

# ANALISA TRANSIEN PERPINDAHAN PANAS PADA *HEAT PLATE* DENGAN METODA *CONFINED IMPINGING JET*, DENGAN NOSEL *RECTANGULAR-STAGGERED*

Bambang Yudianto<sup>1)</sup>

## Abstrak

*Impinging jet* telah diterapkan secara luas diberbagai bidang yang memerlukan laju perpindahan panas tinggi seperti pada pendinginan sudu turbin, sistem anti-icing di pesawat terbang dan sistem pendingin kusus lainnya. Laporan ini membahas perpindahan panas transien yang terjadi pada sebuah pelat panas yang datar dengan fluks kalor konstan pada seluruh permukaannya dengan menggunakan metode pendinginan *confined impinging jet* dengan nosel *rectangular-staggered*.

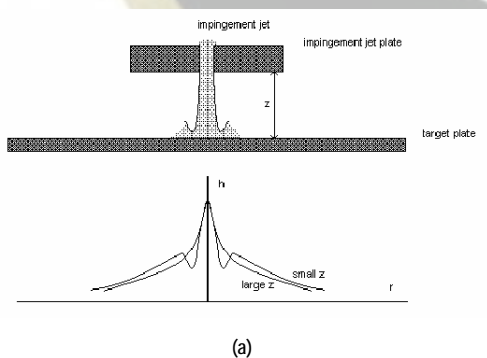
Pengujian dilakukan untuk mengetahui pengaruh laju penurunan temperatur dan penurunan energi yang tersimpan sebagai fungsi jarak pancaran (*jet*) ke plat target dan bilangan Reynold. Pengujian dilakukan dengan memberi variasi jarak *jet* ke target ( $H/D = 1.33$ ,  $H/D = 2.0$ ,  $H/D = 2.67$ ) dan bilangan Reynold ( $Re = 2337$ ,  $Re = 4375$ ,  $Re = 6084$ ).

Dari hasil pengujian didapatkan bahwa pada peningkatan bilangan Reynold akan meningkatkan laju penurunan temperatur pelat target dan penurunan energi yang tersimpan. Namun pada semua bilangan Reynold terukur, penurunan temperatur optimum terjadi pada jarak  $H/D = 2$ .

## PENDAHULUAN

Pendinginan dengan metoda *Impinging Jet*, dimana fluida dipancarkan melalui lubang-lubang atau nosel menuju permukaan yang akan didinginkan, menghasilkan koefisien perpindahan panas lokal yang tinggi. Metoda ini telah diterapkan pada berbagai komponen seperti sudu turbin, dinding ruang pembakaran, *heat exchanger* dan komponen elektronik. Sebaliknya, cara ini juga dapat digunakan untuk memanaskan suatu komponen atau suatu bahan tertentu contohnya pada proses pengeringan kertas dan pengeringan tekstil.

"*Impinging*" disini berarti "tabrakan", dimana terjadi tabrakan antara fluida pendingin dengan permukaan suatu target dalam kecepatan aliran yang tinggi. Pada gambar 1(a, b) ditunjukkan visualisasi *impinging jet*, terlihat bahwa koefisien perpindahan panas akan menurun seiring dengan meningkatnya radius (jarak dari inti *jet*), selain itu akan terjadi puncak koefisien perpindahan panas yang kedua untuk jarak *jet* nosel yang cukup dekat dengan permukaan target ( $H$  yang kecil).



Gambar 1 :

- (a) Mekanisme perpindahan panas *impinging jet*<sup>(9)</sup>
- (b) Visualisasi *impinging jet*<sup>(11)</sup>

Awalnya penelitian terhadap metode peningkatan perpindahan panas *impinging jet* ini terfokus pada penggunaan *impinging jet* tunggal, kemudian berkembang pada penggunaan susunan *impinging jet*. Untuk *impinging jet* tunggal, seperti pada gambar 1., aliran udara pendingin keluar melalui sebuah *jet* nosel dan langsung menabrak permukaan target. Aliran udara yang memancar memiliki kecepatan yang tinggi dan setelah terjadi tabrakan dengan permukaan target akan mengakibatkan terjadinya aliran turbulen. Hal ini mengakibatkan adanya peningkatan yang signifikan laju perpindahan panas yang terjadi. Koefisien perpindahan panas ( $h$ ) yang tertinggi dihasilkan pada inti *jet* (semburan) dan akan menurun untuk daerah diluar inti *jet*.

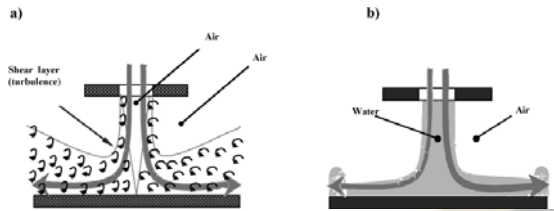
## KONFIGURASI IMPINGING JET

### *Submerge jet - free jet*

Berdasarkan perbedaan bentuk alirannya *impinging jet* ini terbagi dua yaitu, *submerge impinging jet* dan *free impinging jet*. Pada *submerge impinging jet*, fluida yang digunakan dalam *impinging jet* sama

<sup>1)</sup> Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin FT-UNDIP

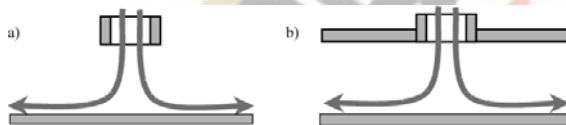
dengan fluida yang terdapat disekeliling target. Sedangkan untuk *free impinging jet*, fluida yang digunakan berbeda dengan fluida disekeliling pelat target, contohnya air digunakan untuk pendinginan komponen yang terdapat di udara bebas.



Gambar 2 : (a) Submerge impinging jet dan(b) free impinging jet [8]

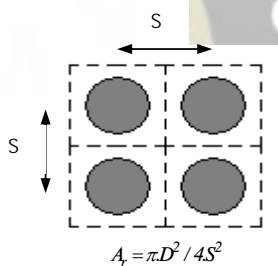
**Confined impinging jet dan unconfined impinging jet**

Dalam penerapannya, *Impinging jet* terbagi menjadi *confined impinging jet* dan *unconfined impinging jet*. Seperti terlihat pada gambar, untuk *confined impinging jet* digunakan pembatas pada nosel keluaran *jet*.



Gambar 6 : (a) Unconfined impinging jet (b) confined impinging jet [8]

*Impinging jet* dengan susunan beberapa nosel *jet* digunakan untuk daerah yang lebih luas. Karakter dari susunan *impinging jet* ini secara umum bisa ditentukan dengan parameter-parameter tak berdimensi, seperti  $X/D$ ,  $Y/D$ , dan  $H/D$ .  $X/D$  dan  $Y/D$  merupakan parameter untuk jarak antar jet dalam koordinat cartesian sedangkan  $H/D$  merupakan jarak antara *jet* dengan pelat target. Ketiga parameter tersebut tergantung dengan besarnya diameter *jet* ( $D$ ). Pengaruh dari tiga parameter geometri,  $X/D$ ,  $Y/D$  dan  $H/D$  telah diselidiki secara teoritis dan eksperimental, yang mendapati bahwa meningkatkan jarak antar *jet* akan menyebabkan penurunan koefisien perpindahan panas secara keseluruhan. Semakin besar jarak antara *jet* dengan pelat target juga akan menyebabkan penurunan laju perpindahann panas.

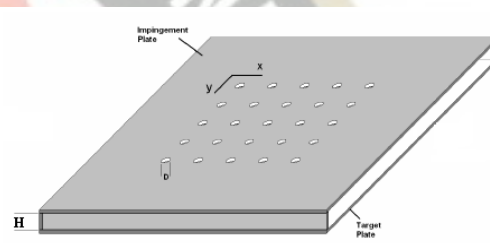


Gambar 3 : Susunan nosel *circular* sejajar [2]

Selain itu terdapat parameter geometri yang lain yaitu, luasan nosel relatif  $A_r$ , yang merupakan rasio luas penampang keluaran nosel dengan luas permukaan dari *sell* ( $A_r = A_{c,e}/A_{sel}$ ). Pada gambar berikut terdapat susunan nosel *circular* sejajar dengan luas nosel relatifnya. Dimana pada umumnya  $S$  menyatakan *pitch* susunan.

Beberapa penelitian dilakukan yang terfokus pada bentuk susunan nosel *jet*, sejajar (*aligned*) dan selang seling (*staggered*). Penelitian tersebut menemukan bahwa susunan *jet* selang seling menghasilkan laju perpindahan panas yang lebih tinggi dari pada susunan *jet* sejajar. Nosel yang digunakan dalam *impinging jet* ini tidak terbatas pada bentuk *circular* tetapi terdapat juga nosel berbentuk celah (*slot*), *rectangular*, dll.

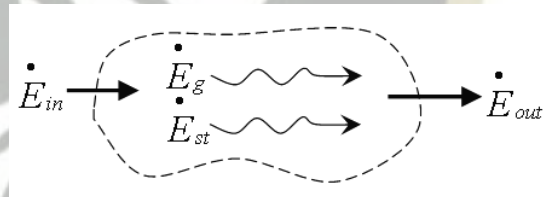
Pada pengujian ini digunakan jenis nosel persegi (*rectangular*) yang disusun selang seling (*staggered*).



Gambar 4 : *Circular aligned confined impinging jet* [9]

**ANALISIS KEKEKALAN ENERGI**

Berdasarkan gambar 5, maka persamaan kekekalan energi dapat dituliskan dengan :



Gambar 5 : Aliran energi suatu volume atur [2]

$$E_{in} + E_g - E_{out} = \Delta E_{st}$$

Jadi, jumlah energi yang masuk (*inflow energy*,  $E_{in}$ ) dan energi yang dibangkitkan (*generation energy*,  $E_g$ ) akan menambah jumlah energi dalam (energi yang tersimpan / *storage energy*,  $\Delta E_{st}$ ) dalam volume atur. Sedangkan energi keluar (*outflow energy*,  $E_{out}$ ) akan mengurangi energi dalam (*storage energy*,  $\Delta E_{st}$ ).

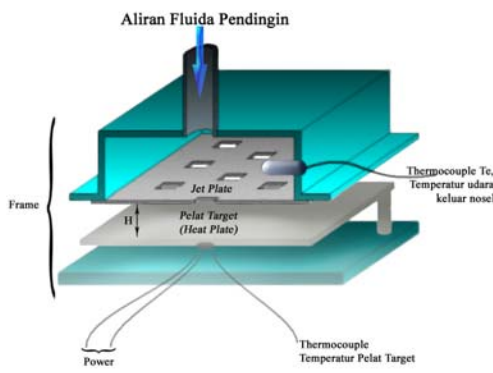
Untuk mencari penurunan energi dalam (*energi storage*) digunakan persamaan berikut :

$$\dot{E}_{st} = -\rho V c \frac{dT}{dt}$$

Tanda negatif di depan menyatakan bahwa telah terjadi penurunan energi dalam akibat adanya penurunan temperatur dari temperatur stedinya. Selain itu, sesuai dengan hukum kedua termodinamika, tanda negatif menunjukkan bahwa energi panas berpindah ke tempat yang lebih rendah dalam skala temperatur.

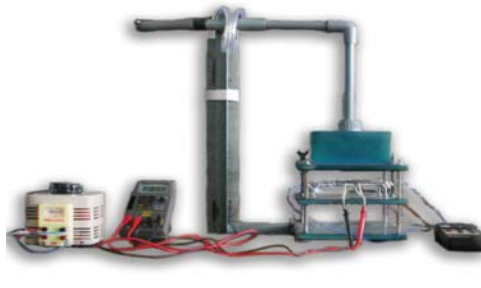
## INSTALASI PENGUJIAN

Skema sistem pengujian ditunjukkan pada gambar 6. Aliran fluida pendingin (udara) dari kompresor mengalir melalui *orifice* dan kemudian menuju *frame*. Kemudian aliran fluida pendingin keluar melalui 18 lubang yang terdapat pada *jet plate* lalu menabrak pelat target dengan arah tegak lurus yang merupakan prinsip dari proses pendinginan *impinging jet* ini.



Gambar 6 : Skema sistem pengujian

Setelah proses *impingement* tersebut, aliran fluida keluar dari *frame* dalam arah yang tidak menentu atau mengalir ke segala arah. Instalasi pengujian ini dapat dilihat pada gambar 7. di bawah ini :



Gambar 7 : Instalasi pengujian

Secara garis besar instalasi pengujian ini terdiri dari beberapa komponen :

- ✦ Kompresor  
Kompresor adalah alat yang berfungsi untuk menghasilkan laju aliran fluida yang digunakan sebagai medium pendingin *heat plate*. Pada pengujian ini laju aliran udara yang dihasilkan dari kompresor diatur dengan mengatur sistem bukaan katup pada kompresor.

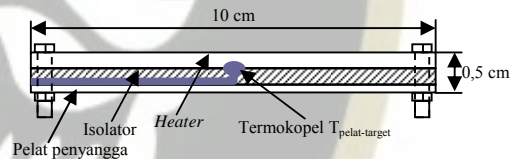
- ✦ *Frame*  
*Frame* berfungsi sebagai tempat dari berbagai peralatan lainnya. Pada *frame* terdapat beberapa peralatan lainnya seperti alat ukur, *jet plate* dan pelat target. Selain itu *frame* berfungsi sebagai pengatur jarak antara *jet plate* dengan pelat target

- ✦ *Heater*  
Elemen Pemanas selain berfungsi sebagai sumber panas juga berfungsi sebagai *heat plate* atau pelat target yang akan didinginkan pada proses pengujian.

- ✦ *Jet plate*  
Pada *jet plate* ini terdapat 18 buah lubang (*jet nozzle*) dengan bentuk persegi empat (*rectangular*) dan susunannya adalah selang-seling (*staggered*). *Jet plate* berfungsi sebagai pengarah aliran fluida pendingin (udara) dari kompresor menuju pelat target dengan distribusi yang merata.

- ✦ *Regulator*  
*Regulator* berfungsi sebagai pengatur *voltage* atau tegangan yang diperlukan ke elemen pemanas. *Regulator* diperlukan agar daya yang masuk ke elemen pemanas tetap konstan.

- ✦ Alat ukur  
Alat ukur yang digunakan pada instalasi pengujian ini terdiri dari dua buah termokopel tipe K (CA) sebagai sensor untuk mengukur temperatur pelat target dan temperatur udara pendingin, *orifice* untuk mengukur debit aliran udara pendingin, *wattmeter* untuk mengukur besarnya daya listrik yang masuk kedalam elemen pemanas serta *display* termometer digital untuk menampilkan temperatur yang terukur dari termokopel.



Gambar 8 : Pemasangan termokopel Tpelat-target

## PROSEDUR PENGUJIAN

Pengujian dilakukan dengan melakukan dua buah variasi, yaitu variasi bilangan Reynold dan variasi rasio H/D dengan menggunakan daya yang tetap sebesar 35 Watt. Variasi bilangan Reynold yang digunakan adalah 2337, 4375 dan 6084. Sedangkan untuk variasi rasio H/D adalah  $H/D = 1,33$ ,  $H/D = 2,0$  dan  $H/D = 2,67$ . Prosedur pengujian dilakukan dengan urutan sebagai berikut :

1. Memberikan input daya listrik terhadap elemen pemanas sebesar 35 Watt.
2. Mengukur perubahan temperatur sampai diperoleh kondisi *steady* pada pelat target ( $\frac{dT}{dt} \leq 0,07$  °C/min).
3. Mengatur jarak pelat target dari *jet plate* untuk  $H/D = 2,67$  yaitu sebesar 13,35 mm..

4. Mencatat ketinggian awal manometer ( $\Delta H$ ), temperatur awal pelat target dan temperatur awal udara keluar *nozzle*.
5. Mengalirkan fluida pendingin dengan mengatur bukaan katup untuk mendapat kecepatan aliran udara sehingga diperoleh bilangan Reynold 2337. ( $\Delta H = 2,1$  cm).
6. Mencatat perubahan ketinggian manometer, perubahan temperatur pelat target dan temperatur udara keluar *nozzle* secara bersamaan setiap 5 detik selama 10 menit.
7. Setelah selesai, melanjutkan pengujian untuk variasi bilangan Reynold berikutnya yaitu  $Re = 4375$  ( $\Delta H = 4,4$  cm) dan yang terakhir untuk  $Re = 6084$  ( $\Delta H = 8,8$  cm).
8. Diulangi dari nomor tiga, untuk jarak pelat target  $H/D = 2,0$  dan  $H/D = 1,33$

Total pengujian yang dilakukan adalah sebanyak 9 kali dan untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel berikut.

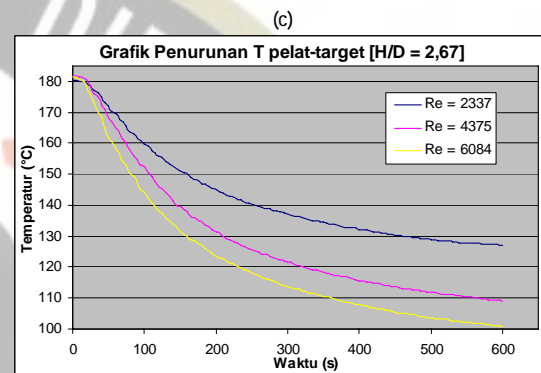
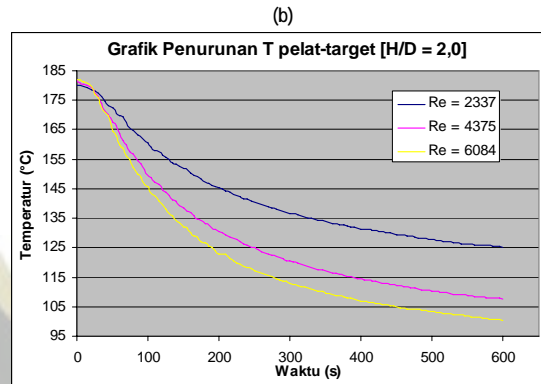
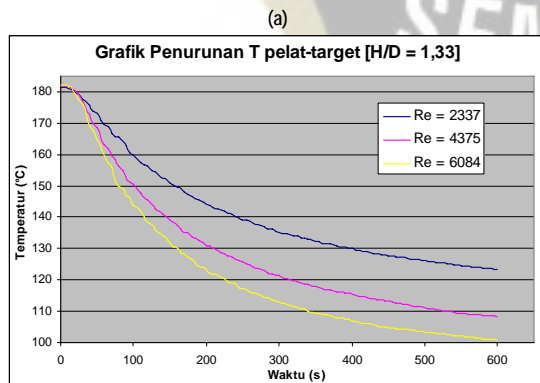
Tabel 1 : Jumlah pengujian

Pengujian ke	Rasio H/D	Bilangan Reynold
1	2,67	2337
2		4375
3		6084
4	2,0	2337
5		4375
6		6084
7	1,33	2337
8		4375
9		6084

## DATA DAN PEMBAHASAN

### Penurunan Temperatur Pelat Target

Perubahan temperatur pelat target terhadap waktu pada setiap H/D dengan tiga variasi bilangan Reynold, yaitu  $Re = 2337$ ,  $Re = 4375$  dan  $Re = 6084$ , ditunjukkan grafik 9a s.d 9c. Sementara tabel.2 menyatakan penurunan temperatur (selisih temperatur awal dan temperatur akhir) plat target, untuk 3 bilangan Reynold dan 3 variasi H/D..



Gambar 9 : Grafik penurunan temperatur pelat target terhadap waktu untuk setiap H/D

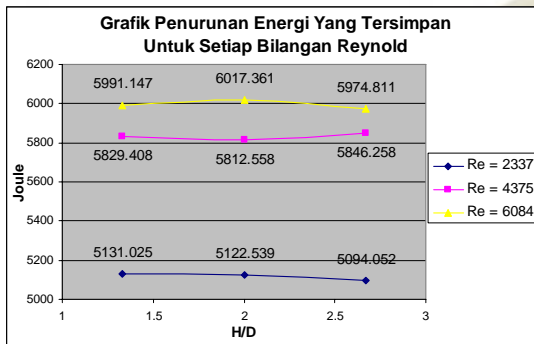
Tabel 2 : Penurunan temperatur pelat target tiap H/D

Reynold	H/D = 1,33	H/D = 2,0	H/D = 2,67
2337	54,2°C	54,8°C	53,3°C
4375	73,6°C	74,1°C	72,7°C
6084	81,4°C	81,5°C	80,7°C

Dari hasil pengujian (gambar 1s.d 2) dapat dilihat, penurunan temperatur pelat target untuk setiap H/D dipengaruhi oleh kecepatan aliran udara (bilangan Reynold). Pada peningkatan kecepatan udara akan menyebabkan penurunan temperatur pelat target yang lebih besar. Pola kecenderungan ini selalu nampak pada semua variasi H/D. Hal ini dapat dijelaskan bahwa makin tinggi kecepatan aliran, tingkat turbulensinya juga akan meningkat, sehingga terjadi perpindahan energi/panas yang lebih besar. Sementara pengaruh perubahan H/D untuk bilangan Reynold tertentu, mempunyai pengaruh yang tidak linear. Sebagai contoh untuk bilangan Reynold 2337 pada variasi H/D (= 1,33, 2 dan 2,67) didapat penurunan temperatur berturut-turut 54,2 C, 54,8 C dan 53,3 C. Demikian juga untuk bilangan Reynold yang lain Namun penurunan temperatur terbesar untuk semua bilangan Reynold, terjadi pada H/D = 2,0 (tabel 2). Hal ini dapat disimpulkan bahwa pengaruh terbesar dari penggunaan variasi kecepatan aliran udara terjadi pada H/D = 2,0 dibandingkan pada H/D = 2,67 maupun H/D = 1,33.

## Penurunan Energi Yang Tersimpan

Berikut ini akan dibahas pengaruh variasi bilangan Reynold serta pengaruh variasi H/D terhadap penurunan energi yang tersimpan dalam pelat target setelah dilakukan proses pendinginan selama 10 menit. Dari grafik terlihat bahwa dengan meningkatkan bilangan Reynold yang berarti meningkatkan kecepatan aliran udara pendingin, akan meningkatkan penurunan energi yang tersimpan pada pelat target.



Gambar 10 : Penurunan energi yang tersimpan untuk setiap bilangan Reynold

Hal ini terjadi untuk semua variasi H/D yang digunakan

Peningkatan rasio H/D yang berarti memperbesar jarak antara pelat target dengan *jet plate* akan terjadi pengaruh yang bervariasi terhadap penurunan energi yang tersimpan. Akan tetapi penurunan energi (pada bilangan Reynold tertentu) terhadap perubahan H/D tidak begitu nampak (tidak signifikan), yaitu cenderung konstan. Sebagai contoh dengan meningkatkan H/D pada bilangan Reynold 2337 akan sedikit memperkecil penurunan energi yang tersimpan (dari 5131 joule hingga 5094 joule). Sementara pada bilangan Reynold 4375 akan sedikit memperbesar penurunan energi yang tersimpan (dari 5829 joule hingga 5846 joule), demikian juga untuk bilangan Reynold 6084, terjadi perubahan penyimpanan energi yang kecil.

## KESIMPULAN

Dari hasil percobaan ini dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Dengan penggunaan kecepatan aliran udara (bilangan Reynold) yang lebih besar akan menyebabkan laju penurunan temperatur pelat target yang lebih besar untuk semua variasi H/D yang digunakan..

2. Penggunaan kecepatan aliran udara yang lebih besar akan meningkatkan penurunan energi yang tersimpan pada pelat target, hal ini berlaku untuk semua variasi H/D yang digunakan.
3. Perubahan H/D terhadap penurunan temperatur dan energi yang tersimpan pada setiap bilangan Reynold tidak menunjukkan perubahan yang berarti atau relatif kecil.
4. Penurunan temperatur terbesar terjadi pada H/D = 2 dan berlaku pada semua bilangan Reynold yang diukur.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Holman, J.P., *Perpindahan Kalor edisi ke enam*, Erlangga, 1988.
2. Incropera, F.P and De Witt D.P, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Third Edition, John Wiley & Sons, 1990.
3. Fox, Robert W and Alan T. Mc Donald, *Introduction to Fluid Mechanics, fourth edition, SI Version*, John Wiley & Sons, Inc, Canada, 1994.
4. Kreith, F, *Prinsip Perpindahan Panas*, Erlangga, Jakarta, 1986.
5. Harahap F, Perkins H.C and Reynold W.C, *Termodinamika Teknik*, Erlangga, Jakarta, 1994.
6. Holman, J.P., *Metode Pengukuran Teknik edisi ke empat*, Erlangga, 1985.
7. Daugherty, Robert L., Franzini, Joseph B. and Fiimore, E. John, *Fluid Mechanics with Engineering Applications*, eighth edition, McGraw Hill, 1985.
8. Al-aqal, Osama M.A, Ph.D., *Heat Transfer On the Walls Of A Narrow Channel With Jet Impingement And Cross Flow*, Dissertation, University of Pittsburgh, 2003.
9. Gao, Lujia, *Effect Of Jet Hole Arrays Arrangement On Impingement Heat Transfer*, Thesis, Louisiana State University, 2003.
10. Yongmann, M. Chung, and Kai, H. Luo, *Unsteady Heat Transfer Analysis Of An Impinging Jet*, Paper, University of London.
11. [www.rmc.ca](http://www.rmc.ca), *Confined and Unconfined Jet impingement : Flow Structure, Heat Transfer and Force Loading*.
12. [www.efunda.com](http://www.efunda.com), *Orifice Flowmeter : Equations*.
13. [www.vki.ac.be](http://www.vki.ac.be), *Research Activities 96-97 : Turbulent Heat Transfer & Flow Phenomena, Heat Transfer In Single Phase Flows*.