

Studi Eksperimen Konveksi Bebas Pada Permukaan Atas Plat Miring Vertikal Non-Isotermal Menggunakan Interferometer Differensial

Aldo Tri Oktamettio^{1,a,*} dan Jooned Hendrarsakti^{1,b}

¹Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesha 10, Bandung 40132, Indonesia
email: aldotrioktamettio@gmail.com, jooned@ftmd.itb.ac.id

Abstrak

Penelitian ini memfokuskan pengujian pada permukaan atas plat panas miring vertikal, dimana arus gaya apung (*bouyancy-driven flows*) pada bagian tersebut tidak stabil (*Unstable*). Pengujian ini menggunakan teknik interferometrik differensial. Pengujian ini menggunakan benda uji berupa aluminium foil nilvar tipis dengan lebar 1,5 in (38,1 mm) dan tebal 0,001 in (0,0254 mm). Plat uji diregangkan pada cangkang ebonit dan menghasilkan permukaan vertikal dengan tinggi 23,2 cm. Posisi pengujian frinji lokal dilakukan pada jarak 2 mm sampai dengan jarak 95 mm dari ujung plat vertikal dengan kenaikan jarak sebesar 5 mm. Kemiringan sudut pengujian dari arah vertikal yaitu 11⁰ dan 16⁰. Pada setiap pengujian diberikan tiga perubahan daya yaitu 7,25 Watt, 12,25 Watt, dan 22,05 Watt.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui persebaran nilai koefisien konveksi bebas lokal dan memetakan pola alirannya, serta mengetahui pengaruhnya terhadap perubahan kemiringan dan kenaikan daya. Hasil dari penelitian ini juga menunjukkan bahwa nilai koefisien konveksi semakin menurun dengan semakin jauhnya posisi frinji lokal dari ujung bawah plat benda uji, tetapi pada posisi tertentu nilai koefisien konveksinya kembali naik, dan kemudian turun kembali, yang menunjukkan pola aliran yang tidak stabil terjadi pada permukaan atas plat panas miring vertikal. Hasil pemetaan pola aliran tidak stabil pada permukaan atas plat menunjukkan bahwa semakin tinggi daya yang diberikan, maka semakin sedikit perubahan pola yang terjadi, dan semakin besar kemiringan pada plat benda uji, maka semakin besar kenaikan nilai koefisien konveksi pada posisi perubahan pola.

Kata kunci: perpindahan panas, konveksi bebas, interferometer differensial

Pendahuluan

Pengukuran koefisien konveksi dengan menggunakan metoda interferometrik dilakukan untuk menentukan korelasi umum dalam perhitungan perpindahan panas serta pengaruhnya pada berbagai geometri terhadap laju perpindahan panas. Referensi [1,2,3,4,5] telah banyak mengembangkan metode interferometer untuk menentukan korelasi umum dalam perpindahan panas konveksi

Saat ini, penelitian-penelitian yang dilakukan terhadap perpindahan panas konveksi bebas hanya berfokus pada bagian bawah plat panas atau bagian atas plat dingin, dimana lapisan batas pada bagian tersebut *steady*. Pada penelitian ini akan memfokuskan pada permukaan atas dari plat pans miring vertikal, dimana diharapkan koefisien konveksi bebas pada aliran *unsteady* di permukaan atas pelat panas miring vertikal tersebut dapat dipetakan dan diketahui pola perubahannya, sehingga bisa dihasilkan suatu korelasi dan dapat mengetahui pada titik mana dari ujung pelat aliran *unsteady* mulai terjadi..

Pengujian ini akan dilakukan pada dua

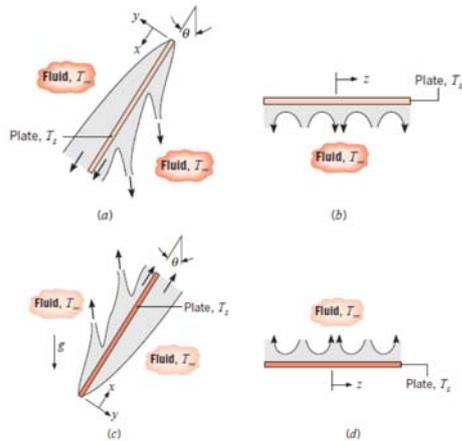
kemiringan, yaitu 10⁰ dan 16⁰, dan 3 kali peningkatan arus, yaitu 7,25 Watt, 12,25 Watt, dan 22,05 Watt. Pengambilan pada kemiringan yang berbeda dan daya yang berbeda ini bertujuan untuk melihat pengaruh kemiringan dan perubahan daya terhadap perubahan nilai koefisien konveksi dan perubahan pola aliran *unsteady* yang terjadi pada permukaan atas plat.

Perpindahan Panas Konveksi Bebas

Perpindahan panas konveksi bebas adalah energi yang berpindah dalam bentuk panas (*heat*) yang terjadi akibat adanya perbedaan temperature antara permukaan benda dengan fluida yang bergerak disekitar benda, dimana gerakan fluida disebabkan langsung oleh gaya apung (*Bouyancy Forced*) yang timbul akibat perubahan densitas pengaruh dari variasi temperatur aliran dengan gaya badan/berat fluida.

Pada plat miring, gaya *bouyancy* mempunyai komponen kearah normal dan paralel terhadap plat. Komponen paralel ini akan mendorong fluida untuk bergerak dan menghasilkan arus konveksi. Jika dibandingkan dengan plat vertikal, komponen

paralel pada plat miring lebih kecil dari pada komponen paralel plat vertikal, sehingga perpindahan panas konveksi yang terjadi juga lebih kecil.



Gambar 1. Pengembangan lapisan batas pada pelat miring vertikal:

- (a) Aliran pada bagian atas dan bawah plat dingin
- (b) Aliran pada bagian bawah plat miring (*end view*), (c) Aliran pada bagian atas dan bawah plat panas, (d) Aliran pada bagian atas plat panas (*end view*) [6]

Pada gambar 1.a bagian atas plat dingin, komponen y dari *bouyancy* (arah normal) membuat lapisan batas pada bagian plat atas. Sedangkan komponen x gaya gravitasi berkurang menjadi $g \cos\theta$, sehingga kecepatan aliran berkurang dan koefisien konveksi juga berkurang. Pada bagian bawah plat dingin, komponen y gaya bouyancy menyebabkan fluida dingin dipindahkan dari plat. Perpindahan fluida dingin dari plat ini menyebabkan lapisan batas menjadi terputus-putus. Hasilnya adalah aliran tiga dimensi seperti ditunjukkan pada gambar 1.b, fluida dingin dipindahkan dari plat dan secara kontinyu digantikan oleh fluida panas disekitarnya. Menyempitnya boundary layer fluida dingin terdesak oleh fluida panas menyebabkan menyempitnya boundary layer termal. Perpindahan panas disini juga didukung oleh lebih kecilnya komponen x dari gravitasi sehingga efek kombinasi tersebut akhirnya memperbesar koefisiensi perpindahan panas konveksi.

Untuk plat panas, kasus dan pola yang terjadi mirip seperti plat dingin, dimana pada bagian bawah plat panas membuat lapisan batas yang *steady*, sedangkan pada bagian atas plat membentuk lapisan batas yang terputus-putus. Hal ini terjadi sama seperti plat dingin, yang berbeda hanya posisi letak lapisannya. Pada plat dingin lapisan batas yang *steady* terdapat pada permukaan bawah dan lapisan batas terputus-putus

pada permukaan atas, sedangkan pada plat panas aliran steady terdapat pada bagian bawah dan lapisan batas terputus-putus terdapat pada plat atas. Hal ini juga disebabkan oleh hal yang sama dimana, lapisan terputus-putus pada bagian atas plat panas terbentuk karena perpindahan fluida panas dari plat. Fluida panas dari plat dipindahkan secara kontinyu dan digantikan oleh fluida dingin disekitarnya.

Fuji dan Imura [7] telah melakukan penelitian terhadap perpindahan panas konveksi bebas pada permukaan atas plat panas. Pada penelitian yang dilakukan oleh Fuji dan Imura [7] memberikan suatu korelasi untuk persamaan *Nusselt Number*, yaitu:

$$\overline{Nu}_{unsteady} = 0.56(Gr Pr \cos \theta)^{1/4} \quad (1)$$

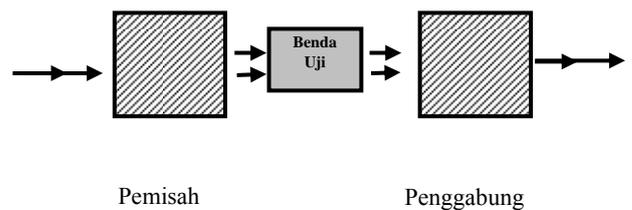
Grashof Number yang dinyatakan dengan persamaan:

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (2)$$

dimana g adalah gaya gravitasi, β adalah $1/T$, T_s adalah temperatur permukaan benda, T_∞ adalah temperatur lingkungan, L adalah panjang pelat, dan ν adalah viskositas kinematik fluida.

Metode Interferometrik

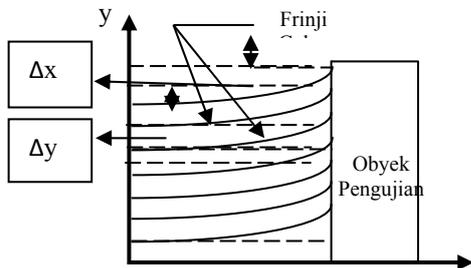
Interferometer merupakan alat yang menerapkan interferensi cahaya pada cara kerjanya. Gambar 2.1 memperlihatkan ilustrasi tipe interferometer yang paling umum digunakan.



Gambar 2. Prinsip dasar interferometer [3]

Adanya gradien indeks refraksi pada permukaan benda uji menyebabkan terjadinya perbedaan lintasan optik antara sinar x dan sinar y sehingga frinji yang dihasilkan akan mengalami defleksi. Definisi Δx dan Δy dapat dilihat pada Gambar 2. Akibat defleksi ini akan terjadi pergeseran frinji m yang didefinisikan dengan persamaan :

$$m = \frac{\Delta x}{\Delta y} \quad (3)$$



Gambar 3. Hipotesa pola frinji untuk daerah pengujian yang dipanaskan dalam daerah pengujian [3]

Sparrow and Gregg [1] telah melakukan penelitian dan memberikan suatu korelasi untuk menentukan nilai koefisien konveksi (h) dengan metode interferometrik, dimana korelasi yang didapat untuk rumusan h adalah

$$h = \left[\frac{k_s R_a T_w^2 \lambda}{3GPLf(n_e - n_o)\theta(T_w - T_\infty)} \right] m_w \quad (4)$$

Pernyataan ini merupakan penghubung antara pergeseran frinji optik yang diamati m_w , dan koefisien perpindahan panas h , dimana P adalah tekanan absolute udara sekitar, R_a adalah konstanta gas untuk udara, G adalah koefisien Gladstone-Dale, L adalah panjang benda yang dipanaskan dalam arah perambatan cahaya, yang dalam penelitian ini adalah sama dengan lebar pelat, $(n_e - n_o)$ adalah perbedaan antara indeks refraksi *extraordinary* dan *ordinary* material prisma wollaston, θ adalah sudut baji prisma Wollaston, λ adalah panjang gelombang cahaya laser, dan F adalah jarak titik fokus cermin cekung.

Untuk mendapatkan nilai koefisien konveksi rata-rata (\bar{h}), maka nilai koefisien konveksi lokal

L HeNe : Laser Helium Neon
SF : Spatial Filter
K : Kondensor
PW1 : Prisma Wollaston 1
CC1 : Cermin cekung 1

dari hasil Pers. 4 diplot dalam grafik dan dicari persamaan *Trendline*-nya. Persamaan *Trendline* pada plot grafik tersebut menghasilkan persamaan $h(x)$ yang akan diubah menjadi koefisien konveksi rata-rata, dimana persamaan tersebut dapat dituliskan

$$\bar{h}_{eksp} = \frac{1}{L} \int_0^L h(x).dx \quad (5)$$

Nilai hasil \bar{h} yang didapat dari hasil interferometrik serta metode empirik dibandingkan dan dihitung nilai persentase perbedaannya dengan menggunakan persamaan

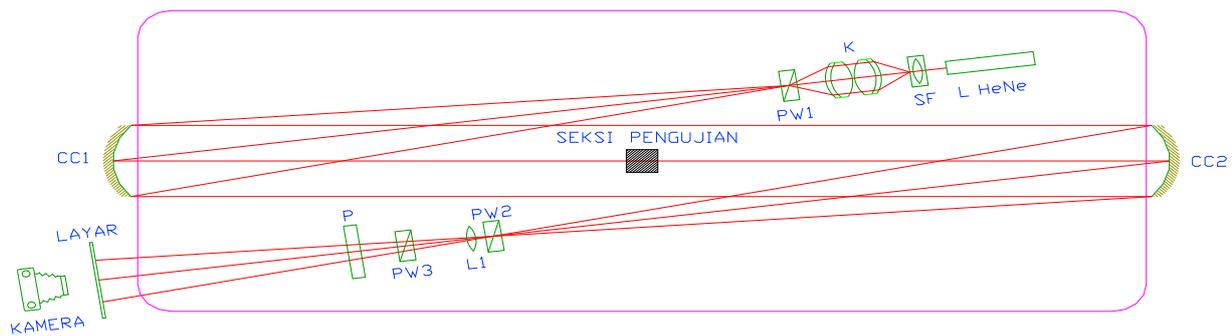
$$\% \text{diff} = \frac{\bar{h}_{eksp} - \bar{h}_{(empirik)}}{(\bar{h}_{eksp} + \bar{h}_{(empirik)}) / 2} \cdot 100\% \quad (6)$$

Prosedur Penyetelan dan Pengujian Interferometer [8]

Sebuah bak kayu ditempatkan diatas dua buah meja. Setiap kaki meja tersebut dilengkapi dengan pengatur ketinggian dengan sekrup untuk penyetelan saat mendaratkan permukaan meja. Kemudian diatasnya ditempatkan pelat besi (ukuran 90 x 240 cm dan tebal 3,4 cm) yang berfungsi sebagai daun meja. Kedataran pelat besi yang diletakkan di atas pasir ini juga dipastikan dengan waterpass. Setelah meja dalam keadaan datar baru kemudian komponen-komponen optik dapat ditempatkan di atasnya. Skema pengujian dan komponen-komponen dalam peralatan uji diperlihatkan pada Gambar 4.

Komponen-komponen interferometer 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.

CC2 : Cermin cekung 2
PW2 : Prisma Wollaston 2
PW3 : Prisma Wollaston 3
P : Penganalisa



Gambar 4. Sintesa interferometer diferensial yang dikembangkan dalam bentuk bagan [8]

Perangkat Benda Uji dan Prosedur Pengolahan Data

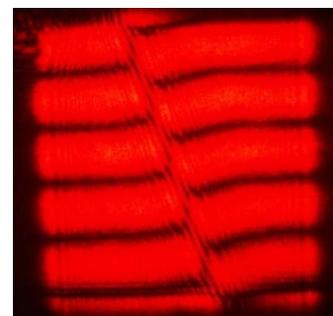
Untuk merealisasikan benda uji, digunakan foil nilvar tipis dengan lebar 1,5 in dan tebal 0,001 in. Sifat-sifat dari nilvar adalah resistivitas sebesar 32,7 mikro-ohm inchi, emisivitas sebesar 0,15 dan koefisien tahanan listrik sebesar $\alpha = 1.354 \times 10^{-4}$ ohm/ohm°C.

Nilai-nilai temperatur, tekanan dan pergeseran frinji yang diukur dimasukkan kedalam Pers. 4 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.

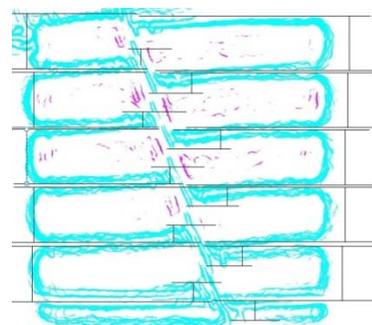
Untuk mendapatkan hasil data yang diinginkan, maka hasil gambar yang difoto dari layar diolah dulu dengan perangkat lunak untuk menghasilkan sketsa gambar, kemudian gambar hasil olahan tersebut dimasukkan ke dalam *Microsoft Visio™* untuk dilihat perubahan nilai Δx dan Δy -nya sehingga dapat dicari nilai koefisien konveksi bebas lokal pada titik lokasi frinji yang telah ditentukan. Posisi penyinaran cahaya laser HeNe ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Posisi berkas cahaya laser relatif terhadap plat uji

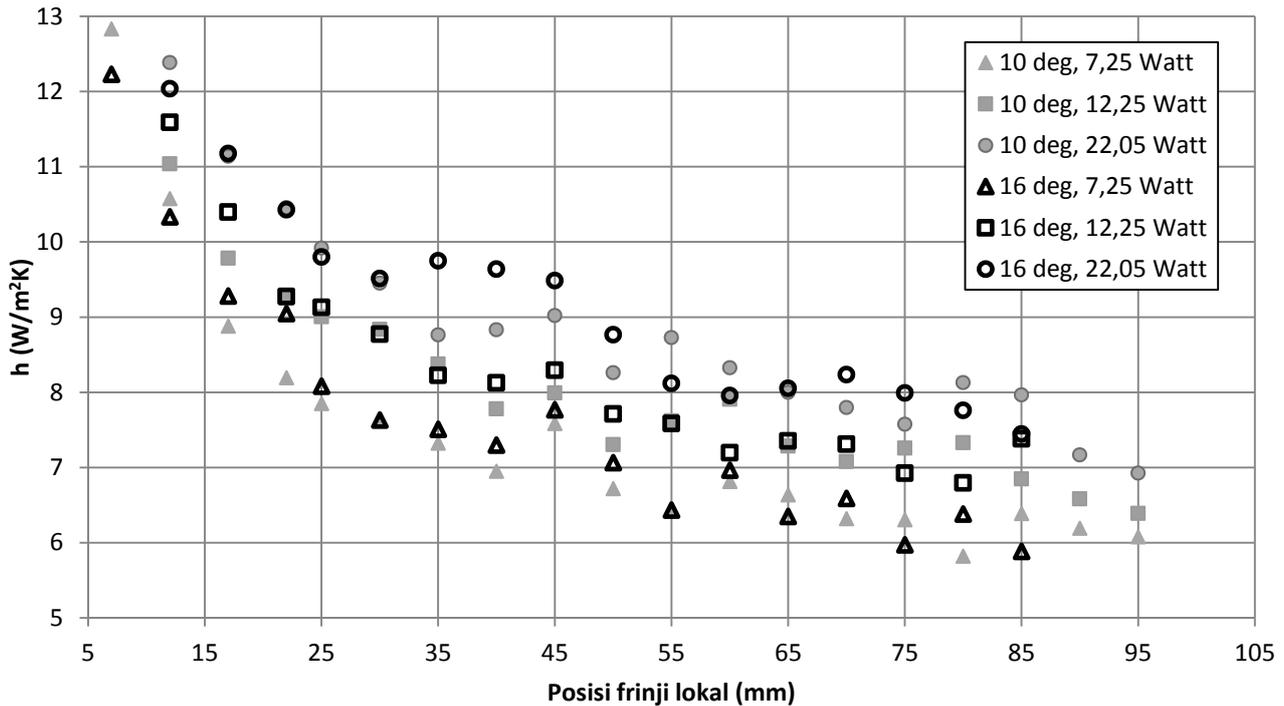


Gambar 6. Hasil pencitraan berkas cahaya laser pada layar penangkap



Gambar 7. Hasil sketsa dan pengolahan gambar dengan *Microsoft Visio™* untuk mencari Δx dan Δy

Hasil Analisis Nilai Koefisien Konveksi Bebas Lokal



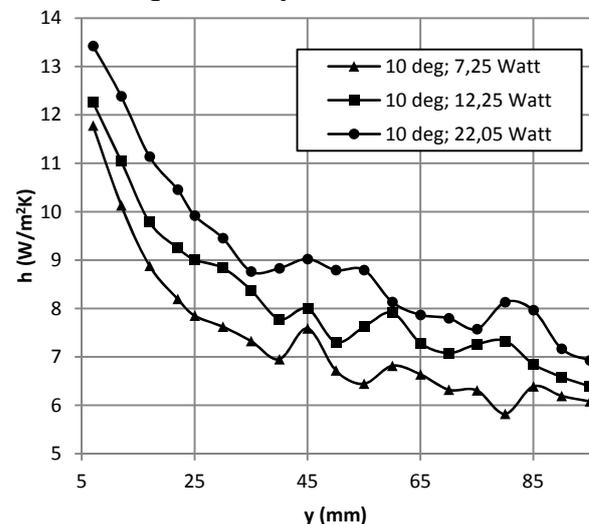
Gambar 8. Perbandingan koefisien konveksi bebas lokal terhadap posisi frinji pada permukaan atas plat

Dari hasil nilai koefisien konveksi lokal pada setiap posisi frinji pada jarak 2 mm sampai dengan 95 mm di sepanjang plat yang terdapat di dalam Gambar 8, maka bisa dilihat bahwa nilai koefisien konveksi bebas mengalami penurunan seiring dengan kenaikan jarak dari ujung plat. Penurunan nilai koefisien konveksi bebas ini disebabkan oleh semakin meningkatnya perbedaan nilai temperatur permukaan plat dengan temperatur lingkungan ($T_w - T_s$), sehingga nilai koefisien konveksi lokal yang dihasilkan pada Pers. 4 akan semakin mengecil. Penurunan nilai koefisien konveksi ini juga disebabkan karena semakin jauh dari ujung pelat, lapisan batas yang terbentuk semakin tebal. Ini dijelaskan dalam Incropera [6] bahwa semakin besar ($T_w - T_s$) plat yang dipanaskan, maka lapisan batas yang terbentuk akan semakin tebal. Dengan semakin tebalnya lapisan batas yang terbentuk, maka nilai tahanan termal perpindahan panas konveksi akan meningkat, sehingga nilai koefisien perpindahan panas konveksi bebas akan menurun.

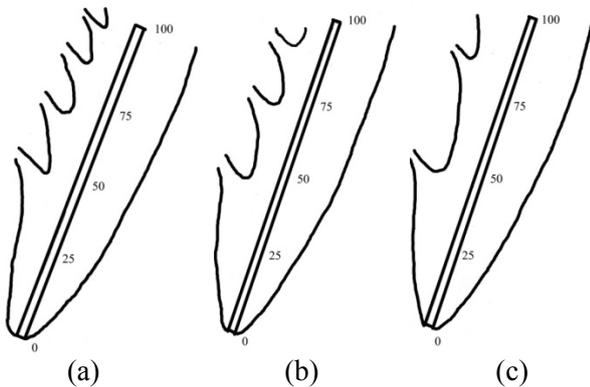
Semakin besar daya listrik yang diberikan pada plat, maka nilai koefisien konveksi bebas juga semakin meningkat. Hal ini disebabkan karena semakin besar daya listrik yang diberikan pada plat, maka semakin tinggi nilai temperatur lokal yang terjadi pada permukaan plat. Ini menyebabkan nilai konduktivitas termal (k_w) dan perbedaan temperatur permukaan dengan lingkungan ($T_w - T_s$) juga semakin meningkat, sehingga nilai koefisien konveksi yang dihasilkan dari Pers. 4 juga akan semakin meningkat.

Pemetaan Pola Aliran *Unsteady* Pada Permukaan Atas Plat Miring

Pemetaan pola aliran *unsteady* yang menggambarkan lapisan batas pada permukaan atas plat panas miring vertikal dipetakan berdasarkan perubahan nilai koefisien konveksi lokal, dimana semakin tebal lapisan batas, maka nilai koefisien konveksi akan semakin kecil. Proses pemetaan pola aliran ini akan digambarkan pada setiap kondisi, yaitu pada kemiringan 10° , daya 7,25 Watt; kemiringan 10° , daya 12,25 Watt; kemiringan 10° , daya 22,05 Watt; kemiringan 16° , daya 7,25 Watt; kemiringan 16° , daya 12,25 Watt; dan kemiringan 16° , daya 22,05 Watt.



Gambar 9. Perbandingan nilai “h” dengan posisi frinji pada kemiringan 10°



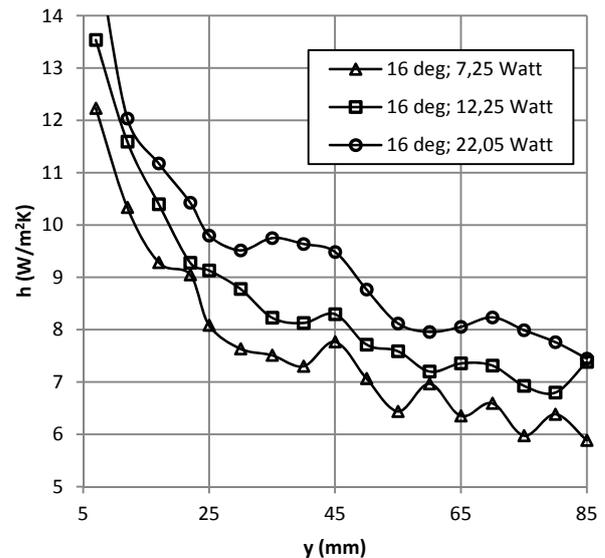
Gambar 10. Pola aliran pada kemiringan 10°:
(a). Daya 7,25 Watt
(b). Daya 12,25 Watt
(c). Daya 22,05 Watt

Perbandingan nilai koefisien konveksi pada masing-masing kondisi tersebut terhadap poisis frinji dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 12.

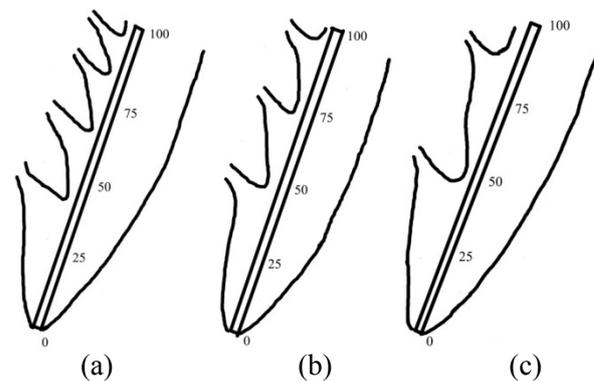
Pada Gambar 9 dan Gambar 11 diperlihatkan bahwa nilai koefisien konveksi bebas sepanjang plat pada berbagai kondisi tidaklah dalam keadaan *steady*. Pola penyebaran nilai koefisien konveksi bebas ini memperlihatkan nilai koefisien konveksi bebas naik lagi pada posisi tertentu. Berbagai kondisi seperti kenaikan daya dan perubahan kemiringan akan mempengaruhi pola perubahan aliran *unsteady*.

Pada kondisi 1, yaitu kemiringan 10°, dan daya 7,25 Watt dapat ditentukan pola perubahan alirannya berdasarkan grafik yang tertera pada Gambar 9, dimana pada daya 7,25 Watt tersebut, nilai koefisien konveksi naik kembali sebanyak 4 kali pada posisi sekitar 45 mm, 60 mm, 70 mm, dan 85 mm. Hal ini menunjukkan bahwa pola aliran lapisan batas yang terbentuk akan turun kembali pada posisi yang sama dengan kenaikan nilai koefisien konveksi pada grafik di Gambar 9. Sehingga pola aliran untuk daya 7,25 Watt dapat diperlihatkan pada Gambar 10.a. Jika daya yang diberikan ditambah menjadi 12,25 Watt, maka rentang posisi kenaikan nilai koefisien konveksi semakin menjauh dan hanya terjadi pada 3 posisi frinji, yaitu 45 mm, 60 mm, dan 75 mm. Begitu daya dinaikkan menjadi 22,05 Watt, maka rentang posisi kenaikan nilai koefisien konveksi akan semakin jauh lagi, dan hanya terjadi 2 kali kenaikan, yaitu pada posisi 45 mm dan 75 mm. Sehingga pola aliran lapisan pada pada daya 12,25 Watt dan 22,05 Watt bisa dilihat pada Gambar 10.b

dan 10.c. Ini bisa disimpulkan bahwa semakin tinggi daya yang diberikan, maka semakin sedikit perubahan pola yang terjadi, karena jarak antar perubahan pola semakin besar. Retang posisi perubahan pola ini juga bisa dilihat pada kemiringan 16° pada Gambar 11, dimana semakin besar daya yang diberikan, maka perubahan pola yang terjadi akan semakin kecil, karena jarak posisi antar perubahan pola semakin besar. Pola aliran untuk kemiringan 16° bisa dilihat pada Gambar 12.a, 12.b, dan 12.c.



Gambar 11. Perbandingan nilai “h” dengan posisi frinji pada kemiringan 16°



Gambar 12. Pola aliran pada kemiringan 16°:
(a). Daya 7,25 Watt
(b). Daya 12,25 Watt
(c). Daya 22,05 Watt

Sementara itu, perubahan kemiringan juga berpengaruh terhadap pola perubahan aliran *unsteady* yang terjadi. Pengaruh kemiringan ini dapat dilihat dari perbandingan antara Gambar 9 dan gambar 11. Pada gambar 10, yaitu pada kemiringan 10°, maka ketika terjadi perubahan pola aliran, maka kenaikan nilai koefisien konveksi

tidak terlalu tinggi. Jika dilihat pada Gambar 11, yaitu kemiringan 16°, maka ketika terjadi perubahan pola aliran, maka perubahan kenaikan nilai koefisien konveksinya lebih tinggi dari pada kemiringan 10°. Hal ini disebabkan karena semakin miringnya posisi plat, maka semakin besar perubahan pola yang terjadi. Begitu juga sebaliknya, ketika posisi pelat semakin tegak, maka pola aliran yang terbentuk semakin *steady*. Dari perubahan posisi kemiringan ini dapat disimpulkan bahwa semakin tegak pelat, maka pola aliran yang terbentuk semakin *steady*, sementara jika semakin miring posisi suatu plat, maka semakin besar pola perubahan yang terjadi.

Hasil dan Analisis Perbandingan Koefisien Konveksi Rata-Rata

Nilai koefisien konveksi lokal metode empirik yang didapat dari Pers. 1 dan metode interferometer yang didapat dari Pers. 4. Sedangkan nilai koefisien konveksi rata-rata (\bar{h}) didapat dari Pers. 5. Pembuatan nilai persentase perbedaan yang didapat pada Pers. 6 dilakukan agar nilai \bar{h} yang dihasilkan oleh pengujian metode interferometrik memiliki kontrol kualitas sehingga dapat menghasilkan hasil analisa yang. Hasil persentase perbedaan antara nilai uji metode interferometrik dengan hasil uji penelitian Fuji dan Imura [7] diperlihatkan pada Tabel 1-4.

Tabel 1. Perbandingan koefisien konveksi metode interferometrik dan metode empirik pada pengujian 1, kemiringan 10°

Θ°	P [W]	Persamaan y(x)	\bar{h}_{eksp}	\bar{h}_1	% beda
10	7,25	-0,0463x + 9,7216	7,36	7,1	3,59 %
10	12,2 5	-0,0509 x + 10,761	8,16	8,0 2	1,71 %
10	22,0 5	-0,0618x + 11,983	8,83	8,8 1	0,18 %

Tabel 2. Perbandingan koefisien konveksi metode interferometrik dan metode empirik pada pengujian 1, kemiringan 16°

Θ°	P [W]	Persamaan y(x)	\bar{h}_{eksp}	\bar{h}_1	% beda
16	7,25	-0,0613x + 10,448	7,62	7,2 6	4,88 %

16	12,2 5	-0,0669x + 11,559	8,48	8,1 2	4,33 %
16	22,0 5	-0,0703x + 12,778	9,54	8,9 1	6,81 %

Tabel 3. Perbandingan koefisien konveksi metode interferometrik dan metode empirik pada pengujian 2, kemiringan 10°

Θ°	P [W]	Persamaan y(x)	\bar{h}_{eksp}	\bar{h}_1	% beda
10	7,25	-0,0467x + 9,7115	7,3 2	7,1 0	3,13 %
10	12,25	-0,0485x + 10,669	8,1 9	8,0 3	1,98 %
10	22,05	-0,0511x + 11,543	8,9 3	8,8 1	1,37 %

Tabel 4. Perbandingan koefisien konveksi metode interferometrik dan metode empirik pada pengujian 2, kemiringan 16°

Θ°	P [W]	Persamaan y(x)	\bar{h}_{eksp}	\bar{h}_1	% beda
16	7,25	-0,0607x + 10,196	7,40	7,2 2	2,37 %
16	12,2 5	-0,0601x + 11,058	8,29	8,1 5	1,69 %
16	22,0 5	-0,0693x + 12,235	9,04	8,9 5	1,06 %

Berdasarkan data yang terdapat pada Tabel 1-4, dapat diambil kesimpulan bahwa persentase perbedaan terbesar terdapat pada pengujian 1, kemiringan 16°, dan daya 22,05 Watt, yaitu sebesar 6,81% dan persentase perbedaan terkecil terdapat pada pengujian 1, kemiringan 10°, dan daya 22,05 Watt sebesar 0,18%.

Korelasi Persamaan Rumus Nusselt Number Rata-rata Seluruh Permukaan

Hasil yang cukup baik yang diperlihatkan pada sub-bab sebelumnya pada perbandingan nilai koefisien konveksi rata-rata metode interferometrik dengan nilai koefisien konveksi rata-rata berdasarkan persamaan yang diberikan

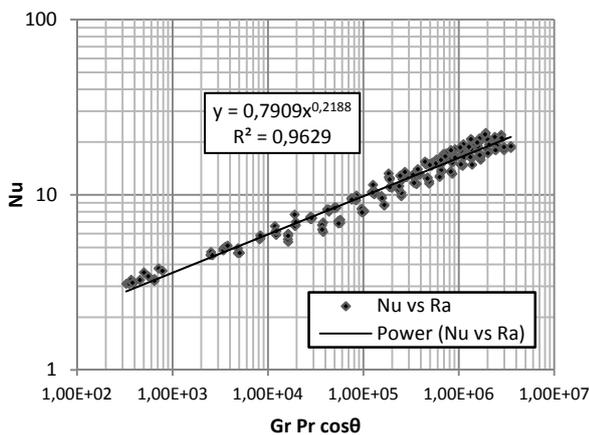
oleh Fuji dan Imura [7] dapat dijadikan sebagai landasan untuk mencari persamaan *Nusselt Number* lokal metode interferometrik. Dalam menentukan rumusan yang dihasilkan dari hasil eksperimental metode interferometrik digunakan persamaan umum sebagai berikut

$$Nu = X.A^J \quad (14)$$

Dimana X adalah bilangan konstanta dan J adalah pangkat dari persamaan A yang didapat dari hasil pengolahan grafik pada *Microsoft Excell* dengan metode *Logarithmic scale* dengan base log 10. Sedangkan untuk persamaan A dapat dijabarkan dengan persamaan

$$A = (Gr.Pr.cos\theta) \quad (15)$$

Grafik perbandingan nilai *Nusselt Number* terhadap nilai *Grasshof Number* dan *Pradtl Number* diperlihatkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Korelasi Persamaan Rumus *Nusselt Number* Rata-rata Pengujian Metode Interferometrik

Dari regresi yang diambil pada grafik Nu vs. Ra pada Gambar 13 memberikan suatu korelasi persamaan umum *Nusselt Number* untuk pengujian perpindahan panas konveksi bebas pada permukaan atas plat panas miring vertikal yaitu:

$$Nu_{eksp} = 0.7909 (Gr Pr \cos \theta)^{0,2188}$$

Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah:

1. Nilai koefisien konveksi bebas semakin menurun dengan semakin jauhnya posisi frinji lokal dari ujung bawah plat benda uji, tetapi pada posisi tertentu, nilai koefisien konveksi kembali naik, lalu kemudian turun lagi yang menunjukkan bahwa aliran *unsteady* terjadi pada permukaan atas plat panas miring vertikal.

2. Nilai koefisien konveksi bebas lokal semakin meningkat dengan semakin meningkatnya penambahan daya yang diberikan.
3. Semakin tinggi daya yang diberikan, maka semakin sedikit perubahan pola yang terjadi karena jarak antar pola perubahan akan semakin jauh. Selain itu, semakin besar kemiringan pada plat benda uji, maka semakin besar kenaikan nilai koefisien konveksi pada posisi perubahan pola.
4. Korelasi umum persamaan *Nusselt Number* untuk bagian *unsteady*, yaitu:
$$Nu_{eksp} = 0.7469 (Gr Pr \cos \theta)^{0,2124}$$

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 : Konduktivitas udara pada temperatur permukaan plat ($\frac{watt}{m K}$)
 l : Panjang benda yang dipanaskan dalam arah perambatan cahaya (m)
 m : Perbedaan lintasan optik pada panjang gelombang
 n_e : Indeks refraksi *extraordinary* pada material *birefringent*
 n_o : Indeks refraksi *ordinary* pada material *birefringent*
 P : Tekanan absolut (Pa)
 PW : Prisma Wollaston
 R_a : Konstanta gas untuk udara ($\frac{J}{kg.K}$)
 SF : *Spatial Filter*
 T_w : Temperatur permukaan (K)
 T_∞ : Temperatur udara sekeliling (K)
 V : Beda tegangan pada ujung-ujung cangkang (Volt)
 y : Koordinat frinji lokal dihitung dari bawah plat (mm)
 α : Sudut pisah total antara sinar x dan y saat meninggalkan PW1 (derajat)
 λ : Panjang gelombang cahaya (m)
 θ_b : Sudut baji prisma Wollaston (derajat/radian)
 ν : Viskositas kinematik ($\frac{m^2}{s}$)
 β : Koefisien ekspansi volumetrik (K^{-1})

Referensi

- [1] Sparrow, E. M. dan Gregg, J. L., “Similar Solutions for Free Convection From a Nonisothermal Vertical Plate”, Trans. ASME, vol. 80, p. 379-386, 1958a
- [2] Sernas, V. dan Fletcher, L. S., *A Schlieren Interferometer Method for Heat Transfer Studies*, Trans. ASME, Series C, Journal of Heat Transfer, Februari 1970, h. 202-204.
- [3] Black, W. Z. dan Carr, W. W., *Application of a Differential Interferometer to the Measurement of Heat Transfer Coefficients*, Review of Scientific Instruments, 42, 1971, h. 337-340.
- [4] Sobhan, C. B., Venkateshan, S. P., dan Seetharamu, K. N., *Experimental Analysis of Unsteady Free Convection Heat Transfer from Horizontal Fin arrays*, Wärme – und Stoffübertragung, Springer-Verlag, 24, 1989, h. 155-160.
- [5] Sobhan, C. B., Venkateshan, S. P., dan Seetharamu, K. N., *Experimental Studies on Steady Free Convection Heat Transfer from Fins and Fin Arrays*, Wärme – und Stoffübertragung, Springer-Verlag, 25, 1990, h. 345-352.
- [6] Incropera, Frank. P. dan DeWitt, David. P., *Introduction to Heat Transfer*, John Wiley & Sons, 5th ed., New York, 2007.
- [7] Fuji, T. Dan Imura, H., *Natural Convection Heat Transfer From A Plate With Arbitrary Inclination*, International Journal of Heat Mass Transfer, vol 5, pp. 755-767, 1972
- [8] Sihombing, A., *Pengembangan Interferometer Differensial Untuk Pengukuran Koefisien Perpindahan Panas Konveksi Bebas Lokal dan Kalibrasi Dengan Plat Vertikal Nonisotermal*, Tesis Magister, Institut Teknologi Bandung, 2003.