

PENENTUAN SECARA ANALITIK KONDUKTIVITAS TERMAL KOMPOSIT MULTIFASA KONTINYU

DETERMINATION OF THERMAL CONDUCTIVITY COMPOSITE ANALYTICALLY CONTINUOUS MULTIPHASE

Dra. Siti Samsiyah Purwaningsih, MT.
(Staf Pengajar UP MKU Politeknik Negeri Bandung)

Drs. Sardjito, MSc.
(Staf Pengajar UP MKU Politeknik Negeri Bandung)

ABSTRAK

Komposit sebagai sistem heterogen memiliki konduktivitas termal yang besarnya bergantung pada konduktivitas termal setiap komponennya, jumlah masing-masing serta cara preparasinya dalam komposit. Model matematis untuk menentukan konduktivitas termal komposit multifasa diturunkan secara analitik dengan metode perata-rataan besaran konduktivitas termal pada komposit keseluruhan berdasarkan Hukum Fourier tentang proses konduksi panas, Persamaan Laplace, Persamaan Poisson serta teorema Gauss. Hasil model ini dibandingkan dengan hasil pengukuran yang diperoleh dari beberapa literatur serta dari eksperimen yang menggunakan Teknik Kawat Panas.

Kata Kunci: Komposit, konduktivitas termal, multifasa.

ABSTRACT

Composite as heterogenous system has thermal conductivity which depends on thermal conductivities of its components, the amounts of the components and the arrangement (preparation) of each phase present. Mathematical model in determining the thermal conductivity multiphases has been developed analitically, bases on Fourier's Law of heat conduction, Laplace's Equation, Poisson's Equation and Gauss's Theorem. The resulting conductivity from this model is compared with the experimental value reported by some Literature and using Hot Wire technique.

Keywords: Composite, thermal conductivities, multiphases.

Pendahuluan

Pengetahuan mengenai jenis dan perilaku bahan sangat diperlukan bagi rancangan material baru. Perancangan ini dituntut oleh perkembangan teknologi mutakhir yang sangat pesat. Dengan melakukan prediksi model bagi perilaku bahan tertentu, dapat dirancang struktur material yang diperlukan untuk kepentingan khusus, yang kemudian diterapkan pada skala industri sesungguhnya. Pemilihan desain jenis komposit, yang akan digunakan untuk kebutuhan tertentu, sangat ditentukan oleh prediksi terhadap sifat fisika komposit yang bersangkutan.

Salah satu jenis material yang penggunaannya diperkirakan akan meningkat adalah komposit. Komposit sebagai bahan multifasa yang heterogen memiliki beberapa sifat fisika yang besarnya akan merupakan hasil perata-rataan sifat fisika bahan murni penyusunnya. Perata-rataan ini ditentukan oleh fraksi jumlah masing-masing bahan, distribusi fasa serta bentuk orientasinya.

Perata-rataan sifat fisika komposit harus dilakukan dengan mempertimbangkan fenomena atau hukum-hukum alam yang berkaitan dengan setiap besaran fisis, jadi tidak sekedar dihitung secara matematis.

Pada tahap awal, penelitian ini diharapkan dapat menentukan besaran-besaran fisika yang menjadi peubah dalam pengaruhnya terhadap konduktivitas termal efektif komposit yang memiliki fasa terdispersi atau sisipan yang terdistribusi secara kontinu. Setelah peubah-peubah tersebut diketahui secara kualitatif, selanjutnya akan dicari solusi terhadap bentuk kuantitatif pengaruh setiap peubah terhadap nilai eksak konduktivitas termal efektif komposit.

Setelah solusi kuantitatifnya diperoleh, selanjutnya penelitian ini diharapkan dapat merumuskan model matematika konduktivitas termal efektif komposit

multifasa kontinu dengan memperhitungkan juga pengaruh pori serta batas antarmuka dan batas butiran. Kesahihan model ini diharapkan lebih meningkat lagi setelah diuji dengan pengukuran eksperimental serta dibandingkan dengan hasil-hasil penelitian sebelumnya.

Kontribusi Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya khasanah pengetahuan khususnya mengenai sifat bahan serta berbagai faktor penentunya. Pemakaian sifat bahan yang diteliti adalah sifat fisika komposit, misalnya dalam bidang mekanik ataupun teknologi otomotif (elemen mesin yang ringan namun kuat), teknologi dirgantara (badan pesawat terbang), atau industri kecil (keramik). Dengan penelitian ini, diharapkan industri yang bersangkutan dapat melakukan desain bahan secara lebih optimal untuk memperoleh hasil yang lebih baik namun dengan biaya dan waktu yang lebih kecil.

Tinjauan Pustaka

Komposit, sebagai sistem bahan yang heterogen, memiliki beberapa sifat fisika yang besarnya merupakan hasil perata-rataan sifat fisika yang bersangkutan dari bahan matriks (fasa utama) serta bahan yang terdispersi (fasa minor/sisipan) (Chou, 1984). Sifat komposit berserat ditentukan oleh sinergi antara serat dengan matriks (Baker, 1988). Pada komposit bermatriks logam atau polimer, matriks bertindak sebagai pengikat atau perekat serat dan melindungi serat dari pengaruh tegangan luar sehingga dapat mencegah timbulnya *crack* pada serat. Serat sendiri biasanya memiliki kontribusi terhadap peningkatan modulus elastisitas efektif komposit. Pada komposit bermatriks keramik, matriksnya justru bersifat kuat, kaku tetapi getas sehingga seratlah yang justru akan mencegah tumbuhnya *crack* pada matriks.

Sifat termal komposit, khususnya konduktivitas termal efektifnya, ditentukan pula oleh sinergi antara matriks dengan fasa sisipan. Tzou (1972) telah menurunkan perumusan konduktivitas termal bahan komposit berlapis, yang lalu dikembangkan terhadap komposit yang merupakan campuran kontinu antara fasa matriks dengan fasa terdispersi (Sardjito, 1989). Hasilnya cukup memuaskan, terutama bila fasa terdispersi terdistribusi secara kontinu dan pengujiannya dilakukan pada berbagai komposit bermatriks keramik. Untuk fasa sisipan yang berbentuk serat, hasil model ini belum begitu memuaskan.

Berdasarkan Penelitian yang dilakukan oleh Purwaningsih (Purwaningsih, 2007) telah diperoleh hasil yang cukup memuaskan bagi pemodelan konduktivitas termal komposit dua fasa terutama bila dibandingkan dengan hasil eksperimen. Namun, penelitian tersebut belum sampai kepada pemodelan bagi komposit yang memiliki fasa tiga atau lebih.

Every (1992) menemukan bahwa hambatan termal pada batas antarmuka, yang lebih dikenal sebagai hambatan Kapitza, sangat berpengaruh terhadap konduktivitas termal efektif komposit, terutama bila ukuran partikel fasa sisipan cukup kecil bila dibandingkan dengan jalan bebas rata-rata fonon dalam bahan tersebut. Dengan menggunakan teori Medium Efektif, serta dengan pengujian Analisis Elemen Hingga, Davis (Davis, 1995) merumuskan model untuk konduktivitas termal komposit bermatriks logam, serta fasa sisipannya berupa keramik atau karbon yang berbentuk sferis. Namun, model tersebut belum dapat digunakan untuk komposit yang sisipannya berbentuk serat. Padahal, dalam pemakaian praktis, justru komposit berserat ini banyak digunakan karena memiliki modulus elastisitas yang baik. Misalnya, pada komposit bermatriks logam atau polimer dengan sisipan serat

grafis yang banyak digunakan dalam teknologi penerbangan dan antariksa (Baker, 1988).

Secara umum, komposit ataupun bahan keramik tak dapat dilepaskan dari masalah porositas karena dalam bahan-bahan tersebut selalu terbentuk pori. Perumusan konduktivitas termal efektif bahan semacam ini dapat dijelaskan dengan menggunakan model komposit dengan pori sebagai fasa terdispersinya (sisipan). Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Chen (Chen, 1995), Tzou (Tzou, 1996), Lipton (Lipton, 1996), Luo (Luo, 1996) dan Shih (Shih Yuan Lu, 1996) menunjukkan bahwa konduktivitas termal bahan berpori bergantung pada friksi, bentuk, orientasi, dan konfigurasi pori. Kesulitan yang muncul dalam kasus ini adalah penentuan bentuk dan orientasi pori yang ada dalam suatu bahan secara eksperimen.

Perubahan suhu dapat menimbulkan hal-hal yang tidak diinginkan, seperti terbentuknya retakan, karena keheterogenan bahan. Satyamurthy (1979) memperlihatkan data adanya perubahan nilai konduktivitas termal bahan dengan adanya retakan mikro dalam komposit. Perubahannya ternyata memiliki persamaan matematika yang mirip dengan persamaan yang berlaku bagi pori. Dengan demikian, model umum bagi perumusan konduktivitas termal efektif komposit (baik bahan heterogen, maupun komposit dengan sisipan pori atau retakan mikro) akan sangat bermanfaat.

Tinjauan Matematis dan Teoritis

Komposit biner (yang merupakan campuran dua jenis bahan : matriks dan sisipan) dapat dianggap sebagai perluasan potongan-potongan tipis komposit. Masing-masing potongan terdiri atas f bagian sisipan dan $(1-f)$ bagian matriks f adalah fraksi volume sisipan dalam komposit.

Jika panas mengalir dalam arah tegak lurus bidang potongan, sedang konduktivitas termal matriks adalah K_M dan konduktivitas termal sisipan adalah K_S , untuk potongan yang sangat kecil, konduktivitas rata-rata efektifnya ialah :

$$K_{KP} = K_M(1-f) + K_S f \dots\dots\dots(1)$$

Untuk seluruh benda (bukan potongan), tentu saja nilai konduktivitas termal efektif akan lebih kecil daripada nilai K_{KP} karena adanya pengaruh "jalan bebas rata-rata" serta hambatan termal pada batas antar-muka. Dengan demikian, konduktivitas termal efektif komposit adalah

$$K_K \leq K_{KP} \text{ atau } K_K \leq K_M(1-f) + K_S f$$

sehingga

$$\frac{K_K}{K_M} \leq 1 - \left(1 - \frac{K_S}{K_M}\right)f \dots\dots\dots(2)$$

Dengan uraian deret (karena nilai $4\pi mC$ kecil sekali), didapat persamaan pendekatan perbandingan antara K_K dengan K_M sama dengan $1-4\pi mC$.

atau

$$\frac{K_K}{K_M} = 1 - Bf \dots\dots\dots(3)$$

dengan

$$Bf = 4\pi mC \text{ atau } B = 4\pi mC / f \dots\dots\dots(4)$$

Fraksi f (volume sisipan) = $(v - v_M) / v$ (dengan v = volume total), maka

$$\frac{K_K}{K_M} = 1 - B \left[\frac{v - v_M}{v_M} \right] \dots\dots\dots(5)$$

Dalam bentuk *increment*, $K_K = K_M + dK$ (dK adalah perubahan K karena adanya perubahan volume, dV) sehingga

persamaan tersebut dapat ditulis dalam bentuk :

$$dK / K = - B dV / V \dots\dots\dots(6)$$

Bila nilai B diketahui, konduktivitas termal efektif komposit dapat ditentukan. Nilai B (ataupun nilai C) dapat dihitung dengan meninjau bentuk sisipan sebagai sumber panas.

Tinjau sisipan berbentuk elipsoida (perluasan dari model bola, namun memiliki sumbu panjang dan sumbu pendek yang berbeda panjangnya). Menurut Landau & Lifshitz (1959), sumber panas berbentuk bola (yang juga dapat diperluas untuk elipsoida) akan menghasilkan solusi persamaan Laplace dan Poisson, sebagai berikut :

$$T_{dalam} = DZ$$

$$T_{luar} = Z + \frac{CZ}{r^3} \dots\dots\dots(7)$$

Dengan persyaratan kontinuitas suhu dan fluks panas dipermukaan batas (untuk bola keduanya terjadi pada nilai r yang sama, namun untuk elipsoida pada nilai r yang berbeda) :

$$T_{dalam} = T_{luar} \text{ (pada } r = R_1 \text{)}$$

dan

$$K \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{dalam} = \left(K \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{luar} \text{ (pada } r = R_2 \text{)}$$

dan dengan mendefinisikan eksentrisitas $t_1 = R_1/R$ dan $t_2 = R_2/R$ (R = jejari efektif sisipan sehingga volume sisipan dapat dianggap sebagai $4/3 \pi R^3$), akan diperoleh $D = 1 + C/(t_1 R_1^3)$, dan

$$C = \frac{1 - \frac{K_s}{K}}{\frac{2}{R_2} + \frac{1}{t_1 R_1^3} \left(\frac{K_s}{K} \right)} \dots\dots\dots(8)$$

Bila hasil ini digunakan untuk menghitung B dari persamaan (4), didapat

$$B = \frac{3\left(1 - \frac{K_s}{K}\right)}{\frac{2}{t_2} + \frac{1}{t_1}\left(\frac{K_s}{K}\right)} \dots\dots\dots(9)$$

Selanjutnya, akan didapat batas nilai B , yaitu $B \geq 1 - K_s / K$. Nilai batasnya akan terjadi jika K_s / K mendekati 1 (yaitu bahan hampir kontinu oleh sisipan semua) sehingga $B = 1 - K_s / K$.

Jika nilai batas ini disubstitusikan pada persamaan (9), diperoleh hubungan antara t_1 dan t_2 , yaitu :

$$t_1 = \frac{t_2}{3t_2 - 1} \dots\dots\dots(10)$$

Didefinisikan faktor ukuran $t = t_2$ (dengan batas $t \geq 2/3$) sehingga koefisien B dari persamaan (9) dapat disederhanakan menjadi :

$$B = \frac{3\left(1 - \frac{K_s}{K}\right)}{\frac{2}{t} + \left(3 - \frac{2}{t}\right)\left(\frac{K_s}{K}\right)} \dots\dots\dots(11)$$

Nilai B ini, jika disubstitusikan pada persamaan (6), akan menghasilkan suatu persamaan diferensial dalam K dan V , yang berbentuk :

$$\frac{\left[\frac{2}{t} + \left(3 - \frac{2}{t}\right)\left(\frac{K_s}{K}\right)\right]}{3K\left[\frac{K_s}{K} - 1\right]} dK = \frac{dV}{V}$$

Selanjutnya, jika persamaan diferensial ini diselesaikan dengan batas awal K_M dan V_M , serta dengan mengganti $V_M/V = 1 - f$, berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Purwaningsih (2007: 1-7), didapat persamaan implisit yang

menghubungkan konduktivitas termal efektif komposit sebagai fungsi dari fraksi volume sisipan, yaitu :

$$\frac{(K - K_s)}{(K_M - K_s)} \left(\frac{K_M}{K}\right)^{1 - \frac{2}{3t}} = 1 - f \dots(12)$$

Selanjutnya, jika diambil kondisi-kondisi khusus untuk nilai t pada persamaan (12) di atas, diperoleh beberapa macam model matematik, yaitu :

- a. Untuk sisipan dengan faktor ukuran t terkecil ($t = 2/3$), diperoleh model matematik sebagai berikut :

$$\frac{K - K_s}{K_M - K_s} = 1 - f \dots\dots\dots(13.a)$$

- b. Untuk sisipan berbentuk bola ($t = 1$), diperoleh model matematik sebagai berikut :

$$\frac{K - K_s}{K_M - K_s} \left(\frac{K_M}{K}\right)^{\frac{1}{3}} = 1 - f \dots(13.b)$$

- c. Untuk sisipan berbentuk serat (t mendekati tak terhingga, ∞), diperoleh model matematik sebagai berikut :

$$\frac{K - K_s}{K_0 - K_s} \left(\frac{K_0}{K}\right) = 1 - f \dots\dots(13.c)$$

Metode Penelitian

Metode penelitian terdiri atas dua bagian, yaitu penelitian teoritik dan penelitian eksperimental.

Penelitian teoritik dilakukan untuk menentukan model matematik konduktivitas termal komposit sebagai fungsi dari konduktivitas bahan murni, fraksi volume setiap bahan, serta distribusi dan orientasi

sisipan serat dalam komposit. Perhitungannya akan melibatkan pemecahan persamaan diferensial yang cukup rumit (Purwaningsih, 2007) hingga memerlukan alat bantu berupa perangkat lunak komputer. Penelitian eksperimental dilakukan untuk menguji keberlakuan model matematik yang diperoleh secara teoritik. Pengujian dilakukan terhadap data empirik sekunder yang telah diperoleh peneliti lain. Untuk lebih memperkuat kesahihan dan keterandalan model tersebut, dilakukan pula pengujian dalam bentuk pengukuran langsung konduktivitas termal komposit. Pengujian secara eksperimen dilakukan terhadap komposit yang banyak digunakan dalam praktik, yakni keramik. Pengukuran akan dilakukan dengan menggunakan metode kawat panas (Sardjito, 1989).

Model atau formulasi yang telah ada sebelumnya, serta akan menjadi basis hipotesis awal penelitian ini, diperoleh melalui penelusuran kepustakaan serta komunikasi dengan berbagai sumber (jurnal, buku, internet, CD ROM, dan lain-lain) begitu pula halnya dengan data empirik sekunder. Data primer didapat melalui eksperimen langsung di laboratorium dengan tahapan :

- penyiapan sistem yang diteliti ;
- pengukuran ;
- pengolahan data (analisis variasi, kalkulus peubah banyak, analisis numerik, pencocokan data eksperimen dengan data hasil perhitungan).

Model yang Digunakan

Menurut Purwaningsih (2007:1-7), dari ketiga model matematik yang dipresentasikan oleh persamaan (13.a), (13.b), dan (13.c) tersebut, model kedua (sisipan berbentuk bola) merupakan model yang paling bagus karena hasil perhitungannya mendekati data hasil

pengukuran untuk komposit biner (dua fasa).

Dalam penelitian ini, akan dikembangkan aplikasi model sisipan berbentuk bola ($t = 1$) untuk komposit multifasa. Model ini akan diujicobakan untuk komposit tiga fasa dengan dua langkah perhitungan dari model tersebut.

Percobaan Pengukuran Konduktivitas Termal Komposit dengan Teknik Kawat Panas

Peralatan yang digunakan terdiri atas

1. Sumber/pasok daya (*Power Supply*) berupa "*Low Voltage Variable Transformer*" jenis Leybold dengan keluaran tegangan bolak-balik yang dapat diatur besarnya antara 0 sampai dengan 25 volt, 50 Hz.
2. Wattmeter Leybold untuk mengukur daya listrik yang dialirkan pada kawat pemanas, dengan jangkauan pengukuran 0 sampai 30 watt dengan ketelitian 0,5 watt.
3. Kawat pemanas Nichrome dengan garis tengah 0,5 mm.
4. Termometer Digital, Keithley 872, tipe JTC Fe - Cu Ni untuk mengukur suhu komposit dengan ketelitian 0,1 derajat F dan 0,1 derajat C.
5. Digital Counter Leybold untuk menentukan waktu pengukuran secara digital dengan ketelitian 0,01 detik.
6. Neraca Analitis, Jangka sorong, dan alat-alat bantu lainnya.

Komposit yang dijadikan sampel adalah sistem komposit semen – baja - pori, dengan beberapa perbandingan fraksi volume yang berbeda. Semen yang digunakan adalah jenis semen Fortland yang mengandung silikat trikalsium, silikat dikalsium, aluminat trikalsium. Jenis semen ini, jika dicampur dengan air, akan terbentuk ikatan hidrat dari silikat dan aluminat serta kalsium karbonat. Adapun baja yang digunakan adalah jenis "*mild*

steel" BS 986 dalam bentuk batangan-batangan kecil dengan garis tengah 1,4 mm dan panjang 20 mm.

Semua sampel diperlakukan sama, diukur konduktivitas termalnya menggunakan teknik kawat panas.

Hasil pengukuran nilai konduktivitas termal komposit tiga fasa semen-baja-pori dari percobaan yang dilakukan dalam penelitian ini, disajikan pada Tabel 1.

Analisis Hasil Pengukuran dan Perhitungan

Dalam analisis ini, yang dimaksud konduktivitas termal hasil perhitungan, adalah nilai yang diperoleh menggunakan perhitungan pada persamaan-persamaan tersebut. Karena komposit dalam penelitian ini untuk tiga fasa, ada dua langkah perhitungan yang rumit.

Untuk kelancaran dan kemudahan perhitungan, dilakukan dengan menggunakan piranti program (*software*) komputer DERIVE. Hasil perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 2.

Penelitian ini, digunakan untuk menentukan konduktivitas termal komposit :

* Semen - baja - pori (K_M semen = 2,6162 W/mK, K_s baja = 48,0W/mK, K_s udara = 0,025 W/mK).

Apabila porositas sampel tidak diperhitungkan, perbandingan antara konduktivitas termal hasil pengukuran dengan hasil perhitungan serta penyimpangannya dapat dilihat pada tabel 3 dan gambar 1 .

Simpulan

1. Komposit sebagai sistem heterogen akan mempunyai konduktivitas termal yang besarnya bergantung pada konduktivitas termal setiap komponen pembentuknya, fraksi volume setiap

komponen serta distribusi penyusun masing-masing.

2. Konduktivitas termal komposit dapat ditentukan dengan pendekatan perata-rataan dari konduktivitas termal komponen-komponen penyusunnya.
3. Hasil yang diperoleh melalui perhitungan cukup memuaskan bila dibandingkan dengan hasil eksperimen (gambar 1).
4. Hasil perhitungan konduktivitas termal komposit multifasa, dalam penelitian ini untuk tiga fasa sudah cukup memuaskan bila dibandingkan dengan hasil pengukuran.(tabel 3 dan gambar 1).
5. Untuk komposit lebih dari tiga fasa, dibutuhkan banyak langkah perhitungan. Diperkirakan hasil perhitungannya mempunyai simpangan yang makin membesar sehingga perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mencari model yang lebih efisien dan efektif.
6. Hasil perhitungan konduktivitas termal komposit tiga fasa (semen-baja-pori), untuk fraksi baja di atas 17% terlihat penyimpangannya membesar bila dibandingkan dengan hasil pengukuran (tabel 3 dan gambar 1). Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut.

Tabel 1.: Hasil Pengukuran Nilai Konduktivitas Termal pada Komposit Tiga Fasa Semen-Baja-Pori.

Nomor Sampel	Fraksi Volume (%)			Hasil Pengukuran Konduktivitas Termal Komposit (W/mK)
	Semen	Baja	Pori	
1	88,3	-	11,7	1,5183
2	84,4	1,4	14,2	1,5354
3	76,8	2,8	17,4	1,3999
4	82,3	3,4	14,3	1,3755
5	84,0	4,0	12,0	1,6666
6	83,5	4,0	12,5	1,6798
7	84,6	4,4	11,0	1,9834
8	80,8	5,0	14,2	1,7076
9	80,6	6,4	13,0	1,8202
10	74,9	7,0	17,1	1,4893
11	81,9	8,0	10,1	2,1072
12	80,4	8,8	10,8	1,9788
13	79,2	9,4	11,4	2,0738
14	71,6	17,0	11,4	2,4979
15	68,0	19,8	12,2	2,6128
16	65,3	22,6	12,1	2,8145

KETERANGAN :

Konduktivitas semen = 2,6162 W/mK

Konduktivitas baja = 48,0 W/mK

Konduktivitas udara = 0,025 W/mK

**Penentuan Secara Analitik Konduktivitas
Termal Komposit Multifasa Kontinu**

Tabel 2.: Hasil Perhitungan Nilai Konduktivitas Termal pada Komposit Tiga Fasa Semen-Baja-Pori.

Nomor Sampel	Fraksi Volume (%)			Hasil Perhitungan Konduktivitas Termal Komposit (W/mK)
	Semen	Baja	Pori	
1	88,3	-	11,7	
2	84,4	1,4	14,2	1,66566
3	76,8	2,8	17,4	1,37601
4	82,3	3,4	14,3	1,65643
5	84,0	4,0	12,0	1,95173
6	83,5	4,0	12,5	1,87906
7	84,6	4,4	11,0	2,11593
8	80,8	5,0	14,2	1,66876
9	80,6	6,4	13,0	1,81408
10	74,9	7,0	17,1	1,40136
11	81,9	8,0	10,1	2,29482
12	80,4	8,8	10,8	2,15862
13	79,2	9,4	11,4	2,05399
14	71,6	17,0	11,4	2,06431
15	68,0	19,8	12,2	1,94070
16	65,3	22,6	12,1	1,9344

KETERANGAN :

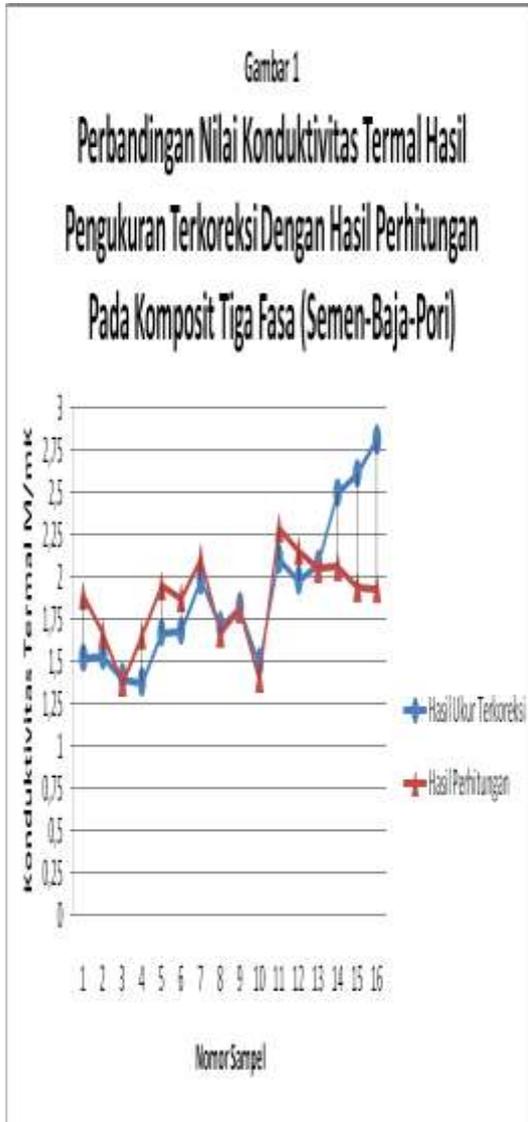
Konduktivitas semen = 2,6162 W/mK

Konduktivitas baja = 48,0 W/mK

Konduktivitas udara = 0,025 W/mK

Tabel 3.: Perbandingan Nilai Konduktivitas Termal Hasil Pengukuran Terkoreksi dengan Hasil Perhitungan pada Komposit Tiga Fasa (Semen-Baja-Pori).

Nomor Sampel	Fraksi Volume (%)			Konduktivitas Termal M/mK		Prosentase Simpangan
	Semen	Baja	Pori	Hasil Ukur Terkoreksi	Hasil Perhitungan	
1	88,3	-	11,7	1,5183	1,89301	+24
2	84,4	1,4	14,2	1,5354	1,66566	+8,5
3	76,8	2,8	17,4	1,3999	1,37601	-1,7
4	82,3	3,4	14,3	1,3755	1,65643	+20
5	84,0	4,0	12,0	1,6666	1,95173	+17,1
6	83,5	4,0	12,5	1,6798	1,87906	+11,8
7	84,6	4,4	11,0	1,9834	2,11593	+6,7
8	80,8	5,0	14,2	1,7076	1,66876	-2,3
9	80,6	6,4	13,0	1,8202	1,81408	-0,3
10	74,9	7,0	17,1	1,4893	1,40136	-5,9
11	81,9	8,0	10,1	2,1072	2,29482	+8,9
12	80,4	8,8	10,8	1,9788	2,15862	+9,1
13	79,2	9,4	11,4	2,0738	2,05399	-1
14	71,6	17,0	11,4	2,4979	2,06431	-17,3
15	68,0	19,8	12,2	2,6128	1,94070	-25
16	65,3	22,6	12,1	2,8145	1,9344	-31



Daftar Pustaka

- Baker A.A.** 1988. "Development and Potential of Advancer Fibre Composite", *Aus. J.Sc & Tech. Eng. Motor*, 11, 217 - 231
- Chen J.** 1995. "Elastic Properties of Rigid Fiber Reinforced Composites", *J.Appl.Phys*, 77, 4349 - 4360
- Chou T.W.** 1984. "Composites", *Scientific American*, 1984, 167 - 177

Davis I.C. 1995. "Thermal Conductivity of Metal Matrix Composites", *J.Appl.Phys.*, 77, 4954-4960

Every et.al. 1992. *Acta Metall. Mater.*, 40 (123)

Lipton R. 1996. "Critical Radius Size Effects and Inverse Problems for Composites with Imperfect Interface", *J. Appl. Phys.*, 79, 8964 – 8966

Lao Jie. 1996. "Micromechanics of Randomly Oriented Ellipsoidal Inclusion Composites", *J. Appl. Phys.*, 79, 9047 - 9063

Purwaningsih S.S. 2007. "Penentuan Konduktivitas Termal Efektif Bahan Komposit secara Analitik", *SIGMA-MU*, 2007, 1-7

Sardjito. 1989. "Penentuan Konduktivitas Termal Komposit Campuran Kontinu secara Macro", Tugas Akhir S-2, ITB

Satyamurthy. 1979. "Effect of Spatially Varying Porosity on Magnitude of Thermal Stress", *J. Am. Ceram. Soc.*, 62, 431 - 432

Shih Yuan Lu. 1996. "Effective Conductivity of Composites", *J. Appl. Phys.*, 79, 6761 - 6769

Tsou F. K. 1972. "*Symposium of Composite Materials in Engineering*", ASM

Tzou DY. 1995. "The Anisotropic Overall Thermal Conductivity", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 38, 23 - 30.