

ANALISIS DISTRIBUSI SUHU DAN KELEMBABAN UDARA DALAM RUMAH JAMUR (KUMBUNG) MENGGUNAKAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* (CFD)

Analysis of the Temperature Distribution and Air Humidity in Mushroom House Using Computational Fluid Dynamics (CFD)

Anisum^{1,2}, Nursigit Bintoro¹, Sunarto Goenadi¹

¹Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Jl. Flora No. 1, Bulaksumur, Yogyakarta 55281

²Sekolah Tinggi Pertanian Kutai Timur, Jl. Soekarno Hatta No. 1, Sangatta, Kutai Timur, Kalimantan Timur 75387
Email: stiper_kutim@yahoo.com

ABSTRAK

Salah satu upaya untuk mengoptimalkan suhu dan kelembaban udara dalam rumah jamur pada musim kemarau dengan menggunakan *evaporative cooler* (pendingin penguap). Pada penelitian ini ada dua variasi perlakuan yang dikaji pendistribusian suhu dan kelembaban udara dalam rumah jamur dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD), yaitu kondisi bangunan menggunakan ventilasi alamiah dan kondisi bangunan dengan pendingin penguap (*evaporative cooler*) menggunakan air. Analisis dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) mampu memodelkan distribusi suhu dan kelembaban udara, serta pola pergerakan udara dalam rumah jamur. Nilai validasi distribusi suhu dan kelembaban udara dalam rumah jamur menunjukkan *error* 0,70 – 2,62%. Dari hasil analisis CFD suhu dan kelembaban udara mampu diturunkan sebesar $\pm 1^{\circ}\text{C}$ dan $\pm 5,1\%$ untuk bangunan dengan *evaporative cooler* menggunakan air. Hal ini menunjukkan bahwa bangunan dengan *evaporative cooler* menggunakan air mampu menurunkan suhu udara dan meningkatkan kelembaban udara dalam rumah jamur.

Kata kunci: Computational Fluid Dynamics (CFD), rumah jamur (kumbang), evaporative cooler

ABSTRACT

One effort to optimize the temperature and humidity in the mushroom house during the dry season using evaporative cooler. This research was conducted two treatment variation which were assessed about distribution of temperature and humidity of air inside a mushroom house using Computational Fluid Dynamics (CFD) is the condition of building using natural ventilation and condition of building with water used evaporative cooler. Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis was able to model the distributions of temperature and humidity, and air movement pattern inside of a mushroom house. The validation point of temperature distribution and humidity in the mushroom house has an error 0.70-2.62%. The results CFD analysis of temperature and humidity were able to reduced by about $\pm 1^{\circ}\text{C}$ and $\pm 5.1\%$ for building with evaporative cooler used water. The indicated that buildings evaporative cooler used water able to reduced air temperature and increasing humidity in the mushroom houses.

Keywords: Computational Fluid Dynamics (CFD), oyster, mushroom house, evaporative cooler

PENDAHULUAN

Jamur memiliki kelebihan dibandingkan dengan bahan makanan lainnya, yaitu gizinya yang tinggi dan cita rasanya yang lezat (Agromedia, 2009). Jamur tiram merupakan salah satu produk komersial dan dapat dikembangkan dengan teknik sederhana (Zervakis dan Balis, 1996 dalam Kibar dan Peksen, 2008). Dalam budidaya jamur tiram sangat dipengaruhi oleh

beberapa faktor lingkungan, misalnya suhu, kelembaban, cahaya, dan konsentrasi CO_2 . Namun, suhu adalah faktor lingkungan yang paling dominan (Chang dan Miles, 1989 dalam Han dkk., 2009). Suhu udara dan kelembaban relatif (RH) adalah dua parameter lingkungan yang berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman (Hanan dkk., 1978 dalam Romdhonah, 2011). Pada musim penghujan pertumbuhan jamur sangat baik karena suhunya rendah, namun pada musim

kemarau pertumbuhan jamur terhambat karena kelembaban rendah dan suhu udara tinggi. Cahyana dkk. (2007) dalam Yanuati (2007) menjelaskan pada umumnya, jamur tiram bisa tumbuh pada suhu 24-28°C. Salah satu upaya untuk mengoptimalkan suhu dan kelembaban udara dalam rumah jamur dengan menggunakan *evaporative cooler* (pendingin penguap). Dengan menggunakan *evaporative cooler* dalam rumah jamur, tidak menjamin pertumbuhan jamur yang baik dan seragam (tumbuh merata), kecuali udara didistribusikan merata di atas media tanam jamur (*baglog*). Kekhawatiran ini menyebabkan tuntutan perlunya menganalisis sifat dan pola aliran udara dalam rumah jamur. Pemecahan analisis aliran udara dalam rumah jamur dapat dilakukan dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) (Versteeg dan Malalasekera, 1995). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi suhu dan kelembaban udara pada rumah jamur dengan dua variasi perlakuan, yaitu kondisi bangunan tanpa bantuan alat mekanis (ventilasi alamiah) dan kondisi bangunan dengan pendingin penguap (*evaporative cooler*) menggunakan air, serta melakukan validasi antara hasil pengukuran dengan perhitungan hasil *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat

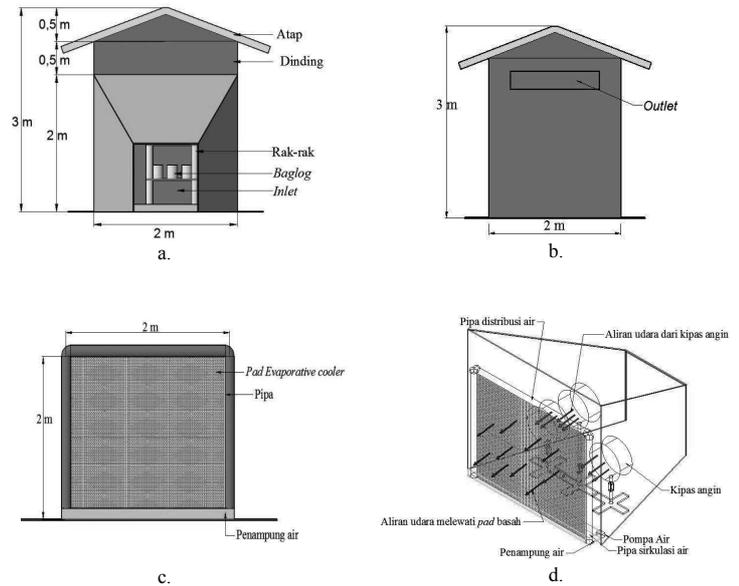
Penelitian dilaksanakan pada bulan Maret sampai Mei 2014 berlokasi di Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian terdiri dari rumah jamur (kumbung) dengan dimensi 3 x 2 x 3 m, rak-rak dan *baglog* (media tanam jamur). Rumah jamur terbuat dari anyaman bambu (gedek), baik untuk atap maupun dinding, sedangkan rangka rumah menggunakan bambu dan lantai dari *concrete block hollow*. Peralatan yang digunakan yaitu *evaporative cooler*, *data logger*, *thermohygrometer*, *anemometer*, termometer, termokopel dan seperangkat laptop dengan *software Gambit 2.4.6* dan *Fluent 6.3*.

Desain Bangunan

Dalam penelitian ini, terdapat dua desain rumah jamur, yaitu bangunan kontrol (ventilasi alamiah) tanpa *evaporative cooler* dan bangunan dengan *evaporative cooler* (Gambar 1). Bangunan yang menggunakan *evaporative cooler* ini sama seperti bangunan konvensional hanya saja pada salah satu sisinya menggunakan *evaporative cooler*. Di belakang *pad* diletakkan kipas angin dengan ukuran diameter 38 cm dan 60 watt (Gambar 1d).



Gambar 1. Desain rumah jamur:
 a. Bangunan kontrol tampak depan (*inlet*)
 b. Bangunan tampak belakang (*outlet*)
 c. Desain *evaporative pad*
 d. Skematis dari sistem *evaporative cooling*

Analisis Data Menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD)

Dalam simulasi pola aliran udara, udara digambarkan secara kuantitatif dalam besaran suhu dan kecepatan dengan bentuk persamaan differensial, dalam koordinat kartesian dan dipecahkan dengan teknik CFD (tiga dimensi) berdasarkan analisis numerik menggunakan metode volume hingga. Tiga persamaan atur aliran fluida yang menyatakan hukum kekekalan fisika (Versteeg dan Malalasekera, 1995), yaitu:

Persamaan kekekalan massa. Bentuk matematika untuk fluida yang tidak terkompresi dinyatakan pada

Persamaan 1:

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

dimana ρ adalah massa jenis fluida (kg/m^3) dan x, y, z adalah koordinat kartesian.

Persamaan momentum. Persamaan momentum dikembangkan dari persamaan *Navier-Stokes* dalam bentuk sesuai dengan metode *finite volume* yang ditunjukkan pada Persamaan 2 sampai dengan Persamaan 4.

Momentum x :

$$\rho \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + S_{Mx} \tag{2}$$

Momentum y:

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

Momentum z:

$$\rho \left[u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + S_M \quad (4)$$

dimana μ adalah viskositas dinamik fluida (kg/ m det) dan S_{MX} , S_{MY} , S_{MZ} adalah momentum yang berasal dari *body* per unit volume per unit waktu, masing-masing untuk koordinat x , y dan z .

Persamaan energy. Persamaan energi diturunkan dari Hukum I Termodinamika. Secara matematika dinyatakan pada Persamaan 5.

$$\rho \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right] = p \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right] + k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + S_i \quad (5)$$

p adalah tekanan fluida (Pa), k adalah konduktivitas termal fluida (W/m°C) dan S_i adalah energi yang ditambahkan per unit volume per unit waktu.

Dengan menggunakan persamaan-persamaan di atas, kondisi batas yang dijadikan input diolah dan dikembangkan menjadi suatu model dengan menggunakan *software Fluent 6.3* sehingga diperoleh suatu output. Data input kondisi batas (*boundary condition*) dapat dilihat pada Tabel 1.

Pengaturan dasar pada *Fluent 6.3* diawali dengan memilih *pressure-based* sebagai tipe *solver*, *implicit* sebagai *formulation*, *absolute* sebagai tipe *velocity formulation* dan *steady* sebagai tipe *time*, dan mengaktifkan model energi. Model *k-epsilon* digunakan pada penelitian ini karena model ini yang sering digunakan pada simulasi aliran fluida dan perpindahan panas. Model *k-epsilon* merupakan model

Tabel 1. Data input kondisi batas (*boundary condition*) untuk *Fluent 6.3* pada bangunan kontrol dan bangunan dengan *evaporative cooler* menggunakan air

Uraian	Satuan	Bangunan kontrol			Bangunan dengan <i>evaporative cooler</i>		
		08.00 WIB	12.00 WIB	17.00 WIB	08.00 WIB	12.00 WIB	17.00 WIB
Inlet							
Suhu udara	°C	27,1	30,7	29,0	26,7	29,2	27,8
Kecepatan angin	m/det	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4
Atap							
Suhu udara	°C	26,9	30,5	29,1	26,7	29,6	28
Koefisien pindah panas	W/m ² .K	0,54	0,45	0,45	1,43	1,42	1,42
Dinding selatan							
Suhu udara	°C	27,3	31,1	29,5	26,9	30,5	28,3
Koefisien pindah panas	W/m ² .K	0,88	1,43	0,99	1,43	1,42	1,42
Dinding utara							
Suhu udara	°C	27,4	30,9	29,9	27,8	31,3	29,2
Koefisien pindah panas	W/m ² .K	0,94	1,34	1,27	1,43	1,42	1,42
Lantai							
Suhu udara	°C	26,7	28,2	27,7	26,4	27,9	27,6
Koefisien pindah panas	W/m ² .K	1,58	2,37	2,11	3,19	3,18	3,19
Rak I							
Suhu udara di rak	°C	27,2	30,3	29,4	27	29,8	28,8
Koefisien pindah panas <i>baglog</i>	W/m ² .K	1,12	1,57	1,47	4,31	4,3	4,3
Rak II							
Suhu udara di rak	°C	27,1	29,8	29,3	27	29,3	28,7
Koefisien pindah panas <i>baglog</i>	W/m ² .K	1,33	1,94	1,33	4,31	4,3	4,31
Rak III							
Suhu udara di rak	°C	26,8	29,4	28,7	26,5	28,8	28,1
Koefisien pindah panas <i>baglog</i>	W/m ² .K	1,52	2,06	1,52	4,31	4,3	4,3

turbulensi yang cukup lengkap dengan dua persamaan yang memungkinkan kecepatan turbulen (*turbulent velocity*) dan skala panjang (*length scales*) ditentukan secara independen (Tuakia, 2008). Kacira dkk. (1998) dalam Han dkk. (2009) menyatakan bahwa analisis turbulensi pada aliran udara dalam rumah jamur dilakukan dengan model *k-epsilon* untuk memprediksi kecepatan distribusi udara. Persamaan-persamaan tersebut diselesaikan dengan metode iterasi (Patankar, 1980; Versteeg dan Malalasekera, 1995). Di dalam analisis menggunakan CFD, material penyusun rumah jamur (kumbung) seperti atap, dinding, lantai, rak-rak dianggap sebagai *wall*. *Inlet* dan *outlet* merupakan bukaan ventilasi rumah jamur. Adapun asumsi yang digunakan dalam analisis CFD adalah: 1) Udara bergerak dalam keadaan *steady state* dan tidak terkompresi (*incompressible*); 2) Udara lingkungan dianggap konstan selama simulasi; 3) Panas jenis, konduktivitas dan viskositas udara konstan. 4) Massa udara dalam rumah jamur tidak diperhitungkan; 5) Distribusi suhu udara pada tiap atap, dinding dan lantai rumah jamur seragam; 6) Dinding rumah jamur berupa anyaman bambu (gedek) dianggap tidak memiliki pori-pori atau dianggap rata; 7) Tanaman jamur tiram yang tumbuh tidak menghasilkan panas dan tidak menghambat pergerakan udara (tanaman jamur tidak didefinisikan).

Validasi

Besarnya *error* dalam validasi dihitung menggunakan Persamaan 6 (Yani, 2012) sebagai berikut:

$$Error (\%) = \frac{|p-u|}{p} \times 100 \quad (6)$$

dimana *p* adalah nilai suhu udara hasil CFD (°C) dan *u* adalah nilai suhu udara hasil pengukuran (°C). Selain itu juga menggunakan *paired samples t-test* untuk melakukan perbandingan rataan antara output simulasi dan hasil observasi sistem nyata dengan asumsi bahwa variansi kedua sample sama (Pidd, 1992 dalam Singgih dan Susanto, 2006).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis CFD pada Bangunan Kontrol

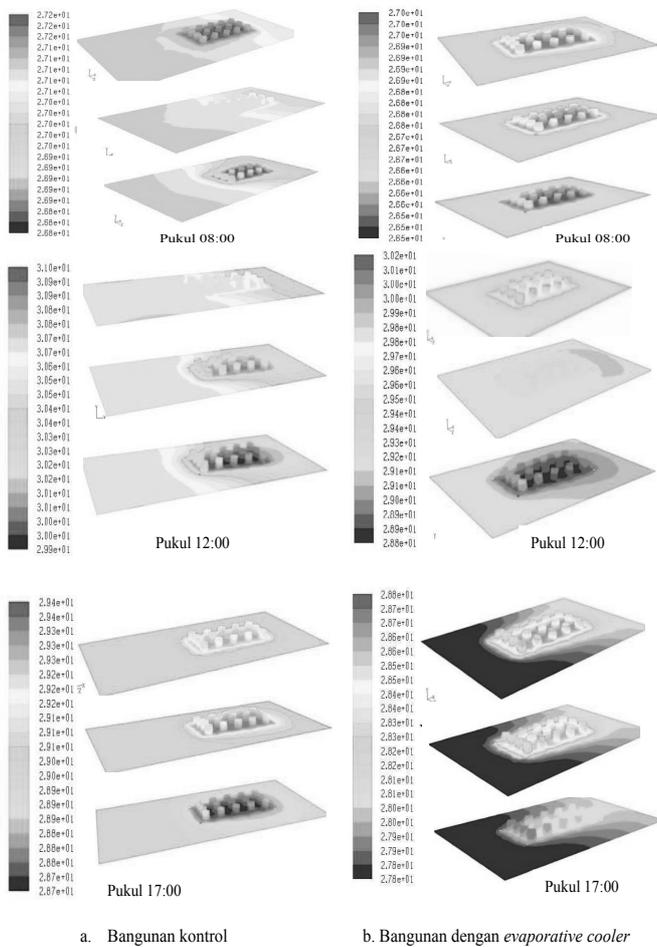
Pada bangunan kontrol atau ventilasi alamiah suhu udara dalam rumah jamur berasal dari suhu udara lingkungan yang naik pada pagi hari sampai siang hari dan menurun kembali pada sore hari. Pada pukul 08:00 WIB, dari Gambar 2a dapat dilihat suhu udara dalam rumah jamur terdistribusi merata. Suhu udara rata-rata dalam rumah (27°C) lebih rendah daripada suhu udara lingkungan (27,1°C), karena radiasi matahari yang diterima atap dan konveksi panas dari material penyusun yang dihantarkan masih rendah. Kelembaban udara

(RH) rata-rata di dalam rumah jamur (90%) lebih tinggi dari RH udara lingkungan (88,37%) karena proses pemanasan dalam rumah jamur masih rendah sehingga uap air dalam bangunan belum banyak yang terbuang karena efek panas dan angin lingkungan. Pada Gambar 3a, suhu udara yang terendah berada di rak bawah berkisar 26,81°C – 26,93°C, sedangkan suhu udara paling tinggi di rak atas (27,19°C).

Pada pukul 12:00, suhu udara dalam rumah lebih tinggi daripada suhu udara lingkungan (30,7°C), sedangkan kelembaban udara rata-rata dalam rumah jamur (76,06%) mendekati kelembaban udara lingkungan (76,26%). Suhu udara paling tinggi di daerah atap (30,9°C) dapat dilihat pada Gambar 2a. Tingginya suhu udara di dekat (bawah atap) karena atap merupakan material penyusun rumah jamur yang paling besar menerima radiasi matahari. Pada Gambar 3a, suhu udara terendah berada di rak bawah (29,71°C – 30,39°C).

Pada pukul 17:00, suhu udara rata-rata dalam rumah jamur (29,07°C) lebih tinggi daripada suhu udara lingkungan (29°C). Tingginya suhu udara pada sore hari karena terjadinya konveksi dalam rumah jamur dan panasnya terperangkap di material penyusun serta benda-benda (*baglog*) yang ada dalam rumah rumah jamur, sehingga menyebabkan kenaikan suhu udara. Dari Gambar 2a, suhu udara tertinggi berada di daerah atap. Tingginya suhu pada permukaan atap, disebabkan oleh model rumah jamur yang ada adalah jenis ventilasi dinding sehingga pada akhirnya suhu udara di atas dekat atap cenderung tinggi atau karena tidak adanya ventilasi di atap. Menurut Katsoulas dkk. (2006) dalam Suhardiyanto (2009), konfigurasi bukaan ventilasi yang paling efektif adalah kombinasi bukaan dinding dan atap, diikuti oleh bukaan dinding saja dan terakhir adalah bukaan atap saja. Adapun suhu udara terendah berada di rak bawah (dekat lantai) pada ketinggian kurang dari 2m dapat dilihat pada Gambar 3a. Rendahnya suhu udara di rak bawah disebabkan udara lingkungan yang masuk melalui *inlet* pada permukaan lantai langsung menuju *outlet* (bukaan ventilasi dekat atap) dan akibat terhalang dinding (2 m) yang berada di bawah *outlet*, udara dibelokkan kembali ke tengah dan terhalang oleh media tanam di rak bawah ketika diteruskan ke *outlet*, sehingga suhu udara di lantai dan di rak bawah lebih rendah dari rak atas dan rak tengah. Hal ini merupakan sifat dari udara yang akan membelokkan pola alirannya apabila mengenai suatu halangan yang tidak dapat dilewatinya. Pada pukul 17:00, RH udara rata-rata dalam rumah jamur (79,96%) lebih rendah dari RH udara lingkungan (80,47%) karena meningkatnya suhu udara dalam rumah jamur akibat panas yang dikonveksikan material penyusun rumah jamur dan benda-benda (*baglog*) yang berada di dalamnya.

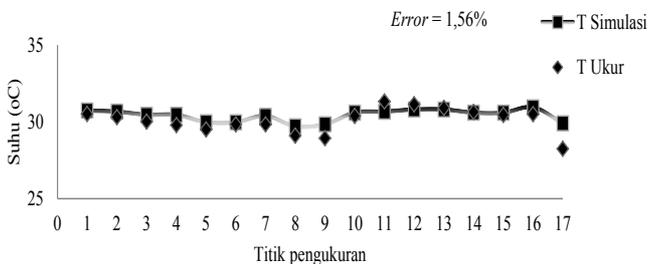
Dengan kecepatan angin sebesar 0,3 m/detik, udara masuk dalam rumah jamur melalui bukaan *inlet* yang terletak di bagian bawah dinding dan keluar melalui *outlet* yang



Gambar 3. Kontur suhu udara di rak-rak pada: a. Bangunan kontrol; b. Bangunan dengan evaporative cooler menggunakan air pada pukul 08:00; 12:00; 17:00 WIB

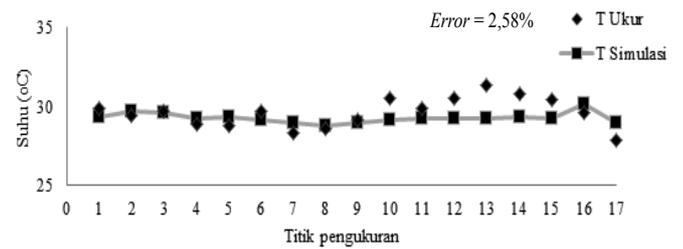
Validasi

Validasi distribusi suhu udara dilakukan dengan cara membandingkan data suhu hasil pengukuran dengan data suhu udara hasil CFD di 17 titik pengukuran. Hasil validasi distribusi suhu udara dalam ruang jamur menunjukkan kecenderungan hasil CFD mendekati hasil pengukuran dengan nilai error yang rendah. Nilai error suhu udara rata-rata tertinggi pada bangunan kontrol (ventilasi alamiah)



Gambar 4. Validasi suhu udara hasil CFD terhadap hasil pengukuran di 17 titik pada bangunan kontrol (pukul 12:00 WIB)

sebesar 1,56% (Gambar 4) dan 2,58% pada bangunan dengan evaporative cooler menggunakan air (Gambar 5). Adapun, nilai error kelembaban udara rata-rata pada bangunan kontrol sebesar 1,54% dan 2,15% pada bangunan dengan evaporative cooler menggunakan air. Pada beberapa titik terjadi perbedaan yang cukup mencolok karena terkait dengan penentuan jarak grid yang sedikit berbeda antara pengukuran dan perhitungan CFD. Nilai error yang tinggi disebabkan oleh pembuatan geometri pada dinding rumah jamur diasumsikan tidak berlubang-lubang, tetapi dalam realitanya dinding rumah jamur yang berupa anyaman bambu memiliki lubang-lubang kecil yang memungkinkan tempat keluar masuknya udara luar sehingga menyebabkan error yang cukup besar, tetapi masih dalam batasan yang rendah.



Keterangan:

- | | | |
|--------------------------|-------------------------|--------------------|
| 1. Rak atas (depan) | 7. Rak bawah (depan) | 13. Dinding utara |
| 2. Rak atas (tengah) | 8. Rak bawah (tengah) | 14. Outlet selatan |
| 3. Rak atas (belakang) | 9. Rak bawah (belakang) | 15. Outlet utara |
| 4. Rak tengah (depan) | 10. Selatan rak | 16. Atap |
| 5. Rak tengah (tengah) | 11. Utara rak | 17. Lantai |
| 6. Rak tengah (belakang) | 12. Dinding selatan | |

Gambar 5. Validasi suhu udara hasil CFD terhadap hasil pengukuran di 17 titik pada bangunan dengan evaporative cooler menggunakan air (pukul 12:00 WIB)

Pada uji statistik paired sample t-test menggunakan data hasil pengukuran dan hasil perhitungan menggunakan CFD pada bangunan kontrol dan bangunan dengan evaporative cooler menggunakan air menunjukkan bahwa nilai t hitung lebih kecil dari t tabel dan nilai significant level lebih besar dari nilai α (0.05), sehingga dapat disimpulkan bahwa H0 diterima dan dinyatakan tidak ada perbedaan rata-rata secara signifikan antara hasil pengukuran dengan hasil CFD. Kesimpulan ini menunjukkan bahwa model perhitungan dengan CFD valid dan dapat digunakan sebagai representasi sistem dalam melakukan analisis terhadap model rumah jamur.

KESIMPULAN

Distribusi suhu udara dan kelembaban udara dalam rumah jamur dengan dua variasi perlakuan dapat dianalisis menggunakan Computational Fluid Dynamics (CFD) karena memiliki tingkat validasi cukup tinggi dengan nilai error

suhu dan kelembaban udara rata-rata 1,56% pada bangunan kontrol dan 2,58% pada bangunan dengan *evaporative cooler* menggunakan air. Hasil simulasi distribusi suhu pada ke dua perlakuan yang diberikan pada rumah jamur menunjukkan bahwa bangunan dengan *evaporative cooler* menggunakan air mampu menurunkan suhu udara dan meningkatkan kelembaban udara dalam rumah jamur dan memiliki hasil yang seragam dengan pola aliran udara yang terjadi dari inlet menuju outlet.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Sekolah Tinggi Pertanian (STIPER) Kutai Timur, Kalimantan Timur, atas bantuan dana penelitian sehingga penelitian bisa terlaksana dengan lancar. Tulisan ini adalah bagian penelitian tesis yang menggunakan dana penelitian tersebut. Dan ucapan terima kepada Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada yang sudah memfasilitasi selama proses penelitian berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Agromedia (2009). *Jamur Konsumsi*. PT Agro Media Pustaka, Jakarta.
- Kibar, B. dan Peksen, A. (2008). Modelling the effects of temperature and light intensity on the Development and yield of different pleurotus species. *Agricultura Tropica et Subtropica* **41**:2.
- Han, J.H., Kwon, H.J., Yoon, J.Y., Kim, K., Nam, S.W. dan Son, J.E. (2009). Analysis of the thermal environment in a mushroom house using sensible heat balance and 3-D computational fluid dynamics. *Biosystem Engineering* **104**: 417-424.
- Kacira, M., Short, T.H. dan Stowell, R.R. (1998). A CFD evaluation of naturally ventilated, multi-span, sawtooth greenhouses. *Transactions of The American Society of Agricultural Engineers* **41**: 833-836.
- Patankar, S.V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluida Flow*. Hemishpere Publishing Corporation. Mc-Graw Hill. New York.
- Romdhonah, Y. (2011). *Simulasi Distribusi Suhu dan Kelembaban Udara untuk Pengembangan Desain Rumah Tanaman di Daerah Tropika Basah*. Tesis. Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Singgih, M.L. dan Susanto, H. (2006). Perancangan model simulasi downtime machines untuk menentukan kecepatan mesin dan jumlah operator yang optimal pada divisi ring spinning. *Prosiding Seminar Nasional Manajemen Teknologi IV. Magister Manajemen Teknologi. Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya*.
- Suhardiyanto, H. (2009). *Teknologi Rumah Tanaman untuk Iklim Tropika Basah "Pemodelan dan Pengendalian Lingkungan"*. IPB Press, Bogor.
- Tuakia, F. (2008). *Dasar-Dasar CFD Menggunakan Fluent*. Informatika, Bandung.
- Yani, A. (2007). *Distribusi Suhu dalam Kandang Sapi Menggunakan Computational Fluid Dynamics*. Tesis. Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Yanuati, I.N.T. (2007). *Kajian Perbedaan Komposisi Media Tanam terhadap Pertumbuhan dan Hasil Jamur Tiram Putih (Pleurotus florida)*. Universitas Brawijaya, Malang.
- Versteeg, H.K. dan Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Longman Scientific and Technical. New York.