

KARAKTERISTIK PENDINGINAN PADA HEAT SINK MENGGUNAKAN METODE JET SINTETIK ALIRAN SILANG DENGAN VARIASI EKSITASI

Harinaldi^a, Engkos A Kosasih^a, Damora Rhakasywi^a, Arief Randy^a, Aldy Andika^a

¹Departemen 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*, arief.randy@ui.ac.id, aldy.andika91@ui.ac.id

Abstrak

Sistem pendinginan konvensional pada piranti elektronik dengan menggunakan fan sudah tidak efektif dan memadai untuk diaplikasikan sekarang ini. Miniaturisasi produk dengan performa kinerja yang semakin canggih menyebabkan diperlukannya sistem pendingin baru yang mempunyai efisiensi termal yang tinggi dan juga hemat energi. Jet sintetik dapat dijadikan sistem pendinginan baru berdasar input massa netto nol tetapi momentum tidak nol. Dalam penelitian ini dua buah membran jet sintetik dengan tipe aliran silang (*Cross-Flow*) diuji dan dianalisa untuk membandingkan karakteristik efek pendinginan yang masing-masing membran digetarkan dengan menggunakan variasi gelombang sinusoidal dan square. Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental. Tahap eksperimental menggunakan *function generator* untuk menggerakkan membran dengan menggunakan variasi fungsi frekuensi Sinusoidal dan Square pada masing-masing percobaan serta tiga frekuensi osilasi yaitu 80 Hz, 120 Hz, dan 160 Hz pada amplitudo tetap 0.002 m/s. Penelitian menggunakan jet sintetik ber-tipe aliran silang bertujuan untuk memperbaiki serta mengoptimalkan proses pendinginan jet sintetik akibat adanya *confinement effect* atau efek sekam dimana panas yang dibuang akan terakumulasi kembali pada *cavity* dari jet sintetik sehingga pendinginan pada heatsink terhenti. Pada riset kali ini akan dilihat seberapa lama waktu optimum pendinginan jet sintetik ber-tipe aliran silang serta frekuensi osilasi ter-optimum dalam proses pendinginan *heat sink*.

Keywords: Eksitasi, Jet sintetik, Aliran silang, Efek sekam

Pendahuluan

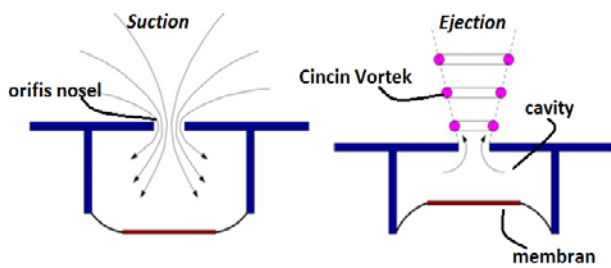
Pada zaman modern ini, perkembangan teknologi mengalami kemajuan yang semakin pesat, khususnya dalam industri elektronik. Seiring waktu, perkembangan dalam industri elektronik menuntut efisiensi bentuk dan kinerja produk yang semakin tinggi. Kecanggihan teknologi yang terus berkembang tentunya harus didukung oleh perangkat *hardware* di dalamnya.

Pemasok daya yang ada seperti baterai masih berkapasitas terbatas. Seiring dengan tantangan efisiensi energi, maka diperlukan suatu sistem baru yang mampu menunjang hal tersebut. Salah satu yang dikembangkan adalah dalam hal sistem pendinginan elektronik (*cooling devices*). Metode pendinginan yang masih umum digunakan saat ini adalah sistem pendinginan konvensional yang masih menggunakan *fan/blower* yang memanfaatkan konveksi paksa dengan udara sebagai fluida kerjanya. Sampai sekarang perangkat elektronik skala menengah sampai besar kebanyakan masih menggunakan metode ini pada aplikasi sistem pendinginannya baik untuk sirkulasi udara menyeluruh atau peningkatan laju pendinginan lokal.

Alternatif baru yang cukup menjanjikan dalam memberikan suatu sistem pendingin pada komponen

mikroelektronik adalah dengan menggunakan teknologi jet sintetik. Jet sintetik ini digerakkan oleh membran piezoelektrik yang diberi sinyal listrik dengan tegangan sebesar 5 volt.

Prinsip kerja utama dari jet sintetik ini berupa input massa netto nol (*zero mass input*) yang masuk kedalam *cavity* tetapi menghasilkan output momentum netto tidak nol (*non zero momentum output*) yang keluar dari nozzle. Aliran jet yang keluar dari nozzle tersebut berupa sebuah cincin-cincin vortek yang keluar secara berpasangan. Jet sintetik merupakan sebuah jet seperti aliran gerak fluida yang dibentuk oleh perubahan waktu ke waktu, penghisapan dan penyemburan fluida yang berulang melewati lubang keluar, dengan gerakan diafragma per periode waktu yang dibangun menjadi satu kesatuan dengan dinding ruangan. 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 dapat digambarkan seperti pada gambar 1.



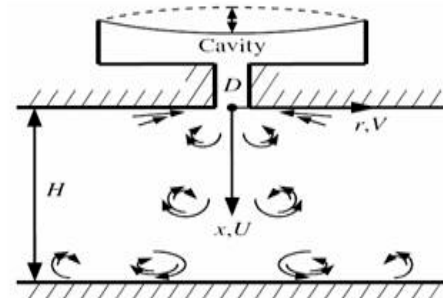
Gambar 1. Jet sintetik yang terbentuk akibat adanya gerakan pada diafragma (Khrisnan & Mohseni 2010)

Vortek atau pusaran-pusaran yang disemburkan dari nozzle tersebut membantu dalam proses pencampuran panas dari sumber panas (*heat source*) yang kemudian di buang ke lingkungan, gerakan dari membran piezoelektrik yang menghasilkan aliran vortek tersebut akan mengubah aliran di sekitar sistem yang awalnya laminar menjadi turbulen (Timchenko & Rezes 2004). Penggunaan sintetik jet ditujukan untuk mengganggu aliran laminar yang terdapat pada suatu sistem dan mengubahnya menjadi sebuah aliran turbulen yang bertujuan untuk meningkatkan perpindahan panas suatu sistem tersebut terhadap lingkungannya. Hal ini sesuai dengan prinsip perpindahan panas dimana laju perpindahan panas dari suatu sistem yang mempunyai pola aliran turbulen akan lebih cepat dan lebih efisien di bandingkan dengan laju aliran panas pada sistem yang mempunyai pola aliran laminar.

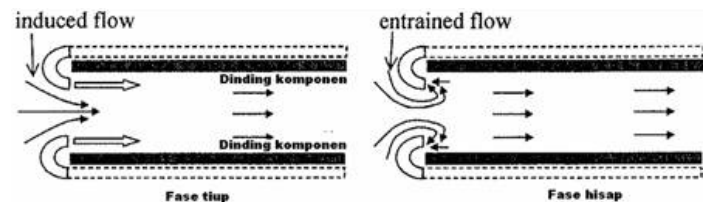
Proses terbentuknya jet sintetik telah diteliti dan ditunjukkan dalam beberapa hasil penelitian yang diantaranya telah dilakukan oleh King & Jagannatha (2007) dan Zhang & Tan (2007). Proses-proses terbentuknya jet sintetik secara garis besar terbentuk sebagai berikut. Di dalam *cavity* jet sintetik terdapat suatu diafragma atau membran dimana membran tersebut akan digerakkan secara periodik. Pada saat membran tersebut beresilasi, 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.

Keuntungan lain dari sistem pendinginan menggunakan jet sintetik dibanding fan atau blower untuk performa *heat transfer* yang sama, menurut Lasance & Aarts (2008) antara lain adalah tingkat kebisingan yang jauh lebih rendah, efisiensi (termodinamik) yang lebih baik, kebutuhan daya hanya setengahnya atau kurang, memiliki *form factor* yang jauh lebih baik sehingga bersifat “*design-friendly*”, *reliability* (tahan uji) intrinsik yang lebih tinggi, masalah *fouling* yang lebih rendah yakni komponen bergerak dapat dilindungi dari ambient, miniaturisasi produk lebih mudah dibanding fan, serta memiliki kemungkinan peredaman kebisingan yang lebih simpel.

Jet sintetik terbagi atas dua macam model uji yaitu model jet sintetik aliran tumbukan (*impinging*) dan jet sintetik aliran silang (*cross-flow*). Kedua model tersebut digambarkan seperti pada gambar 2 dan gambar 3



Gambar 2. Model *Impinging Jet* (Persoons, O'Donovan & B.Murray 2008)



Gambar 3. Model *Cross-Flow Jet* (Raghav Mahalingam 2007)

Model jet sintetik aliran tumbukan dan aliran silang memiliki perbedaan pada bagian bidang aliran fluida yang dituju. Pada model jet aliran tumbukan, arah aliran *vortex* diarahkan menuju *heated wall* sehingga aliran *vortex* membentur *heated wall* dan kemudian aliran *vortex* bergerak sepanjang dinding, sementara jet aliran silang mengarahkan *vortex* yang keluar dari orifis langsung melewati dinding komponen dan bergerak sejajar dinding. Terdapat tiga variabel utama yang mempengaruhi perpindahan kalor pada jet sintetik aliran tumbukan yaitu frekuensi eksitasi, panjang langkah dan ketinggian orifis terhadap permukaan (Mc Guinn, et al. 2008).

Hasil penelitian Harinaldi, et al., (2011) menunjukkan baik secara komputasional maupun eksperimental bahwa jet sintetik bertipe aliran tumbukan mampu menurunkan temperatur pada *heat sink* dengan

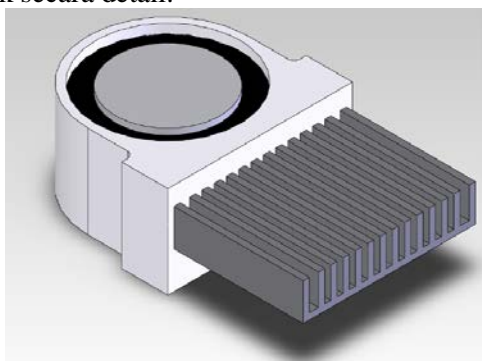
memanfaatkan variasi modulus eksitasi. Solovits dan Arik (2010) mempelajari pemahaman dasar sistem pendingin berbasis teknologi jet sintetik untuk sistem pendingin lanjut, diperoleh penurunan nilai temperatur yang cukup signifikan.

Akan tetapi jet sintetik juga memiliki kelemahan, terutama pada jenis jet sintetik aliran tumbukan. Hal ini terlihat pada fluida udara yang dihisap kembali pada fase *suction* saat membran jet sintetik beresilasi. Jika udara yang dibuang pada fase *discharge* terdapat udara panas dan dihisap kembali ke dalam *cavity* jet sintetik (Tesar, et al. 2005). Dimana hal ini juga dilaporkan oleh Harinaldi (2011) bahwa efek sekam yang terjadi pada jet sintetik bertipe aliran tumbukan akan membuat kemampuan penurunan temperatur akan berkurang dan memiliki waktu optimum pendinginan hanya 30 menit pertama dimana hal ini terjadi akibat udara panas yang terakumulasi pada *cavity*.

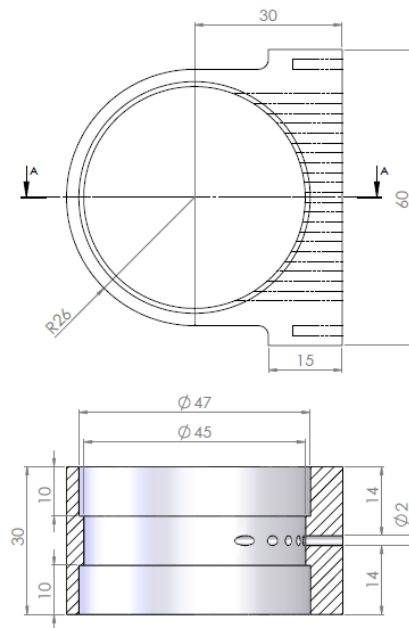
Riset kali ini dilakukan untuk menemukan suatu formulasi pemanfaatan jet sintetik secara maksimum dan optimum untuk tujuan pendinginan heatsink dimana dengan memanfaatkan jet sintetik bertipe aliran silang efek sekam dapat diminimalisasikan atau dihilangkan. Serta untuk mengetahui jangka waktu periode pendinginan yang optimum dari jet sintetik bertipe aliran silang.

Metode Eksperimen

Riset ini dilakukan dengan metode eksperimental dengan menggunakan alat ukur temperatur termokopel tipe-T berjumlah enam buah yang dihubungkan terhadap *data acquisition module* (Advantech USB 4718) dengan akurasi pengukuran ± 0.01°C. Pada penelitian ini digunakan jet sintetik bertipe aliran silang untuk melakukan percobaan dimana diharapkan rancangan *prototype* jet sintetik yang telah dirancang mampu menghasilkan aliran jet sintetik yang memiliki *heat transfer coefficient* yang baik. Gambar 4(a) memperlihatkan detail model fisik susunan modul jet sintetik dengan *heat sink*, sedangkan Gambar 4(b) memperlihatkan aktuator jet sintetik secara detail.



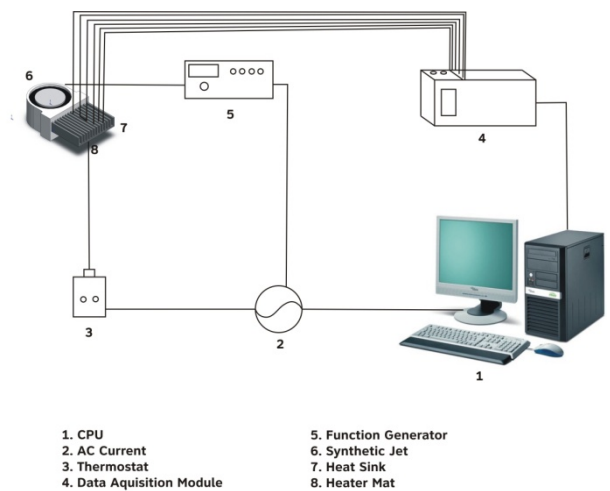
(a)



(b)

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

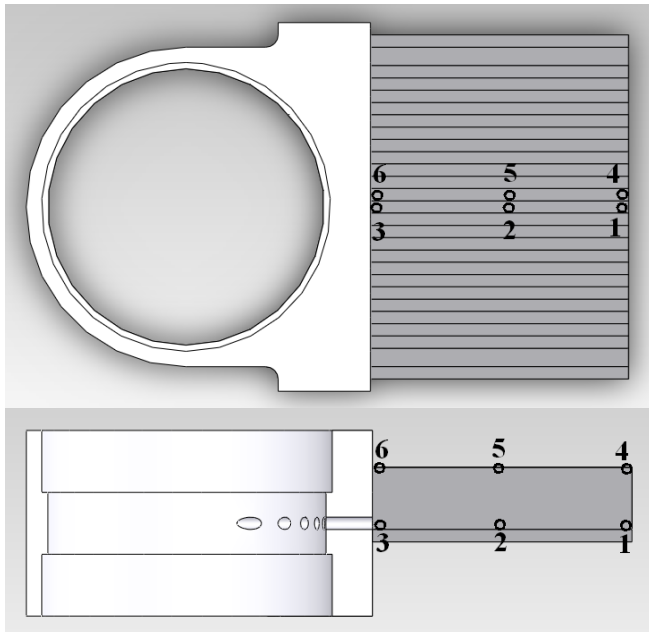
Tahap eksperimen ini dilakukan untuk mendapatkan data temperatur sebuah *heat sink* yang didinginkan menggunakan jet sintetik. Sistem eksperimen yang dibuat pada penelitian ini dapat dijabarkan pada gambar 5



Gambar 5. Experimental Set-up

Pengambilan data dilakukan dengan mengukur suhu pada *heat sink* di enam titik dengan menggunakan digital multimeter dengan akurasi pengukuran ± 0.01 °C. 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 °C yang diatur menggunakan *thermostat* dan pengukuran dilakukan pada suhu lingkungan 27 °C. Kemudian

dilakukan pengaturan bentuk gelombang dengan memberikan 6 buah variasi gelombang sinusoidal dan square 80 Hz, 120 Hz dan 160 Hz menggunakan *function generator* pada dua buah membran piezoelektrik, masing-masing membran atas dan bawah.



Gambar 6. Titik pengambilan suhu

Setelah semua pengaturan dilakukan, maka dilakukan pengambilan data dengan meletakkan *thermocouple* di titik-titik yang telah ditentukan pada *heat sink* yang kemudian dibaca menggunakan DAQ. Setelah itu DAQ dihubungkan dengan komputer dan kemudian pengambilan data dimulai. Pengambilan data pada eksperimen ini dilakukan selama 60 menit.

Hasil dan Pembahasan

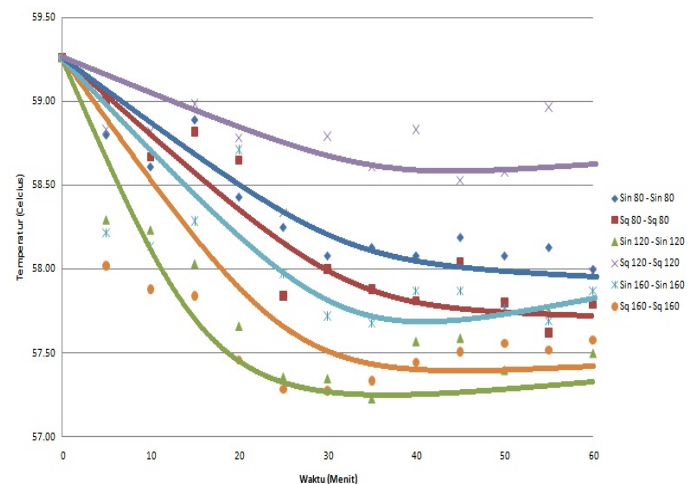
Tahap eksperimen dilakukan dengan mengamati perubahan temperatur pada enam titik berbeda yang diletakan pada bagian-bagian *heat sink*, dengan 3 buah variasi jarak terhadap nozzle, mulai dari jarak terdekat, tengah-tengah heatsink, hingga terjauh, yang dianggap mampu menggambarkan laju pendinginan jet sintetik secara merata terhadap *heat sink* pada kondisi ruang terbuka selama 60 menit. Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan 6 buah variasi frekuensi pasangan gelombang sinusoidal dan square, masing-masing sin 80 Hz – sin 80 Hz, square 80 Hz – square 80 Hz, sin 120 Hz – sin 120 Hz, square 120 Hz – square 120 Hz, sin 160 Hz – sin 160 Hz, dan square 160 Hz – square 160 Hz dengan amplitudo tetap 0.002 m/s serta temperatur ambient / lingkungan +/- 27-30°C dengan tingkat kelembaban (Rh = 76% - 82%). Setelah dilakukan pengambilan data dan pengolahan data terhadap

enam titik eksperimen, didapatkan hasil yang hampir serupa dan sama untuk tiap bagiannya baik perubahan temperatur maupun karakteristik pendinginannya. Dalam makalah ini selanjutnya hanya tiga titik yang akan disajikan dalam analisis eksperimental ini, yaitu titik 1, titik 2 dan titik 3, dimana ketiga titik tersebut dianggap mampu mewakili variasi jarak dari nozzle pada titik-titik lainnya.

Hasil pengambilan data disajikan dan dianalisis ke dalam dua grafik yaitu grafik perubahan temperatur terhadap waktu dan grafik koefisien perpindahan kalor konveksi terhadap waktu.

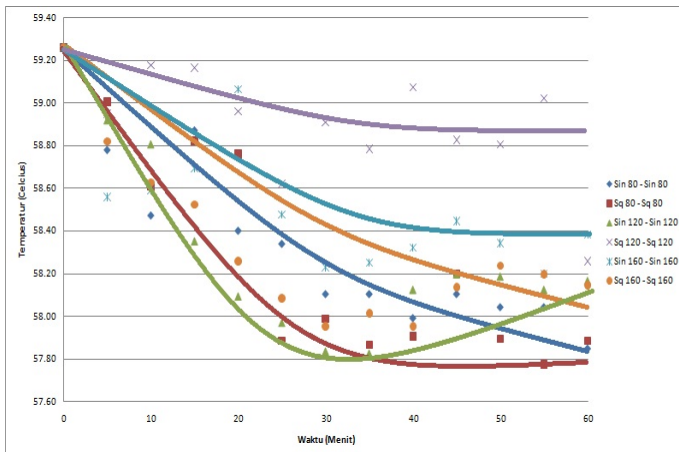
Analisis Perubahan Temperatur terhadap Waktu

Gambar 7(a) menunjukkan karakteristik perubahan temperatur *heat sink* terhadap waktu di titik 3, yakni titik terdekat dengan nozzle. Terlihat pada grafik bahwa variasi frekuensi gelombang baik *Sinusoidal* maupun *Square* memiliki pengaruh terhadap pendinginan *heat sink*. Berdasarkan bentuk grafik pada gambar 7(a), karakteristik pendinginan jet sintetik terhadap *heat sink* dengan gelombang baik *Sinusoidal* maupun *Square* menunjukkan kecenderungan penurunan temperatur yang cepat pada awal pendinginan hingga mencapai menit ke-30, dan semakin cepat mencapai temperatur terendah pada frekuensi yang semakin tinggi.



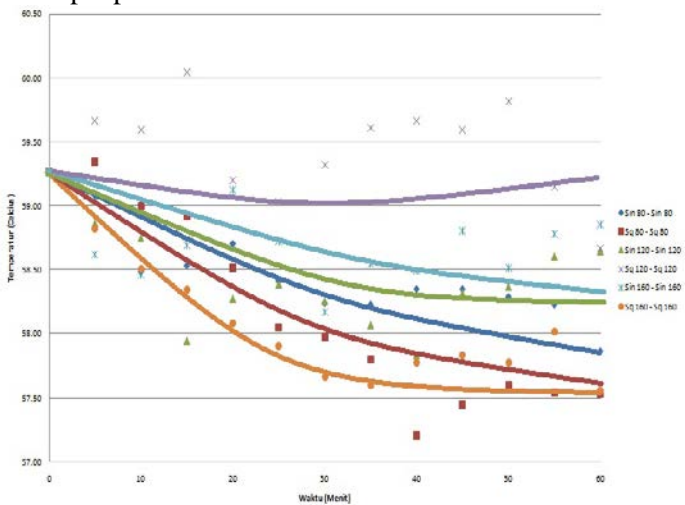
Gambar 7(a). Grafik temperatur pendinginan jet sintetik terhadap waktu di titik 3

Sedangkan pada gambar 7(b), gambar yang menunjukkan grafik karakteristik perubahan temperatur *heat sink* terhadap waktu di titik 2, terlihat bahwa variasi eksitasi gelombang dari jet sintetik masih dapat memberikan pengaruh yang berarti dalam penurunan temperatur pada *heat sink*, namun tidak lagi menunjukkan kecenderungan penurunan temperatur yang cepat seperti pada awal pendinginan.



Gambar 7(b). Grafik temperatur pendinginan jet sintetis terhadap waktu di titik 2

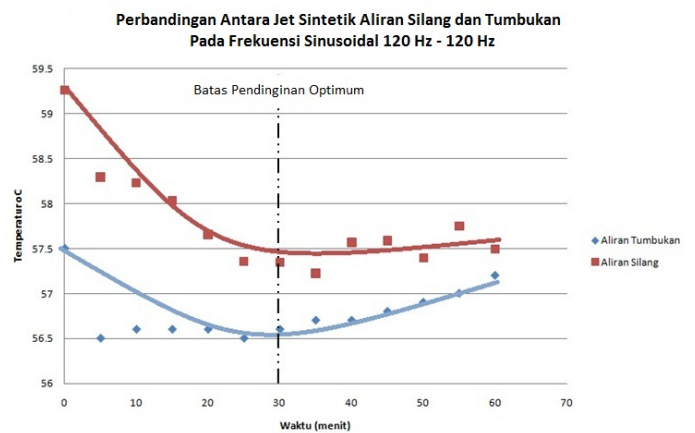
Pada gambar 7(c) yang merupakan gambar grafik pengukuran pada titik terjauh *heat sink* dari nozzle, mulai terlihat jelas pengaruh jarak titik pengukuran terhadap nozzle yang mengakibatkan efek pendinginan yang dihasilkan oleh jet sintetis pada titik ini tidak memiliki nilai penurunan temperature secepat pada titik 2 dan 3.



Gambar 7(c). Grafik temperatur pendinginan jet sintetis terhadap waktu di titik 1

Pada eksperimen ini, hasil pengukuran di titik 3 sebagai titik yang dianggap paling baik dalam mewakili karakteristik pendinginan jet sintetis, terlihat bahwa variasi gelombang sin 120 Hz – sin 120 Hz menunjukkan nilai yang paling baik dalam penurunan temperatur *heat sink* yakni menghasilkan pendinginan hingga 2,04°C, yang kemudian diikuti oleh variasi gelombang square 160 Hz – square 160 Hz dengan nilai pendinginan hingga 1,99°C. Nilai pendinginan paling rendah pada kelompok ini dihasilkan oleh variasi gelombang sin 80 Hz – sin 80 Hz dengan nilai sebesar 1,26°C. Sedangkan untuk nilai penurunan temperatur terbaik selama satu jam dihasilkan oleh variasi gelombang sin 120 Hz – sin

120 Hz dimana dalam waktu 60 menit variasi suhu ini mampu menurunkan suhu sebesar 1,76°C. Secara keseluruhan, eksperimen ini tidak menunjukkan adanya penyimpangan yang berarti. Hal ini ditandai dengan tidak adanya kecenderungan kenaikan nilai temperatur yang cukup signifikan setelah rentang waktu menit tertentu, serta tidak adanya hasil bacaan temperatur pada *heat sink* yang lebih tinggi dari temperatur awal sebelum dilakukan pendinginan. Hal ini cukup menunjukkan bahwa pada metode pendinginan menggunakan jet sintetis dengan aliran melintang tidak terpengaruh oleh *confinement effect* atau efek sekam dimana hal ini berarti efektifitas periode pendinginan menjadi lebih baik dan lama.



Gambar 8. Grafik perbandingan kinerja pendinginan jet sintetis aliran silang dan aliran tumbukan

Hal ini berbeda dengan hasil eksperimen pada jet sintetis aliran tumbukan yang sebelumnya telah diteliti oleh Harinaldi, et al. (2011), yang ditunjukkan pada gambar 8. Dapat dilihat pada grafik perbandingan di atas antara kinerja jet sintetis bertipe aliran tumbukan dan aliran silang yang menunjukkan kecenderungan adanya kenaikan temperatur setelah jet sintetis bekerja melewati batas pendinginan yang optimum akibat adanya efek sekam atau *confinement effect* pada jet sintetis aliran tumbukan, dimana hal ini akan berakibat pada menurunnya nilai *heat transfer* serta kenaikan suhu pada *heat sink*.

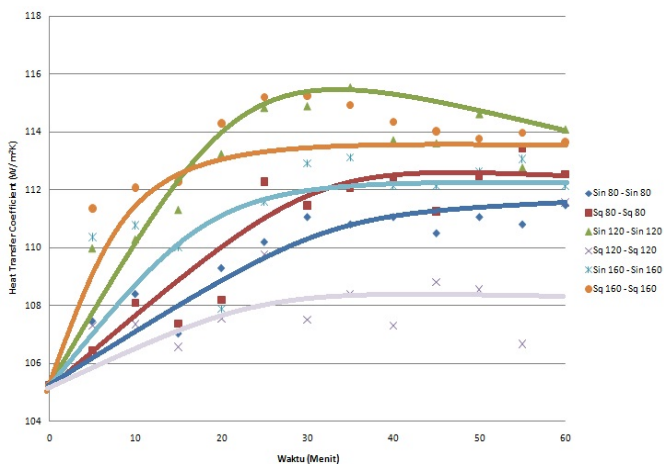
Analisis Koefisien Perpindahan Kalor Konveksi terhadap Waktu

Gambar 9 memperlihatkan karakteristik koefisien perpindahan panas gelombang *Sinusoidal – Square* dengan variasi frekuensi 80Hz, 120Hz, 160Hz terhadap waktu. Pada grafik terlihat jelas bahwa untuk mencapai suatu kestabilan koefisien *heat transfer* pada berbagai frekuensi jet sintetis

dibutuhkan waktu pendinginan tertentu. Trend pada grafik ini memperlihatkan kecenderungan naiknya koefisien perpindahan panas dengan tajam pada tahap awal pendinginan baik menggunakan fungsi gelombang *Sinusoidal* maupun *Square*. Trend peningkatan koefisien perpindahan kalor yang tajam ini berlangsung selama 10 menit pertama. Trend peningkatan koefisien heat transfer ini berlangsung hingga menit ke 25 sampai 35, setelah itu nilai koefisien heat transfer mengalami kecenderungan tetap di kisaran nilai tertentu tanpa penurunan maupun peningkatan yang berarti, kecuali pada variasi gelombang sin 80 Hz – sin 80 Hz, sin 120 Hz – sin 120 Hz dan Square 120 Hz – Square 120 Hz yang masih cukup fluktuatif namun tetap berada pada rentang nilai tertentu.

Nilai koefisien heat transfer terbesar terdapat pada variasi gelombang sin 120 Hz – sin 120 Hz dimana koefisien perpindahan kalor mencapai nilai puncak sekitar 115,53 W/m²K yang terjadi pada menit ke-35 dan setelah itu mengalami kecenderungan penurunan secara perlahan. Pada variasi gelombang lainnya terjadi tren yang sama dimana hampir semua variasi gelombang frekuensi memiliki tren meningkat di menit ke-0 sampai menit ke-25 hingga ke-35

Pada gambar grafik koefisien perpindahan kalor ini terlihat bahwa efek pendinginan terbaik dicapai oleh gelombang sin 120Hz – sin 120Hz dibandingkan dengan variasi frekuensi gelombang lainnya. Dan grafik ini juga memperlihatkan bahwa tidak ada nilai koefisien perpindahan kalor setelah 60 menit yang berada di bawah nilai awalnya yang biasanya terjadi pada model jet sintetik aliran tumbukan disebabkan karena akumulasi panas yang terjadi di dalam *cavity* jet sintetik yang tidak mampu diimbangi dengan pembuangan panas di dalamnya seiring dengan terus berjalannya fase *suction* dan *discharge*.



Gambar 9. Grafik koefisien perpindahan kalor jet sintetik terhadap waktu

Kesimpulan

Penelitian mengenai efek pendinginan serta karakteristik aliran dengan menggunakan jet sintetik bertipe aliran silang dengan variasi gelombang *sinusoidal* dan *square* pada frekuensi variasi 80Hz, 120Hz, 160 Hz yang telah dilakukan dan dianalisa berhasil menunjukkan karakteristik dan efek pendinginan yang menjanjikan. Hasil eksperimen yang telah dilakukan pada sebuah desain orisinal jet sintetik yang memiliki dua buah membran *piezoelectric* yang digerakan oleh *function generator* (yang menghasilkan sinyal sinusoidal dan square) mampu menciptakan aliran turbulen yang dapat menghasilkan efek pendinginan pada *heat sink* dalam periode pendinginan selama 60 menit dengan waktu efektifitas pendinginan terjadi pada periode 35 menit pertama, dan kecenderungan temperatur yang stabil setelah rentang waktu tersebut.

Berdasarkan hasil eksperimen ini didapatkan bahwa variasi gelombang sin 120 Hz – sin 120 Hz menunjukkan nilai yang paling baik dalam penurunan temperatur *heat sink* yakni menghasilkan pendinginan hingga 2,04°C serta memiliki koefisien perpindahan kalor mencapai nilai puncak sekitar 115,53 W/m²K.

Ucapan Terima kasih

Penelitian ini dibiayai oleh Hibah Riset Madya Universitas Indonesia tahun 2012 No.1927/H2.R12.1/HKP.05.00/2012

Nomenklatur

ΔT beda temperature (°C)
h heat transfer coefficient (W m⁻²)

Referensi

Krisnan, Gopi, Mohseni, Kamrai. "An Experimental Study of a Radial Wall Jet Formed by The Normal Impingement of a Round Synthetic Jet", European Journal of Mechanical B/Fluids 29, El Sevier LTD (2010)

Timchenko, V., Rezes, J. "A Numerical Study of Enhanced Micro-channel Cooling Using a Synthetic Jet Ejector", School of Mechanical and Manufacturing Engineering, The University of New South Wales, Sydney 2052, Australia (2004)

King, S. J. C. And Jagannatha, D., "Simulation of synthetic jets with non-sinusoidal forcing for heat transfer applications", *proc. 18th World IMACS / MODSIM Congress*, Cairns Australia (2009)

Zhang, JingZhou, & Tan, XiaoMing. *Experimental study on flow and heat transfer characteristics of synthetic jet driven by piezoelectric actuator. Science in China Series E: Technological Sciences*, 50, 221-229, (2007)

Lasance, C.J.M., & Aarts, R.M. *Synthetic jet cooling partI: Overview of heat transfer and acoustics*. Paper presented at the 24th IEEE SEMI-THERM Symposium (2008)

McGuinn, A., Persoons, T., Valiorgue, P., O'Donovan, T.S., & Murray, D.B. *Heat transfer measurements of an impinging synthetic air jet with constant stroke length*. Paper presented at the 5th European Thermal-Sciences Conference, Netherlands (2008)

Harinaldi, Damora Rhakasywi & Rikko Defriadi, "The Effect of Oscillation Mode To The Temperature Distribution of a Heated Wall Impinged by a Synthetic Jet" The International Conference On QiR (Quality in Research). ISSN 114-1284. (July 2011)

Stephen A. Solovitz & Mehmet Arik, "Understanding The Performance Metrics For Adanced Cooling Methodologies" IEEE SEMI-THERM Symposium. ISBN : 978-1-4244-5343 (2010)

Tesar, V., Chuan, H.H., & Zimmerman, W.B. *No-moving-part hybrid-synthetic jet actuator. SNA-4850*, pp. 1-11. (2005)

Harinaldi, Damora Rhakasywi & Rikko Defriadi, Ken ferry, "Cooling Characteristic On Heat Sink With Synthetic Jet Using Sine Wave Function", IJENS (2011)