

jTEP

JURNAL KETEKNIKAN PERTANIAN

ISSN 0216-3365

Vol. 22, No. 1, April 2008



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



Jurnal Keteknikan Pertanian merupakan publikasi resmi Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (**PERTETA**) yang didirikan 10 Agustus 1968 di Bogor, berkiprah dalam pengembangan ilmu keteknikan untuk pertanian tropika dan lingkungan hayati. Jurnal ini diterbitkan tiga kali setahun, namun untuk meningkatkan kualitas jurnal maka mulai edisi April 2008 diterbitkan dua kali setahun. Penulis makalah tidak dibatasi pada anggota **PERTETA** tetapi terbuka bagi masyarakat umum. Lingkup makalah, antara lain: teknik sumberdaya lahan dan air, alat dan mesin budidaya, lingkungan dan bangunan, energi alternatif dan elektrifikasi, ergonomika dan elektronika, teknik pengolahan pangan dan hasil pertanian, manajemen dan sistem informasi. 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. Pengiriman makalah harus mengikuti panduan penulisan yang tertera pada halaman akhir atau menghubungi redaksi via telpon, faksimili atau e-mail. Makalah dapat dikirimkan langsung atau via pos dengan menyertakan hard- dan soft-softcopy, atau e-mail. Penulis tidak dikenai biaya penerbitan, akan tetapi untuk memperoleh satu eksemplar dan 10 re-prints dikenai biaya sebesar Rp 50.000. Harga langganan Rp 70.000 per volume (2 nomor), harga satuan Rp 40.000 per nomor. Pemesanan dapat dilakukan melalui e-mail, pos atau langsung ke sekretariat. Formulir pemesanan terdapat pada halaman akhir.

Penanggungjawab:

Ketua Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia
Ketua Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB

Dewan Redaksi:

Ketua : Asep Sapei
Anggota : Kudang B. Seminar
Daniel Saputra
Bambang Purwantana
Y. Aris Purwanto

Redaksi Pelaksana:

Ketua : Rokhani Hasbullah
Sekretaris : Satyanto K. Saptomo
Bendahara : Emmy Darmawati
Anggota : Usman Ahmad
I Wayan Astika
M. Faiz Syuaib
Ahmad Mulyawatullah

Penerbit:

Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA) bekerjasama dengan
Departemen Teknik Pertanian, IPB Bogor

Alamat:

Jurnal Keteknikan Pertanian, Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian,
Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680. Telp. 0251-8624691, Fax 0251-8623026,
E-mail: jtep@ipb.ac.id atau jurnaltep@yahoo.com. Website: ipb.ac.id/~jtep.

Rekening:

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

Percetakan:

PT. Binakerta Adiputra, Jakarta

Ucapan Terima Kasih

Redaksi Jurnal Keteknikan Pertanian mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bestari yang telah menelaah (mereview) naskah pada penerbitan Vol. 22 No. 1 April 2008. Ucapan terima kasih disampaikan kepada Dr. Ir. Bambang Dwi Argo, DEA (Departemen Teknik Pertanian, Universitas Brawijaya Malang), Dr. Ir. Rokhani Hasbullah, M.Si (Departemen Teknik Pertanian IPB), Dr. Ir. Usman Ahmad, M. Agr (Departemen Teknik Pertanian IPB), Dr. Ir. Leopold Oscar Nelwan, M.Si (Departemen Teknik Pertanian IPB), Dr. Ir. Sutrisno, M. Agr (Departemen Teknik Pertanian IPB), Prof. Dr. H. M. Ade Moetangad Kramadibrata, Dipl. Ing., M. Res. Eng. Sc., PhD. (Fakultas Teknologi Industri Pertanian Unpad), Dr. Ir. M. Yanuar J. Purwanto, MS (Departemen Teknik Pertanian IPB).

Technical Paper

Pendekatan Analitik untuk Menduga Koefisien Pindah Panas Konveksi**Analytical Approach in Estimating Convective Heat Transfer Coefficient**

Ida Bagus Putu Gunadnya¹, Kamaruddin Abdullah², Armansyah H. Tambunan³, Y. Aris Purwanto⁴, M.A.M. Oktaufik⁵, dan Leopold Oscar Nelwan⁶

Abstract

Convective heat transfer coefficient has an important role in thermal processes. It is commonly determined and formulated using empirical models, while some workers have also proposed formulas based on analytical methods. This paper describes the formulation of convective heat transfer coefficient using an analytical approach which could be expressed as $h = 5.277V^{0.5}$.

Keywords: convective heat transfer coefficient, analytical approach

Diterima: 11 Juni 2007; Disetujui: 24 September 2007

Pendahuluan

Pindah panas secara konveksi merupakan salah satu cara perpindahan panas yang penting didalam proses termal. Pindah panas secara konveksi umumnya terjadi antara fluida dengan permukaan suatu benda. Pindah panas jenis ini lebih sulit dianalisis dibandingkan dengan pindah panas secara konduksi karena tidak ada satu sifat medium pindah panas, seperti konduktivitas termal, yang dapat menerangkan mekanismenya. Oleh karena itu, koefisien dari pindah panas konveksi hanya bisa diduga nilainya dan ditentukan secara empiris dengan pengamatan langsung. Koefisien ini bergantung pada faktor-faktor diantaranya: Kecepatan fluida, kekentalan fluida, fluks panas dan sifat permukaan. Secara umum, koefisien pindah panas konveksi untuk aliran laminar relatif lebih rendah daripada untuk aliran turbulen.

Kehilangan atau tambahan panas pada suatu permukaan karena aliran fluida di permukaan suatu benda disebut sebagai kehilangan panas atau tambahan panas secara konveksi. Peneliti-peneliti terdahulu sudah banyak membuat dan mengembangkan hubungan antara nilai koefisien pindah panas konveksi (h) dengan kecepatan fluida (V). Secara umum, h dinyatakan sebagai fungsi dari V , $h = f(V)$. Nilai h yang didekati dari hasil pengukuran pada permukaan suatu bidang datar atau benda disebut sebagai pendekatan empiris. Banyak peneliti

kemudian menggunakan persamaan-persamaan empiris yang sudah ada untuk mendesain, mengevaluasi, menguji unjuk kerja dan melakukan simulasi serta optimisasi suatu sistem termal tanpa melakukan pengukuran h secara langsung. Tetapi, beberapa peneliti membuat persamaan empiris dari data hasil penelitiannya.

Perbedaan suhu antara angin yang bergerak diatas permukaan suatu bidang datar dengan permukaan bidang datar itu akan menyebabkan adanya pindah panas secara konveksi. Secara teori, interaksi antara fluida yang bergerak dengan permukaan suatu benda akan membentuk lapisan batas yang berupa lapisan batas termal yang terjadi karena perbedaan suhu. Selain itu, terbentuk pula lapisan batas kecepatan yang disebabkan adanya gesekan antara permukaan dengan fluida karena kekentalan fluida. Kombinasi kedua lapisan ini mengatur pindah panas konveksi yang terjadi. Pendugaan nilai h yang didasarkan pada analisis pada kedua lapisan yang diturunkan secara analitik dengan persamaan matematik disebut sebagai pendugaan dengan pendekatan analitik.

Didalam paper ini akan dibahas tentang kemungkinan pendekatan analitik dapat menjelaskan persamaan-persamaan empiris yang dibangun dari hubungan h dengan V . Akan dibahas pula pendugaan nilai h dari data hasil percobaan dengan menggunakan pendekatan kesetimbangan energi dan pendekatan analitik. Selanjutnya, nilai h hasil

¹ Mahasiswa Program Doktor, Ilmu Keteknikan Pertanian, Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor.

² Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali. Email:

³ Guru Besar Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Email: kamaruddinbogar@yahoo.com

⁴ Staf Pengajar Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor.

⁵ Staf Pengajar Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor.

⁶ Staf Peneliti Balai Besar Teknologi Energi (B2TE)-BPPT Serpong, Tangerang, Jawa Barat

⁷ Staf Pengajar Departemen Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor.

pendugaan dengan pendekatan analitik dan empiris akan dibandingkan dengan nilai h hasil pengukuran (h -ukur) untuk mengetahui besar penyimpangan nilai h hasil pendugaan terhadap h -ukur. Dengan cara ini ingin diketahui apakah persamaan analitik dapat disarankan untuk digunakan dalam menduga nilai h -ukur.

Tinjauan Pustaka

Persamaan Empiris Penduga h dan Penggunaannya

Persamaan empiris yang berupa persamaan linier yang diturunkan oleh Watmuff et al. (Duffie dan Beckman, 1980) untuk benda berupa lempengan dengan luas 0.5 m^2 , adalah

$$h = 2.8 + 3.0V \quad (1)$$

Persamaan ini digunakan oleh Tang dan Etzion (2004) untuk mengukur unjuk kerja kolam atap dari suatu bangunan. Demikian pula Ho et al. (2005) menggunakannya untuk menghitung pindah panas dari pemanas surya, sedangkan Abu-Hamdeh (2003) memanfaatkannya untuk kajian simulasi pemanas surya. Chow et al. (2006) dalam menganalisis bangunan berventilasi surya juga menggunakan persamaan ini.

Dalam mengkaji beban panas bangunan, Parker (2005) menggunakan persamaan empiris linier yang disarankan oleh Burch dan Luna sebagai berikut

$$h = 2.8 + 4.8V \quad (2)$$

Lunde (1980) juga mengajukan persamaan empiris linier untuk menduga nilai h untuk permukaan datar dengan persamaan:

$$h = 4.5 + 2.9V \quad (3)$$

Untuk melakukan pemodelan cerobong surya, Ong dan Chow (2003) menggunakan persamaan empiris linier yang diajukan oleh McAdams (Duffie dan Beckman, 1980). Ong (2003) dan Pretorius dan Kröger (2006) menggunakan persamaan yang sama untuk menguji unjuk kerja cerobong surya. Abdel-Rehim dan Lasheen (2005) juga menggunakan persamaan yang sama untuk menentukan unjuk kerja desalinasi surya. Persamaan ini juga digunakan oleh Kurt et al. (2000) dalam membuat kajian kolam surya. Persamaan empiris linier McAdams (Duffie dan Beckman, 1980), seperti dinyatakan dibawah ini, semula dibuat untuk menduga nilai h untuk lempengan dengan luas 0.5 m^2 . Tetapi Suhardiyanto et al. (2007) memilih persamaan ini dalam pengembangan model pindah panas untuk rumah kaca.

$$h = 5.7 + 3.8V \quad (4)$$

Sebagaimana diuraikan diatas, penggunaan persamaan empiris tersebut tidak dibatasi dengan kecepatan angin. Tetapi menurut Trinuyuk et al. (-), persamaan empiris (1) hanya berlaku dalam kisaran kecepatan angin $0 - 7 \text{ m/s}$ bila digunakan untuk menguji unjuk kerja fotovoltaik. Demikian pula dengan persamaan empiris linier yang dilaporkan oleh Clark dan Berdahl $h = 2.8 + 0.76V$ berlaku pada kecepatan angin $1.5 - 5 \text{ m/s}$ untuk pendugaan h pada permukaan radiator (Dimoudi dan Anroutsopoulos, 2006). Juga persamaan empiris liniernya, $h = 1.8 + 3.8V$, berlaku pada kisaran kecepatan angin $1.25 - 4.5 \text{ m/s}$ untuk pendugaan nilai h pada permukaan bangunan (Erell dan Etzion, 2000). Penggunaan persamaan empiris $h = 2.8 + 3.0V$ juga dibatasi pada kisaran kecepatan angin $0 \leq V \leq 7 \text{ m/s}$ oleh Timoumi et al. (2004) bila persamaan ini digunakan untuk pemodelan kolektor lempeng datar berenergi surya.

Ada pula peneliti yang menggunakan persamaan empiris linier dan pangkat secara bersama-sama dengan pembatasan kecepatan angin. Sebagai contoh Bentz (2000) dalam mengkaji pindah panas pada permukaan beton menggunakan persamaan empiris linier dan pangkat FEMMASSE berikut ini

$$\begin{aligned} h &= 5.6 + 4.0V \quad (V \leq 5 \text{ m/s}) \quad \text{dan} \quad (5) \\ h &= 7.2V^{0.78} \quad (V > 5 \text{ m/s}) \end{aligned}$$

Disamping hubungan linier, beberapa peneliti mengajukan hubungan tidak linier seperti pangkat dan bentuk hubungan yang lebih kompleks. Duffie dan Beckman (1980) menyarankan pendugaan nilai h untuk konveksi paksa pada permukaan bangunan dengan menggunakan persamaan $h = 8.6V^{0.6}/L^{0.4}$ dimana L adalah akar pangkat tiga dari volume bangunan.

ASHRAE (Loveday dan Taki, 1996) menganjurkan penggunaan persamaan berpangkat $h = 18.6V^{0.605}$ untuk menduga nilai h pada permukaan bangunan. Li dan Lam (2000) dalam perhitungan beban panas surya memanfaatkan persamaan yang diajukan oleh Loveday dan Taki (1996).

Pendugaan Nilai h dengan Pendekatan Analitik

Buiar dan Moura (2004) membuat pendekatan analitik dalam menduga nilai h dengan didasarkan pada hukum pendinginan Newton. Lebih lanjut mereka melaporkan bahwa perbedaan antara hasil pendekatan analitik dengan hasil percobaan sangat kecil dan kecenderungan dari kedua nilai adalah sama. Zhai dan Chen (2004) membuat pendekatan analitik untuk menduga nilai h dengan berdasarkan pada lapisan batas kecepatan. Disebutkan bahwa ketebalan lapisan batas kecepatan (δ) merupakan kebalikan dari bilangan Reynolds.

$$\delta = 4.92x / \sqrt{\text{Re}_x}$$

persamaan ini mirip dengan persamaan (A4) didalam Lampiran A. Pendekatan analitik juga dilakukan oleh Khan et al. (2006) dalam menghitung pindah panas

konveksi pada rangkunan pipa tabung. Khan et al. (2006) mengembangkan model yang dapat diterapkan pada rangkunan tabung dengan susunan pipa satu garis sejajar atau selang-seling pada nilai bilangan Reynolds dan Prandtl dengan kisaran luas.

Pendugaan Nilai h dari Data Hasil Percobaan

Hagishima dan Tanimoto (2003) menurunkan persamaan linier dari data hasil percobaannya. Hubungan yang diperoleh berdasarkan pada analisis regresi terhadap diagram serak adalah

$$h = 8.18 + 2.28V \tag{6}$$

Clear et al. (2003) melaporkan bahwa dari diagram serak diketahui nilai h merupakan fungsi dari kecepatan angin dengan hubungan linier. Tetapi Loveday dan Taki (1996) dalam menduga nilai h memperoleh persamaan:

$$h = 16.21V^{0.452} \tag{7}$$

Nilai h dapat pula diukur berdasarkan pada kesetimbangan massa dan energi. Rahman dan Kumar (2006) menggunakan cara ini dalam menduga nilai h untuk pengeringan bahan-bahan yang mengkerut. Clearet al. (2003) menggunakan kesetimbangan energi dalam menduga nilai h dengan mempertimbangkan panas radiasi.

Bahan dan Metode

Pendugaan Nilai h Menggunakan Persamaan Analitik untuk Permukaan Bidang Datar

Persamaan penduga untuk nilai koefisien pindah panas konveksi h diturunkan dengan pendekatan analitik seperti terlihat didalam Lampiran A (persamaan A11) adalah:

$$h = 0.664(k/L)(V/\alpha)^{1/3} (VL/V)^{1/2} \tag{8}$$

Pengukuran Nilai h

Berdasarkan pada analisis kesetimbangan energi (Lampiran B) diperoleh nilai h dari data hasil percobaan dengan menggunakan persamaan (B3)

$$h = \frac{m_w c_{pw} dT_w/dt - \epsilon \alpha A (T_w^4 - T_s^4)}{A [(T_a - T_w) + (1/c_{pm}) (H_i - H_a) h_{fg}]} \tag{9}$$

Hasil pendugaan nilai koefisien pindah panas konveksi h ini disebut sebagai h -ukur. Dari persamaan (9) terdapat satu variabel lain yang tidak dapat diukur secara langsung yaitu suhu langit (T_s). Oleh karena itu, dilakukan pendugaan suhu langit dengan menggunakan persamaan empiris yang sudah ada.

Suhu langit (T_s) diduga menggunakan persamaan Idso-Jackson yang sudah dimodifikasi oleh Exell (1979) untuk lingkungan tropis. Persamaan yang sudah dimodifikasi ini sudah digunakan dan dilaporkan

hasilnya oleh Trisasiwi (2000).

$$L = L_0 + (\sigma T_a^4 - L_0) kn^{1.4} \tag{10}$$

$$L_0/\sigma T_a^4 = 1 - 0.261 \exp[-0.000777(273 - T_a)^2]$$

L adalah panas radiasi pada saat langit berawan dan L_0 panas radiasi saat langit cerah, k faktor yang tergantung pada jenis dan ketinggian awan serta n adalah jumlah awan atau sering pula disebut sebagai tingkat ketertutupan langit oleh awan ($n = 0$ langit cerah dan $n = 1$ langit tertutup sepenuhnya).

Percobaan

Kolam dangkal sebagai tempat air dibuat dari papan tripleks dengan tebal 0.004 m dengan pinggiran balok kayu berukuran 0.01x 0.02 m. Kolam dangkal dibuat berukuran 0.55 x 0.55 m dengan kedalaman kolam 0.01 m. Kolam dan pinggirannya dilapisi dengan kertas aluminium foil.

Percobaan dilakukan di Denpasar sebanyak lima kali dengan dua kali tahapan percobaan. Pada tahap I dilakukan tiga kali percobaan pada tanggal 1 sampai dengan 4 September 2007 dan pada tahap II sebanyak dua kali percobaan yang dilakukan pada tanggal 10 sampai dengan 12 September 2007. Percobaan dilakukan sepanjang malam hari, mulai jam 18:00 sampai dengan 06:00 WITA.

Pada percobaan tahap I kolam diisi dengan air sampai kedalaman air rata-rata 0.0065 m dan pada tahap II kedalaman air rata-rata 0.0099 m dan permukaan air di dalam kolam dianggap sebagai permukaan bidang datar. Pengukuran yang dilakukan meliputi: Pengukuran suhu bola kering dan suhu bola basah udara lingkungan, suhu air di dalam kolam dan kecepatan angin. Sensor suhu untuk pengukuran suhu lingkungan diletakkan di sekitar kolam, sedangkan sensor suhu untuk mengukur suhu air di dalam kolam dimasukkan kedalam air pada salah satu sudut kolam. Pengukuran kecepatan angin dilakukan pada jarak 20 cm diatas bagian tengah kolam. Pengamatan yang dilakukan adalah kondisi langit dengan menggolongkan keadaan langit sebagai berikut: Cerah, berawan tinggi, berawan sedang dan mendung. Pengamatan terhadap ketertutupan langit tidak dilakukan.

Pengukuran suhu menggunakan termometer digital dan kecepatan angin menggunakan anemometer dengan prinsip kerja kawat panas. Pengukuran suhu, kecepatan angin dan pengamatan lainnya dilakukan setiap 20 menit. Alat-alat ukur yang digunakan dikalibrasi dengan menggunakan termometer air raksa dan anemometer standar Climomaster Model A541 Kanomax Jepang. Karena pengamatan terhadap ketertutupan langit oleh awan tidak dapat dilakukan, maka n pada persamaan (10) diasumsikan bernilai 1 yang berarti bahwa langit dianggap tertutup sepenuhnya oleh awan atau mendung. Analisis yang dilakukan terhadap data hasil percobaan berupa analisis regresi dan akar rata-rata kesalahan kuadrat (RMSE).

Hasil dan Pembahasan

Hubungan antara Persamaan h dengan Pendekatan Empiris dan Analitik

Berdasarkan uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa persamaan-persamaan empiris untuk menduga nilai h memiliki bentuk hubungan $h = a + bV^c$, $h = aV^b/L^c$ dan $h = aV^b$ atau dengan bentuk umum $h = f(V)$. Koefisien-koefisien persamaan (a , b dan c) diperoleh dari analisis regresi nilai h hasil perhitungan dengan nilai V hasil pengukuran.

Bila persamaan (8) yang merupakan persamaan hasil pendekatan analitik diatur lebih lanjut, diperoleh bentuk umum yang sama yaitu $h = aV^b$ dengan nilai koefisien-koefisien seperti terlihat di bawah ini:

$$a = 0.664(k/L)(v/\alpha)^{1/3} (L/v)^{1/2} \quad (11)$$

$$b = 1/2$$

Dari kenyataan ini dapat disimpulkan bahwa persamaan empiris sebagai penduga nilai h , seperti diajukan oleh peneliti-peneliti tersebut di atas, dapat dijelaskan dengan menggunakan pendekatan analitik.

Pendugaan Nilai h dengan Pendekatan Analitik

Pendugaan nilai h dilakukan dengan menghitung k , v , α sebagai fungsi dari suhu udara lingkungan hasil pengukuran dan dengan nilai $L = 0.55$ m. Koefisien α dapat dihitung dari persamaan (11) dan diperoleh nilai koefisien a rata-rata sebesar 5.277, sehingga diperoleh persamaan analitik penduga nilai h sebagai berikut:

$$h = 5.277V^{1/2} \quad (12)$$

Pendugaan Nilai h dengan Percobaan

Nilai h -ukur rata-rata yang diperoleh adalah 7.57 $W/m^{20}C$ dengan simpangan baku 3.11 $W/m^{20}C$ pada kisaran kecepatan angin hasil pengukuran 0.17 – 3.06 m/s. Untuk analisis lebih lanjut, dibuat gambar hubungan antara nilai h -ukur dengan kecepatan angin hasil pengukuran (V) seperti terlihat didalam Gambar

1. Selanjutnya persamaan empiris yang dibangun didasarkan pada persamaan analitik yaitu dalam bentuk $h = aV^b$. Analisis regresi menghasilkan persamaan berikut ini

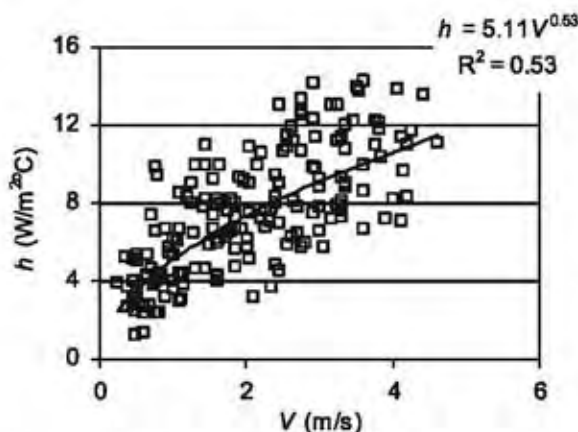
$$h = 5.108V^{0.53} \quad (13)$$

Perbandingan antara nilai koefisien-koefisien pada persamaan (12) dan (13), terlihat bahwa nilai koefisien a dan b dari kedua persamaan regresi ini tidak jauh berbeda. Nilai koefisien a adalah 5.277 dan 5.108 masing-masing untuk pendekatan analitik dan percobaan, sedangkan koefisien b 0.5 dan 0.53. Akan tetapi nilai koefisien korelasi dari persamaan (13) hanya 0.53. Hal ini menunjukkan bahwa data hasil pengukuran kecepatan angin hanya dapat menjelaskan separuh dari nilai-nilai h -ukur.

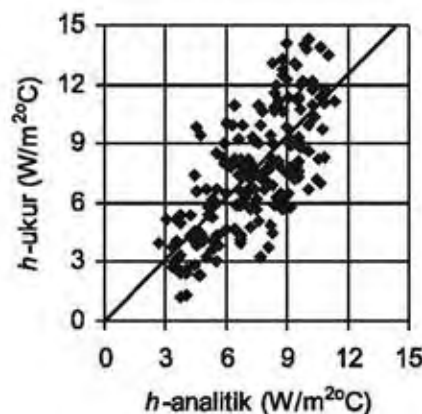
Perbandingan antara Nilai h Hasil Percobaan, Pendekatan Analitik dan Empiris

Untuk melihat hubungan antara nilai pendugaan h hasil percobaan (h -ukur) dengan pendugaan h hasil pendekatan analitik (h -analitik), dibuat gambar hubungan antara kedua nilai pendugaan ini seperti terlihat dalam Gambar 2. Dari analisis regresi diketahui hubungan kedua variabel ini mengikuti persamaan linier h -ukur = 0.022 + 1.037 h -analitik. Hubungan yang diharapkan dari kedua variabel ini adalah h -ukur = h -analitik. Bila diperhatikan nilai koefisien-koefisien yang dihasilkan dari analisis regresi terlihat bahwa nilai perpotongan kurva (0.022) hampir mendekati nol dan kemiringan kurva (1.037) mendekati nilai satu.

Walaupun demikian, dari diagram serak (Gambar 2) terlihat bahwa nilai h -ukur menyebar disepanjang garis regresi yang mengindikasikan bahwa keragaman nilai h -ukur cukup tinggi. Analisis data lebih lanjut menunjukkan bahwa nilai simpangan baku dari nilai h -ukur adalah 3.11 $W/m^{20}C$ dengan nilai tengah 7.59 $W/m^{20}C$. Hasil analisis seperti ini mungkin berkaitan dengan ketepatan dalam pendugaan suhu langit (T_s). Dari persamaan



Gambar 1. Hubungan nilai koefisien pindah panas konveksi dengan kecepatan angin.



Gambar 2. Diagram serak dari hubungan h -ukur dengan h -analitik.

Tabel 1. Perbandingan antara nilai h -ukur dengan h hasil pendekatan analitik dan empiris

No	Persamaan	Sumber persamaan	h rata-rata	RMSE
1.	$h = 5.277 V^{0.5}$	Analitik (percobaan ini)	7.32	2.15
2.	$h = 5.107 V^{0.53}$	Empiris (percobaan ini)	7.24	2.14
3.	$h = 2.8 + 3.0 V$	Duffie dan Beckman (1980)	7.68	3.38
4.	$h = 2.8 + 4.8 V$	Parker (2005)	10.61	6.28
5.	$h = 4.5 + 2.9 V$	Lunde (1980)	9.22	3.67
6.	$h = 5.7 + 3.8 V$	Duffie dan Beckman (1980)	11.88	6.04
7.	$h = 8.18 + 2.28 V$	Hagishima dan Tanimoto (2003)	11.89	5.09
8.	$h = 5.6 + 4.0 V, (V \leq 5 \text{ m/s})$ $h = 7.2 V^{0.78}, (V > 5 \text{ m/s})$	Bentz (2000)	12.11	6.37
9.	$h = 16.21 V^{0.452}$	Loveday dan Taki (1996)	17.51	12.52

RMSE = Akar rata-rata kesalahan kuadrat.

kesetimbangan energi diketahui bila pendugaan T_s tidak tepat akan menyebabkan nilai panas radiasi (Q_{rad}) akan tidak tepat pula. Ketidaktepatan nilai Q_{rad} akan menyebabkan jumlah panas sensibel (Q_s) dan panas laten (Q_L) akan tidak tepat (persamaan B1 dalam Lampiran B). Pada saat hasil pendugaan T_s bernilai terlalu tinggi akan menyebabkan nilai Q_{rad} kecil yang mengakibatkan Q_s dan Q_L bernilai besar, pada nilai panas total (Q_{tot}) yang sama. Q_s dan Q_L yang bernilai besar menghasilkan nilai dugaan h yang besar. Demikian pula akan terjadi hal yang sebaliknya.

Ketidaktepatan pendugaan T_s disebabkan oleh ketidakmampuan dalam menentukan tingkat ketertutupan langit oleh awan (n). Persamaan T_s hasil modifikasi Exell (1979) mensyaratkan adanya nilai n . Selama percobaan dilakukan, n tidak diamati karena sulit untuk ditentukan secara kuantitatif. Dari kajian Goforth et al. (2002) tentang pengaruh awan, termasuk kajian tentang nilai n , dapat disimpulkan bahwa pengkajian tentang awan sulit dan kompleks. Dalam perhitungannya, n diasumsikan bernilai 1 dan penyederhanaan ini mungkin menyebabkan hasil pendugaan suhu langit kurang tepat.

Perbandingan antara nilai h -ukur rata-rata dengan nilai hasil pendekatan analitik dan empiris disajikan didalam Tabel 1. Dari tabel dapat dilihat bahwa nilai h rata-rata dari hasil pendugaan secara analitik (persamaan 1), hasil analisis regresi data hasil percobaan (persamaan 2) dan persamaan empiris (3) hampir sama dengan nilai h -ukur rata-rata yang besarnya 7.57 W/m²C. Lebih lanjut dapat pula dilihat bahwa nilai akar rata-rata kesalahan kuadrat (RMSE)

dari ketiga persamaan ini berturut-turut 2.15, 2.14 dan 3.38. Nilai RMSE persamaan (3) lebih besar bila dibandingkan dengan persamaan (1) dan (2), sedangkan nilai RMSE persamaan (1) dan (2) hampir sama. Hal ini menjelaskan bahwa pendugaan nilai h hasil percobaan dapat didekati dengan menggunakan pendekatan analitik.

Tabel 1 juga memperlihatkan bahwa nilai h hasil pendekatan analitik dan empiris pada percobaan ini lebih baik dalam menduga h -ukur jika dibandingkan dengan hasil pendekatan dengan menggunakan persamaan empiris lainnya (persamaan 4 sampai dengan 9 dalam Tabel 1). Nilai h rata-rata dari persamaan empiris yang lain memberikan nilai RMSE yang lebih besar. Dari ketujuh persamaan yang dibandingkan (persamaan 3 sampai dengan 9 dalam Tabel 1) hanya persamaan (8) yang mensyaratkan kecepatan angin yaitu lebih kecil atau sama dengan 5 m/s atau lebih besar dari 5 m/s. Rata-rata hasil pengukuran kecepatan angin selama percobaan adalah 2.1 m/s yang berarti masih memenuhi syarat penggunaan persamaan (8), tetapi nilai RMSE dari persamaan ini lebih besar daripada persamaan (1), (2) dan (3) dalam Tabel 1. Oleh karena itu dalam menduga nilai h pada permukaan kolam air dangkal disarankan menggunakan persamaan analitik.

Kesimpulan

1. Pendekatan analitik dapat menjelaskan hubungan antara koefisien pindah panas konveksi dengan kecepatan angin.
2. Nilai koefisien pindah panas rata-rata dari data hasil pengukuran adalah $7.57 \text{ W/m}^{20}\text{C}$ dengan nilai simpangan baku $3.11 \text{ W/m}^{20}\text{C}$.
3. Pendekatan analitik dapat digunakan untuk menduga nilai koefisien pindah panas konveksi pada permukaan kolam air dangkal dengan persamaan $h = 5.277V^{0.5}$.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasihnya kepada BPPS Dikti dan Program Hibah Tim Pascasarjana Tahun 2005 Dikti Departemen Pendidikan Nasional dengan surat perjanjian nomor 077/D3/N/2005 tertanggal 23 Pebruari 2005, atas bantuan dana penelitian yang sudah diberikan kepada penulis.

Notasi

A	= luas permukaan kontak (m^2)
c_p	= panas jenis ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$)
c_{pm}	= panas jenis udara lembab (J/kgK)
h	= koefisien pindah panas konveksi ($\text{W/m}^{20}\text{C}$)
H	= kelembaban mutlak (kg/kg)
h_D	= konstanta proporsionalitas (kg/m^2)
h_{fg}	= panas laten penguapan (J/kg)
k	= koefisien pindah panas konduksi (W/mK)
L	= panjang (m)
m	= massa (kg)
T	= suhu ($^\circ\text{C}$)
V, u	= kecepatan angin (m/s)

Latin

ε	= emisivitas
σ	= konstanta Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

Subskrit

a, ∞	= udara
i, w	= air
s	= langit
x	= lokal

Daftar Pustaka

Abdel-Rehim, Z.S. dan A. Lasheen. 2005. Improving the performance of solar desalination systems. *Renewable Energy*. 30:1955-1971.

Abu-Hamdeh, N.H. 2003. Simulation study of solar air heater. *Solar Energy*. 74:309-317

Bentz, D.P. 2000. A Computer model to predict the

surface temperature and time-of-wetness of concrete pavement and bridge decks. <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build00/PDF/b00037.pdf> [24 Agustus 2008].

- Buiar, C.L. dan L.M. Moura. 2004. The Sequential Method Apply to Estimate the Convection Heat Transfer Coefficient. Inverse Problems, Design and Optimization Symposium, Rio de Janeiro, Bazil. Maret 2008].
- Chapman, A.J. 1984. Heat Transfer. 4th edition. Mcmillan Pub. Co. New York.
- Chow, T.T. et al. 2006. Use of ventilated solar screen window in warm climate. *Applied Thermal Engineering*. 26:1910-1918.
- Clear, R.D., L. Gartland dan F.C. Winkelmann. 2003. An empirical correlation for the outside convective air-film coefficient for horizontal roofs. *Energy and Buildings*. 35:797-811.
- Dimoudi A. dan A. Androutopoulos. 2006. The cooling performance of a radiator based roof component. *Solar Energy*. 80:1039-1047.
- Duffie, J.A., W.A. Beckman. 1980. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley and Sons. New York.
- Erell, E. dan Y. Etzion. 2000. Radiative cooling of buildings with flat-plate solar collectors. *Building dan Environment*. 35:297-305.
- Exell, R.B.H. 1979. Solar and atmospheric radiation. *Renewable Energy Review J. Vol. 1*, pp 3-20.
- Goforth, M.A., G.W. Gilchrist dan J.D. Sirianni. 2002. Cloud Effects on Thermal Downwelling Sky Radiance. Proc. SPIE, *Thermosense XXIV*, Vol 4710-27:1-11. September 2007]
- Hagishima, A. dan J. Tanimoto. 2003. Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces. *Building dan Environment*. 38:873-881.
- Ho, C.D., H.M. Yeh dan R.C. Wang. 2005. Heat-transfer enhancement in double-pass flat-plate solar air heaters with recycle. *Energy*. 30:2796-2817.
- Holman, J.P. 1997. Heat Transfer. 8th edition. McGraw-Hill Inc. New York.
- Khan, W.A., J.R. Culham dan M.M. Yovanovich. 2006. Analytical model for convection heat transfer from tube banks. *J. Thermophysics and Heat Transfer*. 20:720-727. <http://pdf.aiaa.org/> [16 Maret 2008].
- Kurt, H., F. Halici. dan A.K. Binark. 2000. Solar pond conception – experimental and theoretical studies. *Energi Conversion and Management*. 41:939-951.
- Li, D.H.W. dan J.C. Lam. 2001. Development of solar heat gain factors database using meteorological data. *Building dan Environment*. 36:469-483.
- Lunde, P.J. 1980. Solar Thermal Engineering. John Wiley & Sons. New York.
- Loveday, D.L. dan A.H. Taki. 1996. Convective heat transfer coefficients at a plane surface on a full-scale building facade. *International J. of Heat Mass Transfer*. 39:1729-42

Ong, K.S. 2003. A mathematical model of a solar chimney. *Renewable Energy*. 28:1047-1060.

Ong, K.S. dan C.C. Chow. 2003. Performance of a solar chimney. *Solar Energy*. 74:1-17.

Parker, D.S. 2005. Theoretical Evaluation of the NightCool Nocturnal Radiation Cooling Concept. Agustus 2007].

Pretorius, J.P. dan D.G. Kröger. 2006. Critical evaluation of solar chimney power plant performance. *Solar Energy*. 80:535-544.

Rahman, N. dan S. Kumar. 2006. Evaluation of convective heat transfer coefficient during drying of shrinking bodies. *Energy Conversion and Management*. 47:2591-2601.

Suhardiyo, H., Y. Chadirin, T. Nuryawati dan Y. Romdhonah. 2007. Analisis sudut datang radiasi matahari untuk pengembangan model pindah panas pada rumah kaca di daerah tropis. *J. Keteknikan Pertanian* 21(1): 57-66.

Tang, R. dan Y. Etzion. 2004. On thermal performance of an improved roof pond for cooling buildings. *Building and Environment*. 39:201-209.

Timoumi, S., D. Mihoubi dan F. Zagrouba. 2004. Simulation model for a solar drying process. *Desalination*. 168:111-115.

Trinuruk, P., C. Sorapipatana dan D. Janwittaya. - . Effects of Air Gap Spacing between a Photovoltaic Panel and Building Envelop on Electricity Generation and Heat Gains Through a Building. September 2007].

Trisasiwi, W. 2000. Sistem pendingin radiatif dan menara pendingin menggunakan fluida kerja air di dataran tinggi untuk penyimpanan sayuran [disertasi]. Bogor: Program Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.

Welty, J.R. 1974. Engineering Heat Transfer. John Wiley & Sons. New York.

Zhai, Z. dan Q. Chen. 2004. Numerical determination and treatment of convective heat transfer coefficient in the coupled building energy and CFD simulation. *Building and Environment*. 39:1001-1009.

Lampiran A

Penurunan Persamaan Penduga Nilai *h* dengan Pendekatan Analitik

Welty (1974), Chapman (1984), Holman (1997) dan banyak penulis pustaka pindah panas lainnya membahas tentang pendekatan analitik dari lapisan batas kecepatan dan termal yang terbentuk karena hembusan angin di permukaan suatu benda. Pendekatan analitik yang dilakukan berkaitan dengan sistem aliran konveksi paksa. Dengan menggabungkan antara analisis lapisan batas kecepatan dan lapisan batas termal (seperti terlihat dalam Gambar 1).

Berikut ini ringkasan penurunan persamaan *h* berdasarkan pada pendekatan analitik pada permukaan bidang datar.

Lapisan batas kecepatan. Dari lapisan batas kecepatan diperoleh persamaan

$$\rho \frac{d}{dx} \int_0^\delta (u_\infty - u) u dy = \tau_w = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} \tag{A1}$$

ρ adalah densitas, u_∞ kecepatan dan μ kekentalan. Pendekatan dilakukan berdasarkan kondisi yang harus dipenuhi oleh fungsi kecepatan:

$$u = 0, \text{ pada } y = 0 \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \text{ pada } y = \delta$$

$$u_\infty = 0, \text{ pada } y = \delta \quad \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0, \text{ pada } y = 0$$

Bila profil kecepatan dapat diketahui maka dengan menggunakan persamaan (A1), ketebalan lapisan batas kecepatan (δ) dapat dihitung. Bila profil kecepatan tidak diketahui maka profil kecepatan dapat didekati dengan fungsi *u* yang paling sederhana

$$u = C_1 + C_2 y + C_3 y^2 + C_4 y^3 \tag{A2}$$

dengan menerapkan empat kondisi tersebut diatas terhadap persamaan (A2) diperoleh

$$\frac{u}{u_\infty} = \frac{3}{2} \frac{y}{\delta} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{\delta} \right)^3 \tag{A3}$$

setelah menyisipkan persamaan (A3) ke dalam persamaan (A1) didapat persamaan yang setelah diintegrasikan menjadi

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{39}{280} \rho u_\infty^2 \delta \right) = \frac{3}{2} \frac{\mu u_\infty}{\delta}$$



Gambar A1. Lapisan batas kecepatan dan termal pada pelat datar.

karena nilai ρ dan u_∞ tetap, variabel dapat dipisahkan untuk mendapat

$$\delta d\delta = \frac{140 \mu}{13 \rho u_\infty} dx = \frac{140 \nu}{13 u_\infty} dx$$

dan $\frac{\delta^2}{2} = \frac{140 \nu x}{13 u_\infty} + c$ pada $x = 0, \delta = 0$

$$\delta = 4.64 \sqrt{\frac{\nu x}{u_\infty}} \text{ atau } \delta = 4.64 x / \sqrt{Re} \quad (A4)$$

Lapisan batas termal. Jika lapisan batas kecepatan didefinisikan sebagai daerah aliran dengan penurunan gaya kekentalan, maka lapisan batas termal bisa didefinisikan sebagai daerah tempat terjadinya gradien suhu dalam aliran fluida. Gradien suhu ini akan menghasilkan proses pindah panas antara fluida dengan dinding. Suhu dinding adalah T_w , suhu fluida diluar lapisan batas termal adalah T_∞ dengan ketebalan lapisan batas termal δ . Pada dinding kecepatan sama dengan nol, dan pindah panas ke dalam fluida terjadi secara konduksi. Jadi fluks panas lokal per satuan luas, q'' , adalah

$$\frac{q}{A} = q'' = -k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_w$$

dan hukum pendinginan Newton: $q'' = h(T_w - T_\infty)$
 h adalah koefisien pindah panas konveksi dan k koefisien pindah panas konduksi. Dengan memadukan kedua persamaan tersebut didapat

$$h = -k(\partial T / \partial y)_w / (T_w - T_\infty) \quad (A5)$$

Untuk menyelesaikan persamaan ini dibutuhkan gradien suhu pada dinding untuk mengevaluasi koefisien pindah panas. Sama seperti analisis momentum pada lapisan batas kecepatan, bila sebaran suhu tidak diketahui maka dapat dilakukan pendekatan yang memenuhi kondisi sbb:
 $T = T_\infty$, pada $y = 0$ $\partial T / \partial y = 0$, pada $y = \delta_t$
 $T = T_\infty$, pada $y = \delta_t$ $\partial^2 T / \partial y^2 = 0$, pada $y = 0$

Kondisi (a) dan (d) mungkin sesuai dengan polinomial kubik seperti pada kasus profil kecepatan, sehingga

$$\frac{\theta}{\theta_\infty} = \frac{T - T_w}{T_\infty - T_w} = \frac{3}{2} \frac{y}{\delta_t} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{\delta_t} \right)^3 \quad (A6)$$

manipulasi lebih lanjut dan dengan menggunakan $\zeta = \delta_t / \delta$, dihasilkan

$$\zeta^3 + 4x\zeta^2 \frac{d\zeta}{dx} = \frac{13 \alpha}{14 \nu} \quad (A7)$$

α adalah difusivitas panas dan ν kekentalan kinematik. Berdasarkan persamaan ini diperoleh

$$\zeta^3 = Cx^{-3/4} + \frac{13 \alpha}{14 \nu}$$

bila kondisi batas yang digunakan:
 $\delta_t = 0$, pada $x = x_0$ $\zeta = 0$, pada $x = x_0$
 dan $x_0 = 0$, diperoleh jawaban akhir

$$\zeta = \frac{1}{1.026} \left(\frac{\alpha}{\nu} \right)^{1/3} \quad (A8)$$

kembali ke persamaan

$$h = \frac{-k(\partial T / \partial y)_w}{T_w - T_\infty} = \frac{3 k}{2 \delta_t} = \frac{3 k}{2 \zeta \delta} \quad (A9)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (A4) dan (A8) kedalam persamaan (A9) diperoleh persamaan koefisien pindah panas lokal (h_x):

$$h_x = 0.332 \frac{k}{x} \left(\frac{\nu}{\alpha} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{u_\infty x}{\nu}} \quad (A10)$$

nilai koefisien pindah panas konveksi rata-rata sepanjang $x = L$ adalah

$$\bar{h} = \frac{\int_0^L h_x dx}{\int_0^L dx} = 0.664 \frac{k}{L} \left(\frac{\nu}{\alpha} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{u_\infty L}{\nu}} \quad (A11)$$

diketahui $Pr = \nu / \alpha$ dan $Re = u_\infty L / \nu$ sehingga persamaan (A11) menjadi:

$$\bar{h} = 0.664 \frac{k}{L} Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad (A12)$$

Lampiran B

Pendugaan Nilai h dari Data Hasil Percobaan

Kolam air dangkal dibuat sebagai suatu sistem pindah panas. Kolam air ditaruh pada lingkungan terbuka sehingga kolam air tidak terhalang pada percobaan yang dilakukan di sepanjang malam hari. Kolam air dangkal sebagai sistem termal yang diuji ditampilkan didalam Gambar B1 berikut ini.

Asumsi yang digunakan adalah bahwa kehilangan atau peningkatan panas air di dalam kolam air dangkal (Q_{tot}) disebabkan oleh panas radiasi malam hari (Q_{rad}), panas sensibel (Q_s) dan panas laten (Q_L). Kesetimbangan energi yang terjadi didalam air adalah:

$$Q_{tot} = Q_{rad} + Q_s + Q_L \quad (B1)$$

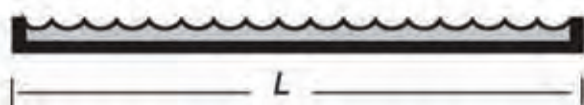
Lebih lanjut, komponen-komponen panas air diuraikan dan diperoleh persamaan:

$$m_w c_{pw} \frac{dT_w}{dt} = \epsilon \alpha A (T_w^4 - T_s^4) + hA(T_s - T_w) + h_D A (H_i - H_a) h_{fg} \quad (B2)$$

diketahui $h_D = \frac{h}{c_{pm}}$ (Chapman, 1980), sehingga:

$$h = \frac{m_w c_{pw} \frac{dT_w}{dt} - \epsilon \alpha A (T_w^4 - T_s^4)}{A[(T_s - T_w) + (1/c_{pm})(H_i - H_a)h_{fg}]} \quad (B3)$$

V Q_s Q_L Q_{rad}



Gambar B1. Penampang melintang kolam air dangkal yang digunakan dalam percobaan.