

Efek Perubahan Heat Flux Terhadap Konveksi Bebas Pada Permukaan Vertikal Menggunakan Interferometer Differential

Gatra Tria Rahendra dan Jooned Hendrarsakti
Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesha 10, Bandung 40132
Email: jooned@ftmd.itb.ac.id

Abstrak

Dalam karya ilmiah ini dilatarbelakangi oleh kepentingan untuk mengetahui fenomena konveksi bebas yang terjadi ketika sebuah pelat vertikal dipanaskan dengan kondisi tertentu dengan menggunakan metoda non intrusive bernama Interferometer differensial. Kajian ilmiah ini menggambarkan fenomena yang terjadi baik secara fisik maupun dengan cara perhitungan analitis. Masalah umum dalam penelitian ini adalah untuk mengetahui efek perubahan heat flux pada permukaan suatu pelat vertikal. Penelitian akan menjelaskan kenaikan nilai koefisien konveksi bebas lokal pelat, efek posisi dari suhunya berbeda pada nilai daya yang sama, dan kenaikan daya yang menyebabkan penurunan nilai koefisien konveksi secara linear. Metode yang digunakan adalah metode eksperimen langsung dengan melakukan percobaan tersebut pada suatu ruangan gelap dan tertutup. Peralatan percobaan yang diperlukan adalah meja datar dengan ukuran 2 x 1 meter, tabung interferometer, power supply, 6 buah set lensa optik, 2 buah lensa cekung, serta dudukan dan cangkang untuk meletakkan posisi pelat vertikal. Data dalam penelitian ini adalah nilai koefisien konveksi pada setiap pelat vertikal dengan daya listrik yang berbeda. Teknik pengumpulan data adalah melalui hasil eksperimen yang diolah dengan image processing untuk mendapatkan nilai koefisien konveksi pada pelat vertikal tersebut. Hasil dari pengujian menunjukkan kemiripan hasil bilangan Nusselt dengan hasil perhitungan empiris dari literature oleh McAdams (1954) dan Churchill, S. W., dan H. H. S. Chu (1975). Studi menunjukkan bahwa nilai bilangan Nusselt akan meningkat dengan bertambahnya daya listrik yang dipakai, dan temperature dari dinding.

Keywords: konveksi bebas, bidang vertikal, interferometer

Pendahuluan

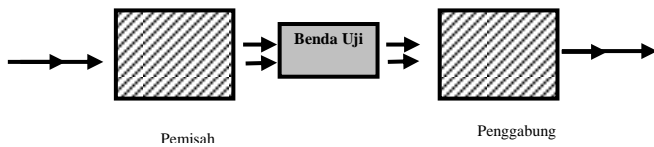
Penelitian terhadap pelat vertikal dalam konveksi bebas masih sering dilakukan karena tetap masih merupakan cara yang termurah, lagipula merupakan sistem tanpa komponen bergerak untuk pendinginan berbagai peralatan elektronik dalam daerah operasinya yang optimum. Mengetahui keadaan tersebut maka program penelitian di ITB berusaha meneliti permasalahan tersebut lebih mendalam dengan melakukan penelitian dengan teknik interferometrik disamping teknik kalorimetrik yang selama ini telah diterapkan. Tahap program penelitian yang dilaporkan disini mencakup pengembangan dan kalibrasi interferometer diferensial untuk pengukuran perpindahan panas konveksi bebas secara kuantitatif. Pada gilirannya, interferometer diferensial tersebut diharapkan dapat dikembangkan lebih lanjut untuk mengukur koefisien konveksi bebas lokal dari sebuah pelat vertikal tegak lurus atau pelat vertikal vertikal sebagai komplemen terhadap penelitian dengan teknik kalorimetrik yang telah dilakukan. Penelitian terhadap kinerja disipasi panas dari pelat vertikal yang berukuran miniatur dilakukan secara berkelanjutan di Laboratorium Proses Termal, Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi

Bandung (ITB).

Metode Interferometrik

Interferometer adalah suatu perangkat uji yang memanfaatkan interferensi cahaya dalam cara kerjanya. Tipe interferometer yang paling umum dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 1 dimana terlihat dua “kotak hitam”; sebuah berkas (*beam*) cahaya masuk ke kotak pertama, lalu berkas tersebut dibagi menjadi sejumlah komponen berkas. Kemudian komponen ini melewati daerah diantara kedua kotak tersebut dan masuk ke kotak kedua, dimana komponen berkas tersebut dikombinasikan kembali.

Interferometer yang digunakan pada penelitian ini merupakan interferometer diferensial yang disintesa dari interferometer diferensial Black dan Carr lalu dikembangkan dan dimodifikasi oleh Sihombing (2003) sehingga dihasilkan modifikasi untuk menekan biaya serendah mungkin serta mengikuti kemajuan dalam bidang teknologi, seperti penggunaan laser sebagai sumber cahaya, kamera digital untuk perekaman, dan komputer untuk pengolahan data interferometrik.

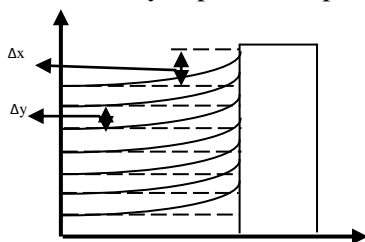


Gambar 1. Prinsip dasar interferometer

Interferometer diferensial yang digunakan pada penelitian ini memiliki komponen-komponen perangkat uji yang terdiri atas sebuah sumber cahaya monokromatik laser HeNe (L HeNe), sebuah *spatial filter* (SF), sebuah kondensor (K), tiga prisma Wollaston (PW1, PW2, PW3), dua cermin cekung (CC1, CC2), penganalisa (P), dan layar serta kamera digital. Jika sebuah spesimen yang telah dipanaskan diletakkan pada seksi pengujian maka akan terjadi gradien indeks refraksi udara tegak lurus terhadap permukaan benda yang tercetak pada layar perekaman. Adanya gradien indeks refraksi menyebabkan terjadinya perbedaan lintasan optik antara sinar x dan sinar y sehingga frinji yang dihasilkan akan mengalami defleksi. Akibat defleksi ini akan terjadi pergeseran frinji m yang didefinisikan dengan persamaan :

$$m = \frac{\Delta x}{\Delta y} \quad (1)$$

Definisi Δx dan Δy dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Hipotesa pola frinji untuk daerah pengujian yang dipanaskan dalam daerah pengujian (Sihombing, 2003)

persamaan untuk gradien indeks refraksi yang didapat dalam bentuk pergeseran frinji m menurut Black and Carr adalah di Persamaan (2)

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \left[\frac{\lambda}{2Lf(n_e - n_o)\tan\theta} \right] m \quad (2)$$

Aplikasi Interferometer Diferensial Pada Permasalahan Perpindahan Panas

Hubungan antara koefisien perpindahan panas dengan pergeseran frinji akan dijabarkan sebagai dasar bagi studi perpindahan panas dengan menggunakan Persamaan (3-8).

Fluks panas $q(x)$ dari permukaan benda ke fluida sekitarnya diberikan dengan persamaan Fourier

$$q(x) = -k_w \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_w \quad (3)$$

dimana $\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_w$ adalah gradien temperatur dalam arah y yang dievaluasi dalam pada permukaan obyek pengujian, k_w adalah konduktivitas termal udara yang dievaluasi pada temperatur permukaan, T_w , x adalah koordinat paralel terhadap permukaan benda, dan y adalah koordinat dalam arah normal terhadap permukaan benda. Sehingga, tiga besaran k_w , T_w , dan $\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_w$, harus diketahui untuk menghitung flux panas pada permukaan. Konduktivitas termal udara telah diukur dengan akurat sebagai sebuah fungsi temperatur, dan temperatur permukaan dengan mudah dapat diukur, tetapi pengukuran $\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_w$ secara akurat jauh lebih sukar diperoleh.

Dengan melakukan diferensiasi parsial indeks refraksi terhadap y (dengan merotasi PW1 dan PW2 sejauh 90° pada arah yang sama sehingga bidang pemilahan berkas sinar menjadi horizontal) maka akan diperoleh pernyataan

$$\frac{\partial n}{\partial y} = -\frac{GP}{R_a T^2} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4)$$

P adalah tekanan absolute udara sekitar, R_a adalah konstanta gas untuk udara, G adalah koefisien Gladstone-Dale dimana pada udara adalah fungsi dari panjang gelombang cahaya yang dipergunakan dan tekanan parsial uap air dalam udara, dan T_w adalah temperatur permukaan benda.

Persamaan (1.4) dapat dikombinasikan dengan Persamaan (1.2) yang memberikan pernyataan untuk $\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_w$ sebagai fungsi pergeseran frinji

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \left[\frac{\lambda R_a T^2}{3GPLg(n_e - n_o)\theta} \right] m \quad (5)$$

Fluks panas lokal sekarang dapat dituliskan sebagai fungsi pergeseran frinji pada permukaan pada seksi pengujian, m_w , dengan mensubstitusikan Persamaan (.5) ke dalam Persamaan (1.3), sehingga diperoleh

$$q(x) = \left[\frac{k_s R_a T_w^2 \lambda}{3GPLf(n_e - n_o)\theta} \right] m_w \quad (6)$$

Hubungan antara koefisien perpindahan panas konveksi dan fluks panas diberikan oleh hukum Newton tentang pendinginan (*Newton's law of cooling*) sebagai berikut

$$h = \frac{q(x)}{T_w - T_\infty} \quad (7)$$

dimana T_∞ adalah temperatur ambien dari udara sekitar obyek pengujian. Dengan mengkombinasikan Persamaan (6) dan Persamaan (7), sebuah rumusan untuk koefisien perpindahan panas konveksi dapat

dituliskan sebagai fungsi berbagai konstanta yang diketahui, besaran-besaran yang dapat diukur dan bilangan pergeseran frinji dari posisi yang belum terganggu pada permukaan pada daerah pengujian. Hasil yang didapat untuk rumusan h adalah

$$h = \left[\frac{k_s R_a T_w^2 \lambda}{3GPLf(n_e - n_o)\theta(T_w - T_\infty)} \right] m_w \quad (8)$$

Pernyataan ini merupakan penghubung antara pergeseran frinji optik yang diamati, m_w , dengan koefisien perpindahan panas, h . Kesederhanaan persamaan ini terbukti sangat bermanfaat untuk sebuah permukaan datar vertikal karena dengan satu pengukuran optik saja dapat diperoleh suatu ukuran yang relatif sederhana, tetapi langsung berhubungan terhadap koefisien perpindahan panas lokal yang biasanya sulit untuk ditentukan secara eksperimental. Untuk penjelasan lebih lanjut dapat diambil dari referensi oleh Sihombing (2003).

Penggunaan Metode Empirik Pada Permasalahan Perpindahan Panas

Pada kasus perpindahan panas konveksi bebas pelat vertikal dan pelat vertikal vertikal dari literatur, secara umum persamaannya adalah sebagai dikemukakan oleh McAdams di Persamaan (9)

$$Nu_L = 0.59Ra^{1/4} \quad (9)$$

Sedangkan Churchill dan Chu menemukan suatu korelasi persamaan Nusselt untuk pelat datar vertikal dengan aliran laminar maupun aliran turbulen, dimana persamaan tersebut dituliskan

$$\overline{Nu}_L = \left[0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.429/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right]^2 \quad (10)$$

Namun persamaan tersebut digunakan pada semua kondisi baik laminar maupun turbulen sehingga diperlukan Persamaan (11) yang lebih spesifik pada kasus aliran laminar.

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.67Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.429/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (11)$$

dimana Pr adalah bilangan *Prandtl* sedangkan Ra_L adalah bilangan *Rayleigh* yang dapat dituliskan dengan Persamaan (12).

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (12)$$

Dengan g sebagai nilai gaya gravitasi, β adalah nilai $1/T_f$, sedangkan nilai ν dan α dicari pada Table A-4 pada buku *Introduction To Heat Transfer oleh Incropera dkk (1996)*. Nilai tersebut dan nilai *Prandtl* diambil dengan mengacu pada temperatur film dari hasil bagi dua antara penjumlahan temperatur lokal dengan temperatur lingkungan.

Untuk mendapatkan nilai koefisien konveksi perpindahan panas lokal dengan persamaan empirik sehingga dapat dibandingkan dengan hasil koefisien konveksi lokal pada hasil metode interferometrik, maka nilai Ra_L yang menunjukkan nilai *Rayleigh* keseluruhan dari spesimen uji diubah menjadi Ra_x yang merupakan nilai *Rayleigh* lokalnya dengan cara mengganti L yang merupakan panjang total spesimen dari ujung bawahnya dengan x yang menunjukkan panjang letak posisi temperatur lokal dari ujung bawah spesimen. Dengan demikian maka nilai koefisien konveksi bebas lokal dapat ditemukan dari nilai *Nusselt Number* lokalnya dimana persamaan tersebut dapat dituliskan

$$Nu_x = \frac{h_x x}{k} \quad (13)$$

Dengan x yang menunjukkan panjang letak posisi temperatur lokal dari ujung bawah spesimen, sedangkan nilai k adalah nilai konduktivitas termal yang dicari pada Table A-4 pada buku *Introduction To Heat Transfer* dengan mengacu pada temperatur filmnya.

Prosedur Penyetelan dan Pengujian Interferometer (Sihombing, 2003)

Setelah melalui beberapa upaya, berikut ini dideskripsikan konfigurasi yang dianggap berhasil. Untuk bahan peredam getaran dipergunakan pasir sungai yang telah dikeringkan dan ditampung didalam sebuah bak kayu. Bak kayu tersebut ditempatkan diatas dua buah meja. Setiap kaki meja tersebut dilengkapi dengan pengatur ketinggian dengan sekrup untuk penyetelan saat mendaratkan permukaan meja. Pasir yang terdapat dalam bak tersebut diatur supaya datar dengan menggunakan waterpass. Kemudian diatasnya ditempatkan pelat besi (ukuran 90 x 240 cm dan tebal 3,4 cm dengan berat lebih kurang setengah ton) yang berfungsi sebagai daun meja. Kedataran pelat besi yang diletakkan di atas pasir ini juga dipastikan dengan waterpass. Apabila masih belum datar perlu dilakukan penyetelan ketinggian pengatur kedataran pada kaki-kaki meja. Setelah meja dalam keadaan datar baru kemudian komponen-komponen optik dapat ditempatkan di atasnya. Skema pengujian digambarkan di Gambar 3. Selanjutnya dua cermin cekung pada sistem penyangga yang dapat diatur ketinggiannya dengan teliti ditempatkan didekat sisi lebar meja. Jarak titik fokus cermin cekung (CC) 1 dan 2 buatan Edmund Scientific ini adalah 64 in. atau 1625.6 mm dengan ketelitian $\pm 1,5\%$. Kemudian tabung laser HeNe dengan dudukannya berupa *lab jack* yang dapat diatur ketinggiannya ditempatkan pada posisi seperti yang diperlihatkan pada diagram skematik interferometer (Gambar 2.2), yaitu disekitar salah satu pojok daun meja. Laser kemudian dihubungkan dengan sumber

daya untuk dinyalakan. Berkas sinar laser dengan diameter 0,81 mm pada panjang gelombang 632,8 nm, diarahkan ketitik tengah CC1, yang kemudian pantulan berkas laser dari CC1 diarahkan ke titik tengah CC2. Akhirnya pantulan berkas sinar laser dari CC2 diarahkan ke layar.

Selanjutnya posisi keluaran sinar pada tabung laser harus disesuaikan agar bidang polarisasinya 45° terhadap bidang x-z, yaitu bidang vertikal yang melalui sumber berkas sinar laser. Posisi bidang polarisasi (*plane of polarization*) tabung laser dipastikan dari tanda pada ujung tabung moncong keluaran berkas laser.

Setelah itu prisma Wollaston 1 (PW1) dan prisma Wollaston 2 (PW2) ditempatkan pada titik fokus, masing-masing berurutan, dari CC1 dan CC2. Penempatan prisma Wollaston pada titik fokus CC dimaksudkan agar berkas sinar merambat sebagai sinar paralel pada saat melintasi seksi pengujian. Adanya toleransi ketelitian jarak titik fokus cermin cekung mengharuskan dilakukannya penyetelan cermat dengan menggeser kedua prisma Wollaston secara bersamaan mendekati atau menjauhi masing-masing CC-nya untuk memastikan agar kedua PW telah berada dalam posisi yang simetris.

Kondensor, yang terdiri atas dua lensa achromat yang sama dan ditempatkan saling bertolak belakang serta disetel mempunyai satu sumbu dalam tabung rumah kondensor, ditempatkan diantara *spatial filter* dengan PW1.

Spatial filter ditempatkan diantara kondenser dan tabung laser pada jarak 120 mm dibelakang kondensor. Pada dasarnya *spatial filter* berfungsi membersihkan berkas sinar laser. Pada saat penempatan *spatial filter*, salah satu komponennya, *pinhole*, dilepaskan terlebih dahulu, untuk mempermudah penempatan *spatial filter* pada posisi yang tepat. Juga perlu diperhatikan agar sinar yang menerpa CC1, tepat berada dipusat lingkaran muka CC tersebut. Setelah mendapatkan posisi yang paling baik, *pinhole* kemudian dipasang padaudukannya di *spatial filter*. *Pinhole* adalah sebuah pelat tipis stainless steel berbentuk lingkaran dengan diameter 9,5 mm, yang pada titik pusatnya terdapat lubang dengan berdiameter 15 μm . *Pinhole* ini kemudian diapit oleh dua buah pelat dengan lingkaran yang lebih besar yang kemudian diletakkan pada *pinhole mount*. Untuk memastikan bahwa lubang *pinhole* tidak tersumbat, sumber cahaya diarahkan ke lubang tersebut, sampai sebuah titik cahaya kecil diamati melintasi lubang tersebut. *Pinhole* yang telah terpasang kemudian disetel agar titik fokus sinar yang melintasi lensa obyektif berada tepat pada lubang *pinhole*.

Penganalisa ditempatkan setelah PW2 dengan besar sudut bidang polarisasi yang sama dengan tabung laser. Dengan adanya penganalisa, perbedaan fasa yang

dihasilkan prisma Wollaston dapat divisualisasikan. Layar ditempatkan disebelah meja pada tiang tersendiri, dan bidang layar ditempatkan tegak lurus terhadap arah perambatan sinar. Layar yang digunakan terbuat dari kertas kalkir, agar pengambilan foto dari belakang layar dapat dilakukan.

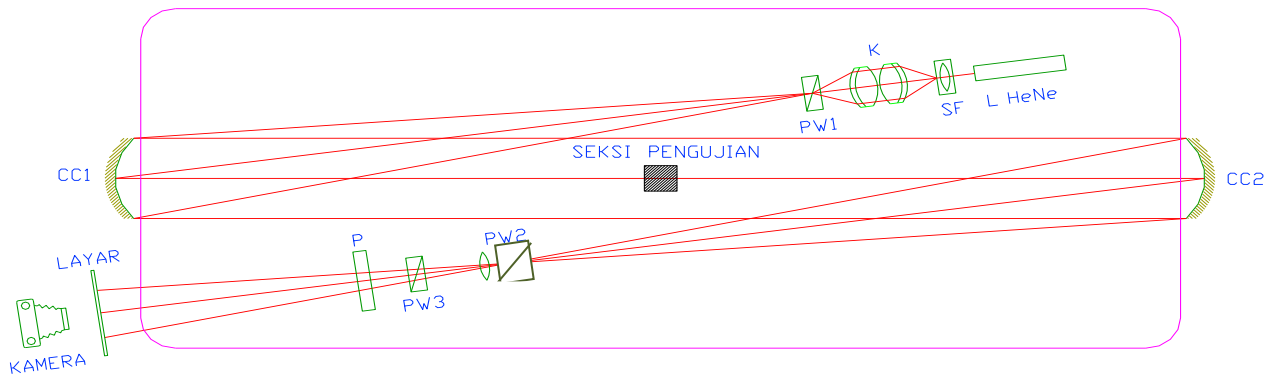
Perangkat Benda Uji dan Prosedur Pengolahan Data

Untuk merealisasikan benda uji, dipergunakan foil nilvar tipis dengan lebar 1,5 in. dan tebal 0,001 in. Sifat-sifat dari nilvar adalah resistivitas sebesar 32,7 mikro-ohm inchi, emisivitas sebesar 0,15 dan koefisien tahanan listrik sebesar $\alpha = 1.354 \times 10^{-3}$ ohm/ohm°C. Foil nilvar tipis buatan Driver-Harris Co., New Jersey ini diregangkan diantara dua jepitan cangkang ebonit sehingga menghasilkan suatu permukaan vertikal dengan tinggi 23,2 cm.

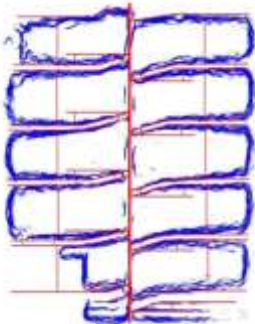
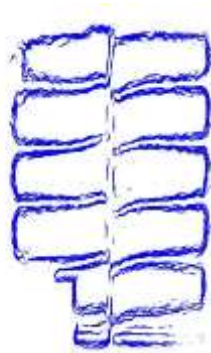
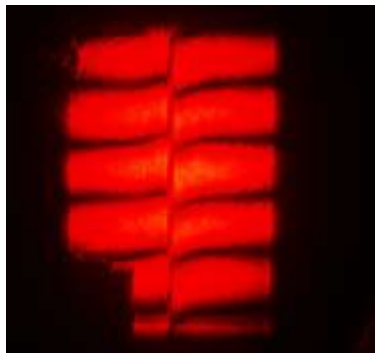
Pemasangan nilvar pada cangkang tersebut dilakukan dengan bantuan catok agar nilvar dapat ditegangkan sehingga kondisi permukaan datar vertikal dihasilkan. Nilai-nilai temperatur, tekanan dan pergeseran frinji yang diukur dimasukkan kedalam Persamaan (1.8) untuk mendapatkan nilai koefisien perpindahan panas konveksi lokal stasioner. Besaran-besaran lainnya dalam persamaan tersebut adalah konstanta-konstanta yang telah diketahui. Nilai konstanta k_w dipetik dari hasil interpolasi nilai-nilai konduktivitas termal udara pada Tabel A.4 dalam buku referensi, $R_a = 286,99$ J/kg.K, $\lambda = 6,328 \cdot 10^{-7}$ m, $G = 2,27843 \cdot 10^{-04}$ m³/kg, $L = 0,0381$ m, $f = 1,6256$ m, $(n_e - n_o) = 0,009056$, $\theta = 0,017453$ rad. Sedangkan tekanan udara pada saat pengujian sebesar $P = 91592,47$ Pa.

Untuk mendapatkan hasil data yang dapat diolah maka hasil gambar yang difoto dari layar diolah dulu dengan perangkat lunak pengolahan gambar untuk dihilangkan *Noise* dari gambar sehingga gambar hasil olahan tersebut dimasukkan ke dalam Microsoft Visio untuk dilihat perubahan nilai Δx dan Δy -nya sehingga dapat dicari nilai koefisien konveksi bebas lokal pada titik lokasi frinji yang telah ditentukan. Lokasi frinji jika diambil acuan dari bawah maka frinji 1 = 9 mm, frinji 2 = 18 mm, frinji 3 = 27 mm, frinji 4 = 36 mm, dan frinji 5 = 45 mm diukur dari bawah pelat.

L HeNe	: Laser Helium Neon	CC2	: Cermin cekung 2	PW1	: Prisma Wollaston 1	PW3	: Prisma Wollaston 3
SF	: Spatial Filter	PW2	: Prisma Wollaston 2	CC1	: Cermin cekung 1	P	: Penganalisa
K	: Kondensor						



Gambar 3. Skema Pengujian Interferometer (Sihombing, 2003)



(a)

(b)

(c)

Gambar 4. hasil pengambilan foto 2,5 watt pada gambar : (a) gambar yang difoto langsung dengan kamera digital dari layar, (b) gambar yang diolah untuk dihilangkan *noise*-nya, (c) gambar yang diproses dengan Microsoft visio untuk menentukan nilai Δx dan Δy -nya.

Hasil dan Analisa

Hasil pengujian kemudian ditabulasi dan dibandingkan dengan hasil perhitungan menggunakan Persamaan empiris (9-11) seperti tertera pada Tabel 1. Pada table ini, kolom “Nu” adalah hasil pengujian menggunakan Interferometer, Nu 1-3 menggunakan Persamaan (9-11) secara berurutan.

Hasil menunjukkan bahwa dengan peningkatan daya, terjadi peningkatan nilai Nu dari pengujian walaupun tidak terjadi disetiap lokasi. Hal ini dapat disebabkan dari proses pembacaan gambar dan penentuan jarak interferensi yang kurang tepat. Hasil pengujian

ketika dibandingkan dengan hasil perhitungan menggunakan Persamaan (9-11) menunjukkan hasil yang memuaskan dengan nilai persentasi perbedaan yang rata-rata kurang dari 3%.

Hasil juga menunjukkan bahwa terdapat peningkatan nilai *Nu* sebanding dengan meningkatnya posisi frinji yang diukur dari bawah pelat. Hal ini disebabkan oleh semakin meningkatnya nilai temperature lokal pada setiap frinji sehingga mempengaruhi pula nilai *Nu* oleh tiap frinji tersebut.

Penurunan nilai koefisien konveksi bebas dari frinji 1

sampai frinji 5 terjadi disebabkan oleh peningkatan nilai ΔT pada titik frinji lokalnya dimana nilainya semakin membesar serta berbanding lurus dengan peningkatan nilai daya listrik yang diberikan. Nilai Nusselt Number studi ini didapat paling

mendekati hasil perhitungan Persamaan (1.9) dengan tingkat perbedaan di 2%. Hasil yang tidak jauh berbeda tersebut menandakan bahwa pengujian pelat vertikal dengan metode interferometrik dapat dilakukan dan diterima hasilnya

Tabel 1. Perbandingan hasil eksperimen dengan persamaan dari literature.

No. frinji	P (W)	Jarak (mm)	T0 (K)	T lokal (K)	T-T0 (K)	h (W/m2.K)	Q" (W/m2)	Nu	Nu 1	Nu 2	Nu 3	%diff 1	%diff 2	%diff 3	
1	2.5	9	298.95	319.95	21.00	9.609	201.786	3.20	3.48	3.54	3.71	2.04	2.53	3.65	
2	2.5	18	298.95	325.35	26.40	9.336	246.480	6.18	6.13	5.61	6.02	0.21	2.42	0.67	
3	2.5	27	298.95	328.85	29.90	9.121	272.720	9.01	8.51	7.54	8.09	1.43	4.44	2.69	
4	2.5	36	298.95	333.75	34.80	8.711	303.129	11.40	10.87	9.53	10.14	1.19	4.48	2.91	
5	2.5	45	298.95	337.65	38.70	8.511	329.387	13.85	13.10	11.47	12.09	1.39	4.71	3.40	
1	3.6	9	299.15	326.75	27.60	9.708	267.954	3.21	3.67	3.69	3.88	3.39	3.55	4.75	
2	3.6	18	299.15	332.45	33.30	9.258	308.294	6.07	6.40	5.83	6.26	1.35	0.99	0.77	
3	3.6	27	299.15	335.75	36.60	8.804	322.237	8.62	8.83	7.81	8.37	0.62	2.45	0.72	
4	3.6	36	299.15	342.65	43.50	8.300	361.054	10.73	11.30	9.90	10.52	1.29	2.02	0.49	
5	3.6	45	299.15	346.95	47.80	8.115	387.879	13.04	13.57	11.88	12.50	1.00	2.32	1.06	
1	4.9	9	299.85	333.45	33.60	9.392	315.576	3.07	3.80	3.80	3.99	5.34	5.28	6.53	
2	4.9	18	299.85	341.25	41.40	9.139	378.349	5.91	6.65	6.02	6.47	2.92	0.46	2.24	
3	4.9	27	299.85	345.55	45.70	9.012	411.834	8.70	9.16	8.08	8.66	1.30	1.83	0.11	
4	4.9	36	299.85	348.45	48.60	8.867	430.944	11.37	11.48	10.05	10.68	0.26	3.06	1.56	
5	4.9	45	299.85	353.45	53.60	8.669	464.663	13.80	13.79	12.08	12.69	0.02	3.33	2.10	
1	6.4	9	300.65	342.35	41.70	9.669	403.205	3.12	3.94	3.90	4.12	5.84	5.58	6.88	
2	6.4	18	300.65	351.55	50.90	9.399	478.397	5.99	6.86	6.19	6.65	3.37	0.83	2.61	
3	6.4	27	300.65	356.35	55.70	9.170	510.786	8.72	9.40	8.28	8.87	1.90	1.27	0.43	
4	6.4	36	300.65	361.95	61.30	8.961	549.328	11.27	11.78	10.31	10.94	1.10	2.23	0.76	
5	6.4	45	300.65	367.25	66.60	8.780	584.777	13.71	14.11	12.36	12.96	0.70	2.60	1.41	
												Rata2	2.04	2.53	3.65

Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah:

1. Koefisien konveksi bebas lokal dari foil vertikal yang dipanaskan dengan listrik mempunyai kondisi batas temperatur nonisotermal, yang bervariasi dengan diikuti penurunan nilai disertai peningkatan nilai *heat flux* konveksi.
2. Penurunan nilai koefisien konveksi bebas dari frinji 1 sampai frinji 5 disebabkan oleh peningkatan nilai ΔT pada titik frinji lokalnya yang semakin membesar dimana berbanding lurus dengan peningkatan nilai daya listrik yang diberikan.
3. Sedangkan peningkatan nilai *heat flux* konveksi dari frinji 1 sampai frinji 5 disebabkan oleh peningkatan temperatur lokal pada setiap frinji sehingga memberikan efek peningkatan pada nilai *heat flux* setiap frinji.

Nomenklatur

f : Jarak titik fokus cermin cekung

m

G : Koefisien Gladstone-Dale

$$\frac{m^3}{kg}$$

g : Akselerasi gravitasi

$$\frac{m}{s^2}$$

h : Koefisien perpindahan panas konveksi bebas

$$\frac{watt}{m^2K}$$

k_w : Konduktifitas udara pada temperatur

$$\frac{watt}{m K}$$

q_w'' : Fluks panas dari permukaan benda ke fluida sekitarnya

$$\frac{watt}{m^2}$$

Nu : Bilangan Nusselt lokal

Pr : Angka Prandtl

Referensi

Churchill, S. W., and H. H. S. Chu, *Int. J. Heat*

Mass Transfer, 18, 1323, 1975

Incropera, Frank. P. dan DeWitt, David. P.,
“Introduction to Heat Transfer”, John Wiley &
Sons, 3rd ed., New York, 1996.

McAdams, W. H., *Heat Transmission*, 3rd
ed., McGraw-Hill, New York, 1954.

Sihombing. A., “Pengembangan Interferometer
Differensial Untuk Pengukuran Koefisien
Perpindahan Panas Konveksi Bebas Lokal Dan
Kalibrasi Dengan Pelat Vertikal Nonisothermal”,
Tesis Magister, Institut Teknologi Bandung, 2003.