



Perancangan Coran Baja Cor SKD6 Menggunakan Simulasi Perangkat Lunak Pada Produk *Side Core* SD25R

Roni Kusnowo¹, Ery Hidayat²

^{1,2} Politeknik Manufaktur Bandung, Bandung

Email : roni@polman-bandung.ac.id

Abstract

This study aims to produce a casting design for SD25R sidecore products with SKD6 material to be able to produce sound casting products or castings products that are free from defects with a scale of 1: 1. The sidecore SD25R is a casting product made for molded components for car wheels. This component is an imported product and in Indonesia no one has succeeded in supplying the needs of this component. The methodology used is simulation method, which is a method used to predict the defects of a cast material by using the SOLIDcast 8.2.5. Starting with the calculation of the channel system and the addition and design simulation using software as a tool in modeling the process metal casting before the actual metal casting process is carried out to reduce the risk of failure. In addition, this simulation can predict freezing temperature, cooling speed, the hottest area, and the porosity that occurs will be seen from this simulation, so it will reduce the trial and error process in the field. Based on the calculation of the gating system, the dimensions of the runner are 11x22x33 mm, the gates is 12x48 mm, the diameters of downsprue is 33 mm, and uses 2 top risers with a diameter of 150 mm, with a casting yield of 59.5%. The simulation results with this software showed that the gating system design from the above calculations and the use of the top riser is more effective to produce a better product or sound casting product.

Keywords: *castings design; side core; SKD6; simulatation method*

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan rancangan coran produk *sidecore* SD25R dengan material SKD6 untuk dapat menghasilkan produk *sound casting* atau produk coran yang bebas dari cacat dengan skala 1:1. *Sidecore* SD25R merupakan produk cor yang dibuat untuk komponen cetakan velg mobil. Komponen ini merupakan produk impor dan di Indonesia belum ada yang berhasil memasok kebutuhan komponen tersebut. Metodologi yang dilakukan adalah metode simulasi, yaitu suatu metode yang digunakan untuk memprediksi cacat suatu material cor dengan cara simulasi menggunakan perangkat lunak SOLIDcast 8.2.5. Diawali dengan perhitungan sistem saluran dan penambah serta simulasi perancangan menggunakan perangkat lunak sebagai alat bantu dalam memodelkan proses pengecoran logam sebelum proses pengecoran logam yang sebenarnya dilakukan sehingga dapat mengurangi resiko kegagalan. Selain itu simulasi ini dapat memprediksi temperatur pembekuan, kecepatan pendinginan, daerah terpanas, dan porositas yang terjadi akan terlihat dari simulasi ini, sehingga akan mengurangi proses *trial and error* di lapangan. Berdasarkan perhitungan sistem saluran dihasilkan dimensi saluran terak 11x22x33 mm, saluran masuk 12x48 mm, saluran turun diameter 33 mm, dan menggunakan 2 penambah atas dengan diameter 150 mm, dengan *casting yield* sebesar 59.5%. Hasil simulasi dengan perangkat lunak ini menunjukkan perancangan sistem saluran dari hasil perhitungan di atas dan penggunaan penambah pada posisi atas (*top riser*) lebih efektif untuk menghasilkan produk yang lebih baik atau produk *sound casting*.

Kata kunci: perancangan coran; *side core*; SKD6; metode simulasi

1. PENDAHULUAN

Komponen *sidecore* SD25R adalah komponen produk cor yang berada di mesin *die casting* yang dibuat untuk komponen cetakan *velg* mobil. Cetakan *velg* ini tidak bisa dibuat dengan proses permesinan, dikarenakan bentuknya sangat kompleks. Salah satu spesifikasi material *sidecore* SD25R adalah tahan terhadap temperatur kerja 700⁰ C, dimana temperatur ini adalah temperatur aluminium yang dituangkan kedalam cetakan. Cetakan untuk membuat *velg* terbagi menjadi 3 bagian, yaitu bagian atas yang membuat bagian permukaan dalam *velg*, bagian tengah yang membuat bagian tepi *velg*, dan bagian bawah yang membuat bagian permukaan luar *velg* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Cetakan *Velg sidecore SD25R*

Material *Side Core SD25R* harus memiliki sifat ketahanan terhadap keausan, dan harus tangguh, mengingat benda ini akan dipakai untuk cetakan logam. Untuk itu, material yang akan dipilih sesuai persyaratan yang harus dimiliki oleh *Side Core* adalah baja perkakas. Baja perkakas yang dipilih adalah baja perkakas jenis *Hot Work Tool Steel JIS SKD6* [1,2]. Pemilihan material SKD6 ini dikarenakan material ini memiliki spesifikasi yang dibutuhkan untuk kebutuhan produk yang dibuat berdasarkan komposisi material standar. Saat ini material *hot work tool steel* ini yang tersedia dipasar berbentuk balok dan impor dari negara Jerman atau Jepang, dan jika dilakukan proses permesinan akan dibutuhkan pesanan material yang lama, serta biaya yang sangat mahal, karena pengiriman dari luar negeri dan waktu pembuatannya menggunakan mesin sangat lama dan banyak material terbuang. Oleh karena itu proses pengecoran menjadi solusi untuk kebutuhan material dalam negeri, sehingga dapat mengurangi biaya produksi yang diperlukan. Simulasi dengan perangkat lunak perlu dilakukan dikarenakan dimensi benda yang cukup besar dan jika dilakukan *proses trial and error* secara langsung akan dibutuhkan biaya yang cukup besar serta waktu yang lebih lama.

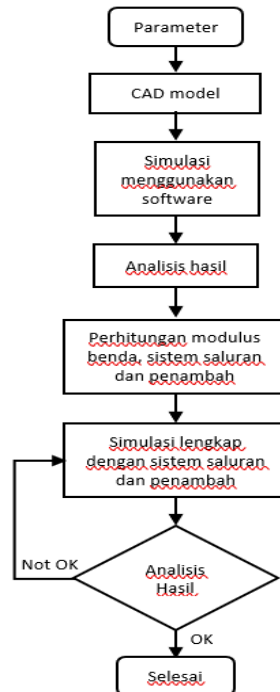
Penelitian penggunaan perangkat lunak untuk membuat simulasi perancangan coran sudah pernah dilakukan dengan berbagai macam variasi material coran yang dipergunakan serta perangkat lunak yang berbeda-beda. Penelitian simulasi coran dengan penggunaan alat bantu perangkat lunak ini mampu memprediksi dan mengurangi kemungkinan terjadinya cacat coran [3], penelitian lain yang diterapkan untuk produk yang berbeda yaitu proses pengecoran simulasi dilakukan sebelum pembuatan bola gerinda dengan menggunakan SOLID Cast™ versi 8.2.0. Desain sistem saluran dan temperatur penguangan logam panas diselidiki dengan jelas untuk mendapatkan bola gerinda yang tidak cacat [4]. Penelitian untuk mendeteksi porositas suatu benda coran juga dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak [5]. Namun demikian pemilihan perangkat lunak simulasi casting sangat penting dan memerlukan pengetahuan tentang perangkat lunak yang tersedia secara komersial [6]. Metode cetakan dalam simulasi cukup beragam seperti pada penelitian dengan menggunakan perangkat lunak *magmasoft* untuk mendeteksi cacat produk akhir [7] dan mensimulasikan proses pengecoran [8].

Pada penelitian ini dilakukan perancangan coran baja cor SKD6 menggunakan perangkat lunak yang disesuaikan dengan tuntutan hasil yang diharapkan, sehingga perangkat lunak yang dipergunakan untuk membantu penelitian ini yaitu SOLIDcast versi 8.2.5 untuk simulasi perancangan coran dan *solidwork* untuk perhitungan volume benda cor pada produk *sidecore* SD25R dengan tujuan untuk mendapatkan hasil akhir produk yang bebas cacat coran.

2. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode simulasi, yaitu suatu metode yang digunakan untuk memprediksi cacat suatu material cor dengan cara simulasi menggunakan metode perangkat lunak SOLIDcast 8.2.5.

Adapun Langkah-langkah penelitian dilakukan secara bertahap sebagai berikut:



Gambar 2. Langkah Dalam Penelitian

Langkah pertama yang dilakukan dalam penelitian ini dimulai dengan pengumpulan parameter yang akan digunakan pada proses pengecoran logam. Setiap parameter mempunyai sub parameter yang sangat penting diatur. Keakuratan hasil simulasi dipengaruhi oleh detail dari setiap parameter yang di informasikan ke perangkat lunak. Salah satu parameter penting yang diperlukan adalah parameter material yang digunakan. Dalam buku *JIS handbook* [9], komposisi material SKD6 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi material SKD6 [9]

C (%)	0.32~0.42	Si (%)	0.80~1.20	Mn (%)	0.50 max
P (%)	≤0.030	S (%)	≤0.020	Cr (%)	4.5~5.50
Mo (%)	1.00~1.5	V (%)	0.30~0.50		

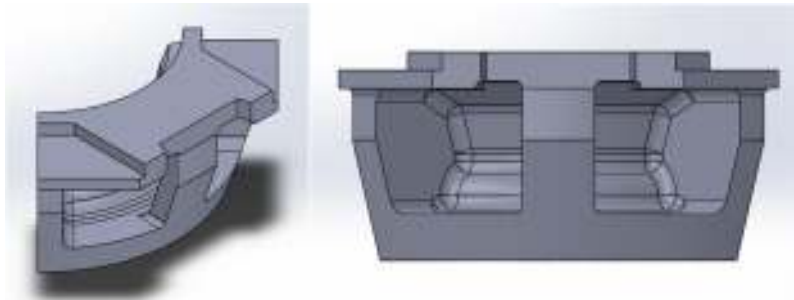
Parameter yang lain yang diperlukan diantaranya adalah temperatur cor. Penentuan temperatur cor menggunakan grafik Fe3C pada kadar carbon 0.32. Pada pembacaan grafik Fe3C tersebut T solidus berada pada temperatur 1500°C [10]. Perhitungan temperatur cor merupakan temperatur T solidus + 100°C sehingga dihasilkan temperatur untuk proses pengecoran sebesar 1600°C. Untuk parameter cetakan menggunakan pasir kering berpengikat resin karena ketahanan pasir kering berpengikat resin sangat tepat untuk proses pengecoran pada jenis material baja. Proses selanjutnya diperlukan gambar 3D dari produk *sidecore* SD25R, untuk pemodelan bentuk benda secara virtual menggunakan CAD model.

Tahapan simulasi coran yang pertama dilakukan menggunakan software simulasi dengan material *JIS SKD6* yang bertujuan untuk mencari posisi dari rongga susut. Dari hasil simulasi pertama akan dihasilkan posisi rongga susut dari benda. Langkah berikutnya adalah perhitungan modulus benda, sistem saluran dan penambah (*riser*). Dari hasil perhitungan dilakukan proses gambar 3D *sidecore* SD25R yang sudah ditambahkan dengan sistem saluran dan penambah (*riser*).

Proses simulasi kedua dilakukan berdasarkan perancangan benda *sidecore* SD25R lengkap dengan sistem saluran dan penambah. Tahap terakhir adalah analisis hasil simulasi yang dilakukan berdasarkan hasil simulasi perancangan coran dengan sistem saluran dan penambah, jika hasil simulasi bebas dari cacat rongga susut atau *sound casting*, maka tahapan-tahapan penelitian ini dinyatakan selesai.

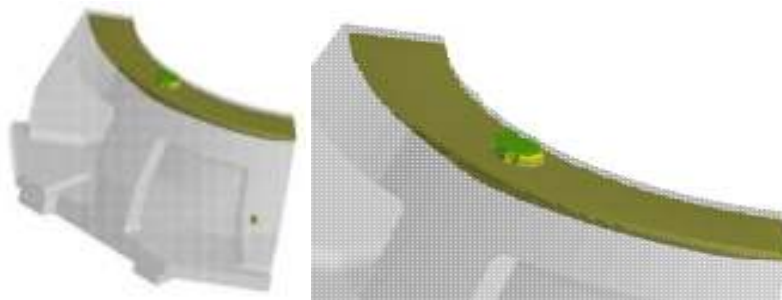
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan parameter yang sudah didapat selanjutnya data dimasukkan ke dalam perangkat lunak simulasi dalam hal ini menggunakan SOLIDcast 8.2.5. Secara rinci tampilan 3D *sidecore* tanpa sistem saluran dan penambah seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Gambar 3D Side Core SD25R

Setelah gambar 3D selesai, maka dilakukan proses simulasi menggunakan perangkat lunak SOLIDcast 8.2.5 dengan *mesh* 500.000 – 2.000.000 untuk melihat dimana kemungkinan terjadi susut pada benda tersebut. Hasil simulasi tanpa penambah menunjukkan lokasi rongga susut yang terdapat pada produk *sidecore* dapat dilihat pada Gambar 4.



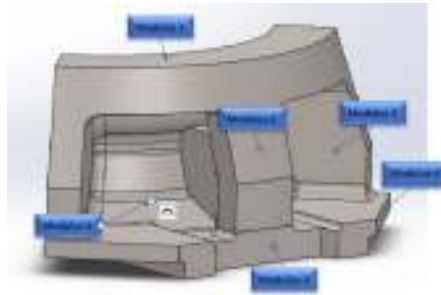
Gambar 4. Posisi Rongga Susut

Pada Gambar 4 menunjukkan posisi rongga susut yang terjadi, sesuai dengan hasil simulasi pada modul temperatur dan laju pembekuan, pada benda bagian atas mengalami pembekuan paling terakhir dan memiliki temperatur paling panas, maka rongga susut yang terjadi adalah pada benda bagian atas. Berdasarkan simulasi benda tanpa penambah, terdapat rongga susut pada permukaan atas, perlu ditambahkan penambah (*riser*) untuk menghindari rongga susut pada benda cor. Perhitungan dimensi penambah (*riser*) dimulai dengan menghitung **modulus** benda.

Modulus adalah fungsi dari kecepatan pembekuan. Nilai modulus didapat dengan perhitungan volume (V) berbanding dengan area pelepas panas (A) [11].

$$\text{Modulus (M)} = \frac{\text{VOLUME}}{\text{LUAS AREA LEPAS PANAS}} = \frac{V}{A}$$

Pada proses pengecoran logam modulus diperlukan untuk menghitung penyusutan kristal yang terjadi dan untuk menghitung besar penambah.



Gambar 5. Pembagian Bagian Modulus

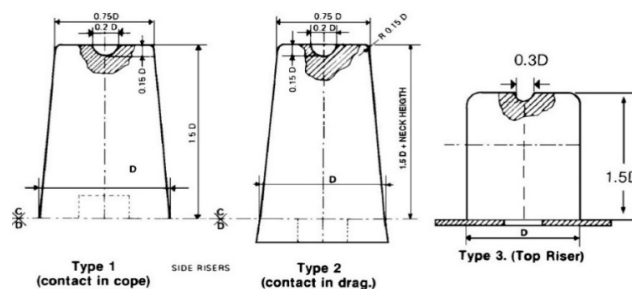
Dari Gambar 5, dihasilkan perhitungan modulus pada Tabel 2 yang merupakan hasil perhitungan modulus menggunakan aplikasi *Solidworks*. Hasil perhitungan modulus terbesar pada bagian 1, dimana modulus pada bagian tersebut 2,23.

Tabel 2. Data Perhitungan Modulus

Bagian	Modulus	Bagian	Modulus
Modulus 1	2.23	Modulus 4	1.01
Modulus 2	1.53	Modulus 5	1.83
Modulus 3	1.71	Modulus 6	1.36

Penambah yang disebut juga *riser* merupakan bagian penting dari coran untuk menghindari cacat *shrinkage*. Berdasarkan letaknya penambah ada dua jenis yaitu penambah samping dan penambah atas. Sedangkan berdasarkan jenisnya penambah ada dua jenis yaitu penambah panas (*hot riser*) dan penambah dingin (*cold riser*). Wlodawer dalam bukunya menyebutkan bahwa perbandingan modulus antara modulus benda (M_b) : modulus leher penambah (M_{lp}) : modulus penambah (M_p) = 1 : 1.1 : 1.2 [11]. Dengan modulus penambah yang lebih besar daripada benda, bertujuan agar laju pendinginan akan berakhir di penambah, agar penambah dapat menyuplai benda yang kekurangan cairan, sehingga benda akan menjadi *sound casting*.

Terdapat beberapa tipe penambah yang disesuaikan dengan kebutuhan proses pengecoran. Pada penelitian ini tipe penambah yang dipergunakan adalah penambah tipe 3 dengan perhitungan volume penambah tipe 3 seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Tipe-tipe Penambah [10]

Penambah tipe 3 adalah penambah atas, dimana penambah diletakkan diatas benda, berbentuk silinder yang bertujuan untuk mensuplai cairan ke dalam benda.

Tabel 3. Tabel Perhitungan Penambah [10]

Jenis	h (cm)	Dp (cm)	Vp (cm ³)
Type 1		5.33 Mp	1.06 Dp ³
Type 2	1.5 Dp	4.91 Mp	1.16 Dp ³
Type 3		4.53 Mp	1.04 Dp ³

Mp = Modulus Penambah

3.1. Perbandingan Modulus

Perbandingan modulus bertujuan untuk mengendalikan pembekuan, dimana pembekuan diatur supaya urutan pembekuan terjadi pada benda, leher penambah dan terakhir terjadi pada penambah, perbandingan modulus terlihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Tabel Perbandingan Modulus [11]

Modulus benda	Modulus leher penambah	Modulus penambah
1	1.1	1.2
Mb terbesar = 2.23 cm	Mlp = 1.1 x 2.23 cm = 2.453 cm	Mp = 1.2 x 2.23 cm = 2.676 cm

3.2. Perhitungan penambah

Perhitungan besarnya penambah (riser) adalah sebagai berikut:

- a. Diameter penambah dengan menggunakan tipe 3 $D_p = 4.53 \times M_p = 4.53 \times 2.676 = 12.12 \text{ cm} \approx 130 \text{ mm}$
- b. Tinggi penambah $h = 1.5 \times D_p = 1.5 \times 130 = 195 \text{ mm}$
- c. Volume penambah $V = 1.04 \times D_p^3 = 1.04 \times 1.3^3 = 2.28 \text{ dm}^3$
- d. Volume feeding $V_f = \frac{s \times V_c}{X - s}$
 $V_f = \text{Volume feeding (dm}^3/\text{liter)}$
 $s = \text{penyusutan total (\%)} = 7\%$
 $V_c = \text{Volume benda (dm}^3) = 13.25 \text{ dm}^3$
 $X = \text{efisiensi penambah (14\% - 20\%)} = 14\%$
- e. Ukuran leher penambah $V_f = \frac{0.07 \times 13.25}{0.14 - 0.07} = 11.6 \text{ dm}^3$
 $a = 4 \times M_{lp} \times \sqrt{\text{eff}} = 4 \times 2.453 \times \sqrt{0.5} = 6.9 \text{ cm}$
 $M_{lp}' = \frac{a}{4} = \frac{6.9}{4} = 1.725$
 $b = \frac{2a * M_{lp}}{a - 2 * M_{lp}'} = \frac{2 \times 6.9 \times 2.453}{6.9 - 2 \times 1.725}$
 $b = 9.812 \text{ cm} \sim 10 \text{ cm}$

Tabel 5. Tabel Dimensi Sistem Penambah

	Nilai
Modulus Penambah	2.676 cm
Jenis Penambah	Tipe 3 (Top Riser)
Tinggi Penambah (hp)	225 mm
Diameter Penambah (Dp)	150 mm
Volume Penambah (Vp)	4.2 dm ³
Jumlah Penambah	2 buah

3.3. Perhitungan Sistem Saluran

Sistem saluran adalah jalan masuk cairan logam menuju benda. Sistem saluran merupakan salah satu bagian yang terpenting dalam proses pengecoran logam karena bagian ini dapat menentukan benda cor berhasil atau tidak. Sistem saluran terdiri dari cawan tuang, saluran turun, saluran terak, dan saluran masuk.

Berikut Perhitungan sistem saluran [10] untuk *Side Core SD25R* :

1. Volume benda cor (V)

Perhitungan volume benda cor dibantu dengan bantuan software *Solidwork*, adapun hasilnya adalah:

$$\begin{aligned}
 V &= \text{volume benda} + \text{volume penambah sebenarnya} \\
 V &= 13.25 \text{ dm}^3 + 8.4 \text{ dm}^3 \\
 &= 21.65 \text{ dm}^3
 \end{aligned}$$

2. Massa benda cor

Massa benda cor adalah sebagai berikut:

$$G = V \times \rho$$

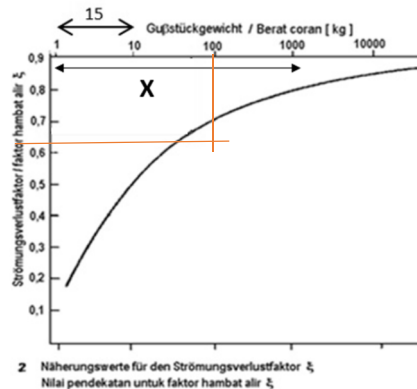
Massa jenis dari material *JIS SKD61* adalah 7.85 kg/dm^3

$$G = V \times \rho = 21.65 \times 7.85 = 170 \text{ kg}$$

3. Waktu tuang (t_p)

$$t_p = 1.25 \sqrt{2G} = 1.25 \sqrt{2 \times 170} = 23 \text{ detik}$$

4. Faktor Hambat Alir



Gambar 7. Grafik Pendekatan Nilai Faktor Hambatan Alir *Side Core SD25R* [11]

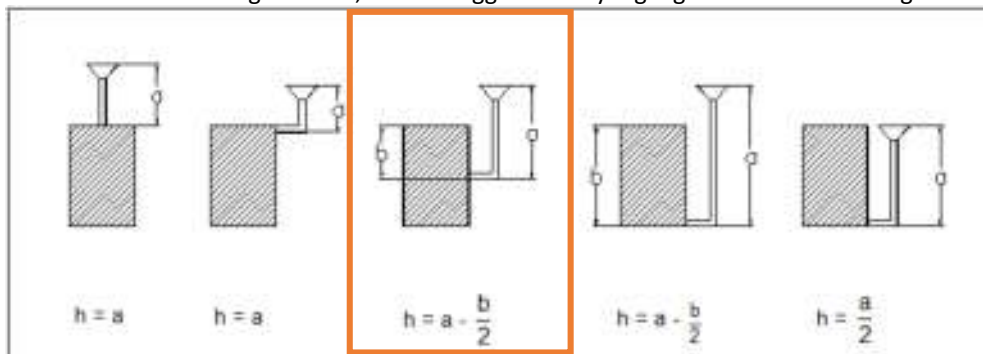
$$\begin{aligned} x &= 15 \log(G) \\ &= 15 \log(170) \\ &= 33 \text{ mm} \end{aligned}$$

Dari grafik maka didapat faktor hambat alir:

$$\xi = 0,72$$

5. Tinggi hidrolis

Berdasarkan rancangan coran, rumus tinggi hidrolis yang digunakan adalah sebagai berikut:



Gambar 8. Tinggi Hidrolis *Side Core SD25R*

$$\begin{aligned} H &= a - \frac{b}{2} \\ H &= 40 - \frac{16.6}{2} = 31.7 \text{ cm} \end{aligned}$$

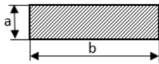
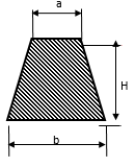
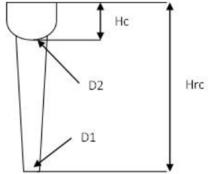
Rangka cetak yang digunakan adalah rangka cetak dengan tinggi 400 mm.

6. Perbandingan sistem saluran

Karena material *Side Core SD25R* adalah baja cor maka digunakan perbandingan sistem saluran *unpressurized*. Dimana perbandingan luas saluran turun : luas saluran terak : luas saluran masuk adalah 1:2:2

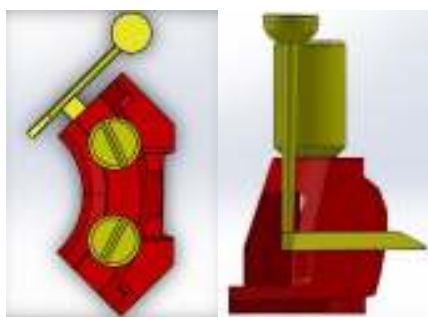
7. Sistem saluran

Hasil perhitungan pada masing-masing sistem saluran masuk, saluran terak, dan saluran turun dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Perhitungan pada Sistem Saluran		
Nama	Perhitungan	Ukuran
Saluran Masuk	a. Luas penampang saluran masuk $A_{sm} = \frac{22.6 \times G}{\rho \times t \times \xi \times \sqrt{H}}$ $= \frac{22.6 \times 170}{7.85 \times 23 \times 0.72 \times \sqrt{31.7}}$ $= 5.3 \text{ cm}^2$	 a=1.2 cm b. 4.8 cm
	$a = \sqrt{\frac{A_{sm}}{4}} = \sqrt{\frac{5.3}{4}} = 1.15 \approx 1.2 \text{ cm}$ $b = 4 \times a = 4 \times 1.1 = 4.8 \text{ cm}$	
Saluran Terak	a. Luas penampang saluran terak $A_{Str} = \frac{2}{2} \times A_{Sm}$ $A_{Str} = \frac{2}{2} \times 5.3 = 5.3 \text{ cm}^2$	 a = 1.10cm b= 2.19 cm H=3.30 cm
	$b = \sqrt{\frac{4 \times A_{Str}}{6 - 9 \tan 10}} = \sqrt{\frac{4 \times 5.3}{6 - 9 \tan 10}} = 2.19 \text{ cm}$ $\approx 2.2 \text{ cm}$ $a = b (1 - 3 \tan 10)$ $a = 2.2 (1 - 3 \tan 10) = 1.03 \text{ cm} \approx 1.1 \text{ cm}$ $H = 1.5 \times b$ $H = 1.5 \times 2.2 = 3.3 \text{ cm}$	
Saluran Turun	$A_{St} = \frac{1}{2} \times A_{Sm} = \frac{1}{2} \times 5.3 = 2.65 \text{ cm}^2$ $D1 = \sqrt{\frac{4 \times A_{St}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 2.65}{\pi}} = 1.84 \text{ cm} \approx 1.9 \text{ cm}$ $D2 = D1 \times \sqrt[4]{\frac{Hrc}{Hc}} = 1.9 \times \sqrt[4]{\frac{40}{5}} = 3.22 \text{ cm} \approx 3.3 \text{ cm}$	

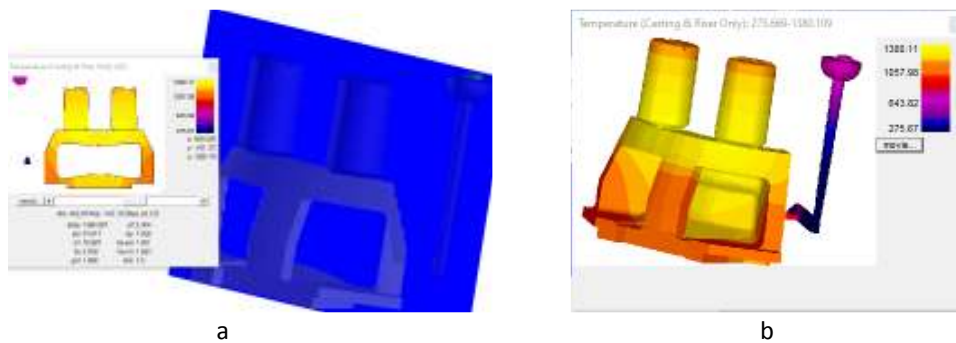
3.5 Penentuan *layout* cetakan

Perancangan *layout* sistem saluran dilakukan untuk menghasilkan coran yang baik dengan bentuk yang paling efektif dan efisien. Adapun *layout* cetakan *Side Core SD25R* dapat dilihat pada Gambar 9.



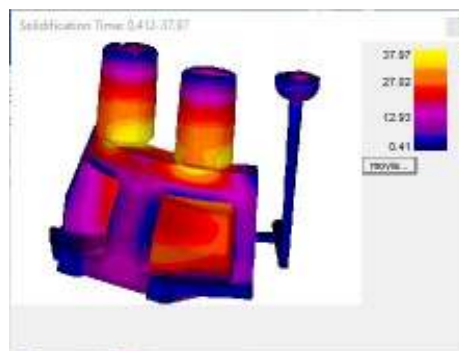
Gambar 9. *Layout* system saluran dan penambah (*riser*).

Setelah rancangan 3D benda, sistem saluran dan penambah selesai kemudian dilakukan simulasi menggunakan software SOLIDcast 8.2.5 hasilnya dapat dilihat pada Gambar 10.



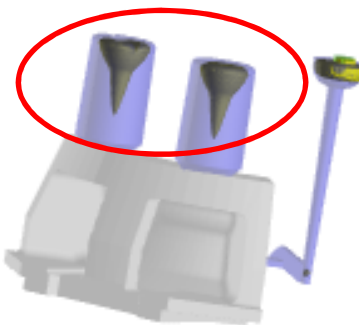
Gambar 10. a. Temperatur pada benda dengan penambah dan b. Sistem saluran

Analisis dari simulasi temperatur pada Gambar 10 menunjukkan urutan temperatur dari temperatur rendah ke temperatur tinggi. Selain itu dapat dilihat distribusi panas yang terjadi, ditunjukkan dengan gradient warna pada temperatur paling panas berwarna kuning dengan temperature $1380\text{ }^{\circ}\text{C}$ terjadi pada penambah. Menurut Wlodawer prinsip sebuah penambah (riser) adalah membeku paling terakhir [11], hal ini sesuai dengan hasil simulasi ini, dimana pembekuan terakhir terjadi pada penambah.



Gambar 11. *Solidification Time* pada benda dengan penambah dan sistem saluran

Analisis dari simulasi yang terjadi pada laju pembekuan yang terlihat pada Gambar 11 menunjukkan laju pembekuan yang terjadi pada benda. Pembekuan terakhir terjadi pada bagian penambah. Maka pada penambah diprediksikan akan mengalami penyusutan paling besar dan dapat mensuplai kekurangan cairan pada benda kerja.



Gambar 12. *Porosity* pada benda dengan penambah dan sistem saluran.

Analisis dari porositas yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 12 dengan menggunakan *plot this value* 0.954, didapatkan hasil pada Gambar 12. Sesuai dengan hasil analisis dari sisi temperatur dan laju pembekuan, didapatkan benda yang *sound casting* atau benda yang bebas dari cacat *sinkage*. Perancangan coran yang bebas rongga susut ini mendapatkan hasil *yield* sebesar 59,5%.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian perancangan dengan menggunakan 2 buah penambah atas dengan diameter 150 mm, sistem saluran dengan saluran masuk ukuran 12x48 mm, saluran terak ukuran 22x33 mm, dan saluran turun diameter 19 mm menghasilkan coran yang *sound casting*, dengan *casting yield* sebesar 59.5%. Hasil simulasi dengan perangkat lunak ini menunjukkan perancangan sistem saluran dan penambah atas lebih efektif untuk menghasilkan produk yang lebih baik atau produk *sound casting*. Hasil simulasi perangkat lunak juga memprediksi area benda cor yang akan terjadi rongga susut dan kemungkinan letak terjadinya porositas, hal ini akan berdampak pada pengurangan proses *trial and error* yang biasanya dilakukan di lapangan sehingga dapat menghemat waktu serta biaya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Masahide Umino, et.al, "Effect of Silicon Content on Tempered Hardness, High Temperature Strength and Toughness of Hot Working Tool Steels", *J-STAGE*, vol. 69, issue 6, pp. 673-379, 2003.
- [2]. Yahong Sun, Satoshi Hanaki, Hitoshi Uchida, Hisakichi Sunada, Nobuhiro Tsujii, "Repair Effect of Hot Work Tool Steel by Laser-Melting Process", *Journal Material Science and Technology*, vol. 19(Supl.), pp. 91-93, 2003.
- [3]. Sachin Thakur, Dr. Y.M. Puri, "Solidification Simulation of the Casting to predict and eliminate the Shrinkage Defects", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 6, no. 5, pp. 6409-06412, 2019.
- [4]. F. Nurjaman, et. al, "Simulation for grinding balls production using sand mold-gravity casting", IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 285 012029, 2018.
- [5]. Sachin. L. Nimbalkar, Dr. R. S. Dalu, "Design Optimization Through Casting Simulation Software For Sand Casting", International Conference on Recent Advances in Mechanical Engineering In collaboration with International Journal of Engineering and Management Research (IJEMR), 2015, pp. 166-170.
- [6]. Khan, M. A. A. & Sheikh, A. K., "A Comparative study of simulation softwarefor modelling metal casting processes", *International Journal of Simulation Modelling*, vol. 17, no.2, pp. 197-209, 2018.
- [7]. Dedy Krisbianto, Dwi Rahmalina, Agri Suwandi, "Optimasi desain gating system proses die casting cold chamber menurunkan cacat produk", *Jurnal Kajian Teknik Mesin*, vol.4, no. 2, 2019.
- [8]. Robert Jarosz, et.al, "MAGMASOFT Simulation of Sand Casting Process With EV31A Magnesium Alloy", *Journal of Engineering Material and Technology*, vol. 140, issue 3, 2018.
- [9]. JIS Handbook: Ferrous Materials & Metallurgy I, 2018.
- [10]. Rolf Roller, *Grund-Und Fachkenntnisse Giessereitechnischer Berufe*, Verlag Handwerk und Technik, 1986.
- [11]. R. Wlodawer, *Directional Solidification of Stell Castings*, Oxford: Pergamon Press, 1966.