah tanaman. Arah angin tidak berpengaruh terhadap laju ventilasi akibat faktor termal dan akibat faktor angin.

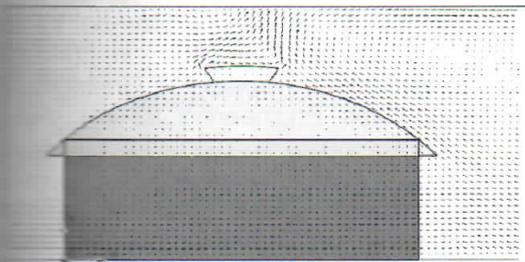
Berdasarkan Tabel 3, untuk Kasus 1 dengan kecepatan angin 0,0 m/detik menghasilkan laju aliran udara di dalam rumah tanaman berkisar antara 0,014-0,038 m/detik. Laju aliran udara tersebut terjadi karena adanya *chimney effect*. Pada Kasus 2 dengan kecepatan angin sebesar 0,5 m/detik, diperoleh bahwa laju aliran udara di dalam rumah tanaman antara 0,365-0,485 m/detik. Penurunan laju udara di luar dan di dalam rumah tanaman sebesar 3-27%.

Tabel 3. Laju aliran udara di dalam rumah tanaman hasil simulasi

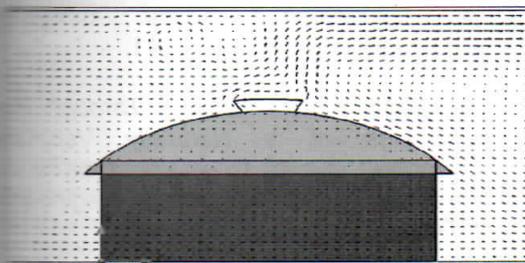
x [m]	y [m]	z [m]	Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3	Kasus 4
			Laju aliran udara [m/detik]			
3,0	1,0	-7,5	0,038	0,485	0,468	1,667
6,6	1,0	-7,5	0,037	0,462	0,428	1,431
3,0	2,0	-7,5	0,020	0,418	0,342	1,357
6,6	2,0	-7,5	0,026	0,402	0,379	1,331
3,0	3,0	-7,5	0,011	0,384	0,285	1,248
6,6	3,0	-7,5	0,014	0,365	0,270	1,233



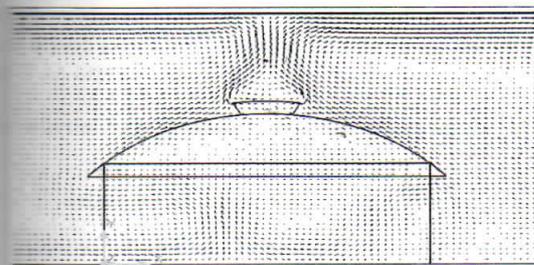
Pada Kasus 3 dengan kecepatan angin sebesar 0,6 m/detik, diperoleh bahwa laju aliran udara di dalam rumah tanaman antara 0,270-0,468 m/detik. Penurunan laju udara di luar dan di dalam rumah tanaman sebesar 22 - 55%. Pada Kasus 4 dengan kecepatan angin sebesar 1,8 m/detik, diperoleh bahwa laju aliran udara di dalam rumah tanaman antara 1,233 - 1,667 m/detik. Penurunan laju udara di luar dan di dalam rumah tanaman sebesar 7-31%. Secara keseluruhan (Kasus 1 - 4), penurunan laju udara di luar dan di dalam rumah tanaman sebesar 3 - 55%. Hal ini menunjukkan bahwa dinding yang ditutup dengan *screen* ukuran 52 *mesh* pada rumah tanaman tipe busur termodifikasi ini dapat menurunkan kecepatan angin sebesar 3-55%.



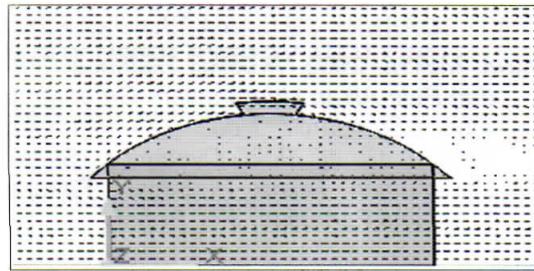
Gambar 8. Pola aliran udara dalam rumah tanaman saat kondisi pagi hari (tidak ada radiasi matahari dan kecepatan angin 0,0 m/detik).



Gambar 9. Pola aliran udara di dalam rumah tanaman pada pukul 08:00 WIB (radiasi matahari 418 W/m² dan kecepatan angin 0,5 m/detik).



Gambar 10. Pola aliran udara di dalam rumah tanaman saat kondisi siang hari (radiasi matahari 802 W/m² dan kecepatan angin 0,6 m/detik).



Gambar 11. Pola aliran udara di dalam rumah tanaman saat kondisi sore hari (radiasi matahari 514 W/m² dan kecepatan angin 1,8 m/detik).

KESIMPULAN

1. Model simulasi CFD dinyatakan berhasil dengan baik untuk memprediksi suhu udara (nilai CV sebesar 0,12 dan CU sebesar 89,76%) dan pola aliran udara, sehingga rumah tanaman tipe busur termodifikasi memiliki kinerja yang baik.
2. Hasil simulasi distribusi suhu menunjukkan hasil yang seragam, dengan pola aliran udara terjadi dari inlet (bukaan dinding) menuju outlet (bukaan atap).
3. Perbedaan suhu udara di dalam rumah tanaman tipe busur termodifikasi dengan suhu lingkungan berkisar antara 2,2 - 5,5 °C. Gradien suhu terjadi secara vertikal, tetapi besarnya tidak signifikan.
4. Distribusi suhu dan pola aliran udara dalam rumah tanaman dengan ventilasi alami mampu dijelaskan dengan baik menggunakan program CFD dan memungkinkan dilakukan permodelan untuk memprediksi suhu dan kelembaban udara di dalamnya.
5. Ventilasi alamiah dalam rumah tanaman tipe busur termodifikasi bekerja secara efektif baik terjadi dengan adanya pengaruh kecepatan angin maupun tanpa adanya kecepatan angin di luar rumah tanaman karena saat angin tidak bertiup maupun saat kecepatan angin rendah pertukaran udara tetap terjadi karena adanya *chimney effect*.

DAFTAR PUSTAKA

- Asnawi, M.A.M. 2009. *Prediksi Distribusi Suhu dan Pola Aliran Udara dalam Greenhouse Tipe Standard Peak Menggunakan Computational Fluid Dynamics*. Skripsi. Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB. Bogor.
- Bartzanas, T., T. Boulard, and C. Kittas. 2002. *Numerical Simulation of the Airflow and Temperature Distribution in a Tunnel Greenhouse Equipped with Insect-proof Screen in the Openings*. Computers and Electronics in Agriculture 34: 207–221.
- Bot, G.P.A. 1983. *Greenhouse Climate: from Physical Processes to a Dynamic Model*. Thesis. Agricultural University of Wageningen, Netherland.
- Fatnassi, H., T. Boulard, and H. Demrati, L. Bouirden, G. Sappe. 2002. *Ventilation Performance of a Large Canarian-Type Greenhouse Equipped with Insect-proof Nets*. Biosystem Engineering 82 (1): 97-105.
- Fatnassi, H., T. Boulard, L. Bouirden. 2003. *Simulation of Climatic Conditions in Full-Scale Greenhouse Fitted with Insect-Proof Screens*. Agricultural and Forest Meteorology 118: 97–111.
- Fatnassi, H., T. Boulard, C. Poncet, and M. Chave. 2006. *Optimisation of Greenhouse Insect Screening with Computational Fluid Dynamics*. Biosystems Engineering 93 (3): 301 - 312.
- Ferziger, J.H and Milovan Peric. 1999. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer Verlag, USA.
- Harmanto, H.J. Tantau, V.M. Salokhe. 2006. *Microclimate and Air Exchange Rates in Greenhouse Covered with Different Nets in the Humid Tropics*. Biosystems Engineering 94 (2): 239 - 253.
- Impron, I. S. Hemming, and G.P.A. Bot. 2007. *Simple Greenhouse Climate Model as A Design Tool For Greenhouses in Tropical Lowland*. Biosystem Engineering 98 (2007): 79 – 89.
- Katsoulas, N., T . Bartzanas, T . Boulard, M . Mermier, and C . Kittas. 2006. *Effect of Vent Openings and Insect Screens on Greenhouse Ventilation*. Biosystems Engineering 93 (4): 427 - 436.
- Kementerian Pertanian. 2010. *Statistik Pertanian (Agricultural Statistics) 2010*. Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian, Kementerian Pertanian.
- Miguel, A.F, N.J. van de Braak, and G.P.A. Bot. 1997. *Analysis of the Airflow Characteristics of Greenhouse Screening Materials*. Agricultural Engineering Resources 67: 105 – 112.
- Soni, P., V.M. Salokhe, and H.J. Tantau. 2005. *Effect of Screen Mesh Size on Vertical Temperature Distribution in Naturally Ventilated Tropical Greenhouses*. Biosystems Engineering 92 (4): 469 – 482.
- Suhardiyanto, H. 2009. *Teknologi Rumah Tanaman untuk Iklim Tropika Basah: Pemodelan dan Pengendalian Lingkungan*. IPB Press, Bogor.
- Tanny, J., S. Cohen, and M. Teitel. 2003. *Screenhouse Microclimate and Ventilation: an Experimental Study*. Biosystem Engineering 84 (3): 331 - 341.
- Teitel, M. 2005. *Airflow Patterns Through Roof Openings of a Naturally Ventilated Greenhouse and Their Effect on Insect Penetration*. A Biosystems Engineering (2005) 92 (3), 341–353.