

VALIDASI PERANGKAT LUNAK SIMULASI ALIRAN DAN PEMBEKUAN PADA PROSES PENGECCORAN DENGAN MATERIAL BESI COR FC100

(THE VALIDATION OF PROCESS FLOW SOLIDIFICATION SIMULATION SOFTWARE ON THE MATERIAL Fc100 CAST IRON CASTING)

Husen Taufiq, Mufid Djoko Purwanto
Balai Besar Logam dan Mesin
Jl. Sangkuriang 12 Bandung
htaufiq@gmail.com

Diterima: 26/06/2012, Direvisi: 12/10/2012, Disetujui: 16/11/2012

ABSTRAK

Telah dilakukan proses validasi perangkat lunak simulasi aliran dan pembekuan pada proses pengecoran dengan material besi cor FC 100. Proses validasi perlu dilakukan karena sering terjadinya ketidaksesuaian antara hasil akhir produk coran dengan hasil simulasi perangkat lunak simulasi aliran dan pembekuan. Dengan proses validasi ini bertujuan penggunaan perangkat lunak simulasi aliran dan pembekuan dapat dioptimalkan. Proses validasi meliputi dua tahap: Tahap (1) pembuatan benda uji melalui proses pengecoran. Proses pengecoran dimulai dari perancangan dan pembuatan pola benda uji dengan variasi Modulus (M) yaitu M=1 cm, M=1.4 dan M=2 cm, pembuatan cetakan dengan pasir silika dengan pengikat resin, dan pengecoran dengan material besi cor hipereutektik FC 100 (JIS G5501). Hasil penelitian pada tahap ini meliputi: hasil pengujian mikrostruktur perlit 80% dan ferit 20% grafit lamellar tipe C. dan hasil pengujian uji tarik 141.3 N/mm² sesuai standar JIS G5501 dan hasil uji visual benda uji hasil cor dengan cara dipotong-potong diidentifikasi terjadinya cacat tuang berupa porositas pada benda dengan modulus(M) = 2 cm yang dicor pada suhu tuang 1420 °C dan waktu tuang 8 detik. Pada tahap (2) proses validasi perangkat lunak simulasi melalui tahapan: pemodelan 3D, proses Meshing, setting parameter simulasi yang disesuaikan dengan kondisi nyata pada saat pengecoran pada tahap sebelumnya meliputi : waktu tuang dan suhu tuang. Kemudian dilakukan iterasi simulasi sehingga hasil simulasi mendekati hasil uji visual benda uji. Hasil akhir validasi menunjukkan bahwa parameter propertis termal *critical fraction solid* (CFS)= 0.7 dan parameter koefisien perpindahan panas konveksi (h) = 500 W/m².K. adalah yang paling mendekati hasil visual coran benda uji.

Kata kunci: Validasi, FC 100(JIS G5501), perancangan coran, perangkat lunak simulasi aliran dan pembekuan, parameter simulasi.

ABSTRACT

The validation of process flow and solidification simulation software on the material FC 100 cast iron casting has been done. The validation process needs to be conducted because of the frequent occurrence of a discrepancy between the results of the final casting products with the flow and solidification simulation software simulation. With this validation process aimed at the use of software simulation flow and solidification can be optimized. The validation process includes two stages: Stage (1) the manufacture of test specimens through the casting process. Casting process starting from the design and manufacture of the test object pattern with variations Modulus (M) is M = 1 cm, M = 1.4 and M = 2 cm, silica sand molds with a binder resin, and casting with cast iron material hypereutectic FC 100 (JIS G5501). The results at this stage include: test results microstructure pearlite 80% and ferrite 20%, lamellar graphite type C. and results of 141.3 N/mm² tensile testing standards JIS G5501 and visual test results cast specimen results dismembered by the defect identified in the form of porosity in castings of objects with modulus (M) = 2 cm were cast at temperatures 1420 °C and castings at 8 second pouring time. In step (2) the validation process simulation software through phases: 3D modeling, process Meshing, setting simulation parameters are adjusted to the actual conditions at the time of casting in the previous stage include: pouring time and pouring temperature. Then the simulation iteration conducted so that the simulation results closer test specimen visual test results. The final results showed that the parameter validation critical thermal properties of solid fraction (CFS) = 0.7 and the convection heat transfer coefficient (h) = 500 W/m².K. is the closest visual outcomes specimen.

Keywords: validation, FC 100 (JIS G5501), castings design, flow and solidification simulation software, simulation parameters.

PENDAHULUAN

Produk cor yang dibuat pada umumnya harus memenuhi aspek

ekonomis ekonomis dan aspek teknis seperti: spesifikasi geometri, bebas porositas, mekanikal propertis, komposisi kimia atau yang dipersyaratkan melalui

standar dan atau permintaan konsumen. Untuk memenuhi spesifikasi tersebut pada proses pengecoran produk baru atau untuk optimalisasi kita sering melakukan percobaan produksi. Pada pengecoran produk dengan berat produk yang relatif besar atau produk dengan cetakan permanen membutuhkan biaya pembuatan cetakan dan percobaan yang relatif besar. Sehingga resiko kegagalan akibat cacat coran harus diminimalisir pada saat percobaan. Cacat coran yang umumnya terjadi seperti: porositas, *cold shut*, *swollen*, *misrun* dan sebagainya. Cacat-cacat tersebut dapat mengurangi fungsi kerja produk atau produk dinyatakan gagal. Oleh karena itu perlu dilakukan percobaan pengecoran menggunakan perangkat lunak simulasi aliran dan pembekuan. Perangkat lunak (P/L) ini dapat mensimulasi proses pengecoran dari suatu rancangan coran produk tanpa melakukan proses pengecoran yang sesungguhnya. Dengan demikian kita dapat melakukan simulasi pengecoran suatu produk sehingga hasil akhirnya sesuai dengan yang diharapkan. pada penerapannya sering terjadi ketidaksesuaian antara hasil simulasi dan fakta dilapangan. Untuk memperoleh hasil yang optimal perlu dilakukan proses validasi perangkat lunak simulasi. Terutama pada jenis material baru yang tidak terdapat pada basis data perangkat lunak. dalam hal ini adalah material besi cor FC 100 dimana dalam standar JIS G5501 hanya mempersyaratkan sifat mekanis, tidak mempersyaratkan komposisi kimia. Umumnya komposisi kimia dipersyaratkan pada standar material lainnya.

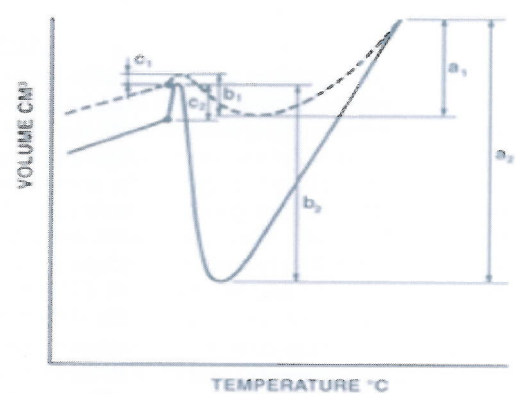
Tinjauan Pustaka Proses Pengecoran

Secara umum proses pengecoran terdiri dari beberapa tahapan proses diantaranya: perancangan coran, pembuatan pola, pembuatan cetakan, peleburan, pengecoran, pengerjaan lanjut (*fettling*). dewasa ini untuk membantu proses perancangan dibantu dengan perangkat

lunak simulasi aliran dan pembekuan. Dalam pemakaiannya selain harus menguasai cara pemakaiannya, juga harus memahami prinsip dasar perancangan tuangan dan metalurgi material yang kan dicor.

Metalurgi Material dan Perancangan Coran

Metalurgi material dapat menentukan sifat mekanik dari suatu material. faktor-faktor yang mempengaruhinya yaitu: komposisi kimia, perlakuan cairan, kecepatan pendinginan, dan perlakuan panas^{[2],[6]}. Dua faktor diawal juga akan mempengaruhi propertis cairan logam Seperti: massa jenis, viskositas, suhu *liquidus*, suhu *solidus* dan prosentase penyusutan. Sehingga material dengan perbedaan faktor-faktor tersebut akan memiliki karakteristik pengecoran yang berbeda pula^[4]. Maka perancangan coran untuk setiap jenis produk terutama jenis material yang berbeda, biasanya memiliki karakteristik perancangan berbeda pula. Dalam hal ini material besi cor kelabu dimana pada proses pembekuan terjadi pengintian dan pertumbuhan grafit bebas^[3], yang mengakibatkan terjadinya ekspansi grafit karena perbedaan massa jenis.



Gambar 1. Perubahan volume material besi cor pada proses pembekuan

Pada proses pembekuan material besi cor sesaat setelah penuangan didalam cetakan. Material besi cor (dengan jenis a atau b, tergantung jenis dan komposisi) selain mengalami penyusutan (a_1 atau a_2) akan terjadi pengembangan (b_1 atau b_2). Pengembangan akibat pengintian dan

pertumbuhan grafit. Dimana grafit memiliki massa jenis yang lebih kecil dari pada besi. Sehingga kejadian ini memberikan efek ekspansi grafit. Selain dari pada jumlah atau besar grafit dihasilkan, juga bentuknya menentukan prosentase pengembangan yang terjadi. Dimana akibat ekspansi ini akan memberikan tekanan sekitar 2 Mpa^[5], Apabila jenis cetakan yang dipakai dapat menahan tekanan yang terjadi, efek ekspansi tersebut dapat menggantikan penyusutan yang terjadi. Sehingga memungkinkan tidak memerlukan kembali sistem penambah^[5]. Besarnya ekspansi diatas selain berdasarkan komposisi juga dipengaruhi oleh modulus coran produk. Dimana modulus dengan modul diatas 2 cm yang dapat memberikan ekspansi yang dapat menggantikan penyusutan yang terjadi (Stephen I. Karsay).

Konsep modulus

a. Modulus Geometri

Menurut Chvorinov:

$$t_c = k \cdot \frac{V_c^2}{A_c^2} ; \quad \frac{V_c^2}{A_c^2} = M ; \quad \frac{V_c}{A_c} = M$$

$$t_c = k \cdot M^2 \quad (1)$$

(secara praktis faktor Mc lebih signifikan dari pada faktor k)

t_c = waktu pembekuan penampang coran.

V_c = Volume coran

A_c = Luas area pelepas panas, bagaikan coran yang bersentuhan langsung dengan dinding cetakan..

K = konstanta yang dipengaruhi oleh jenis cetakan dan jenis material coran.

b. Modulus Termal

$$\frac{V}{A} \approx M = \frac{2}{\pi} \left(\frac{T_{al,sol} - T_{mold,ini}}{\rho_{al,sol} \Delta H_{al}} \right) (k_{mold,ini} \rho_{mold,ini} C_{p,mold,ini})^{\frac{1}{2}} (t_{sol})^{\frac{1}{2}} \quad .. (2)$$

Dimana :

V : Volume Coran

A : Luas area pelepas panas

M : Modulus coran

$T_{al,sol}$: Suhu solidus paduan

$T_{mold,ini}$: Suhu inisial cetakan

$\rho_{al,sol}$: masa jenis paduan pada suhu solidus.

ΔH_{al} : variasi entalpi paduan dari suhu inisial hingga suhu solidus.

$K_{mold,ini}$: Konduktivitas termal cetakan pada suhu inisial.

$\rho_{mold,ini}$: Masa jenis cetakan pada suhu inisial.

C_p mold ini : panas spesifik cetakan pada suhu inisial

t_{sol} : Waktu pembekuan.

Dalam perhitungan modulus diatas modulus termal lebih mendakati kondisi nyata. Karena metode perhitungan lebih kompleks umumnya hasilnya diperoleh menggunakan perangkat lunak simulasi aliran dan pembekuan.

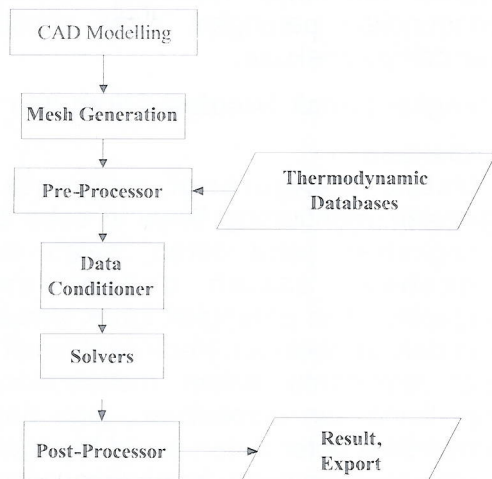
Perangkat Lunak Simulasi Aliran dan Pembekuan

Untuk mengurangi prosentase kegagalan, mengurangi biaya uji coba dan meningkatkan *yield* coran, salah satu langkahnya adalah dengan cara mengaplikasikan perangkat lunak simulasi aliran dan pembekuan. Perangkat lunak ini dapat membantu dalam memvisualisasi aliran fluida dan pembekuan, juga dapat memprediksi potensi dan posisi kegagalan yg kritis (penyusutan, sambungan dingin dsb), bahkan untuk beberapa jenis perangkat lunak tertentu dapat memprediksi sifat mekanik dan mikrostruktur dari produk akhir coran. sehingga dalam penggunaannya perangkat lunak ini dapat mengurangi resiko percobaan yang terlalu banyak, dan mendapatkan *yield* coran yang optimal. Walaupun investasi awal untuk perangkat lunak tersebut relatif tinggi, namun akan tergantikan manfaat yang akan didapatkan seperti disebutkan diatas dalam jangka panjang. Ada beberapa nama perangkat lunak yang biasa digunakan, diantaranya *Magmasoft*, *Solidcast*, *Procast*, *Adstefan*, dan sebagainya. Dimana diantara perangkat lunak tersebut memiliki fitur dan pengoperasian yang berbeda, akan tetapi pada umumnya memiliki prinsip dasar yang sama. Gambar 2. menunjukkan alur kerja perangkat lunak simulasi aliran dan pembekuan.

Langkah awal adalah pemodelan produk coran, umumnya menggunakan model tiga dimensi (3D) menggunakan perangkat lunak modeling (*Computer Aided Drawing*, *CAD*) seperti *Pro-Engineering*, *SolidWorks*, *AutoCAD*, *Catia* dan sebagainya.

Ada juga beberapa perangkat lunak simulasi pembekuan yang dapat melakukan pemodelan, walaupun dengan fitur-fitur yang relatif sederhana.

Simulasi pembekuan ini menggunakan prinsip metode elemen hingga (*Finite Elemen Methods, FEM*), sehingga file dari pemodelan 3D diatas dilakukan *meshing* (*mesh generation*),



Gambar 2. Diagram Alir Simulas Perangkat Lunak

meshing adalah metode menginter-pretasikan suatu geometri menjadi elemen-elemen hingga sehingga dapat dilakukan komputasi berdasarkan elemen-elemen tersebut.

Setelah data geometri tersebut dapat diterjemahkan dan dibaca pada lingkungan kerja perangkat lunak simulasi aliran dan pembekuan oleh *Pre-processor*. kemudian kita harus memasukan atau mengatur data termodinamik dalam perangkat lunak sesuai dengan material-material yang akan digunakan dan kondisi kerja pada saat penuangan. Untuk material cetakan data minimal yang harus ada adalah konduktifitas termal, panas spesifik dan berat jenis semua data tersebut bisa berupa konstanta atau nilai yang bervariasi terhadap suhu. Sedangkan data material coran adalah fraksi solid, panas laten, suhu liquidus dan solidus. Fraksi solid harus bergantung pada suhu, dimana harus bernilai 0.0 pada suhu tinggi dan bernilai 1.0 pada suhu rendah, sedangkan

panas laten, suhu liquidus dan solidus bernilai konstanta, tetapai nilai suhu liquidus dan solidus harus konsisten dengan nilai suhu tertinggi dan terendah dari fraksi solid. Pada simulasi, perubahan fasa pada saat pembekuan dibutuhkan data panas spesifik dan panas laten atau data entalpi, kemudian data viskositas yang bergantung pada gradien suhu atau bernilai konstanta diperlukan untuk pemodelan aliran fluida logam. Data-data diatas bisa diperoleh dari basis data perangkat lunak sendiri.dapat memberikan informasi riwayat termal pada saat proses penuangan dan pembekuan material didalam cetakan. sehingga dapat memprediksi hasil akhir proses pengecoran seperti prediksi porositas. Berdasarkan masukan data geometri (elemen hingga), propertis termal material, kondisi awal dan kondisi batas pengecoran. Geometri meliputi: produk, sistem penambah dan sistem saluran. Geometri-geometri tersebut merupakan hasil dari perhitungan dan atau penetapan suatu rancangan coran.

METODE PENELITIAN

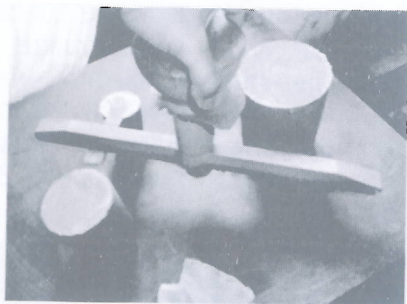
Metodologi yang dilakukan menggunakan teknik analisis melalui simulasi komputer dan eksperimen lapangan. Penelitian dilakukan dengan melakukan validasi parameter simulasi perangkat lunak simulasi pembekuan, caranya dengan melakukan eksperimen pembuatan coran benda uji dilaboratorium Pengecoran Balai Besar Logam dan Mesin pada tahun 2012. dengan beberapa variasi modulus M ($M=2$ cm, $M=1.4$ cm dan $M=1$ cm) sebagai data geometri benda, kemudian direncanakan suhu pengecoran dengan suhu standar pengecoran sekitar 100°C diatas suhu cair dan juga rencanakan suhu cor yang lebih tinggi agar didapatkan cacat tuang porositas akibat penyusutan untuk memudahkan kalibrasi pada saat validasi. kemudian data-data dari proses yang dilakukan seperti: komposisi kimia cairan logam, waktu tuang dan suhu tuang akan direkam, selanjutnya data-data tersebut dijadikan variabel masukan pada simulasi pengecoran menggunakan perangkat lunak simulasi pembekuan. Proses iterasi simulasi

pembekuan akan terus dilakukan dengan mengatur parameter masukan propertis termal material (*critical fraction solid, CFS*) dan koefisien perpindahan panas konveksi (h) sehingga visual akhir produk benda uji hasil simulasi sesuai atau mendekati produk benda uji hasil eksperimen. sehingga parameter propertis termal tersebut akan dijadikan parameter untuk simulasi pembekuan pada setiap produk dengan jenis material tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

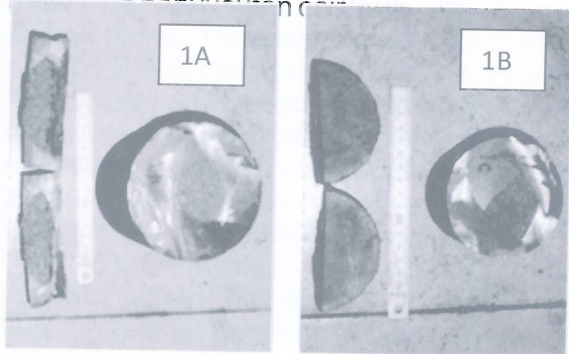
Produk Benda Uji dan Validasi P/L

Produk coran benda uji dengan sistem saluran lengkap terlihat pada Gambar 3. uji visual dengan menggunakan alat bantu penggaris, setelah benda dipotong-potong sesuai dengan gambar-gambar berikutnya.

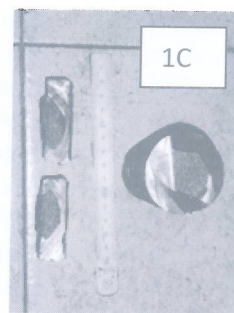


Gambar 3. Produk coran produk benda uji.

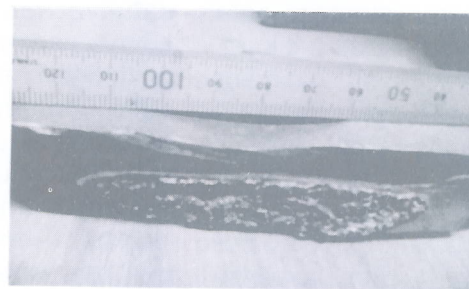
Gambar 4,5,6 adalah penampang potong benda kerja dari cetakan pertama (C1) dengan susunan benda A, B dan C yang dicor pada suhu 1420°C , waktu tuang 8 detik menunjukkan cacat coran berupa penyusutan cair pada penampang potong permukaan atas pada benda A dan B. gambar 7. adalah perbesaran pada penampang atas benda A yang menunjukkan



Gambar 4. $M = 2 \text{ cm}$ Gambar 5. $M = 1.4 \text{ cm}$



Gambar 6. $M = 1 \text{ cm}$.



Gambar 7. Penampang potong bagian atas



Gambar 8. Hasil simulasi P/L, $h = 500 \text{ W/m}^2.\text{K}$ (C1)



Gambar 9. Hasil simulasi P/L, $h = 500 \text{ W/m}^2.\text{K}$ (C2)

Dari hasil iterasi perangkat lunak simulasi aliran dan pembekuan, dengan variabel inputan adalah koefisien perpindahan panas konveksi (h) yaitu: $h = 500 \text{ W/m}^2.\text{K}$. data propertis termal material FC 100 dihasilkan perangkat lunak

berdasarkan data komposisi material aktual yang dimasukkan. Variasi parameter koefisien perpindahan panas konveksi tersebut diaplikasikan pada setiap cetakan dengan perbedaan kondisi batas parameter suhu tuang (T_p) sesuai kondisi eksperimen yaitu temperatur tuang cetakan pertama $T_{p1}=1420^{\circ}\text{C}$, dan temperatur tuang cetakan kedua $T_{p2}=1280^{\circ}\text{C}$. Waktu tuang cetakan pertama $t_1=8$ detik, dan waktu tuang cetakan kedua $t_2=9$, dimana luarannya hasil simulasi pengecoran berupa *thermal history*, dimana salah satunya adalah indikator kemungkinan terjadinya porositas. Selanjutnya dibandingkan dengan hasil pengecoran benda uji dari beberapa cetakan yaitu cetakan pertama C1, dan cetakan kedua C2 dimana hasil simulasi yang paling mendekati dengan parameter koefisien perpindahan panas $h=500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, dan propertis termal dari material FC 100 (CFS = 0.7), hasil simulasi terlihat pada gambar 8 dan gambar 9 diatas. Parameter koefisien perpindahan panas $h=500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, dan propertis termal dari material FC 100 (CFS = 0.7). digunakan pada simulasi perancangan coran dengan material FC 100

Komposisi kimia

Tabel 1. Komposisi Kimia

C %	Si %	Mn %	P %	S %
3.82	2.53	0.898	0.035	0.01

Tabel 1. Adalah komposisi kimia berdasarkan hasil pengujian spektrometri.

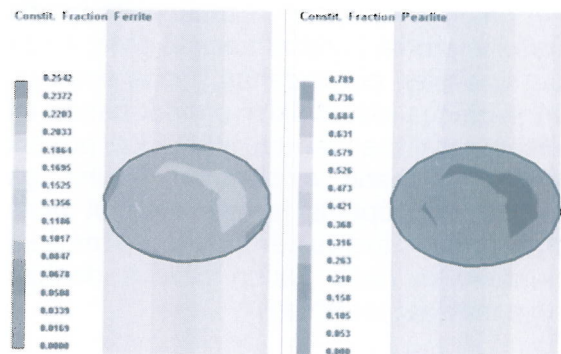
Uji Tarik

Tabel 2. adalah tabel pengujian uji tarik, yang diambil dari sampel yang terpisah dengan produk coran, namun dari *batch* cairan yang sama.

Tabel 2. Hasi Uji tarik

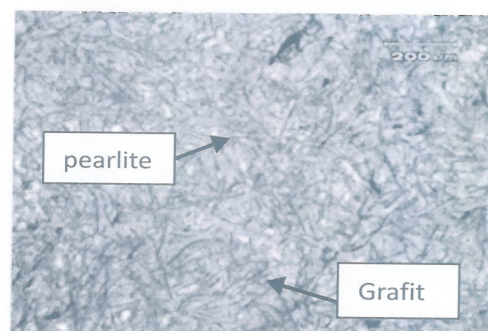
No	Data	Nilai			Satuan
		1	2	3	
1	Suhu Uji	25	25	25	$^{\circ}\text{C}$
2	Luas Penampang	307.9	307.9	314.2	mm^2
3	Beban Maksimum	4582.3	4169.3	4663	Kgf
4	Kuat Tarik	14.88	13.54	14.84	Kgf/mm^2

Mikrostruktur



Gambar 9. a Fraksi Ferit Gambar 9. b. Fraksi Perlit

Gambar 9a. adalah gambar mikrostruktur hasil simulasi berupa prosentase ferit sekitar 20% (fraksi 0.2) dan gambar 9b. adalah gambar mikrostruktur hasil simulasi berupa prosentase perlit sekitar 80 % (fraksi 0.8). sedangkan Gambar 10. berikut adalah gambar photo mikrostruktur yang diambil dari penampang uji tarik, yang di etsa dengan Nital 3%, Perbesaran mikroskop 100x. menunjukkan grafit type C lamelar kasar dengan matrik perlit 80 %. Ferite 20%.



Gambar 10. Mikrostruktur FC 100 perbesaran 100X.

Matrik pearlit 98% seperti yang ditunjukkan diatas biasanya jarang terjadi pada paduan besi cor hipereutektik dengan kandungan karbon dan silikon relatif tinggi $\text{CE}>4.3$. hal ini terjadi karena kandungan Mangan 0.89% tabel 1. yang merupakan perlit promotor. sedangkan untuk memaksimalkan terbentuknya ferit, setelah memperhitungkan pembentukan MnS berdasarkan ketersediaan Sulfur didalam cairan, kelebihan Mangan tidak lebih dari 0,1%^[3].

Uji Kekerasan

Uji kekerasan dilakukan pada penampang patahan benda uji tarik, setelah dihaluskan permukaannya dengan proses bubut sesuai dengan keperluan, dengan hasil pengujian pada tabel 3., menggunakan metode brinel.

Tabel 3. Hasil Uji kekerasan

No	Nilai	Satuan
1	155.6	HB
2	155.6	HB
3	148.9	HB

Keterangan: Diameter indenter 10mm, waktu 15 detik, Gaya Pembebanan 1000 kgf.

Menurut data pengujian sifat mekanis yaitu hasil uji tarik (tabel 2) kekuatan tarik rata-rata adalah 14.42 kgf/mm^2 (141.3 N/mm^2) dan hasil uji kekerasan (tabel 3) dengan kekerasan rata-rata 153.4 HB. Nilai-nilai tersebut memenuhi standar *JIS (Japan Industrial Standard) G5501* untuk material besi cor (FC 100). yaitu rentang nilai kekuatan tarik (*Tensile Strength*) 100-149 N/mm^2 , dan kekerasan maksimal 201 HB^[1]. Sampel uji tarik diameter 30 mm dicor terpisah namun *batch* cairan yang sama dengan produk.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Proses validasi perangkat lunak simulasi telah dilakukan. Hasil kalibrasi yang paling mendekati kondisi beda uji realnya adalah dengan parameter termal material simulasi terdiri dari: CFS= 0.7, dan koefisien perpindahan panas konveksi $h=500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. dan mikrostruktur material di sampel uji tarik dan hasil simulasi sampel uji, hasilnya relatif sama yaitu matrik perlit 80% dan Ferrite 20%. Material FC 100 yang dibuat memenuhi standar material *JIS G5501* yaitu Menurut data pengujian sifat mekanis yaitu hasil uji tarik (tabel 2) kekuatan tarik rata-rata adalah 14.42 kgf/mm^2 (141.3 N/mm^2) dan hasil uji

kekerasan (tabel 3) dengan kekerasan rata-rata 153.4 HB. Nilai-nilai tersebut memenuhi standar *JIS (Japan Industrial Standard) G5501* untuk material besi cor (FC 100). yaitu rentang nilai kekuatan tarik (*Tensile Strength*) 100-149 N/mm^2 , dan kekerasan maksimal 201 HB^[1]

Saran

Parameter simulasi CFS= 0.7, dan koefisien perpindahan panas konveksi $h=500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. hasil validasi untuk material FC 100 diatas dapat dijadikan parameter masukan perangkat lunak simulasi dalam melakukan perancangan tuangan produk-produk dengan jenis material tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Japan Industrial Standard,"*JIS G5501 Grey Cast Iron*", 2003.
- R. Elliot,"*Cast Iron Technology*", Butterworths, 1988.
- Davis & Associates., "*ASM Specialty Handbook Cast Iron*", ASM International, 1999.
- Gupta, RB." *Foundry Engineering*", Satya Prakshan, New Delhi, 1999.
- Rio Tinto Iron & Titanium,"*Gating and Riser*". 2000.
- Stefanescu, D.M., "*ASM Handbook, Formerly Ninth Edition, Metals Handbook Vol.15*", ASM International, 1998.