

## Pengaruh Jarak Tumbukan Terhadap Karakteristik Perpindahan Panas Konvektif Dengan Tumbukan Jet Sintetik

Harinaldi<sup>1\*</sup>, Engkos A Kosasih<sup>1</sup>, Damora Rhakasywi<sup>1</sup>, Christoforus Deberland<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia,  
Kampus UI-Depok, Jawa Barat, 16424, Indonesia

\*Corresponding author. Phone:+62-21-7270032;Fax:+62-21-7270033

e-mail: harinald@eng.ui.ac.id, engkoskosasih@eng.ui.ac.id, damora.rhakasywi01@ui.ac.id, christoforus.deberland@ui.ac.id

### Abstrak

Dewasa ini, beban panas yang semakin besar akibat meningkatnya kecepatan operasi dan densitas komponen pada suatu piranti elektronik menyebabkan perlunya sistem pendingin baru yang lebih efisien atau mempunyai disipasi panas yang tinggi. Jet sintetik potensial untuk digunakan sebagai pendingin komponen elektronik. Paper ini melaporkan hasil dari studi eksperimental mengenai pengaruh Jarak Tumbukan (*impinging distance*) pada performa pendinginan dengan tumbukan jet sintetik. Rasio jarak aksial antara permukaan yang dipanaskan dan jet ( $L$ ) terhadap diameter orifis jet ( $d$ ) berada pada jangkauan 0-3.3. Investigasi dilakukan dengan menggunakan prototipe jet sintetik yang memiliki 16 lubang dengan diameter tiap lubang 3 mm dan digerakkan oleh dua membran piezoelektrik 5 volt dengan eksitasi gelombang sinusoidal. Dengan sistem aparatus tersebut diteliti karakteristik dari perpindahan panas konvektif yang dihasilkan membran yang berosilasi. Hasil penelitian menunjukkan adanya pengaruh ketinggian orifis yang signifikan terhadap laju perpindahan panas yang didapat. Pada frekuensi eksitasi tinggi 160 Hz, kenaikan nilai perpindahan sebanding dengan kenaikan rasio  $L/d$  hingga nilai  $L/d$  sebesar 2 kemudian turun hingga  $L/d$  sebesar 3,3.

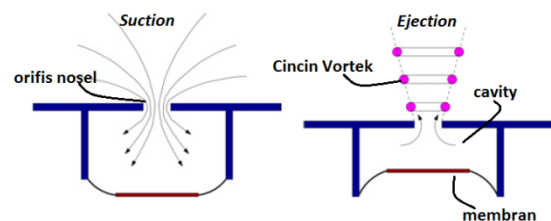
**Keywords:** Efisien, Tumbukan Jet Sintetik, Laju Perpindahan Panas.

### Pendahuluan

Di dunia saat ini, produk-produk elektronik semakin berukuran kecil dan menggunakan daya yang rendah untuk menjalankannya seperti pada komputer portabel dan juga alat telekomunikasi. Sejalan dengan perkembangan tersebut, dibutuhkannya sistem pendingin yang efisien dan juga tidak bising pada produk elektronik tersebut. Saat ini alat-alat elektronik dijalankan menggunakan sumber daya kering (*dry cell*). Ini menjadi tinjauan lain karena sistem pendingin diharapkan mengkonsumsi daya yang kecil untuk menghemat daya pada alat elektronik tersebut. Salah satu sistem pendinginan yang masih banyak digunakan pada alat elektronik adalah kipas yang ukurannya relatif besar dengan demikian untuk menjawab permasalahan di atas maka dipilihlah jet sintetik untuk menggantikan kipas dimana diharapkan jet sintetik mempunyai efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan kipas konvensional saat ini.

Menurut Smith & Glezer<sup>[1]</sup> Jet sintetik merupakan aliran dengan input mass netto nol (*Zero-net-mass*) yang dihasilkan melalui gerak hisap (*suction*) - tiup (*ejection*) fluida yang dihasilkan oleh gerak harmonik membran dan keluar melalui celah sempit/orifis. Jet sintetik digerakkan oleh sebuah aktuator berupa membran *piezoelektrik* yang memiliki input *massa netto* nol tetapi menghasilkan output momentum *netto*

tidak nol. Jet sintetik secara visual seperti yang digambarkan Khrisnan & Mohseni<sup>[2]</sup> tampak pada gambar 1.



**Gambar 1.** Sketsa dari jet sintetik yang terbentuk karena adanya pergerakan diafragma dalam *cavity*.

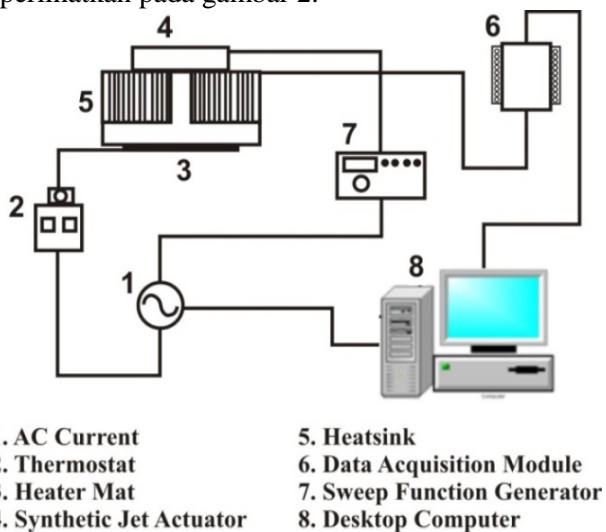
Proses-proses terbentuknya jet sintetik secara garis besar adalah sebagai berikut. Di dalam *cavity* jet sintetik terdapat suatu diafragma atau membran dimana membran tersebut akan digerakkan secara periodik. Pada saat membran tersebut berosilasi, akan terbentuk getaran yang mengakibatkan udara di dalam *cavity* ikut digerakkan. Kemudian fluida udara di dalam *cavity* dipaksa bergerak melalui dua fase yaitu fase hisap (*suction*) dan fase semburan (*ejection*). Kedua fase ini terbentuk karena adanya lubang orifis pada sisi *cavity* dan gerakan dari membran jet sintetik. Pada saat aliran fluida keluar dari *cavity* jet sintetik, aliran fluida mengalami separasi yang dikarenakan adanya fase hisap (*suction*)

dan fase semburan (*ejection*) sehingga terbentuk pasangan cincin *vortex*. Separasi aliran ini terjadi karena amplitudo getaran membran yang cukup besar sehingga aliran fluida saat keluar melalui orifis membentuk lapisan geser dengan udara sekitar. Lapisan geser dan turbulensi pada sisi luar mengakibatkan terbentuknya pasangan cincin *vortex* dan kemudian cincin-cincin *vortex* ini dipergunakan untuk menghasilkan efek perpindahan panas konvektif kontrol aliran termal yang lebih baik terhadap suatu *heat sink* yang dipasang.

Menurut Mc Guinn<sup>[3]</sup> terdapat tiga variabel utama yang mempengaruhi perpindahan kalor pada *synthetic jet impinging* yaitu frekuensi eksitasi, panjang langkah dan ketinggian orifis terhadap permukaan. Kenaikkan perpindahan panas dengan orifis berbentuk kotak lebih baik dibanding bentuk lingkaran dan segitiga menurut Mangesh Chaudari<sup>[4]</sup>. Kemudian dijelaskan pula bahwa pada jarak aksial rendah, orifis dengan rasio aspek 3-5 memiliki performa pendinginan yang baik.

**Metode Eksperimen**

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental dengan menggunakan alat ukur temperatur termokopel tipe-T berjumlah delapan buah yang dihubungkan terhadap *data acquisition module* (Advantech USB 4718) dengan akurasi pengukuran  $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ . Penelitian ini merupakan salah satu dari rangkaian riset mengenai pengembangan pendinginan piranti mikroelektronik dengan tumbukan jet sintetik khususnya jarak tumbukan (*impinging distance*) jet, jumlah orifis, dan bentuk orifis dengan beberapa rasio aspek dan variasi gelombang eksitasi. Susunan aparatus eksperimen diperlihatkan pada gambar 2.

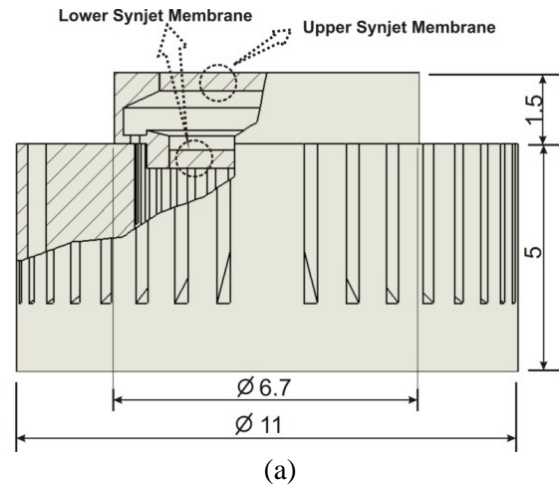


**Gambar 2.** Susunan Aparatus eksperimen

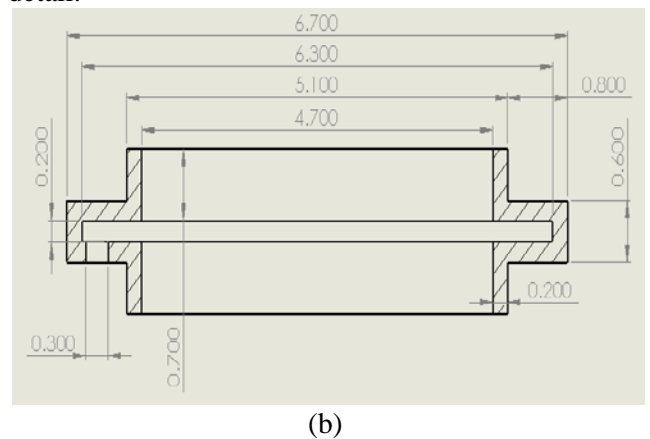
Pemanasan dengan heater dijaga konstan  $60^{\circ}\text{C}$  dengan menggunakan kontrol PID, kemudian setelah suhu pelat *heatsink* mulai stabil maka aktuator Jet

Sintetik diaktifkan dan secara otomatis data temperatur diakuisisi secara berkala oleh DAQ yang terhubung dengan komputer. Pada pengambilan data, divariasikan ketinggian dari orifis jet sintetik terhadap pelat yang dipanaskan (L). Pengambilan data temperatur selama satu jam pengaktifan jet sintetik.

Investigasi dilakukan dengan menggunakan prototipe aktuator jet sintetik yang digunakan memiliki 16 lubang dengan diameter tiap lubang 3 mm dan digerakkan oleh dua membran piezoelektrik 5 volt dengan eksitasi gelombang sinusoidal. Sebelum dilakukan eksperimen, dilakukan pengaturan suhu pada *heat sink*. Sumber panas pada *heat sink* didapatkan dengan menempatkan *heater mat* pada bagian bawah *heat sink* dengan suhu  $60^{\circ}\text{C}$  yang diatur menggunakan *thermostat* dan pengukuran dilakukan pada suhu lingkungan  $28^{\circ}\text{C}$ .



Rancangan *prototype* jet sintetik yang dibuat dan dipakai dalam eksperimen ditunjukkan dalam gambar 4. Gambar 4(a) memperlihatkan detail model fisik susunan modul jet sintetik dengan *heat sink*. Gambar 4(b) memperlihatkan aktuator jet sintetik secara detail.



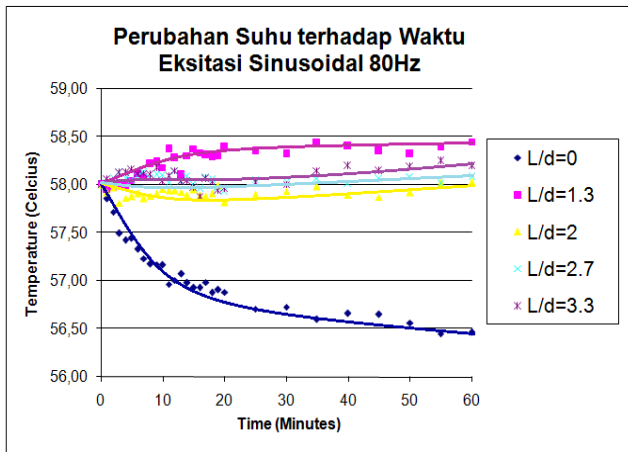
**Gambar 4.** Model fisik *synthetic jet* (dalam cm) (a) Susunan aktuator *synthetic jet* dengan *heat sink* (b) Detail aktuator *synthetic jet*

**Hasil dan Pembahasan**

**1. Penurunan Suhu rata-rata.**

Analisa pendinginan dengan menggunakan Jet sintetik direpresentasikan dengan menggunakan grafik penurunan suhu pada pelat heatsink selama satu jam.

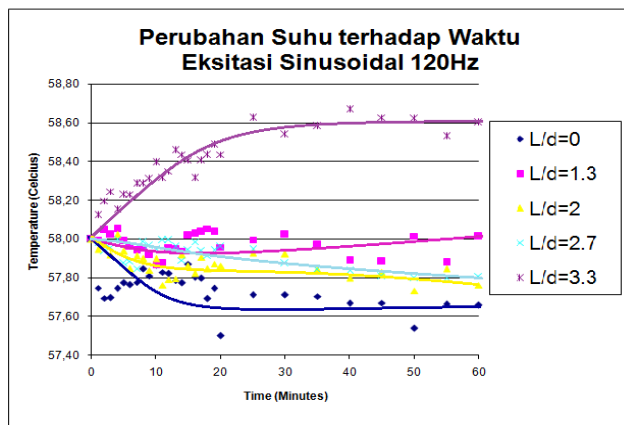
**1.a Penurunan Suhu rata-rata pada eksitasi gelombang sinusoidal 80 Hz.**



**Gambar 5.** Grafik Perubahan Suhu terhadap Waktu pada pada Eksitasi Gelombang Sonusidal 80Hz

Pada eksitasi gelombang Sinusoidal 80 Hz, yang hasilnya terlihat di gambar 5, penurunan suhu yang paling baik diperoleh pada L/d sebesar 0 yaitu sebesar 1.55°C. sedangkan pada variasi lain penurunan suhunya lebih rendah. Pada L/d sebesar 2, terlihat suhu pelat *heatsink* turun dan secara stabil terjaga hingga satu jam meskipun penurunan suhu hanya 0.37°C. Sedangkan untuk variasi lain, cenderung tidak menunjukkan pengaruh pengaktifan jet sintetik.

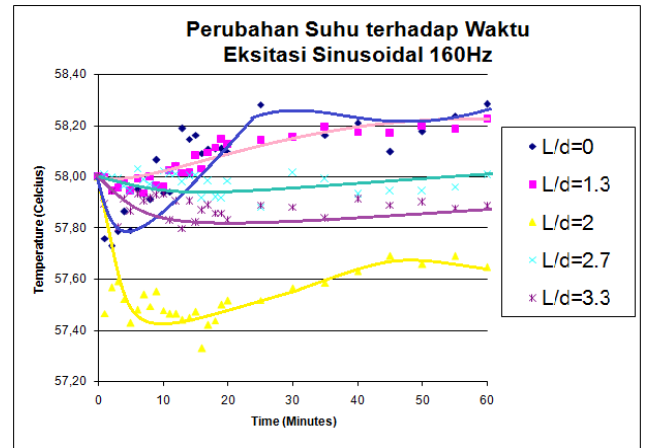
**1.b Penurunan Suhu rata-rata pada eksitasi gelombang sinusoidal 120 Hz.**



**Gambar 6.** Grafik Perubahan Suhu terhadap Waktu pada pada Eksitasi Gelombang Sonusidal 120Hz

Pada eksitasi gelombang sinusoidal 120 Hz, yang hasilnya diperlihatkan pada gambar 6, penurunan suhu yang paling tinggi diperoleh pada L/d sebesar 0, artinya ketinggian jet sintetik mendekati 0. Nilai penurunan suhu pada variasi tersebut adalah 0.5°C, masih lebih rendah dibandingkan dengan eksitasi 80 Hz. Pada nilai L/d 1.3-3.3 tidak menunjukkan penurunan suhu yang signifikan.

**1.c Penurunan Suhu rata-rata pada eksitasi gelombang sinusoidal 160 Hz.**



**Gambar 7.** Grafik Perubahan Suhu terhadap Waktu pada pada Eksitasi Gelombang Sonusidal 160Hz

Pada eksitasi gelombang Sinusoidal 160 Hz, yang hasilnya terlihat di gambar 7, penurunan suhu yang paling tinggi adalah pada L/d sebesar 2. Besarnya penurunan suhu tersebut adalah 0.88°C. Sedangkan pada L/d sebesar 0, penurunan suhu yang didapatkan justru lebih rendah, yaitu sebesar 0.27°C. Efek jet sintetik pada eksitasi frekuensi tinggi 160 Hz menghasilkan penurunan suhu yang paling baik pada L/d = 2.

**2. Koefisien perpindahan panas konvektif Jet Sintetik pada suatu pelat peluruh panas (*heatsink*) yang dipanaskan**

Prosedur untuk menghitung  $Nu_F$  dianggap sebagai nilai *nusselt* rata-rata ( $Nu_{avg}$ ) adalah sebagai berikut:

$$Nu_F = Nu_{avg} = \frac{h_{avg} d}{k} \tag{1}$$

Dimana  $h_{avg}$  koefisien konveksi rata-rata dihitung dengan

$$h_{avg} = \frac{q_{conv}}{(T_s - T_{inf})} \tag{2}$$

Menurut Gilliespie<sup>[5]</sup> ada suatu resirkulasi pada fluida kerja di jarak aksial bawah yang menaikkan

temperatur dari udara di dalam membran sehingga menurunkan nilai perbedaan temperature, hal tersebut juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan Mangesh Chaudari<sup>[6]</sup>. Sehingga dalam mendefinisikan perbedaan temperatur dari *heat sink* yang dipanaskan, peneliti menggunakan formula Mangesh Chaudari<sup>[6]</sup>.

$$q_{conv} = q_{joule} - q_{loss} \tag{3}$$

Fluks panas pada heater dinyatakan dengan  $q_{joule}$ , dengan A luas penampang *heater*, V adalah beda potensial *heater*, dan I adalah arus listrik *heater*.

$$q_{joule} = \frac{VI}{A} \tag{4}$$

Dimana disipasi panas yang dilakukan oleh konveksi alamiah (*Free Convection*) dinyatakan dengan  $q_{loss}$ . *Radiation losses* akibat prototipe yang mengkilap juga sangat kecil sehingga pada perhitungan ini hal tersebut di abaikan. Dalam perhitungan *heat losses*, diasumsikan bahwa panas yang diturunkan oleh jet sintetik dipengaruhi oleh konveksi natural dari udara sekitar *heater*.

Metode perhitungan Konveksi natural merujuk pada Incropera<sup>[7]</sup>.

Untuk permukaan pelat yang dipanaskan terdapat di bagian bawah

$$Nu_L = 0,27 Ra^{1/4} \text{ untuk } 10^5 \leq Ra \leq 10^{10} \tag{5}$$

Untuk permukaan pelat yang dipanaskan terdapat di bagian atas

$$Nu_L = 0,15 Ra^{1/3} \text{ untuk } 10^5 \leq Ra \leq 10^{10} \tag{6}$$

Dengan nilai bilangan *Rayleigh* sebesar

$$Ra = Gr H Pr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) H^3}{\nu \alpha} \tag{7}$$

Ra adalah bilangan *Rayleigh*, Gr adalah bilangan *Grashof*, Pr adalah bilangan *Prandtl*, dan H adalah tinggi pelat yang dipanaskan.

Aliran konveksi bebas bersifat laminar, maka bilangan *Nusselt* dihitung dengan rumus:

$$\overline{Nu}_L = 0,68 + \frac{0,67 Ra_L^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \tag{8}$$

Koefisien konveksi sisi samping dapat dihitung dengan rumus

$$\overline{h}_s = \frac{k}{H} Nu_L \tag{9}$$

Koefisien konveksi atas dapat dihitung dengan rumus

$$\overline{h}_t = \frac{k}{L} 0,15 (Ra_L^{1/3}) \tag{10}$$

Koefisien konveksi bawah dapat dihitung dengan rumus

$$\overline{h}_b = \frac{k}{L} 0,27 (Ra_L^{1/4}) \tag{11}$$

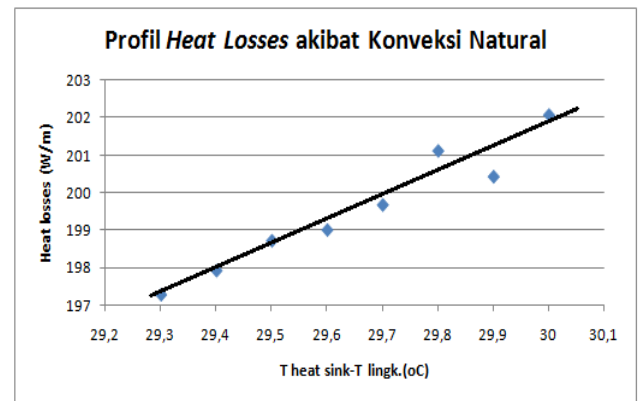
Maka *heat losses* akibat konveksi natural dapat dihitung dengan rumus

$$q_{loss} = q_s' + q_t' + q_b' \tag{12}$$

sehingga *heat losses* akibat konveksi natural,

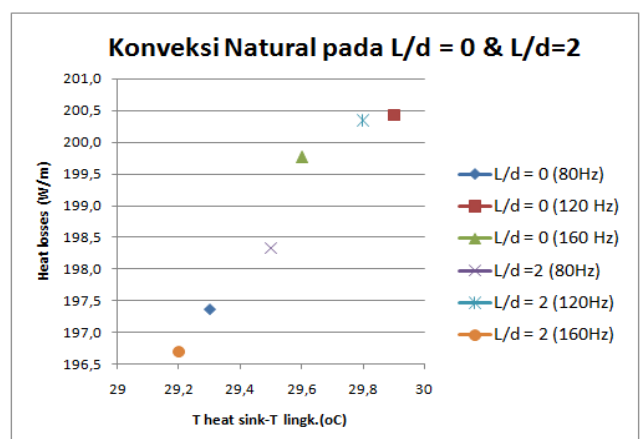
$$q_{loss} = (\overline{h}_s \cdot H + \overline{h}_t \cdot d + \overline{h}_b \cdot d) (T_s - T_\infty) \tag{13}$$

Grafik hubungan perbedaan temperatur *heat sink* terhadap *heat loss* akibat konveksi natural udara sekitar *heat sink* ditunjukkan pada gambar 8. Nilai *heat losses* akibat konveksi natural berbanding lurus dengan perbedaan temperatur antara lingkungan dengan temperatur pelat *heatsink* yang dipanaskan.



**Gambar 8.** Grafik profil *Heat losses* akibat konveksi Natural

Pada konveksi natural, hal yang cukup berpengaruh adalah suhu udara sekitar, karena konveksi bebas adalah konveksi yang dilakukan secara natural/alami oleh udara sekitar. Perbedaan suhu lingkungan juga sedikit mempengaruhi properties dari udara seperti bilangan *prandtl*, viskositas kinematik, dan difusivitas termalnya yang secara otomatis mempengaruhi bilangan *Nusselts* konveksi alaminya.



**Gambar 9.** Grafik Konveksi Natural pada  $L/d=0$  dan  $L/d=2$

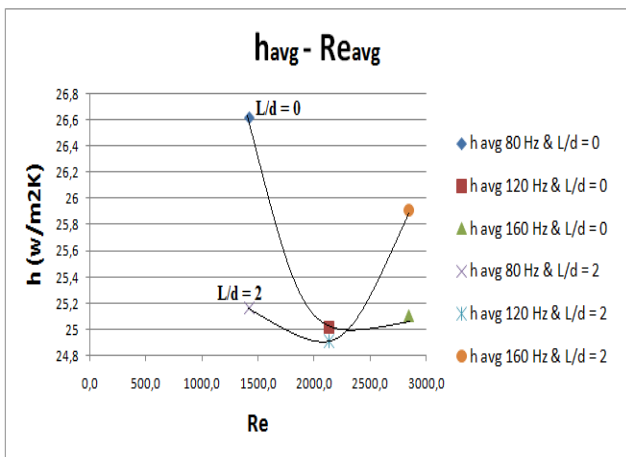
Grafik *heat losses* akibat perbedaan suhu heatsink dengan suhu lingkungannya yang terjadi akibat konveksi alami pada variasi  $L/d=0$  dan  $L/d=2$  diperlihatkan pada gambar 9. Pada  $L/d$  sebesar 2 menggunakan eksitasi sinusoidal 160Hz, panas yang diturunkan akibat konveksi natural lebih sedikit, sehingga dapat dikatakan efek jet sintetik sebagai penurun suhu menunjukkan dampak yang signifikan.

Menurut Smith & Swift<sup>[8]</sup>, Sifat periodik dari jet sintetik mengizinkan untuk dilakukan penskalaan kecepatan yang berdasarkan baik pada volume atau momentum flux. Jika menurut volume fluks *velocity scale*  $U_o = \frac{L}{T} = fL$ , sedangkan jika menurut momentum fluks menjadi  $U_o = \sqrt{2} \frac{L}{T} = \sqrt{2} fL$ . Sehingga Bilangan *Reynolds* didefinisikan sebagai

$$Re = \frac{U_o d}{\nu} = \frac{\sqrt{2} f L d}{\nu} \tag{14}$$

Bilangan *Reynolds* rata-rata didapatkan pada jangkauan 1421 – 2843. Kenaikkan frekuensi eksitasi akan menaikkan nilai bilangan *Reynolds* rata-rata sesuai dengan persamaan (14).

**3. Koefisien perpindahan panas konveksi terhadap Bilangan *Reynolds* rata-rata.**



**Gambar 10.** Grafik  $h_{avg}$  terhadap bilangan *Reynolds* pada  $L/d=0$  dan  $L/d=2$

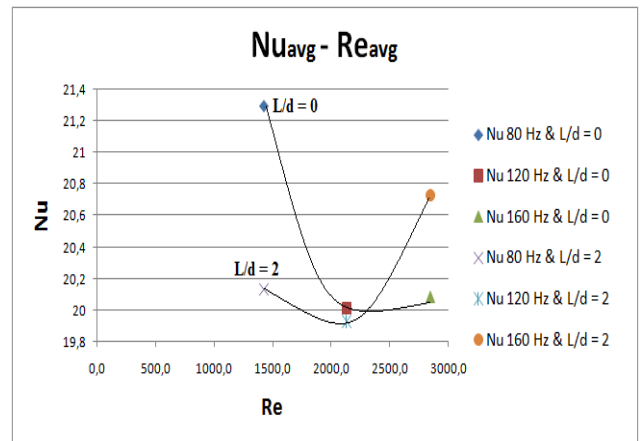
Koefisien perpindahan panas konveksi dapat dihitung menggunakan persamaan (2), sedangkan dengan persamaan (14) dapat diketahui besar bilangan *Reynolds* pada aliran jet sintetik. Pada gambar 10 diperlihatkan bahwa pada variasi 80 Hz yang memiliki bilangan *Reynolds* rata-rata sebesar 1421 dengan  $L/d$  sebesar 0 memiliki  $h_{avg}$  yang paling tinggi dibanding variasi lain yaitu sebesar 26.62 W/m<sup>2</sup>.K. Pada frekuensi eksitasi 160 Hz yang memiliki bilangan *Reynolds* rata-rata sebesar 2843 dengan  $L/d$

sebesar 2 memiliki nilai  $h_{avg}$  sebesar 20.73 W/m<sup>2</sup>.K. Pada  $L/d = 0$  dan  $L/d = 2$ , nilai koefisien perpindahan panas konvektif rata-rata menunjukkan kecenderungan turun pada *range* bilangan *Reynolds* 1421-2132, kemudian naik hingga  $Re$  sebesar 2843.

**4. Bilangan tak berdimensi *Nusselts* rata-rata ( $Nu_{avg}$ ) terhadap Bilangan *Reynolds* rata-rata.**

Pada gambar 11 diperlihatkan bahwa pada variasi 80Hz dengan  $L/d$  sebesar 0 memiliki nilai *Nusselts* yang paling tinggi yaitu sebesar 21.3. Hasil penelitian Tim Persoon<sup>[9]</sup>, pendinginan jet sintetik pada  $500 < Re < 1500$  juga mendukung hasil penelitian dan analisis ini dimana pada korelasi Tim Persoon didapatkan bilangan *Nusselts* sebesar 20.62 pada *Reynolds* sebesar 1421. Pada variasi 160 Hz dengan  $L/d$  sebesar 2 juga menunjukkan dampak penurunan suhu yang signifikan, yaitu dengan  $Nu_{avg}$  sebesar 20.73.

Pada  $L/d = 0$  dan  $L/d = 2$ , bilangan *Nusselts* rata-rata menunjukkan kecenderungan turun pada *range* bilangan *Reynolds* 1421-2132, kemudian naik hingga  $Re$  sebesar 2843.



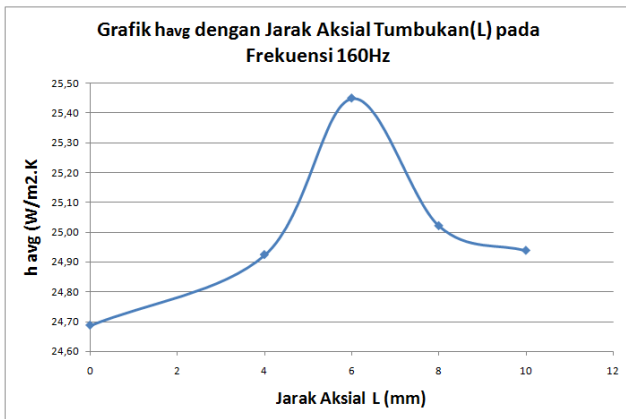
**Gambar 11.** Grafik bilangan *Nusselts*<sub>avg</sub> terhadap bilangan *Reynolds* pada  $L/d=0$  dan  $L/d=2$

Pada gambar 10 dan gambar 11 juga diperlihatkan bahwa kenaikan bilangan *Reynolds* tidak mempengaruhi secara signifikan nilai perpindahan panas konveksi dan angka *Nusselts*-nya. Kenaikkan angka *Reynolds* pada Jet Sintetik disebabkan oleh kenaikan frekuensi eksitasi yang secara langsung juga menaikkan daya listrik untuk menggerakkan membran. Sehingga disinilah letak keunikan pendinginan menggunakan jet sintetik, tidak membutuhkan daya yang lebih besar untuk penurunan suhu yang lebih besar.

**5. Pengaruh jarak aksial tumbukan jet (L) terhadap koefisien perpindahan panas konvektif rata-rata ( $h_{avg}$ )**

Pada gambar 12 ditunjukkan bahwa koefisien

perpindahan panas konvektif rata-rata ( $h_{avg}$ ) naik seiring dengan kenaikan jarak aksial tumbukan jet ( $L$ ) pada 0 mm - 6 mm, kemudian mengalami penurunan nilai  $h_{avg}$  pada 6 mm - 10 mm. Kenaikkan nilai  $h_{avg}$  pada jarak tumbukan aksial 0 mm-6 mm, dikarenakan berkurangnya resirkulasi akibat efek sekam (*confinement effect*). Kenaikkan ini berlangsung hingga ketinggian 6 mm. Kemudian  $h_{avg}$  mengalami penurunan saat jarak aksial tumbukan diatas 6 mm, dikarenakan kecepatan jet sintetis yang keluar orifis berkurang akibat gerakan udara sekitar kaviti.



**Gambar 12.** Grafik  $h_{avg}$  terhadap perubahan jarak aksial tumbukan jet dengan frekuensi eksitasi 160Hz

### Kesimpulan

Penelitian mengenai parameter orifis jet sintetis, yaitu rasio jarak aksial antara permukaan yang dipanaskan dan jet ( $L$ ) terhadap diameter orifis jet ( $d$ ) pada jangkauan 0-3.3 menunjukkan hasil penurunan suhu yang tinggi itu terjadi pada frekuensi 80 Hz dengan  $L/d$  sebesar 0 dan frekuensi 160 Hz dengan  $L/d$  sebesar 2. Pada ketinggian tertentu efek jet sintetis dengan frekuensi yang tinggi ternyata menunjukkan penurunan suhu yang cukup tinggi bila dibandingkan dengan variasi  $L/d$  yang sama. Sebaliknya untuk frekuensi eksitasi rendah, efek jet sintetis untuk pendinginan itu lebih baik pada  $L/d$  sebesar 0. Jet Sintetis merupakan alat baru untuk mendinginkan piranti elektronik yang menjanjikan, tidak membutuhkan daya besar untuk penurunan suhu yang lebih besar.

### Ucapan Terima kasih

Penelitian ini dibiayai oleh Hibah Riset Madya Universitas Indonesia tahun 2012 No. 1927/H2.R12.2.1/HKP.05.00/2012

### Nomenklatur

D Diameter membran (m)  
L jarak aksial antara permukaan yang

dipanaskan dan jet (m)

F Frekuensi Eksitasi dari *Function Generator* (Hz)

$h_{avg}$  Koefisien perpindahan panas konvektif rata-rata (W/m<sup>2</sup>.K)

V Tegangan Listrik (Volt)

I Arus Listrik (A)

k Konduktivitas termal (W/mK)

Nu Bilangan tak berdimensi *Nusselt*

Pr Bilangan tak berdimensi *Prandtl*

Q Total *Heat losses* akibat konveksi natural (W)

$q_{conv}$  *Net heat flux* yang terkonveksi oleh jet sintetis (W/m)

$T_{inf}$  Temperatur lingkungan (°C)

$T_s$  Temperatur permukaan pelat heatsink (°C)

$q_{joule}$  Fluks panas dari pemanas (W)

### Referensi

- [1]. B.L Smith, A. Glezer, "The Formation and Evolution of Synthetic Jets." *Physics of Fluids* 10, 1998, pp. 2281-2297
- [2]. Krishnan, Gopi., Mohseni, Kamran. "An Experimental Study of A Radial Wall Jet Formed by the Normal Impingement of A Round Synthetic Jet." *European Journal of Mechanics B/Fluids* 29, Elsevier Ltd, 2010, pp. 269-277
- [3]. McGuinn, A., Persoons, T., Valiorgue, P., O'Donovan, T.S., & Murray, D.B. (2008). *Heat transfer measurements of an impinging synthetic air jet with constant stroke length*. Paper presented at the 5<sup>th</sup> European Thermal-Sciences Conference, Netherlands.
- [4]. Agrawal, Amit., Puranik, Bhalchandra., Chaudari, Mangesh., "Effect of Orifice Shape in Synthetic Jet Based Impingement Cooling" *International Journal of Experimental Thermal and Fluid Science* 34, Elsevier Ltd, 2010, pp. 246-256
- [5]. Gillespie, M.B., W.Z. Black, C. Rinehart, A. Glezer, "Local convective heat transfer from a constant heat flux flat plate cooled by synthetic air jets. ", *Journal of Heat Transfer* 128 (2006) 990-1000.
- [6]. Chaudari M, Puranik B, & Agrawal A, "Heat Transfer Analysis in A Rectangular Duct Without and With Cross flow and An Impinging Synthetic Jet." *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol.33 No.2 June 2010.
- [7]. Incropera, Frank., DeWitt, David., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th edition", John Wiley & Sons, 1996.
- [8]. Smith, B L., G. Swift., Synthetic Jet at Larger Reynolds Number and Comparison to Continuous Jets, AIAA paper 2001-3030
- [9]. Persoon, Tim., McGuinn, Alan., Murray, Darina., "A General Correlation for the Stagnation Point Nusselts

**Number of an Axisymmetric Impinging Synthetic Jet”,  
International Journal of Heat Transfer, 54 (2011) pp  
3900-3908.**