

SIMULASI NUMERIK PERPINDAHAN PANAS 2 DIMENSI PADA PROSES PENDINGINAN TEMBAGA MURNI DENGAN VARIASI CETAKAN PASIR DAN MULLITE MENGGUNAKAN PENDEKATAN BEDA HINGGA

Joko Supriyanto¹, Eko Prasetya Budiana², Purwadi Joko Widodo²

¹Mahasiswa Program Sarjana – Jurusan Teknik Mesin – Universitas Sebelas Maret

²Staf Pengajar – Jurusan Teknik Mesin – Universitas Sebelas Maret

Keywords :

*Heat transfer
Conduction
Finite difference method
The metal cooling*

Abstract :

Heat transfer simulation on cooling process of pure copper was performed to determine the conduction heat transfer that propagate through the sand mold or mold mullite with convection boundary conditions. Simulation is done by solving the equation set conduction with convection boundary conditions using a finite difference approach. The finite difference approach is done by solving the equation conduction of heat transfer by ADI method for the calculation of the 2 dimentions of conduction equations. The finite difference method is solved by Fortran Power Station 4.0 and Matlab 7.8 software. The simulation results is show that pure copper cooled using mullite mold will cool faster than pure copper that is cooled using sand molds. This is due to the different properties of sand and mullite.

1. PENDAHULUAN

Pengecoran merupakan proses manufaktur dimana material cair dituangkan ke dalam cetakan berongga sesuai dengan bentuk yang diinginkan, dan kemudian dibiarkan agar mengeras. Bahan coran biasanya logam atau berbagai bahan campuran dua atau lebih komponen bersama-sama, contohnya adalah beton dan tanah liat. Salah satu elemen penting yang harus dipertimbangkan untuk menghasilkan kualitas tinggi pada produk cor adalah tingkat pendingin. Laju pendinginan pada proses pembekuan tergantung pada laju perpindahan panas dari logam ke atmosfer melalui cetakan.

Perpindahan panas merupakan bentuk kalor yang berpindah dari benda yang bersuhu tinggi ke benda yang bersuhu lebih rendah. Pada proses pendinginan logam perpindahan panas merambat secara konduksi melewati cetakan sebelum akhirnya ke atmosfer. Perpindahan panas ini akan berhenti ketika telah terjadi keseimbangan temperatur antara logam, cetakan dan lingkungan. Proses pendinginan dalam pengecoran logam perlu dikontrol untuk menghasilkan hasil coran yang sesuai dengan keinginan.

Salah satu pendekatan dalam menyelesaikan persoalan perpindahan panas adalah melalui metode analisis numerik. Pendekatan ini didasarkan pada teknik beda hingga yang sesuai untuk penyelesaian menggunakan komputer dengan kecepatan tinggi. Dalam menerapkan metode numerik terlebih dahulu persamaan perpindahan panas dirumuskan dengan persamaan differensial, tujuannya adalah untuk menentukan persamaan diferensial dengan syarat-syarat batasnya. Hal tersebut dilakukan dengan mengganti daerah yang kontinu dengan pola titik-titik yang diskrit dengan menggunakan pendekatan beda hingga antara titik-titik tersebut.

Penelitian ini mempelajari proses pendinginan tembaga murni yang didinginkan didalam cetakan pasir dan mullite. Properti (massa jenis, konduktivitas termal dan panas jenis) tembaga murni dianalisis berdasarkan fungsi temperatur sedangkan properti cetakan dianggap konstan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Pariona dan Mossi (2005) melakukan analisis simulasi perpindahan panas pada proses pembekuan besi murni menggunakan software Ansys. Penelitian ini meneliti pembekuan besi murni dengan cetakan pasir, AI 50/60 AFS, dan cetakan mullite. Hasil penelitian menunjukkan perbedaan dalam distribusi temperatur pada kedua sistem. Hal tersebut terjadi karena sifat fisik cetakan yang berbeda.

Belkhatay (2010) melakukan pemodelan numerik pada proses pembekuan baja dengan menggunakan cetakan pasir. Masalah yang dianalisis digambarkan dengan persamaan diferensial parsial dilengkapi dengan kondisi batas dan kondisi awal kemudian diselesaikan dengan pendekatan beda hingga. Masalah diselesaikan dengan menggunakan skema eksplisit FDM dimana domain dibagi menjadi grid-grid untuk menyelesaikan persamaan perpindahan panas. Hasilnya menunjukkan bahwa di distribusi temperatur berbeda-beda disetiap gridnya.

Shaha dan Haque (2010) melakukan simulasi distribusi temperatur pada pembekuan besi cor kelabu. Dalam penelitian ini, aliran panas disimulasikan dengan menggunakan software JL Analyzer FEM untuk

memverifikasi model besi cor kelabu. Penelitian ini menunjukkan bahwa daerah logam yang lebih dekat dengan cetakan akan lebih cepat dingin dibandingkan dengan daerah logam yang jauh dengan cetakan sehingga pembekuan akan lebih cepat terjadi dari daerah yang bisinggungan dengan cetakan pasir.

Khalafalla & Hashimi (2010) melakukan simulasi untuk mengetahui aliran panas pada proses pengecoran aluminium dengan cetakan pasir. Simulasi dilakukan dengan pendekatan elemen hingga menggunakan software Matlab Rel.6.1. Model yang digunakan berupa profil aluminium berbentuk huruf T yang dikelilingi oleh cetakan berupa pasir. Hasilnya menunjukkan bahwa geometri cetakan pasir mempengaruhi laju aliran panas yang melewati material tersebut seperti temperatur, laju pendinginan dan gradient distribusi temperatur.

Penelitian lain mengenai distribusi temperatur pada proses pembekuan logam juga dilakukan oleh Anjo (2012). Dalam penelitiannya Anjo menganalisis distribusi konduksi panas dalam cetakan pasir menggunakan metode beda hingga. Hasil simulasi numerik distribusi temperatur konduksi menunjukkan temperatur maksimum berada di pusat dan bergerak sepanjang rongga cetakan melalui sumbu x dan y dan kemudian suhu berangsur-angsur turun sampai dengan suhu lingkungan.

2.1. PERSAMAAN ATUR

Konduksi dapat dipandang sebagai perpindahan panas dari partikel yang lebih berenergi ke partikel yang kurang berenergi yang disebabkan interaksi antar partikel. Proses konduksi dapat terjadi pada benda padat, cair maupun gas jika terjadi kontak secara langsung dengan ketiga benda tersebut. Adapun persamaan difusi yang mengatur perpindahan panas konduksi dapat dituliskan sebagai berikut:

Persamaan difusi untuk perpindahan panas unsteady secara 2-D.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Persamaan difusi untuk perpindahan panas steady secara 2-D.

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (2)$$

Dimana:

- T = temperatur (K)
- t = waktu (s)
- r = diffusivitas termal (m^2/s)
- k = konduktivitas termal (W/m.K)

Kondisi batas yang diterapkan dalam kasus ini adalah konveksi

$$q = k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = h_f (T - T_\infty) \quad (3)$$

Dimana:

- q = fluks panas (J/s)
- k = konduktivitas termal (W/m.K)
- h_f = koefisien perpindahan panas konveksi ($W/m^2.K$)
- T = temperatur lingkungan (K)
- T = temperatur (K)

Dalam proses pendinginan logam temperatur akan berubah seiring dengan perubahan waktu dan perubahan temperatur ini akan berhenti ketika sudah terjadi keseimbangan temperatur antara logam, cetakan dan lingkungan, sehingga dalam simulasi ini persamaan yang digunakan adalah persamaan (1)

Untuk menyelesaikan persoalan distribusi temperatur pada proses pendinginan logam secara 2 dimensi, persamaan atur konduksi panas unsteady diselesaikan menggunakan metode *Alternating Direct Implicit* (ADI). Persamaan atur konduksi panas unsteady di diskritisasi menggunakan pendekatan beda hingga, dimana turunan waktu didekati dengan beda maju sedangkan untuk turunan ruang didekati dengan beda tengah. Langkah penyelesaian menggunakan metode ADI yaitu

a. X-Sweep

X-sweep merupakan langkah dari n ke $n+1/2$, untuk menentukan nilai-nilai dari x-sweep pada persamaan (1) dibuat diskritisasi sebagai berikut:

Diskritisasi turunan waktu

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i,j}^{n+1/2} - T_{i,j}^n}{\Delta t / 2} \quad (4)$$

Diskritisasi turunan ruang untuk arah x

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i-1,j}^{n+1/2} - 2T_{i,j}^{n+1/2} + T_{i+1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} \quad (5)$$

Diskritisasi turunan ruang untuk arah y

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j+1}^n}{\Delta y^2} \quad (6)$$

Persamaan (4), (5) dan (6) kemudian disubstitusikan kepersamaan (1) dan kemudian diselesaikan dengan matrik tridiagonal.

b. Y-Sweep

Y-sweep merupakan langkah dari $n+1/2$ ke $n+1$, untuk menentukan nilai-nilai dari x-sweep pada persamaan (1) dibuat diskritisasi sebagai berikut: Diskritisasi turunan waktu

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta t / 2} \quad (7)$$

Diskritisasi turunan ruang untuk arah x

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i-1,j}^{n+1/2} - 2T_{i,j}^{n+1/2} + T_{i+1,j}^{n+1/2}}{(\Delta x)^2} \quad (8)$$

Diskritisasi turunan ruang untuk arah y

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{i,j-1}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i,j+1}^{n+1}}{(\Delta y)^2} \quad (9)$$

Persamaan (7), (8) dan (9) kemudian disubstitusikan kepersamaan (1) dan kemudian diselesaikan dengan matrik tridiagonal.

Untuk mencegah kesalahan selama proses iterasi maka panjang langkah waktu juga perlu diperhitungkan dalam simulasi ini. Untuk menghitung panjang langkah waktu digunakan persamaan sebagai berikut:

$$Fo \leq \frac{1}{4} \quad (10)$$

Dimana:

$$Fo = \frac{\Gamma \cdot \Delta t}{\Delta x^2} \quad (11)$$

Fo = bilangan fourier

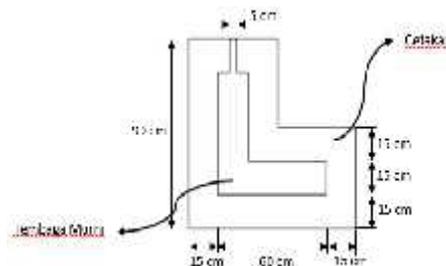
= difusivitas termal (m^2/s)

t = panjang langkah waktu (s)

x = jarak antar grid (m)

2.2. DOMAIN DAN PROPERTI

Dalam simulasi ini domain yang digunakan berbentuk profil L dengan saluran masuk coran diperhitungkan dalam proses simulasi. Domain kemudian dibagi menjadi 91 grid arah x dan 91 arah y dengan $x = y = 0.01m$.



Gambar 3.1. Domain

Logam yang dianalisis dalam simulasi ini adalah tembaga murni yang didinginkan dalam cetakan pasir dan mullite.

Tabel 3.1. Properti tembaga murni

T (K)	k (W/m.K)	Cp (J/kg.K)	(kg/m ³)
100	483	252	9028
200	413	356	8980
300	401	385	8933
400	393	397	8885
600	379	417	8970
800	366	433	8695
1000	352	451	8600
1200	338	470	8505
1358	329	487	8430

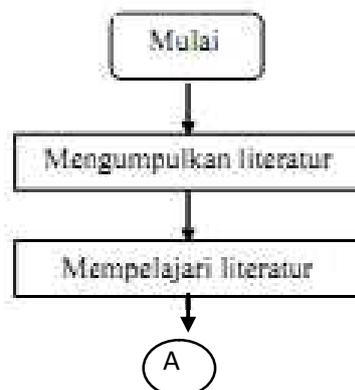
Tabel 3. 2. Properti cetakan

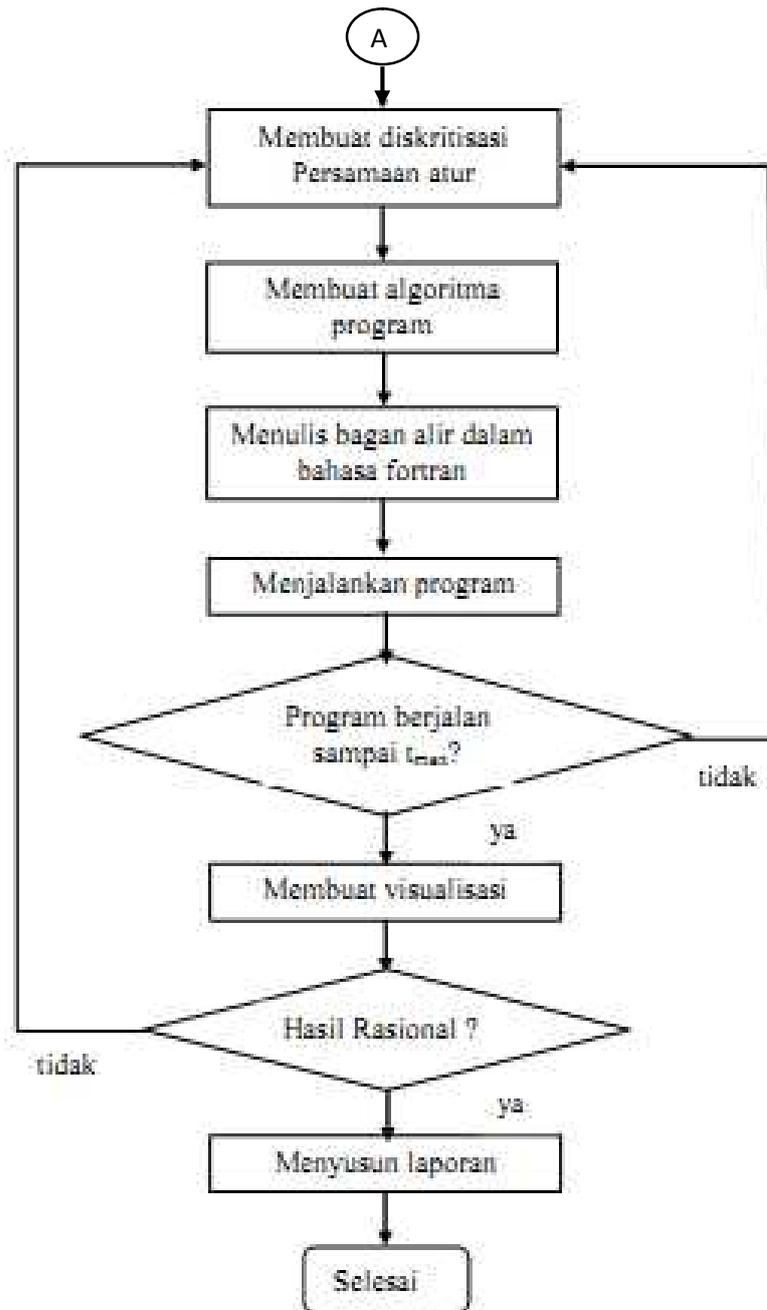
Material cetakan 1	Industrial Sand
Panas jenis (Cp)	800 J/kg.K
Konduktivitas termal (k)	0.35 W/m.K
Massa jenis ()	1515 kg/m ³
Temperatur awal (T)	300 K
Material cetakan 2	Mullite
Panas jenis (Cp)	780 J/kg.K
Konduktivitas termal (k)	6 W/m.K
Massa jenis ()	3100 kg/m ³
Temperatur awal (T)	300 K

Pada simulasi ini kondisi awal tembaga adalah pada temperatur 1358 K dan temperatur lingkungan 300 K dengan koefisien perpindahan panas konveksi 5,09 W/m².K. Simulasi dilakukan menggunakan bahasa pemrograman fortran dengan pendekatan beda hingga secara implisit.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Proses penelitian ini mengacu pada diagram alir yang diperlihatkan oleh gambar berikut ini

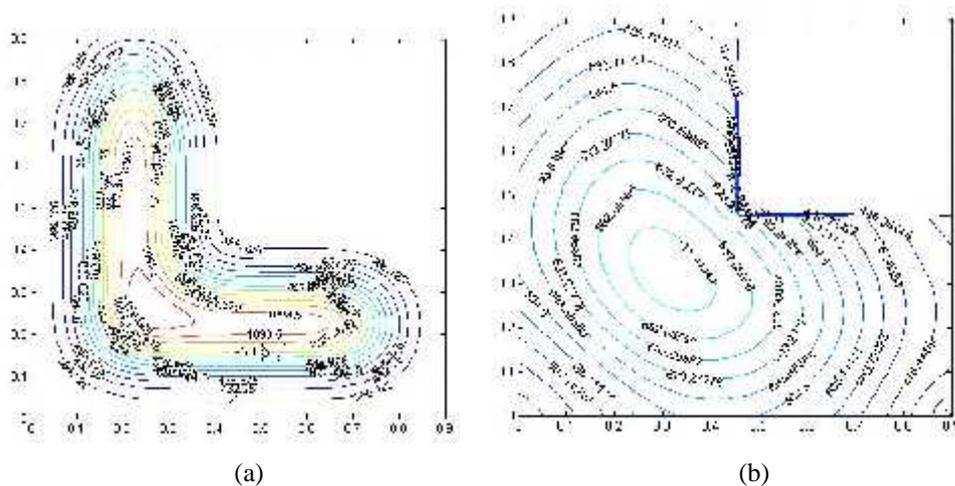




Gambar 4.1. Diagram alir penelitian

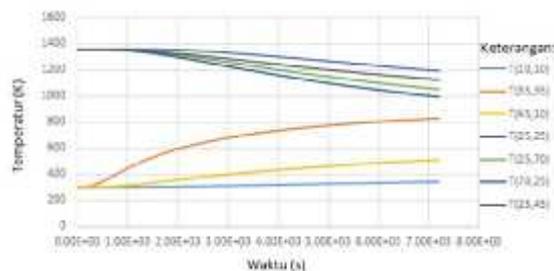
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi numerik perpindahan panas pada proses pendinginan tembaga murni dengan variasi cetakan pasir dan mullite menggunakan pendekatan beda hingga selama 2 jam dapat dilihat pada gambar 4.7. Program ditulis menggunakan perangkat software Microsoft Power Station 4.0. dengan bahasa fortran sebagai bahasa pemrogramannya yang kemudian hasilnya divisualisasikan menggunakan software Matlab 7.8.

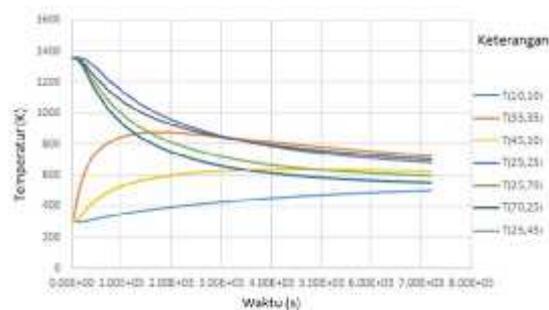


Gambar 5.1. (a) Hasil simulasi dengan cetakan pasir (b) Hasil simulasi dengan cetakan mullite

Pada gambar 4.2 menunjukkan distribusi temperatur pada proses pendinginan tembaga murni yang disimulasikan selama 2 jam. Pada gambar tersebut terlihat panas dari tembaga murni merambat melalui cetakan pasir dan mullite. Panas dari tembaga murni berangsur-angsur turun sedangkan pada cetakan mengalami kenaikan temperatur. Penurunan maupun kenaikan temperatur dari tembaga murni bervariasi di setiap grid. Penurunan temperatur tembaga murni dimulai dari bagian yang bersentuhan dengan cetakan sedangkan kenaikan temperatur pada cetakan dimulai dari daerah yang bersentuhan dengan tembaga murni.



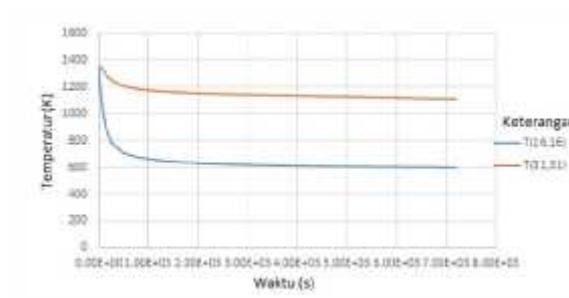
(a)



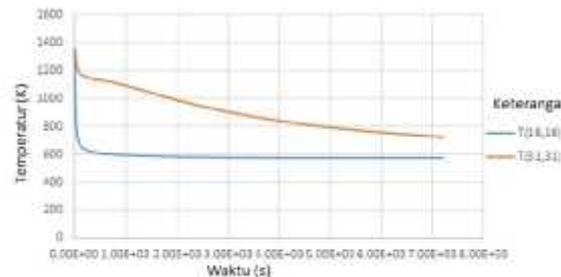
(b)

Gambar 5.2. (a) Distribusi temperatur di beberapa titik menggunakan cetakan pasir, (b) Distribusi temperatur di beberapa titik menggunakan cetakan mullite

Pada gambar 5.2. tersebut juga terlihat bahwa pendinginan tembaga murni yang melewati cetakan pasir lebih lama pendinginannya dibandingkan dengan menggunakan cetakan mullite, dimana setelah disimulasikan selama 2 jam temperatur maksimal dengan menggunakan cetakan pasir masih dikisaran 1100 K sedangkan dengan menggunakan cetakan mullite temperatur maksimal berada pada kisaran 700 K. Hal tersebut disebabkan oleh perbedaan properti dari cetakan pasir dan mullite.



(a)



(b)

Gambar 5.3. (a) Kurva pendinginan pada pojokan tembaga murni dengan cetakan pasir (b) Kurva pendinginan pada pojokan tembaga murni dengan cetakan mullite.

Gambar 5.3 Merupakan kurva pendinginan yang terjadi pada pojokan tembaga murni. Pojokan yang menjorok keluar T(16,16) akan lebih cepat dingin dibandingkan dengan pojokan yang menjorok kedalam T(31,31). Pojokan yang menjorok keluar memiliki luasan cetakan yang lebih luas sehingga dapat menyerap panas dari tembaga murni lebih cepat dibandingkan dengan pojokan yang menjorok keluar. Pada grafik pendinginan yang disimulasikan selama 2 jam selisih antara temperatur pada sudut luar dan sudut dalam setelah 1000 detik dengan menggunakan cetakan pasir besarnya hampir sama sedangkan pada grafik dengan menggunakan cetakan mullite terlihat bahwa terjadi penurunan yang signifikan pada sudut dalam tembaga murni. Hal ini disebabkan karena cetakan mullite mempunyai nilai konduktivitas termal yang lebih besar dibandingkan dengan cetakan pasir sehingga lebih cepat untuk membuang panas.

5. KESIMPULAN

Dari penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan yaitu :

1. Metode beda hingga mampu mempresentasikan perpindahan panas pada proses pendinginan tembaga murni.
2. Cetakan yang digunakan dalam proses pendinginan sangat mempengaruhi kecepatan proses pendinginan, dimana tembaga murni yang didinginkan menggunakan cetakan pasir akan lebih lama dingin dibandingkan dengan tembaga murni yang didinginkan menggunakan cetakan mullite. Hal ini ditunjukkan dengan temperatur maksimal setelah disimulasikan selama 2 jam dengan cetakan pasir temperatur maksimal berada pada kisaran 1100 K sedangkan pada cetakan pasir temperatur maksimal berada pada kisaran 700 K.
3. Setelah disimulasikan selama 2 jam penurunan temperatur pada sudut luar tembaga murni baik yang menggunakan cetakan pasir maupun cetakan mullite besarnya hampir sama yaitu dikisaran 600 K. Sedangkan pada sudut dalam tembaga murni menunjukkan perbedaan yang besar yaitu pada cetakan pasir temperatur sudut dalam tembaga murni di kisaran 1100 K dan pada cetakan mullite sudah mencapai temperatur 800 K.
4. Distribusi temperatur pada proses pendinginan bervariasi di setiap gridnya.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Anjo, V., 2012, Numerical Simulation of Steady State Conduction Heat Transfer during the Solidification of Aluminium Casting in Green Sand Molds, Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, p. 15-24
- Belkhat, A.P., 2010, Numerical Modelling of Solidification Process Using Interval Finite Difference Method, Scientific Research of the Institute and Computer Science, p. 155-163
- Cengel, Y.A., 2003, Heat Transfer: A Practical Approach, 2nd edition, McGraw-Hill, New York
- Chiang, S.T., dan Hoffman, K.A., 2000, Computational Fluid Dynamic, 4th Ed, Engineering Education System, Texas

- DeWitt, D.P., dan Incropera, F.P., 2007, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th Ed, John Willey and Sons, New York.
- Haque, M.M., dan Shaha, S.K., 2010, Simulation of Heat Flow in Computational Method and Its Verification on the Structure and Property of Gray Cast Iron, *American Journal of Applied Science* 7 (6), p. 795-799
- Hassan, E. M. K dan Hassim, A. A., 2010, Simulation of Heat Flow in Aluminum Sand Casting, *Shendi University Journal*, p. 15-48
- Holman, J.P., 1986, *Heat Transfer*, 6th Ed, McGraw-Hill, New York
- Hong, C.P., Umeda, T., dan Kimura, Y., 1984, Numerical Models for Casting Solidification: Part II. Application of the Boundary Element Method to Solidification Problems, p. 101-107
- Komarneni, S dan Schneider, H, 2005, *Mullite*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- Mossi, A.C., dan Pariona, M.M., 2005, Numerical Simulation of Heat Transfer During Solidification of Pure Iron in Sand and Mullite Molds, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical and Engineering*, Vol. XXVII (4), p. 399-406
- Ho, C.Y., Liley.P.E., dan Powell, R.W., 1966, *Thermal Conductivity of Selected Material*, NSRD, Wahington D.C
- Stefanescu, D.M., 2009, *Science and Engineering of Casting Solidification*, 2nd Ed, Springer, New York
- Sun Zhiong dkk., 2011, Numerical simulation of heat transfer in pressurized solidification of Magnesium alloy AM50, Springer, p. 1241-1249