

jTEP

JURNAL KETEKNIKAN PERTANIAN

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

Vol. 6, No. 3, Desember 2018



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 Ristek Dikti 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. JTEP terbit tiga kali setahun yaitu bulan April, Agustus dan Desember, dan mulai tahun ini berisi 15 naskah untuk setiap nomornya. Peningkatan jumlah naskah pada setiap nomornya ini dimaksudkan untuk mengurangi masa tunggu 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 meliputi 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 (Scopus ID: 6602716827, Institut Pertanian Bogor)
Anggota : Asep Sapei (Institut Pertanian Bogor)
Kudang Boro Seminar (Scopus ID: 54897890200, Institut Pertanian Bogor)
Daniel Saputra (Scopus ID: 6507392012, Universitas Sriwijaya - Palembang)
Bambang Purwantana (Universitas Gadjah Mada - Yogyakarta)
Yohanes Aris Purwanto (Scopus ID: 6506369700, Institut Pertanian Bogor)
Muhammad Faiz Syuaib (Scopus ID: 55368844900, Institut Pertanian Bogor)
Salengke (Scopus ID: 6507093353, Universitas Hasanuddin - Makassar)
I Made Anom Sutrisna Wijaya (Scopus ID: 56530783200, Universitas Udayana - Bali)

Redaksi Pelaksana:

Ketua : Rokhani Hasbullah (Scopus ID: 55782905900, Institut Pertanian Bogor)
Sekretaris : Lenny Saulia (Scopus ID: 16744818700, Institut Pertanian Bogor)
Bendahara : Hanim Zuhrotul Amanah (Universitas Gadjah Mada - Yogyakarta)
Anggota : Dyah Wulandani (Scopus ID: 1883926600, Institut Pertanian Bogor)
Usman Ahmad (Scopus ID: 55947981500, Institut Pertanian Bogor)
Satyanto Krido Saptomo (Scopus ID: 6507219391, Institut Pertanian Bogor)
Slamet Widodo (Scopus ID: 22636442900, Institut Pertanian Bogor)
Liyantono (Scopus ID: 54906200300, Institut Pertanian Bogor)
Administrasi : Diana Nursolehat (Institut Pertanian Bogor)

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, 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 Bebestari yang telah menelaah (*me-review*) Naskah pada penerbitan Vol. 6 No. 3 Desember 2018. Ucapan terima kasih disampaikan kepada: Prof.Dr.Ir. Sutrisno, M.Agr. (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor), Prof.Dr.Ir. Slamet Budijanto, M.Agr. (Departemen Ilmu dan Teknologi Pangan, Institut Pertanian Bogor), Prof.Dr.Ir. Daniel Saputra, MS. (Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya), Prof.Ir. Loekas Susanto, MS., Ph.D. (Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman), Prof.Dr.Ir. Muhammad Idrus Alhamid (Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia), Prof.Dr.Ir. Sobir, M.Si. (Departemen Agronomi dan Hortikultura (AGH), Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Bambang Susilo, M.Sc.Agr. (Program Studi Teknik Pertanian, Universitas Brawijaya), Dr. Radi, STP., M.Eng. (Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada), Dr.Ir. Evi Savitri Iriani M.Si. (Balai Besar Litbang Pascapanen Pertanian), Dr.Ir. Hermantoro, MS. (Institut Pertanian Stiper (INSTIPER) Yogyakarta), Dr.Ir. Ridwan Rachmat, M.Agr. (Balai Besar Penelitian Tanaman Padi), Dr.Ir. Rokhani Hasbullah, M.Si. (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor), Dr.Ir. Usman Ahmad, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor), Dr. Leopold Oscar Nelwan, STP., M.Si. (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor), Dr. Slamet Widodo, STP., M.Sc. (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor), Dr. Muhamad Yulianto, ST., MT. (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor), Dr. Nora H. Pandjaitan, DEA. (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor), Dr. Chusnul Arif, STP., M.Si. (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor), Dr. Satyanto Krido Saptomo, STP, M.Si. (Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor), Wilson Palelingan Aman, STP., M.Si. (Fakultas Pertanian dan Teknologi Pertanian, Universitas Negeri Papua), Andri Prima Nugroho, STP., M.Sc., Ph.D. (Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Gadjah Mada), Asna Mustofa, STP., MP. (Program Studi Teknik Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman), Diding Suhandy, S.TP., M.Agr., Ph.D. (Jurusan Teknik Pertanian, Universitas Lampung) Agus Ghautsum Ni'am, STP., M.Si. (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor).

Technical Paper

Sebaran Suhu pada Sistem Hidroponik Substrat dengan Pendinginan Terbatas Daerah Perakaran

Temperature Distribution in Substrate Hydroponics System with Root Zone Cooling

Nurul Choerunnisa, Departemen Teknik Mesin Pertanian dan Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Email: choerunnisa_nurul@yahoo.com

Herry Suhardiyanto, Departemen Teknik Mesin Pertanian dan Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Email: herrysto@yahoo.com

Leopold Oscar Nelwan, Departemen Teknik Mesin Pertanian dan Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Email: lonelwan@yahoo.com

Abstract

High environment temperature in humid tropical lowland can cause vary physiological problems for plants. Zone cooling system for substrate hydroponics was built to maintain root zone temperature of the plants. The objective of this research was to predict temperature distribution in substrate hydroponics system root zone with root zone cooling which is important parameter in evaluating root zone cooling system. The distribution of root zone temperature was simulated using computational fluid dynamics (CFD) approach. The simulation result showed uniformed temperature distribution in the planting medium for hydroponic substrate with minimum, maximum, and average temperature of 12.60°C, 39.90°C, and 32.00°C, respectively. The comparison between simulated and measured root zone temperature using linear regression analysis resulted in gradient value of 1.01, coefficient of intercept value of 0.39, and coefficient of determination value of 0.98. Hence, the developed simulation model with CFD approach can be used to predict root zone temperature of substrate hydroponics system with root zone cooling.

Keywords: *temperature distribution, root zone cooling, substrate hydroponics, computational fluid dynamics*

Abstrak

Suhu lingkungan yang tinggi di dataran rendah tropika basah dapat mengakibatkan berbagai masalah fisiologis pada tanaman. Sistem pendinginan terbatas untuk hidroponik substrat telah dibangun untuk menjaga suhu daerah perakaran tanaman. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memprediksi sebaran suhu daerah perakaran pada sistem hidroponik substrat dengan pendinginan terbatas daerah perakaran yang merupakan parameter penting dalam mengevaluasi sistem pendinginan terbatas daerah perakaran. Sebaran suhu daerah perakaran tanaman disimulasikan dengan menggunakan pendekatan *computational fluid dynamics* (CFD). Hasil simulasi menunjukkan sebaran suhu media tanam yang tidak seragam dengan suhu minimum, maksimum, dan rata-rata secara berurutan sebesar 12.60°C, 39.90°C, dan 32.00°C. Perbandingan antara suhu daerah perakaran hasil simulasi dan pengukuran dengan analisis regresi linear menghasilkan nilai gradien sebesar 1.01, nilai koefisien intersep sebesar 0.39, dan koefisien determinasi sebesar 0.98. Oleh karena itu, model simulasi dengan pendekatan CFD yang telah dikembangkan dapat digunakan untuk memprediksi sebaran suhu daerah perakaran sistem hidroponik substrat dengan pendinginan terbatas daerah perakaran.

Kata Kunci: *distribusi suhu, pendinginan terbatas daerah perakaran, hidroponik substrat, computational fluid dynamics*

Diterima: 22 Agustus 2017; Disetujui: 21 November 2018.

Latar Belakang

Radiasi matahari yang tinggi di Indonesia yang beriklim tropika basah menyebabkan suhu udara di dalam rumah tanaman menjadi tinggi. Suhu udara di dalam rumah tanaman yang terlalu tinggi dapat memicu *stress* pada tanaman sehingga produktivitasnya menurun. Oleh karena itu, pengendalian suhu udara di kawasan yang beriklim tropika basah sangat penting untuk keberhasilan budidaya tanaman (Pek dan Hayles, 2004).

Pendinginan terbatas (*zone cooling*) merupakan metode yang dapat digunakan untuk menurunkan suhu lingkungan tanaman secara efektif dan efisien. Pada metode ini, pendinginan dilakukan terhadap daerah sekitar tanaman yang paling membutuhkan. Pendinginan dapat dilakukan secara terbatas terhadap udara di sekitar pucuk tanaman (*shoot zone*) atau larutan nutrisi di daerah perakaran tanaman (*root zone*). Pendinginan terhadap larutan nutrisi lebih tepat untuk diaplikasikan di daerah tropika basah karena air lebih sulit mengalami kenaikan suhu dibandingkan dengan udara yang disebabkan panas jenis air yang lebih tinggi (Suhardiyanto et al., 2007).

Suhu daerah perakaran tanaman sangat mempengaruhi kondisi tanaman. Menurut He dan Lee (1998), suhu daerah perakaran mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan daerah perakaran dan daerah pucuk tanaman selada yang dibudidayakan di daerah tropis. Sumartono dan Sumarni (2013) menemukan bahwa pertumbuhan vegetatif tanaman kentang paling tinggi diperoleh pada yang daerah perakarannya tidak diberi pendinginan, sedangkan jumlah umbi tertinggi diperoleh dari tanaman kentang yang daerah perakarannya didinginkan dengan larutan nutrisi bersuhu 15°C. Chang et al. (2008) melaporkan bahwa tanaman kentang yang ditanam saat musim panas di kawasan subtropika secara hidroponik dengan perlakuan pendinginan terbatas daerah perakaran mengalami peningkatan pertumbuhan stolon, fotosintesis, laju transpirasi, dan jumlah umbi jika dibandingkan dengan yang tidak mendapat perlakuan pendinginan.

Sistem pendinginan terbatas yang telah dikembangkan di daerah tropika basah diantaranya diaplikasikan untuk budidaya tanaman secara NFT (*Nutrient Film Technique*) (Arif et al., 2010) dan aeroponik (Sumarni, 2013; Sumartono dan Sumarni, 2013). Aplikasi pendinginan terbatas daerah perakaran di daerah tropika basah untuk sistem hidroponik substrat yang masih banyak dipraktikkan di Indonesia sulit dilakukan. Pendinginan terhadap larutan nutrisi dalam sistem hidroponik substrat sulit dilakukan karena laju aliran larutan nutrisi dalam sistem irigasi tetes sangat rendah yaitu sekitar 0.068-0.163 liter detik⁻¹ per 100 m² (Muro dan Lamsfus, 1997). Hal ini menyebabkan larutan nutrisi yang didinginkan mengalami kenaikan

suhu yang cukup tinggi selama didistribusikan menuju perakaran akibat menerima panas dari lingkungan (Choerunnisa dan Suhardiyanto, 2015; Suhardiyanto dan Lilik, 2013). Oleh karena itu, diperlukan pengembangan sistem pendinginan terbatas yang sesuai bagi budidaya tanaman secara hidroponik substrat di daerah tropika basah.

Sebaran suhu di daerah perakaran tanaman =sebagai parameter penting bagi pertumbuhan dan perkembangan tanaman perlu diketahui. Hal ini dapat dimanfaatkan sebagai dasar pengendalian iklim mikro tanaman agar pengendalian lingkungan menjadi lebih efektif. Pengetahuan mengenai sebaran suhu juga dapat dimanfaatkan untuk membantu dalam proses perancangan atau perbaikan sistem pengendalian lingkungan mikro di daerah perakaran tanaman dapat dilakukan dengan lebih mudah.

Sebaran suhu di daerah perakaran tanaman dapat dianalisis dengan pendekatan *computational fluid dynamics* (CFD). CFD merupakan analisis sistem yang melibatkan aliran fluida, pindah panas dan fenomena terkait seperti reaksi kimia dengan menggunakan simulasi berbasis komputer (Versteeg dan Malalasekera, 2011). Penggunaan simulasi CFD untuk menduga sebaran suhu pada sistem budidaya tanaman sebelumnya telah dilakukan Sumarni et al. (2013) untuk sistem budidaya tanaman secara aeroponik. Tujuan penelitian ini adalah untuk memprediksi sebaran suhu media tanam pada sistem hidroponik substrat dengan pendinginan terbatas daerah perakaran melalui simulasi dengan pendekatan CFD.

Bahan dan Metode

Analisis termal dengan pendekatan CFD dilakukan untuk memprediksi sebaran suhu daerah perakaran tanaman pada sistem hidroponik substrat sebagai parameter kritis dalam pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Solidworks® Premium 2013. Komputer yang digunakan adalah komputer dengan spesifikasi CPU Intel® Core™ i7, RAM 12 GB, dan sistem operasi 64 bit.

Pendinginan terbatas daerah perakaran tidak dilakukan dengan mendinginkan larutan nutrisi yang dialirkan melalui sistem irigasi tetes, melainkan dengan mengalirkan air yang didinginkan melalui pipa yang benamkan di dalam media tanam. Hal ini dilakukan agar pendinginan lebih efektif karena selama didistribusikan ke daerah perakaran air akan lebih banyak menyerap panas dari media tanam dibandingkan dari udara lingkungan atau lantai rumah tanaman. Selain itu, laju pindah panas yang terjadi lebih tinggi akibat laju aliran air yang juga lebih tinggi jika dibandingkan laju aliran larutan nutrisi pada sistem irigasi tetes. Hidroponik substrat dilakukan pada bedengan sebagai penyesuaian

Tabel 1. Sifat fisik material padat yang didefinisikan dalam simulasi.

| Sifat fisik | Satuan | Akrilik | Besi galvanis | Media tanam |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------|---------------|-------------|
| Kerapatan | kg m ⁻³ | 1190 | 7850 | 118.1000 |
| Panas jenis | J kg ⁻¹ °C ⁻¹ | 1500 | 875 | 2.6789 |
| Konduktivitas panas | W m ⁻¹ °C ⁻¹ | 0.19 | 30 | 0.0676 |
| Tipe konduktivitas | - | Isotropik | Isotropik | Isotropik |
| <i>Melting temperature</i> | °C | 160 | 412 | - |
| Porositas | % | - | - | 0.77 |

terhadap sistem pendinginan tersebut. Sistem hidroponik substrat terdiri dari bedengan berukuran panjang 6.25 m, lebar 1.25 m dan tinggi 0.25 m, media tanam berupa campuran 80% arang sekam-20% *cocopeat*, dan sistem irigasi tetes. Sistem hidroponik substrat dengan pendinginan terbatas daerah perakaran ini dibangun di dalam rumah tanaman tipe *standard peak* berukuran 6 m x 12 m yang berada di dataran rendah tropika basah pada 106.42°BT, 6.33°LS dengan ketinggian 250 m dpl.

Asumsi-asumsi dan Kondisi Batas

Sumarni (2013) melakukan simulasi sebaran suhu pada sistem aeroponik dengan aplikasi *root zone cooling* dengan tidak memasukkan akar tanaman sebagai salah satu komponen simulasi. Hasil simulasi tersebut akurat dengan nilai PDR rata-rata sebesar 2.89%. Oleh karena itu, akar tanaman tidak akan didefinisikan di dalam simulasi.

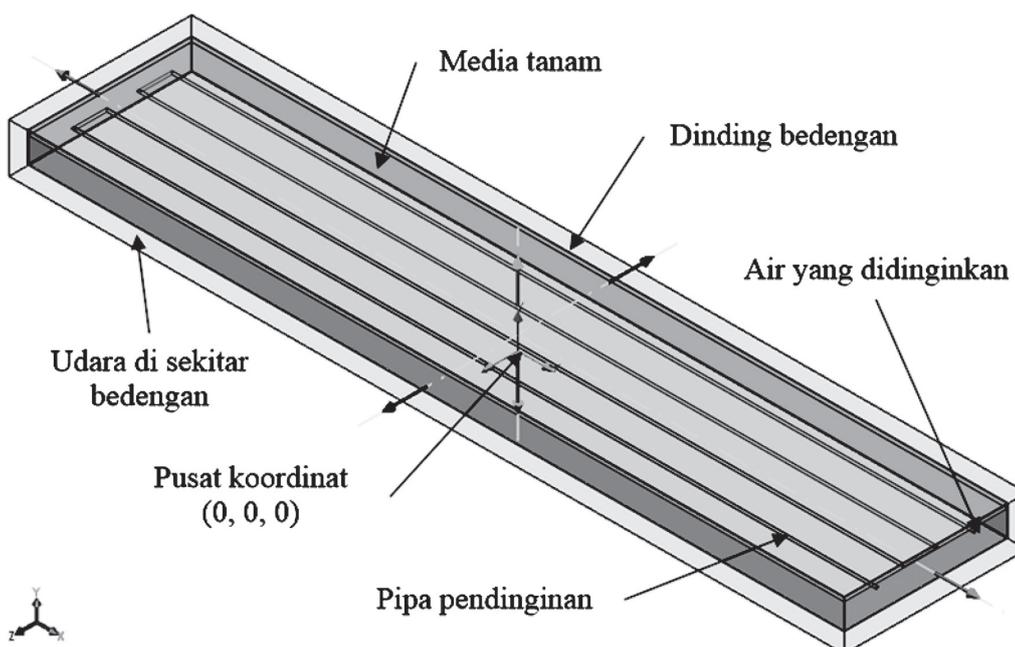
Asumsi-asumsi yang ditetapkan dalam simulasi, diantaranya: 1) fluida bergerak dalam kondisi tunak; 2) fluida merupakan fluida yang tidak termampatkan; 3) tekanan udara pada sistem hidroponik substrat dianggap sama dengan tekanan udara lingkungan; 4) sebaran suhu udara di dalam rumah tanaman

dianggap seragam; 5) media tanam dianggap memiliki tipe konduktivitas isotropik; 6) penyangga pipa pendinginan, kassa dan kawat ram yang menjadi dasar bedengan, larutan nutrisi yang keluar dari irigasi tetes dianggap, dan akar tanaman dianggap tidak mempengaruhi sistem sehingga tidak didefinisikan dalam perhitungan.

Pemodelan geometri untuk simulasi dibuat dalam skala 1:1. Daerah perhitungan dibatasi hingga udara lingkungan di sekitar bedengan. Pusat koordinat (0, 0, 0) berada di tengah-tengah dasar bedengan. Komponen-komponen yang didefinisikan dalam geometri dapat dilihat pada Gambar 1.

Media tanam sebagai fokus dari daerah perhitungan simulasi didefinisikan sebagai *porous medium*. Fluida yang mengisi *porous medium* adalah udara dengan material padat berupa media tanam dalam keadaan kering. Pipa pendinginan didefinisikan sebagai besi galvanis dengan fluida yang dialirkan melalui pipa pendinginan berupa air. Dinding bedengan didefinisikan sebagai akrilik. Sifat fisik dari material padat yang didefinisikan dalam simulasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Input kondisi awal pada simulasi sebaran suhu daerah perakaran tanaman dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 1. Geometri dan daerah perhitungan simulasi.

Tabel 2. Input kondisi awal pada simulasi.

| Input | Satuan | Nilai |
|---|-------------------|--------|
| Suhu udara di dalam rumah tanaman | °C | 34.0 |
| Suhu air pada posisi inlet | °C | 12.6 |
| Suhu dinding bedengan | °C | 39.9 |
| Radiasi matahari di dalam rumah tanaman | W m ⁻² | 410 |
| Kelembaban udara | % | 51 |
| Tekanan atmosfer | Pa | 101325 |

Proses Solving

Solving merupakan proses pencarian solusi dengan penyelesaian persamaan atur (*governing equation*) yang dijabarkan dalam bentuk persamaan diferensial parsial (*partial differential equation*). Penyelesaian persamaan dilakukan dengan mengaproksimasi aliran yang tidak diketahui dengan metode diskritisasi dan iterasi untuk disubstitusikan ke dalam persamaan aliran disertai manipulasi matematika hingga dicapai kondisi yang konvergen. Proses *solving* dalam simulasi menggunakan CFD melibatkan 3 persamaan atur, yaitu persamaan keseimbangan massa, momentum, dan energi (Versteeg dan Malalasekera, 2011).

Persamaan Kekalkan Massa

Keseimbangan massa elemen fluida dinyatakan sebagai laju kenaikan massa dalam elemen fluida. Bentuk persamaan matematis disajikan pada Persamaan (1) (Versteeg dan Malalasekera, 2011).

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

dimana ρ adalah massa jenis fluida (kg m⁻³) dan u , v , dan w adalah komponen vektor kecepatan pada sumbu x , y , dan z (m s⁻¹).

Persamaan Momentum

Persamaan momentum dikembangkan dari persamaan Navier-Stokes dalam bentuk yang sesuai dengan metode *finite volume*. Persamaan momentum 3 dimensi disajikan pada Persamaan (2), (3), dan (4) (Versteeg dan Malalasekera, 2011).

Momentum arah x:

$$\text{div}(UU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + v \text{div grad } U + \left[-\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right] \tag{2}$$

Momentum arah y:

$$\text{div}(VU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + v \text{div grad } V + \left[-\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right] \tag{3}$$

Momentum arah z:

$$\text{div}(WU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + v \text{div grad } W + \left[-\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right] \tag{4}$$

Persamaan Energi

Persamaan energi diturunkan dari Hukum Termodinamika. Secara matematika ditulis sebagai Persamaan (5) (Versteeg dan Malalasekera, 2011).

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

dimana T adalah suhu fluida, k adalah konduktivitas termal fluida, dan S_i adalah energi yang ditambahkan per unit volume per unit waktu.

Validasi Model Simulasi

Validasi model simulasi dilakukan dengan menganalisis garis regresi yang terbentuk pada hubungan linier antara suhu media tanam hasil pengukuran (x) dan hasil simulasi (y) seperti yang ditunjukkan Persamaan (6)

$$y = ax + b \tag{6}$$

dimana a menyatakan gradien garis regresi dan b menyatakan intersep atau perpotongan garis regresi dengan sumbu tegak. Model simulasi dinyatakan memberikan prediksi suhu media tanam yang semakin baik bila koefisien intersep (b) mendekati nol dan gradiennya (a) mendekati satu.

Keakuratan hasil simulasi suhu media tanam dengan hasil pengukuran dinyatakan dalam persentase deviasi rata-rata (PDR). Besarnya PDR tersebut dinyatakan dalam Persamaan (7).

$$\text{Persentase deviasi rata-rata} = \frac{T_{\text{simulasi}} - T_{\text{ukur}}}{T_{\text{ukur}}} \times 100\% \tag{7}$$

Analisis Pindah Panas

Daya yang dikonsumsi untuk pendinginan pada sistem hidroponik substrat dapat dihitung dengan Persamaan (8):

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \tag{8}$$

dimana Q adalah panas yang diserap air selama dialirkan ke sistem hidroponik substrat (W), \dot{m} adalah laju aliran massa air (kg s⁻¹), dan C_p adalah kalor jenis air (J kg⁻¹ °C⁻¹) dan ΔT adalah selisih suhu air di posisi *inlet* dan *outlet* (°C).

Hasil dan Pembahasan

Analisis Sebaran Suhu pada Sistem Hidroponik Substrat

Data yang digunakan dalam simulasi adalah data yang diperoleh pada saat cuaca cerah pada musim kemarau. Hal ini dilakukan agar analisis sebaran suhu pada sistem hidroponik substrat dapat

dilakukan pada saat beban pendinginan mendekati maksimum. Radiasi matahari maksimum di luar rumah tanaman yang diperoleh selama pengukuran adalah 821 W m^{-2} . Nilai radiasi matahari tersebut sudah di atas nilai rata-rata radiasi matahari di luar rumah tanaman maksimum yang diperoleh Sumarni (2013) selama musim kemarau di lingkungan rumah tanaman yang sama, yaitu sebesar 775 W m^{-2} .

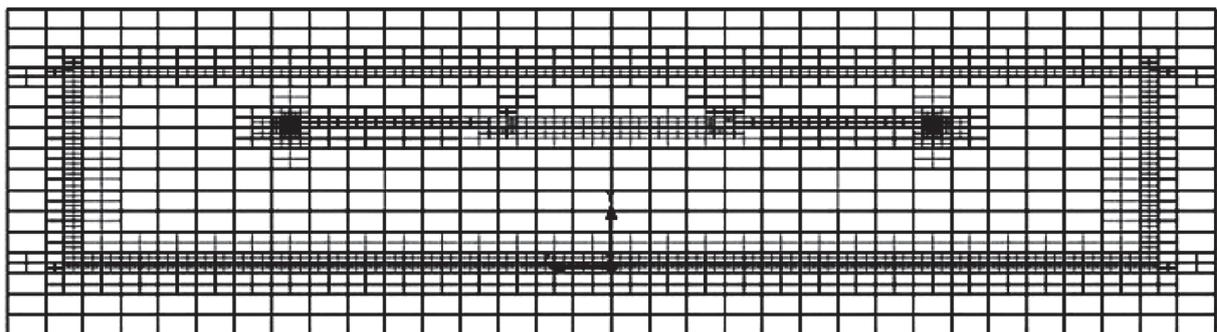
Jumlah *mesh* yang terbentuk dari hasil diskritisasi dan iterasi mempengaruhi jumlah *cells* yang terbentuk. Semakin banyak jumlah *cells* pada daerah perhitungan, semakin akurat hasil perhitungan, namun semakin banyak memori yang dibutuhkan dan semakin lama proses perhitungan. Resolusi *mesh* yang dipilih pada simulasi adalah resolusi *mesh* level 5. Pada level ini sudah diperoleh hasil yang akurat dan menaikkan level resolusi *mesh* tidak meningkatkan akurasi perhitungan secara signifikan.

Dalam Solidworks[®] Premium 2013 Flow Simulation, proses pembuatan *grid* atau *meshing* dilakukan dengan pendekatan *immersed body mesh* dimana pembuatan *mesh* dimulai secara independen dari geometri itu sendiri dan *cells* yang terbentuk dapat secara bebas memotong batas antara fluida dan padatan. Penggunaan *Cartesian immersed-body mesh* yang memotong batas antara fluida dan padatan menyebabkan terbentuknya *cells* yang seluruhnya terletak di daerah fluida (*fluid cells*), *cells* yang seluruhnya terletak di daerah padatan (*solid cells*), dan *cells* yang sebagian terletak di daerah fluida dan sebagian lainnya di daerah padatan (*partial cells*). Jumlah *fluid*, *solid*, dan *partial cells* yang terbentuk setelah *meshing* secara berurutan sebanyak 80,182, 112, dan 39,434

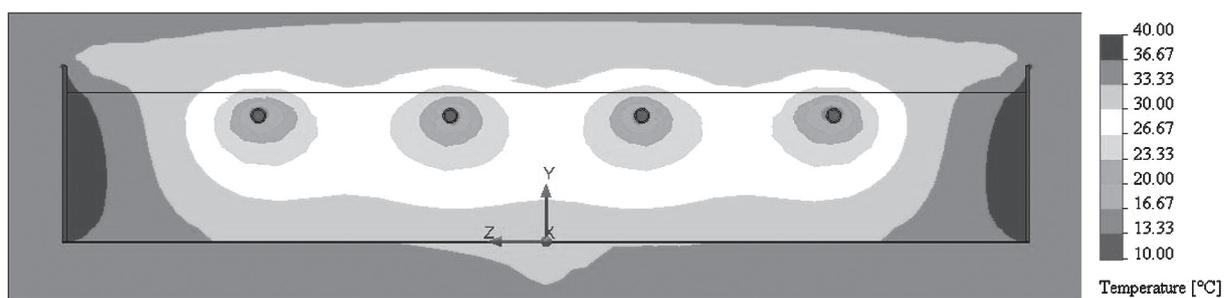
cells. Simulasi mencapai konvergen pada iterasi ke-395. Suhu fluida minimum, maksimum dan rata-rata secara berurutan sebesar 12.60°C , 39.90°C dan 32.00°C . Suhu *solid* minimum, maksimum, dan rata-rata secara berurutan sebesar 12.61°C , 39.9°C , dan 35.14°C .

Hasil simulasi sebaran suhu (Gambar 3) menunjukkan bahwa sebaran suhu media tanam di dalam bedengan pada sistem hidroponik substrat dengan aplikasi *root zone cooling* tidak seragam ke arah sumbu *y* dan *z*. Sebaran suhu media tanaman ke arah sumbu *y* perlu diperhatikan karena berkaitan dengan jangkauan perakaran tanaman di dalam media tanam. Jika panjang akar tanaman mencapai dasar bedengan, maka suhu media tanam perlu dijaga agar berada pada kisaran suhu optimum daerah perakaran untuk tanaman yang dibudidayakan hingga dasar bedengan. Sebaran suhu pada sumbu *z* selain berhubungan dengan jangkauan akar tanaman juga berhubungan dengan jarak tanam tanaman. Semakin rapat jarak tanam suatu tanaman, semakin penting untuk mencapai keseragaman suhu ke arah sumbu *z*.

Suhu media tanam maksimum berada di dekat dinding bedengan. Suhu maksimum media tanam ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan suhu udara lingkungan di sekitar bedengan maupun suhu dinding bedengan bagian luar. Hal ini mengindikasikan bahwa tingginya suhu media tanam di dekat dinding bedengan bukan disebabkan media tanam menyerap energi panas dari udara lingkungan maupun dinding bedengan, melainkan radiasi matahari. Akrilik memiliki *light transmission* sebesar 92% sehingga bersifat meneruskan radiasi matahari. Media tanam yang terdiri dari arang



Gambar 2. *Mesh* pada daerah perhitungan simulasi.



Gambar 3. Sebaran suhu media tanam tampak depan ($x = 0.000 \text{ m}$).

sekam sebanyak 80% berwarna dominan hitam yang memiliki nilai emisivitas tinggi (Holman, 1997) sehingga memiliki kemampuan menyerap radiasi matahari yang tinggi.

Pindah panas pada media tanam dengan lingkungan sekitarnya sebagian besar terjadi secara konduksi. Hal ini dapat diamati pada Gambar 2 dimana pola sebaran suhu pada media tanam di sekitar pipa tampak mengikuti bentuk luar dinding pipa, yaitu membentuk lapisan-lapisan melingkar ke arah luar. Adanya peristiwa pindah panas secara konveksi menyebabkan bentuk melingkar ini tidak sempurna. Hal ini terutama dapat diamati pada daerah di atas permukaan media tanam di mana pada daerah tersebut suhu udara tampak lebih rendah dibandingkan dengan suhu media tanam di bagian bawah pipa akibat adanya pindah panas secara konveksi antara media tanam dan udara lingkungan.

Pindah panas secara konveksi terjadi karena adanya pergerakan molekul-molekul fluida berupa udara lingkungan di sekitar bedengan dan udara yang mengisi pori-pori media tanam. Pergerakan udara ini dapat diamati pada Gambar 4. Pada Gambar tersebut, terlihat bahwa udara lingkungan bergerak dari atas ke bawah menuju permukaan media tanam. Udara ini kemudian berbelok ke arah sumbu z saat membentur permukaan media tanam dan terus mengalir di sepanjang permukaan tersebut hingga akhirnya udara tersebut kembali bergerak ke atas saat mencapai daerah di dekat dinding bedengan. Pergerakan udara juga terjadi di dalam pori-pori media tanam, walaupun kecepatan alirannya sangat kecil dan tidak sebesar kecepatan aliran udara lingkungan yang berinteraksi dengan media tanam di permukaan sehingga pergerakan udara ini sulit diamati.

Pola pergerakan udara pada Gambar 4 tersebut terjadi karena suhu udara mempengaruhi densitas atau kerapatan udara. Kerapatan udara akan meningkat ketika suhunya menurun, sebaliknya kerapatan udara akan menurun ketika suhunya meningkat. Gaya gravitasi akan menarik udara dengan kerapatan lebih tinggi ke bawah sehingga udara dengan kerapatan lebih rendah akan terdorong ke atas. Hal ini disebut sebagai *bouyancy effect* (Shaw, 1992).

Tabel 3. Laju pindah panas pada sistem *root zone cooling*.

| | Satuan | Nilai |
|----------------------------------|--------------------|---------|
| Suhu air di posisi <i>inlet</i> | °C | 2.600 |
| Suhu air di posisi <i>outlet</i> | °C | 12.650 |
| SLaju aliran massa air | kg s ⁻¹ | 0.349 |
| Laju pindah panas | W | 150.510 |

Tabel 4. Perbandingan suhu media tanam, air, dan dinding pipa pada sistem hidroponik substrat hasil imulasi dan pengukuran.

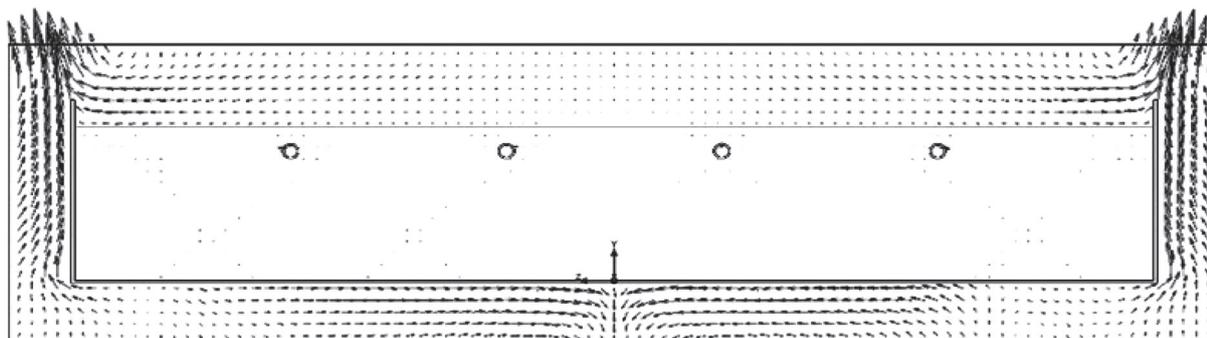
| | PDR minimum % | PDR maksimum % | PDR rata-rata % |
|--------------|---------------|----------------|-----------------|
| Media tanam | 0.11 | 3.23 | 1.37 |
| Air | 0.00 | 0.10 | 0.04 |
| Dinding pipa | 0.09 | 0.5 | 0.27 |

Berdasarkan Gambar 4 juga diketahui bahwa semakin tinggi suhu suatu udara, semakin cepat pula kecepatan aliran udaranya. Hal ini diindikasikan dengan ukuran vektor kecepatan yang semakin besar ukurannya. Suhu udara adalah ukuran energi kinetik rata-rata dari pergerakan molekul-molekul (Holman, 1997). Sehingga semakin tinggi suhu udara, semakin tinggi pula energi kinetiknya yang menyebabkan udara bergerak semakin cepat.

Air yang didinginkan tidak banyak mengalami peningkatan suhu selama dialirkan di dalam pipa ke daerah perakaran tanaman. Hal ini karena cukup tingginya laju aliran air yang didistribusikan, yaitu 0.349 m s⁻¹. Laju pindah panas pada sistem *root zone cooling* dapat dilihat pada Tabel 3.

Validasi Model Simulasi

Keakuratan model simulasi yang digunakan untuk memprediksi sebaran suhu media tanam pada sistem hidroponik substrat dengan aplikasi pendinginan terbatas daerah perakaran dapat diketahui dengan menghitung nilai persentase deviasi rata-rata (PDR) hasil simulasi terhadap hasil pengukuran. Dari Tabel 4 diketahui bahwa nilai PDR rata-rata hasil simulasi sebaran suhu media



Gambar 4. Pola aliran udara hasil simulasi ($x = 0.000$ m).

Tabel 5. Hasil simulasi dari beberapa skenario modifikasi sistem pendinginan.

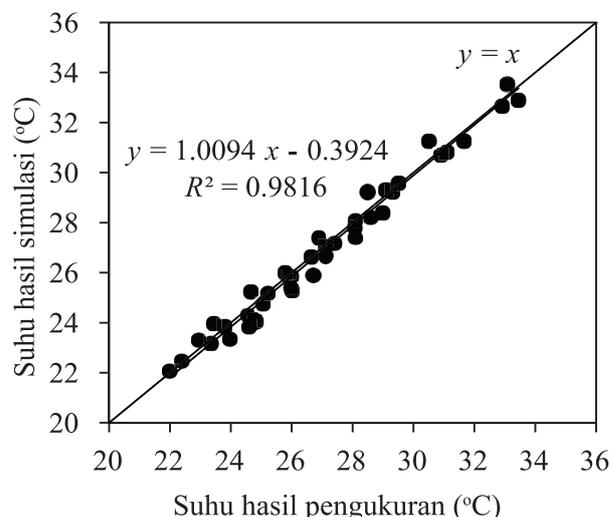
| Skenario input simulasi | $T_{rata-rata}$ °C | T_{in} air °C | T_{ou} air °C | \dot{m} kg s ⁻¹ | \dot{Q} W |
|---|-----------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|----------------|
| Input kondisi batas | 27.375 | 12.600 | 12.630 | 0.349 | 150.510 |
| Laju aliran massa air 0.01 kg s ⁻¹ | 27.934 | 12.600 | 15.061 | 0.010 | 144.626 |
| Laju aliran massa air 0.05 kg s ⁻¹ | 27.454 | 12.600 | 12.879 | 0.050 | 148.997 |
| Laju aliran massa air 0.10 kg s ⁻¹ | 27.414 | 12.600 | 12.740 | 0.100 | 149.588 |
| Laju aliran massa air 0.60 kg s ⁻¹ | 27.308 | 12.600 | 12.625 | 0.600 | 150.682 |
| Suhu air di posisi <i>inlet</i> 10.0 °C | 26.460 | 10.000 | 10.033 | 0.349 | 157.020 |
| Suhu air di posisi <i>inlet</i> 7.5 °C | 25.578 | 7.500 | 7.536 | 0.349 | 163.427 |
| Suhu air di posisi <i>inlet</i> 5.0 °C | 24.706 | 5.000 | 5.042 | 0.349 | 169.321 |
| Dinding bedengan bahan <i>fibrebord</i> | 26.364 | 12.600 | 12.626 | 0.349 | 52.345 |
| Penambahan pipa (dinding akrilik) | 22.499 | | | | 201.309 |
| - Pipa atas | | 12.600 | 12.626 | 0.349 | |
| - Pipa bawah | | 12.600 | 12.640 | 0.349 | |
| Penambahan pipa (dinding <i>fibrebord</i>) | 21.284 | | | | 88.227 |
| - Pipa atas | | 12.600 | 12.644 | 0.349 | |
| - Pipa bawah | | 12.600 | 12.655 | 0.349 | |

tanam sebesar 1.37% dan maksimum sebesar 3.23%. Nilai PDR rata-rata dan maksimum yang diperoleh ini lebih rendah jika dibandingkan dengan yang diperoleh Sumarni (2013) yang menggunakan CFD untuk memprediksi sebaran suhu di dalam *aeroponics chamber*, yaitu PDR rata-rata sebesar 2.89% dan maksimum sebesar 5.89%, dan Yani (2014) yang menggunakan CFD untuk memprediksi sebaran suhu di dalam kandang ayam broiler sistem tertutup, yaitu PDR rata-rata sebesar 6.94% dan maksimum sebesar 11.74%.

Validasi model simulasi dilakukan dengan menggunakan metode analisis regresi linear. Analisis regresi linear dilakukan dengan membandingkan suhu hasil simulasi dengan pengukuran. Hasil analisis regresi linier yang disajikan pada Gambar 5 menunjukkan nilai gradien sebesar 1.0094 dan nilai koefisien intersep sebesar 0.3924. Simulasi semakin baik jika nilai gradien dari persamaan regresi linear tersebut mendekati satu dan intersepnya mendekati nol karena hal ini berarti nilai y (suhu media tanam hasil simulasi) semakin mendekati nilai x (suhu media tanam hasil pengukuran). Koefisien determinasi (R^2) menunjukkan tingkat keceratan korelasi antara suhu media tanam hasil simulasi dengan hasil pengukuran. Nilai dari koefisien determinasi (R^2) semakin baik jika nilainya mendekati 1. Nilai koefisien determinasi pada analisis regresi linear ini adalah sebesar 0.9816 sehingga suhu media tanam hasil simulasi dan hasil pengukuran memiliki tingkat keceratan korelasi yang cukup tinggi.

Nilai PDR yang cukup rendah dan hasil analisis regresi linear yang cukup baik menunjukkan bahwa pendefinisian sistem hidroponik substrat dengan aplikasi *root zone cooling* pada simulasi

menggunakan CFD sudah cukup baik. Dengan demikian, model simulasi sudah mampu menggambarkan kondisi sistem hidroponik substrat dengan aplikasi *root zone cooling* yang sesungguhnya dan dapat digunakan untuk simulasi sebaran suhu yang dapat membantu dalam proses desain, evaluasi, atau perbaikan rancangan sistem pendinginan. Pada Tabel 5 dapat dilihat hasil simulasi dengan beberapa input skenario untuk melihat efek dari perubahan laju aliran air, suhu air di posisi *inlet*, dinding bedengan, dan penambahan pipa pada sistem pendinginan terhadap rata-rata suhu media tanam dan laju pindah panas.



Gambar 5. Hubungan linear antara suhu media tanam hasil simulasi dan pengukuran.

Simpulan

Perbandingan antara suhu media tanam dan hasil simulasi dengan metode analisis regresi linier menghasilkan persamaan regresi linier dengan gradien sebesar 1.009, intersep sebesar 0.392, dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.982. Nilai PDR rata-rata suhu media tanam pada bedengan hasil simulasi terhadap hasil pengukuran adalah 1.37% dengan PDR maksimum sebesar 3.23%. Hal tersebut menunjukkan bahwa pendefinisian sistem pendinginan terbatas daerah perakaran pada simulasi sudah cukup baik dan dapat menggambarkan kondisi suhu media tanam pada saat pengukuran. Hasil simulasi dapat digunakan untuk mengevaluasi sistem hidroponik substrat dengan pendinginan terbatas daerah perakaran. Beberapa hal yang perlu diperhatikan pada sistem hidroponik substrat dengan pendinginan terbatas yang telah dibangun untuk penelitian ini adalah tingginya suhu media tanam yang berdekatan dengan dinding bedengan dan tingginya ketidakseragaman sebaran suhu media tanam ke arah sumbu y dan z. Pindah panas yang terjadi di antara dinding luar pipa dan media tanam lebih banyak terjadi secara konduksi. Pindah panas secara konveksi juga terjadi yang dapat dilihat dari adanya aliran udara yang mengisi pori-pori media tanam.

Daftar Pustaka

- Arif, C., Y.A. Purwanto, H. Suhardiyanto dan Y. Chadirin. 2010. Aplikasi jaringan syaraf tiruan (JST) untuk pendugaan suhu larutan nutrisi yang disirkulasikan dan didinginkan siang-malam pada tanaman tomat hidroponik. *Jurnal Keteknik Pertanian* Vol. 24(2): 115-120.
- Cengel, Y.A. and R.H. Turner. 2011. *Fundamentals of Thermal Fluid Sciences*. McGraw-Hill Company, Inc. New York
- Choerunnisa, N. dan H. Suhardiyanto. 2015. Analisis pindah panas pada pipa utama sistem hidroponik dengan pendinginan larutan nutrisi. *Jurnal Keteknik Pertanian* Vol.3 (1): 1-9.
- Chang, D.C., J.C. Jeong and Y.B. Lee. 2006. Effect of root zone cooling on growth responses and tuberization of hydroponically grown 'superior' potato (*Solanum tuberosum*) in summer. *Journal of Bio-Environment Control*. 15(4): 340-345.
- He, J. and S.K. Lee. 1998. Growth and photosynthetic characteristics of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown under fluctuating hot ambient temperatures with the manipulation of cool rootzone temperature. *Journal of Plant Physiology*. Vol 152: 387-391.
- Muro, J.V.D.G. and C. Lamsfus. 1997. Comparison of hydroponics culture in a peat/sand mixture and the influence of nutrient solution and plant density on seed potato yields. *Potato Research* Vol. 40(4): 431-440.
- Pek, Z. and L. Hayles. 2004. The effect of daily temperature on truss flowering rate of ornamental crops. *J. Sci Food Agriculture* Vol. 84(13):1671-1674.
- Holman, J.P. 1997. *Perpindahan Kalor*. Edisi ke-6. Diterjemahkan oleh Jasjfi. Penerbit Erlangga. Jakarta.
- Shaw, C.T. 1992. *Using Computational Fluid Dynamics*. Prentice Hall. New York.
- Suhardiyanto, H. dan L. Pujiyanto. 2013. Studi pendinginan daerah perakaran pada sistem hidroponik substrat untuk produksi benih kentang di dataran rendah tropika. (Laporan akhir penelitian). Bogor.
- Suhardiyanto, H., M.M. Fuadi dan Y. Widaningrum. 2007. Analisis pindah panas pada pendinginan dalam tanah untuk sistem hidroponik. *Jurnal Keteknik Pertanian* Vol. 21(4): 355-362.
- Sumarni, E. 2013. Pengembangan *zone cooling system* untuk produksi benih kentang secara aeroponik di dataran rendah tropika basah. (Disertasi). Pascasarjana, IPB. Bogor.
- Sumarni, E., H. Suhardiyanto, K.B. Seminar dan S.K. Saptomo. 2013. Temperature distribution in aeroponics system with root zone cooling for the production of potato seed in tropical lowland. *International Journal of Scientific Engineering and Research* Vol. 4(6): 799-804.
- Sumartono, G.H.dan E. Sumarni. 2013. Pengaruh suhu media tanam terhadap pertumbuhan vegetatif kentang hidroponik di dataran medium tropika basah. *Agronomika* Vol. 13(1). ISSN: 1411-8297.
- Versteeg, H.K. dan W. Malalasekera. 2011. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Longman Group Ltd. England.
- Yani, A. 2014. *Pemodelan pindah panas pada budidaya ayam broiler menggunakan kandang sistem tertutup di daerah beriklim tropika basah*. (Disertasi). Pascasarjana, IPB. Bogor.