

Efisiensi dan Efektivitas Sirip Berpenampang Trapesium yang Tersusun Atas Dua Bahan

Michael Seen ^{*)}, Kharisma Sugiana dan Stefan Mardikus

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science and Technology, Sanata Dharma University, Yogyakarta, Indonesia

^{*)} Corresponding author: michaelseen@dosen.usd.ac.id

(Submit pada : 16 Oktober 2024 | Terbit pada : 30 November 2024)

Abstract

One strategy for reducing heat in mechanical systems is through the utilization of fins. Fins extend the surface area in contact with the fluid, thereby enhancing the rate of heat transfer from an object to the surrounding fluid. The material composition of fins is a significant factor influencing their characteristics. In the design of fins, understanding their characteristics is crucial as they relate to temperature distribution, heat flow rate, efficiency, and effectiveness. This study aims to investigate the efficiency and effectiveness of fins composed of two different materials. Computational numerical analysis employing the finite difference method explicitly is conducted for this purpose. The constituent materials of the fins are varied to include copper-copper, copper-aluminum, copper-iron, copper-steel, and copper-zinc configurations. The results indicate that fins composed of different materials yield varying outcomes. Fins made of materials with relatively higher thermal conductivity, specific heat, and density exhibit higher heat transfer rates. The highest efficiency and effectiveness are achieved by fins composed of copper, measuring 0.85 and 15.79, respectively. Conversely, fins composed of copper and steel exhibit the lowest efficiency and effectiveness, at 0.80 and 14.796, respectively.

Abstrak

Salah satu strategi untuk mengurangi panas pada sistem permesinan melalui penggunaan sirip. Sirip memperluas permukaan bidang yang bersentuhan dengan fluida sehingga dapat meningkatkan laju perpindahan panas dari suatu objek ke fluida di sekitarnya. Bahan atau material sirip merupakan salah satu faktor yang berpengaruh terhadap karakteristik sirip. Dalam perancangan sirip penting untuk mengetahui karakteristik dari sirip karena berkaitan dengan distribusi suhu, laju aliran panas, efisiensi dan efektivitas sirip tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efisiensi dan efektivitas dari sirip yang tersusun atas dua bahan. Penelitian dilakukan secara komputasi numerik dengan metode beda-hingga cara eksplisit. Material penyusun sirip divariasikan menjadi tembaga – tembaga, tembaga – aluminium, tembaga – besi, tembaga – baja, dan tembaga – zink. Hasil penelitian menunjukkan sirip dengan susunan material yang berbeda memberikan hasil yang berbeda. Sirip dengan material yang memiliki nilai konduktivitas, kalor jenis, dan massa jenis yang relatif lebih tinggi mempunyai laju perpindahan panas yang lebih tinggi. Efisiensi dan efektivitas tertinggi dicapai oleh sirip dengan material tembaga, yaitu 0,85 dan 15,79. Sedangkan efisiensi dan efektivitas terendah dimiliki oleh sirip dengan susunan material tembaga dan baja, yaitu 0,80 dan 14,796.

Keywords: *Finite difference method, Fin material, Unsteady state*

PENDAHULUAN

Perpindahan panas merupakan fenomena yang krusial dalam sistem permesinan. Pada saat panas yang dihasilkan oleh kerja mesin menumpuk atau tidak ada proses pelepasan panas dari sistem ke lingkungan, maka sistem akan mengalami kelebihan panas dan dapat mengganggu kinerja sistem permesinan tersebut [1]. Salah satu strategi untuk mengurangi panas pada sistem permesinan melalui penggunaan sirip. Sirip memperluas permukaan bidang yang bersentuhan dengan fluida sehingga dapat meningkatkan laju perpindahan panas dari suatu objek ke fluida di sekitarnya [2]. Jenis sirip yang sering digunakan dalam aplikasi industri pada peralatan penukar panas adalah sirip pin.

Sirip pin merupakan komponen berbentuk silinder atau bentuk lainnya yang dipasang secara vertikal tegak lurus terhadap permukaan dinding alat penukar panas, di mana fluida pendingin mengalir secara melintang (*crossflow*) terhadap dinding tersebut [3]-[4]. Keberadaan sirip pin yang menonjol dari permukaan yang terpapar panas bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan pelepasan panas, serta menyebabkan turbulensi dalam aliran fluida, sehingga meningkatkan efisiensi perpindahan panas [5]. Laju perpindahan panas pada sirip juga dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti perbedaan suhu antara permukaan sirip dengan fluida, material sirip, geometri dan penampang sirip [6]-[7]. Idealnya, material sirip harus memiliki konduktivitas termal yang tinggi untuk meminimalkan perbedaan suhu antara permukaan utama (*prime surface*) dengan permukaan yang diperluas (*extended surface*) [8]- [9]. Perbedaan material penyusun sirip mempengaruhi properties sirip seperti konduktivitas, massa jenis, dan panas jenis yang berpengaruh terhadap distribusi suhu dan laju perpindahan panas dari sirip tersebut [10].

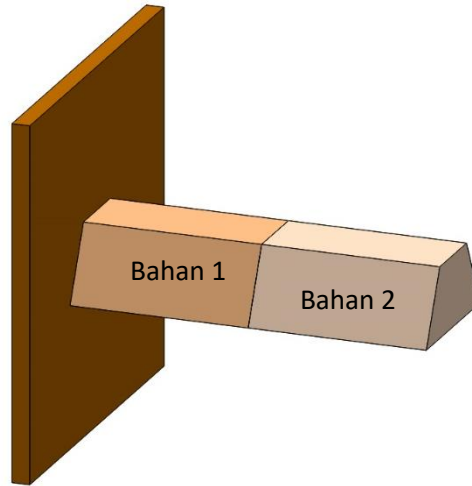
Dalam kondisi transien, distribusi suhu di dalam sirip dipengaruhi oleh karakteristik fisik material yang membentuknya, seperti massa jenis (ρ), kapasitas kalor (c), konduktivitas termal (k), dan difusivitas termal (α) [11]. Namun, ketika mencapai keadaan stabil, hanya konduktivitas termal yang memiliki dampak signifikan terhadap distribusi suhu. Dengan memahami pola distribusi suhu serta laju aliran panas, maka efisiensi dan efektivitas sirip dapat diketahui menggunakan perhitungan numerik [12]-[13]. Pada penelitian ini simulasi numerik metode beda hingga akan diterapkan untuk mendapatkan karakteristik sirip yang tersusun atas dua bahan. Karakteristik sirip meliputi (a) distribusi suhu, (b) laju aliran panas yang dapat dilepaskan oleh sirip, dan (c) efisiensi dan efektivitas dari sirip.

METODE PENELITIAN

Objek penelitian yang diamati merupakan sirip berjenis sirip pin dengan bentuk penampang berupa trapesium. Sirip tersusun atas dua material yang berbeda pada kedua bagian sirip seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Material penyusun sirip divariasikan menjadi baja – besi, baja – aluminium, baja – tembaga, dan baja – zink. Properties dari material ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat – Sifat Bahan Logam

Bahan	ρ (kg/m ³)	c (J/kg°C)	K (W/m°C)
Tembaga	8933	385	401
Aluminium	2702	903	237
Besi	7870	447	80,2
Baja	7854	434	60,5
Zink	7140	389	116



Gambar 1. Sirip lurus berpenampang trapesium yang tersusun atas dua bahan

Analisis dilakukan dengan metode komputasi beda hingga cara eksplisit. Sirip dibagi menjadi 25 elemen kecil dengan jarak antar elemen sebesar Δx , kecuali elemen yang berada di dasar dan di ujung sirip memiliki jarak sebesar $0,5\Delta x$. Sirip memiliki panjang keseluruhan sebesar $L = 0,05$ m, panjang sirip material 1 dan material 2 memiliki panjang yang sama atau sebesar $0,025$ m. Luas penampang sirip $0,00015$ m dan jarak volume kontrol $\Delta x = 0,002$ m. Suhu dasar sirip dianggap konstan sebesar $T_b = 100^\circ\text{C}$ dan suhu fluida sekitar $T_f = 30^\circ\text{C}$. Koefisien perpindahan panas konveksi dianggap konstan yaitu $h = 200$ W/m²C. Terdapat empat persamaan yang dipergunakan dalam perhitungan distribusi suhu, yaitu dasar sirip, diantara dasar dan ujung sirip, perbatasan kedua bahan, dan ujung sirip. Suhu pada volume kontrol dasar sirip diasumsikan tidak berubah sebesar T_b , sehingga dirumuskan seperti Persamaan (1)

$$T_i^{n+1} = T_1^{n+1} = T(0, t) = T_b \quad (1)$$

Suhu pada volume kontrol diantara dasar dan ujung sirip dapat dihitung menggunakan Persamaan (2)

$$T_i^{n+1} = \frac{k \times \Delta t}{\rho \times c \times \Delta x^2} (T_{i-1}^n - T_i^n + T_{i+1}^n - T_i^n) + \left(\frac{h \times \Delta x}{k} \times \frac{A_{s,i}}{A_p} \times (T_f - T_i^n) + T_i^n \right) \quad (2)$$

Suhu volume kontrol pertemuan kedua bahan sirip dapat dinyatakan dengan Persamaan (3)

$$T_i^{n+1} = \frac{\Delta t}{(\rho_1 c_1 V_1 + \rho_2 c_2 V_2)} \left[k_1 A_p \frac{T_{i-1}^n - T_i^n}{\Delta x} + k_2 A_p \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x} + h A_s (T_\infty - T_i^n) \right] + T_i^n \quad (3)$$

Suhu volume kontrol pada ujung sirip dapat ditentukan dengan Persamaan (4)

$$T_i^{n+1} = \frac{k \times \Delta t}{0,5 \times \rho \times c \times \Delta x^2} \left((T_{i-1}^n - T_i^n) + \left(\frac{h \times \Delta x}{k} (T_f - T_i^n) \right) + \left(\frac{h \times \Delta x}{k} \times \frac{A_{s,i}}{A_p} (T_f - T_i^n) \right) + T_i^n \right) \quad (4)$$

Laju aliran panas sesungguhnya dapat diketahui setelah mendapatkan suhu volume kontrol yang ditinjau. Laju aliran panas sesungguhnya ($q_{\text{fin,actual}}$), laju aliran panas maksimum ($q_{\text{fin,ideal}}$), dan laju aliran panas apabila benda tidak menggunakan sirip (q_{nofin}) dihitung dengan Persamaan (5), Persamaan (6), dan Persamaan (7)

$$q_{fin,actual}^{n+1} = h \sum_{i=1}^m A_s (T_i^{n+1} - T_f) \tag{5}$$

$$q_{fin,ideal}^{n+1} = h A_s (T_b - T_f) \tag{6}$$

$$q_{nofin}^{n+1} = h A_b (T_b - T_f) \tag{7}$$

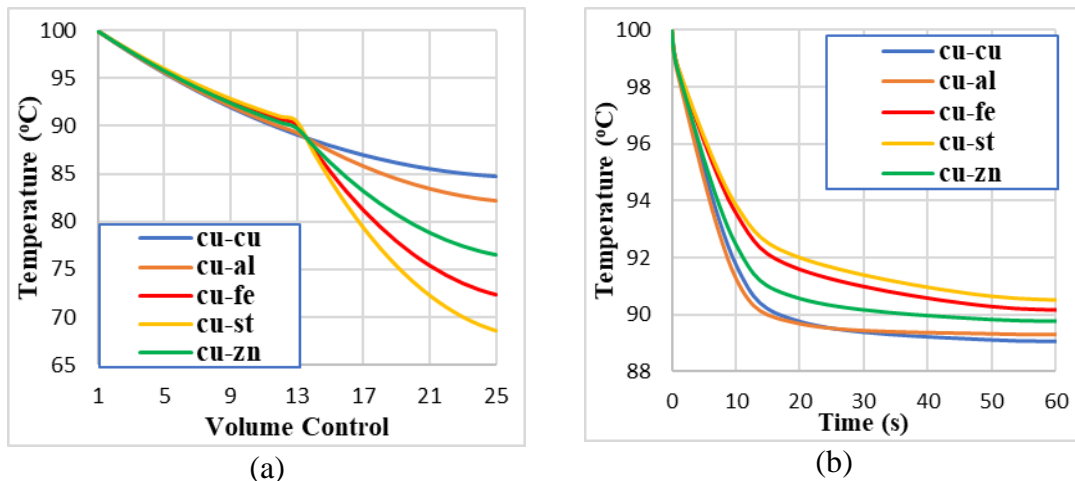
Efisiensi sirip pada keadaan tak tunak dapat dihitung dengan Persamaan (8) dan efisiensi dari sirip dapat dihitung dari persamaan (9). Efisiensi sirip memiliki nilai diantara 0% sampai 100%, sehingga tidak memungkinkan efisiensi suatu sirip melebihi nilai 1 atau 100%. Sedangkan efisiensi nilainya dapat lebih dari 1, semakin tinggi efisiensi maka semakin baik kemampuan sirip untuk melepas panas.

$$\eta = \frac{\dot{q}_{fin,actual}}{\dot{q}_{fin,ideal}} = \frac{h \sum_{i=1}^m A_{s,i} (T_i^n - T_\infty)}{h A_s (T_b - T_\infty)} \tag{8}$$

$$\varepsilon = \frac{\dot{q}_{fin,actual}}{\dot{q}_{nofin}} = \frac{h \sum_{i=1}^m A_{s,i} (T_i^n - T_\infty)}{h A_b (T_b - T_\infty)} \tag{9}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

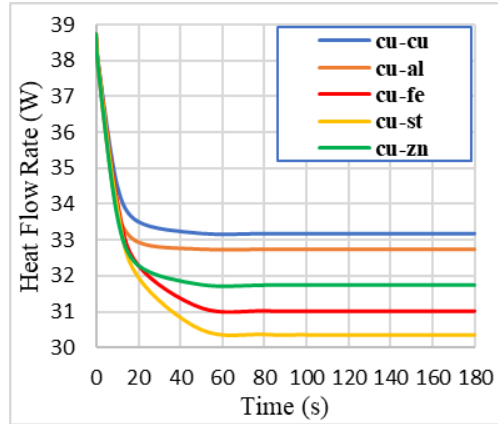
Hasil perhitungan distribusi suhu ditunjukkan pada Gambar 2. Suhu pada volume kontrol 1 atau pada dasar sirip dijaga selalu 100°C sedangkan pada volume kontrol selanjutnya akan mengalami perambatan dan pelepasan panas. Gambar 2 (a) distribusi suhu ditinjau pada detik ke 180 dengan membandingkan suhu setiap volume kontrol pada berbagai variasi material penyusun sirip. Sirip akan mengalami penurunan suhu pada setiap volume kontrol hingga mencapai kesetimbangan termal. Saat suhu di setiap volume kontrol tidak lagi mengalami perubahan maka sirip telah mencapai keadaan tunak. Gambar 2 (b) menunjukkan perubahan suhu yang terjadi di perbatasan kedua bahan atau volume kontrol 13. Penurunan suhu terjadi paling besar waktu 0 detik sampai 20 detik, dimana perbedaan suhu sirip dan suhu lingkungan relatif lebih tinggi.



Gambar 2. Distribusi suhu (a) saat t = 180 detik, (b) pada volume kontrol 13

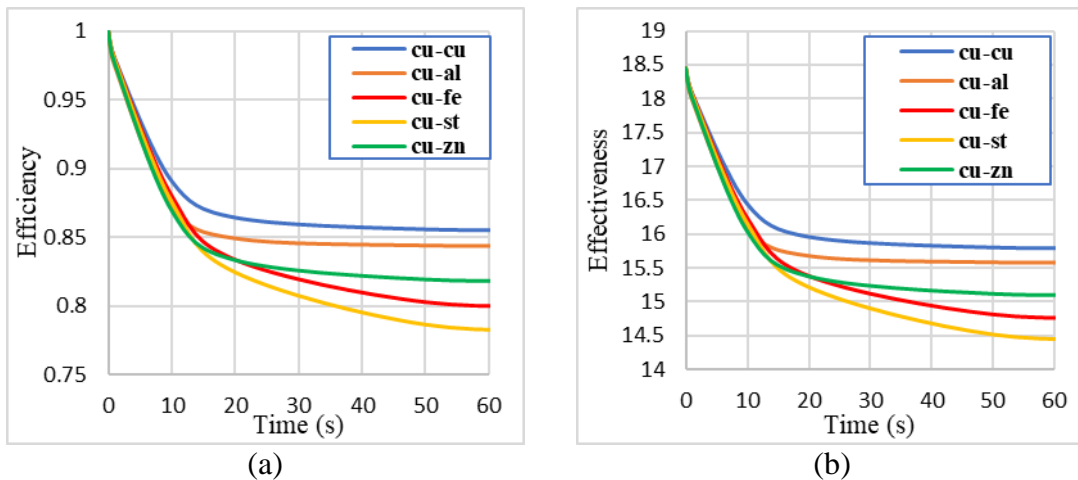
Sirip dengan susunan material yang berbeda memberikan hasil yang berbeda. Pada volume kontrol 13 grafik distribusi suhu material cu-cu dan cu-al terlihat landai berbeda dengan grafik pada material cu-fe, cu-st, dan cu-zn terlihat patah karena terjadi perubahan suhu yang mendadak akibat perbedaan properties material. Sirip dengan material yang memiliki nilai

konduktivitas, kalor jenis, dan massa jenis yang relatif lebih tinggi mempunyai laju perpindahan panas yang lebih tinggi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Laju perpindahan panas menurun seiring dengan perbedaan suhu sirip dan lingkungan yang mengecil. Jika koefisien udara dan bentuk penampang tidak mengalami perubahan maka laju perpindahan panas hanya dipengaruhi oleh distribusi suhu yang terjadi dalam sirip.



Gambar 3. Laju perpindahan panas dibandingkan dengan waktu

Efisiensi dan efektivitas sirip mengalami perubahan seiring dengan laju perpindahan panas yang terjadi dalam sirip. Pada kondisi awal dimana seluruh volume kontrol masih memiliki suhu seragam dengan suhu dasarnya, sirip memiliki efisiensi tertinggi yaitu 100% atau bernilai 1 dan efektivitas 18,45. Efisiensi dan efektivitas pada kondisi awal bernilai sama pada semua variasi susunan material karena belum dipengaruhi oleh perpindahan panas yang terjadi. Perubahan laju perpindahan panas yang semakin menurun menyebabkan penurunan efisiensi dan efektivitas pada setiap variasi susunan material sirip hingga mencapai keadaan tunak. Efisiensi dan efektivitas tertinggi dicapai oleh sirip dengan material tembaga, yaitu 0,85 dan 15,79. Sedangkan efisiensi dan efektivitas terendah dimiliki oleh sirip dengan susunan material tembaga dan baja, yaitu 0,80 dan 14,796.



Gambar 4. (a) Efisiensi sirip terhadap waktu, (b) Efektivitas sirip terhadap waktu

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa material penyusun sirip mempengaruhi karakteristik dari sirip tersebut. Sirip dengan material yang memiliki nilai konduktivitas, kalor

jenis, dan massa jenis yang relatif lebih tinggi mampu mendistribusikan panas dengan lebih baik. Paduan material sirip yang memiliki nilai properties tidak jauh berbeda menghasilkan distribusi suhu yang lebih merata. Efisiensi dan efektivitas dari sirip sangat dipengaruhi oleh laju aliran panas yang ditentukan dari distribusi suhu di dalam sirip. Pada penelitian selanjutnya dapat dikembangkan dengan meninjau bagaimana efisiensi dan efektivitas dari sirip apabila suhu dasar mengalami perubahan atau menerima *heat flux*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dilakukan di Universitas Sanata Dharma. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Sanata Dharma atas dukungan yang diberikan terhadap penelitian ini. Penulis juga berterima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan saran dan bimbingan selama proses penelitian ini berlangsung.

DAFTAR NOTASI

T_i^{n+1}	= Suhu pada volume kontrol i, pada saat n+1, (°C)
T_i^n	= Suhu pada volume kontrol i, pada saat n, (°C)
T_{i-1}^n	= Suhu pada volume kontrol i-1, pada saat n, (°C)
T_{i+1}^n	= Suhu pada volume kontrol i+1, pada saat n, (°C)
T_f	= Suhu fluida, (°C)
Δt	= Selang waktu, dari iterasi n menuju n+1, (detik)
Δx	= Jarak antara volume kontrol, (m)
$A_{s,i}$	= Luas selimut sirip yang bersentuhan dengan fluida, (m ²)
A_p	= Luas penampang sirip, (m ²)
ρ	= Massa jenis bahan sirip, (kg/m ³)
c	= Panas jenis bahan sirip, (J/kg°C)
k	= Konduktivitas termal bahan, (W/m°C)
h	= Koefisien perpindahan panas konveksi, (W/m ² °C)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Ginting, P.K. Purwadi, dan S. Mungkasi, "Efficiency and effectiveness of a fin having capsule-shaped cross section dependent on the one-dimensional position," *Proceedings of the 1st International Conference on Science and Technology for an Internet of Things*, 20 October 2018, Yogyakarta, Indonesia.
- [2] K. Ryanto, E. Tridianto, dan W. N. Fadilah, "Studi Numerik Pengaruh Multiple Helical Fin terhadap Efektivitas Fin dari Modul Low Pressure (LP) Economizer," *Proceeding Technology of Renewable Energy and Development Conference 3*, vol. 3, no. 1, hal 41-47, 2023.
- [3] P. K. Purwadi and M. Seen, "Efficiency and effectiveness of a fin having the capsule-shaped cross section in the unsteady state," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2202, art. 020092, 2019.
- [4] P. K. Purwadi, B. Setyahandana, and R. B. P. Harsilo, "Obtaining the efficiency and effectiveness of fin in unsteady state conditions using explicit finite difference method," *International Journal of Applied Sciences and Smart Technologies*, vol. 3, no. 1, pp. 111-124, 2021.

- [5] P. S. Prabowo and S. Mardikus, "Heat Transfer Characteristic on Wing Pairs Vortex Generator using 3D Simulation of Computational Fluid Dynamic," *International Journal of Applied Sciences and Smart Technologies*, vol. 3, no. 2, pp. 215-224, 2021.
- [6] P. K. Purwadi and B. Y. Pratama, "Efficiency and effectiveness of a truncated cone-shaped fin consisting of two different materials in the steady-state," *AIP Conference Proceedings*, vol.2202, art. 020091, 2019.
- [7] T. D. Nugroho and P. K. Purwadi, "Fins effectiveness and efficiency with position function of rhombus sectional area in unsteady condition," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1788, art. 030034,2017.
- [8] P. K. Purwadi and M. Seen, "The efficiency and effectiveness of fins made from two different materials in unsteady-state," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1511, no. 1, 2020.
- [9] P. K. Purwadi, B. Setyahandana, and M. Seen, "Efficiency and effectiveness of a fin having the ellipse cross section in the unsteady state condition", *AIP Conference Proceedings*, vol.2364, art. 030001, 2021.
- [10] W. Vidjabhakti, P. K. Purwadi, and S. Mungkasi, "Efficiency and Effectiveness of a Fin Having Pentagonal Cross Section Dependent on the One-Dimensional Position," *Proceedings of the 1st International Conference on Science and Technology for an Internet of Things*, 20 October 2018, Yogyakarta, Indonesia.
- [11] P.K. Purwadi, Y. Angga, and S. Mungkasi, "Efficiency and Effectiveness of a Rotation-Shaped Fin Having the Cross-Section Area Dependent on the One-Dimensional Position," *Proceedings of the 2nd International Conference of Science and Technology for the Internet of Things*, ICSTI 2019, September 3rd 2019, Yogyakarta, Indonesia.
- [12] P. K. Purwadi, "Mekanika Efisiensi Sirip Berbentuk Silinder," *Mekanika: Majalah Ilmiah Mekanika*, vol. 9, no. 1, pp. 231-237, 2010.
- [13] P. K. Purwadi, "Efisiensi dan Efektivitas Sirip Longitudinal dengan Profil Siku Empat Keadaan Tak Tunak Kasus 2D," *Seminar Nasional Aplikasi Sains dan Teknologi*, IST Akprind, Yogyakarta, 2008.