

PERANCANGAN *CASTING BUCKET TEETH* TIPE *FLARED CHISEL* DAN ANALISIS PENGARUHNYA PADA VARIASI TEMPERATUR PENUANGAN TERHADAP *SHRINKAGE POROSITY*

Novan Putra Gumilar S.Tr.

Moch. Ahyarsyah, S.ST., M.T

Politeknik Manufaktur Negeri Bandung

Jalan Kanyakan No 21 - Dago, Bandung – 40135

Phone/Fax : 022. 250 0241 / 250 2649

Email : novanpg@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan untuk merencanakan rancangan *casting* produk *Bucket Teeth* tipe *Flared Chisel* agar terhindar dari porositas dengan memprediksi tata letaknya menggunakan *software* simulasi *SOLIDCast 8.2.5* serta menganalisis ketahanan rancangan *casting*-nya terhadap perubahan temperatur penuangan yang mempengaruhi porositas, karena pada kondisi aktual di lapangan temperatur penuangan untuk setiap cetakan dapat berbeda akibat dari adanya jeda waktu antara *tapping* dengan penuangan sehingga dapat menurunkan temperatur cairan di dalam alat penuang sebelum dituangkan ke dalam cetakan.

Simulasi pada *software* mencakup pengisian cairan ke dalam rongga cetak hingga proses solidifikasinya. Kemudian hasil simulasi dianalisis seluruhnya pada *software* dengan parameter – parameter simulasi dibuat mendekati kondisi aktual agar dapat diaplikasikan pada kondisi sebenarnya. Hasil penelitian menunjukkan rancangan *casting* produk *Bucket Teeth* tipe *Flared Chisel* terhindar dari porositas berdasarkan prediksi *software* dengan temperatur penuangan 1530 °C hingga 1605 °C. Namun, pada temperatur 1530 °C menunjukkan bahwa proses pengisian berpotensi tidak penuh, sehingga rekomendasi temperatur penuangan berada pada *range* 1555 °C hingga 1605 °C. Hasil lain berdasarkan analisis ketahanan rancangan *casting*-nya terhadap perubahan temperatur penuangan menunjukkan bahwa, kenaikan temperatur penuangan meningkatkan nilai modulus sehingga lama waktu setiap benda pada *casting* untuk mencapai temperatur fraksi solid kritis bertambah, akibatnya *volume shrinkage cavity* pun meningkat tanpa menimbulkan masalah baru terkait *shrinkage porosity*.

Kata kunci : *Casting design*, simulasi, *SOLIDCast*, temperatur penuangan, *shrinkage porosity*.

1. PENDAHULUAN

Dalam dunia pertambangan dikembangkan sebuah alat penggali yang disebut *Bucket Wheel Dredge (BWD)* sebagai pengganti dari *Bucket Wheel Excavator (BWE)*. *BWD* adalah alat penggali berukuran skala besar yang digunakan untuk penggalian yang bersifat kontinyu. Salah satu komponen yang paling berpengaruh pada *BWD* adalah gigi yang terdapat pada ujung-ujung bucket (*Wheel Bucket Teeth*) yang berfungsi untuk menggali objek tambang. Penggalian pada *bucket wheel dredge* dilakukan oleh gigi (*wheel bucket teeth*).

Terdapat beberapa tipe *bucket teeth* pada *BWD*, salah satunya adalah tipe *Flared Chisel*. **Gambar.1** adalah objek yang akan dijadikan penelitian.



Gambar.1 *Bucket teeth BWD tipe flared chisel* [8]

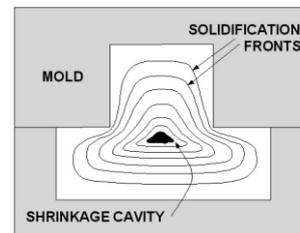
Dengan material baja AISI 4140, pembuatan *bucket teeth* tipe ini akan menggunakan metode pengecoran logam. Sebelumnya produk ini telah diproduksi di bengkel Foundry Polman sebagai *prototipe* untuk pengujian material tanpa mempertimbangkan rancangan *casting*. Untuk itu akan dilakukan pembuatan benda dengan pertimbangan rancangan *casting* agar dapat diaplikasikan untuk kebutuhan produksi secara massal. Namun, sebelum dilakukan pembuatan produk ini di lapangan, dilakukan simulasi pengecoran logam terlebih dahulu pada rancangan *casting* dengan menggunakan *software* simulasi *SOLIDCast 8.2.5*. Dimana dengan menggunakan *software* ini perancang coran dapat melakukan prediksi formasi dan letak porositas pada *casting*. Untuk mengoptimalkan efektifitas pembuatan produk ini karena akan diproduksi secara massal, maka diberikan variasi temperatur penuangan pada simulasi dengan tujuan untuk menganalisis pengaruhnya terhadap porositas yang terjadi. Pada dasarnya divariasikannya temperatur penuangan ini dilakukan karena pada kondisi aktual penuangan terhadap cetakan, ada jeda waktu antara *tapping*

dengan penuangan. Seiring berjalannya waktu maka temperatur cairan didalam alat penuang (*ladle*) akan menurun dan tidak semua cetakan akan memiliki temperatur penuangan yang sama, sehingga perlu dilakukan penelitian untuk menganalisis ketahanan rancangan *casting* pada temperatur penuangan yang bervariasi terhadap porositas yang terjadi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

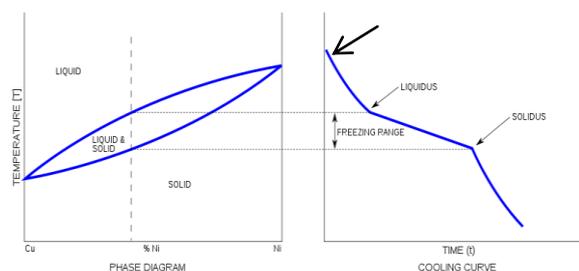
2.1. Fenomena Solidifikasi Cairan Logam

Ketika cairan logam memasuki rongga cetak, panasnya diserap dan berpindah menuju dinding cetakan. Pada logam murni eutektik, proses solidifikasi terjadi secara berlapis – lapis (layaknya kulit bawang) yang dimulai dari dinding cetakan dan menuju bagian tengah. Lapisan pertama dan lapisan – lapisan selanjutnya mengalami penyusutan volume dan mengambil cairan logam dari lapisan yang berbatasan pada bagian yang lebih dalam. Ketika tidak ada lagi cairan logam yang dapat mengkompensasi penyusutan volume masing – masing lapisan, terjadi kekosongan pada lapisan paling dalam yang biasa disebut rongga susut (*shrinkage cavity*) seperti diilustrasikan pada **Gambar.2**.



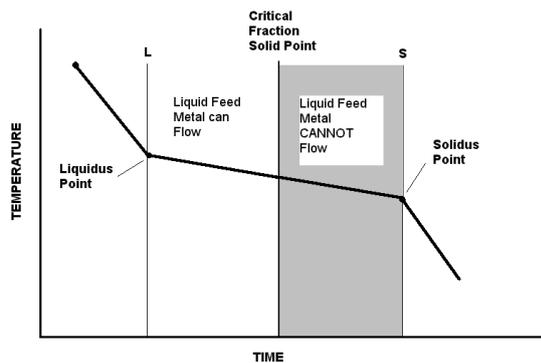
Gambar.2 Solidifikasi *casting* di dalam cetakan [5]

Dalam proses solidifikasi ada istilah yang disebut kurva pendinginan (*cooling curve*). *Cooling curve* menjelaskan bagaimana *casting* mengalami pendinginan ketika temperatur diplotkan terhadap waktu. *Cooling curve* berbasis pada diagram fasa, memiliki titik likuidus dan titik solidus dimana adanya jangka waktu diantara keduanya serta ada selisih temperatur yang biasa disebut *freezing range*. **Gambar.3** menunjukkan hubungan antara diagram fasa suatu paduan dengan *cooling curve*.



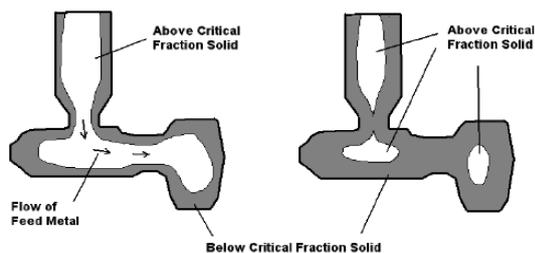
Gambar.3 Hubungan diagram fasa dengan cooling curve [3]

Casting secara berkala berubah dari 100% cair menjadi 100% solid. Ketika paduan logam menjadi solid dan lebih solid lagi, ada titik dimana cairan logam tidak dapat mengalir lebih lama yang diistilahkan fraksi solid kritis (*critical fraction solid/CFS*) yang biasanya dinyatakan berdasarkan persentase solid penuh. **Gambar.4** menjelaskan daerah CFS pada *cooling curve*.



Gambar.4 Critical fraction solid pada cooling curve [10]

Gambar.5 memudahkan untuk memahami *critical fraction solid*. Dimana logam yang berada di atas *critical fraction solid* adalah cairan yang cukup untuk mengalir dari suatu area ke area yang lain. Jadi jika suatu bagian *casting* sedang membeku dan menyusut, dan laluan penyuplaian dari bagian tersebut dari *riser* terbuka, lalu cairan yang akan disuplai dapat masuk, maka dapat diprediksi tidak akan ada *shrinkage*.



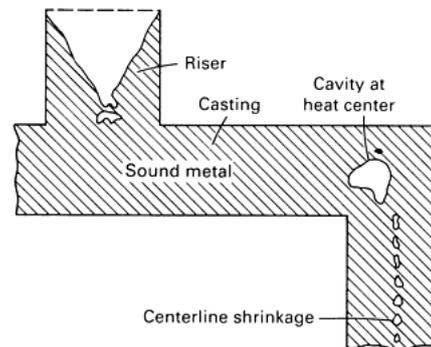
Gambar.5 Ilustrasi bagian di atas dan di bawah critical fraction solid [10]

2.2. Shrinkage Porosity

Shrinkage porosity berkaitan dengan cacat porositas pada *casting* yang merupakan hasil dari proses solidifikasi. Berdasarkan ukurannya, *shrinkage porosity* dibagi menjadi dua, yaitu *macroporosity* dan *microporosity*. *Macroporosity* tampak sebagai zona berupa lubang penyusutan atau rongga susut dengan bentuk tak beraturan serta memiliki permukaan kasar yang cukup besar untuk

dilihat dengan mata telanjang. *Microporosity* tampak sebagai lubang – lubang kecil dengan permukaan kasar dan biasanya tidak terlihat tanpa perbesaran. Keduanya merupakan akibat dari kombinasi penyusutan logam dan evolusi gas selama solidifikasi.

Ketika penyusutan dan gas berkombinasi untuk membentuk *macroporosity*, sifat material akan terpengaruh. Kemampuan statis material akan tereduksi oleh bagian kosong akibat porositas karena tidak ada logam di dalamnya, sehingga tidak adanya bantuan untuk menahan suatu beban [9]. **Gambar.6** merupakan contoh *shrinkage porosity* pada *casting*.



Gambar.6 Shrinkage porosity pada casting [10]

2.3. Riser Design

Dalam merancang *riser* dapat dinyatakan secara sederhana untuk menyediakan penyuplaian cairan logam [9] yaitu :

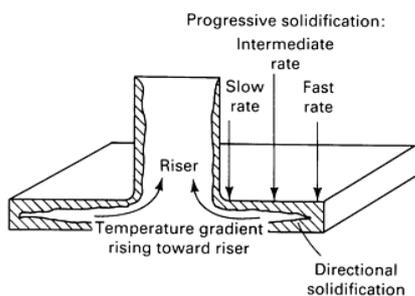
- Dalam jumlah yang tepat
- Dalam tempat yang tepat
- Dalam waktu yang tepat

Pernyataan pertama dalam merancang *riser* yaitu dalam jumlah yang tepat adalah memperhitungkan kebutuhan suplai cairan. Menurut Wlodawer volume kebutuhan *casting* terhadap *riser* harus lebih kecil dari volume *riser* untuk mengakomodasi penyusutan cair dan penyusutan kristal pada *casting*.

Pernyataan kedua dalam merancang *riser* yaitu dalam tempat yang tepat adalah menempatkan *riser* pada *casting* dengan menggunakan konsep *directional solidification*. Jika cacat *shrinkage* ingin dihindari pada *casting*, pembekuan harus terarah dari bagian *casting* terjauh, melewati bagian tengah, dan berakhir di dalam *riser* sendiri, dimana pembekuan akhir akan terjadi.

Pada **Gambar.7** mengilustrasikan *progressive* dan *directional solidification* (pembekuan terarah) pada *casting*. Ketika cairan mengisi rongga cetak, pada umumnya pembekuan

akan dimulai dari dinding cetakan, dimana permukaan casting akan terbentuk. Saat panas berpindah menuju cetakan, akan terjadi pembekuan searah dengan laju perpindahan panas menuju bagian tengah yang diistilahkan *progressive solidification*. Kondisi berbeda pada bagian tepi cetakan dimana bagian tersebut memiliki permukaan pelepas panas lebih banyak dari bagian tengah dimana terjadi *progressive solidification* sehingga laju pembekuan terjadi lebih cepat. Pada *riser*, dimana terdapat bagian paling panas berada dan perpindahan panas menuju cetakan direduksi karena efek luas permukaan pelepas panas yang berkurang akibat adanya persimpangan sehingga laju pembentukan permukaan *casting* menurun. Kombinasi efek tepi *casting* dan efek *riser* menghasilkan *directional solidification*.



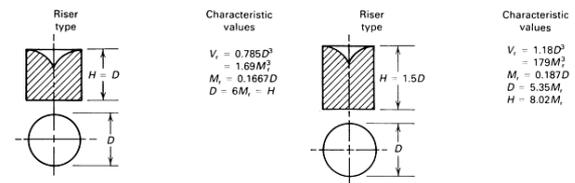
Gambar.7 Progressive dan directional solidification [9]

Pernyataan ketiga dalam merancang *riser* yaitu dalam waktu yang tepat adalah memperkirakan lama waktu pendinginan pada *casting*. Konsep dasar untuk memperkirakan lama waktu sebuah *casting* atau bagian pada *casting* mengalami pendinginan (*freezing time*) dapat menggunakan *Chorinov's rule*. Konsep dari *Chorinov's rule* disederhanakan oleh Wlodawer untuk perhitungan praktis *riser* dengan mengeliminasi kebutuhan perhitungan waktu solidifikasi aktual menjadi rasio volume dengan luas permukaan *casting* yang diistilahkan *casting modulus* (M_c). M_c ini digunakan untuk menentukan waktu solidifikasi relatif pada *casting* dan *riser*.

Freezing time casting dan *riser* harus proporsional, dimana modulus *riser* (M_r) harus lebih besar dari modulus *casting* (M_c) untuk menghasilkan penyuplaian yang baik. Untuk baja cor, modulus *riser* biasanya 1,2 modulus *casting* (M_c).

Wlodawer menyederhanakan metode modulus dengan menunjukkan bahwa beberapa bagian *casting* dapat direduksi menjadi bentuk geometri sederhana dimana M_c dapat ditemukan dengan mudah tanpa perhitungan rumit permukaan aktual dan volume (contohnya, untuk bagian pelat, $M_c = \text{setengah tebal pelat}$). Wlodawer lebih lanjut

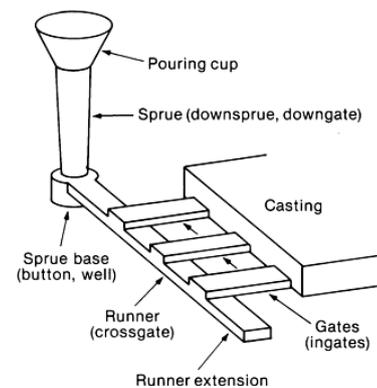
menyederhanakan metode dengan membuat peta konversi sederhana seperti **Gambar.8**.



Gambar.8 Bentuk dan nilai karakteristik riser [9]

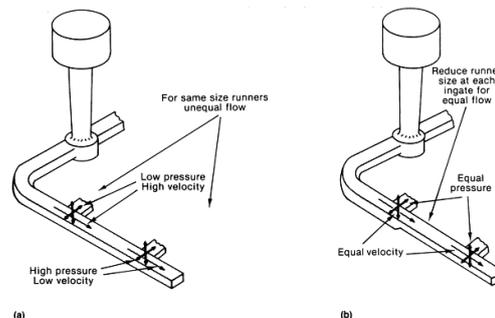
2.4. Gating Design

Gating system adalah penyalur cairan logam untuk memasuki cetakan dan mengalir menuju rongga cetak dimana cairan logam akan membeku di dalamnya. Komponen dasar dari *gating system* tampak seperti **Gambar.9**.



Gambar.9 Komponen dasar gating system [9]

Pada *gating system* diterapkan *Bornoulli's Theorem*, dimana pada setiap titik pada *gating system* merupakan akumulasi dari energi potensial, energi kinetik, energi tekan, dan energi gesek cairan yang mengalir adalah konstan. Untuk kasus bila suatu *gating system* memiliki lebih dari satu *ingate*, maka dianjurkan untuk membuat setiap *ingate* memiliki aliran yang sama dengan cara mereduksi luas permukaan *runner* sehingga pada setiap bagian *runner* memiliki kecepatan yang sama dan pada setiap *ingate* memiliki tekanan yang sama seperti yang ditunjukkan pada **Gambar.10**.



Gambar.10 Penerapan Bornoulli's Theorem pada gating system dengan lebih dari satu ingate

: (a) luas permukaan runner sama, (b) luas permukaan runner direduksi [9]

Ada anjuran lain menurut Peter Beeley untuk menciptakan proporsi volume yang melalui setiap *ingate* sama yaitu dengan mengaplikasikan *ingate* yang dibuat bersudut seperti ditunjukkan pada **Tabel.1**, sehingga aliran cairan yang melalui *ingate* memiliki kecepatan yang sama.

Angle of ingate to runner	Proportion of volume flow %
72°	33.6
56°	33.5
45°	32.8

Tabel.1 Gating system dengan ingate bersudut [1]

Ada pertimbangan dalam pembuatan *gating system* pada baja cor. Karena sifat cairan baja sensitif terhadap oksidasi, maka aliran cairan harus dibuat laminar (tidak turbulen). Untuk membuat aliran cairan laminar, maka diaplikasikan *unpressurized system* pada *gating system* yang membuat kecepatan aliran cairan logam tereduksi. Kecepatan aliran cairan logam yang rendah akan memungkinkan menghasilkan aliran cairan yang laminar sehingga direkomendasikan untuk baja cor menggunakan rasio luas permukaan *gating system* 1:4:4 (*sprue:runner:ingate*) [9].

2.5. AISI 4140

AISI 4140 merupakan baja dengan klasifikasi *medium carbon low alloy*. Dimana angka 41 menunjukkan paduan pada baja ini adalah *chromium* dan *molybdenum*, dan angka 40 menunjukkan kandungan karbonnya 0,4%. Baja ini termasuk kepada keluarga *ultrahigh strength steel* yang mengkombinasikan kekerasan sedang, kekuatan dan ketangguhan yang baik. Karena kemampuannya tersebut, AISI 4140 sering diaplikasikan pada produk seperti *connecting rod*, *crankshaft*, *piston rod*, bagian pompa, pipa tekanan tinggi, peralatan pemesinan, *flange*, *gear*, dan *sprocket*. Pada **Tabel.2** merupakan komposisi

Designation or trade name	Composition, wt %					
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
Medium-carbon low-alloy steels						
4140	0.38-0.43	0.75-1.00	0.20-0.35	0.80-1.10	...	0.15-0.25

kimia dari AISI 4140.

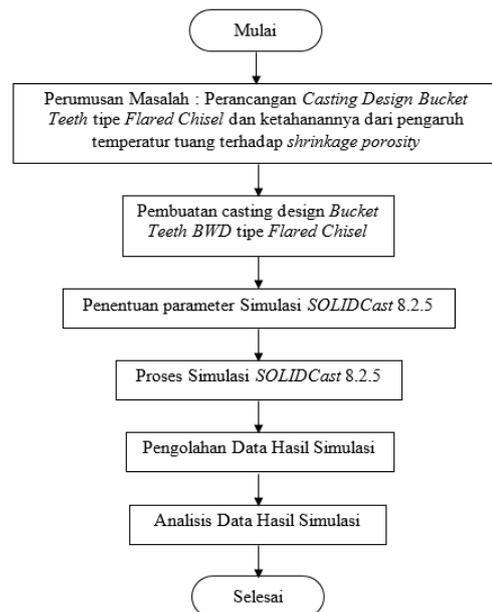
Tabel.2 Komposisi kimia AISI 4140 [6]

2.6. SOLIDCast 8.2.5

SOLIDCast merupakan salah satu dari sekian banyak *software* simulasi pengecoran yang dibekali dengan fasilitas untuk membantu pada *casting designer* membuat suatu *casting design*. Caranya adalah memverifikasi *casting design* yang telah dikembangkan *casting designer* menggunakan analisis aliran cairan yang komprehensif dari *FLOWCast* dan mengkombinasikannya dengan analisis *thermal* serta analisis untuk memastikan *casting* bebas dari cacat.

Ada lima tahapan dasar dalam simulasi. Tahapan pertama adalah membuat sebuah model 3D *casting* dengan bantuan *software* CAD atau dengan *SOLIDCast*. Tahapan kedua adalah memilih material dan menentukan kondisi awal yang diinginkan *casting designer*. Tahapan ketiga adalah membagi model 3D menjadi elemen – elemen hingga pada jumlah tertentu (*meshing*) untuk membantu *software* menghitung perpindahan panas pada *casting* dan cetakan. Pada *SOLIDCast*, digunakan perhitungan *finite difference method (FDM)* yang artinya elemen – elemen yang dibangun berupa kubus. Tahapan keempat adalah proses simulasi yang dilakukan otomatis oleh *software*. Tahapan kelima adalah analisis hasil simulasi yang dapat diplot dengan beberapa cara pada *software* [9].

3. METODOLOGI



Gambar.11 Flowchart metodologi penelitian

a.

Perumusan masalah

Melakukan perumusan masalah terkait merancang *casting bucket teeth* tipe *flared chisel* agar dapat diaplikasikan untuk produksi secara massal serta menganalisis ketahanannya dari perubahan temperatur penuangan terhadap *shrinkage porosity*.

b.

Pembuatan casting design

Membuat *casting design* dimulai dengan pembuatan model benda dalam bentuk 3D dengan bantuan *software CAD* yang kemudian ditentukan dimensi *riser* serta sistem saluran yang akan diplotkan dan disesuaikan dengan rangka cetak yang akan digunakan untuk menghasilkan benda *sound casting* sesuai dengan kaidah perancangan.

c.

Penentuan parameter simulasi

Menentukan parameter - parameter simulasi yang akan mempengaruhi hasil simulasi diantaranya yaitu sifat - sifat fisik material casting dan pasir cetak, temperatur penuangan, penyusutan total, dan penyesuaian volume casting yang disimulasikan dengan cairan logam yang dapat dituang.

Batas bawah temperatur penuangan ditentukan pada temperatur dimana cairan tidak dapat mengisi rongga cetak secara penuh yaitu pada temperatur 1530 °C (temperatur likuidus 1490 °C dan *superheat* sebesar 40 °C). Sedangkan batas atas temperatur penuangan ditentukan berdasarkan daya larut gas (kombinasi gas hidrogen dan nitrogen) maksimal pada besi dalam satu atmosfer yaitu pada temperatur 1720 °C berdasarkan grafik yang ada pada lampiran 7. Karena daya larut yang tinggi pada temperatur di atas temperatur likuidus, pada kondisi aktual diperlukan *treatment* untuk mencegah serta mereduksi kadar gas yang tinggi pada cairan logam, misalnya dengan *covering flux*.

d.

Proses simulasi

Melakukan proses simulasi dimulai dari proses membangun model dengan beberapa elemen (*meshing*), simulasi proses pengisian cairan ke dalam cetakan serta proses pembekuannya.

e.

Engolahan data hasil simulasi

Mengolah data hasil simulasi ke dalam *output criteria* : *material density*, *critical fraction solid time*, dan *custom high*.

f.

Analisis hasil simulasi

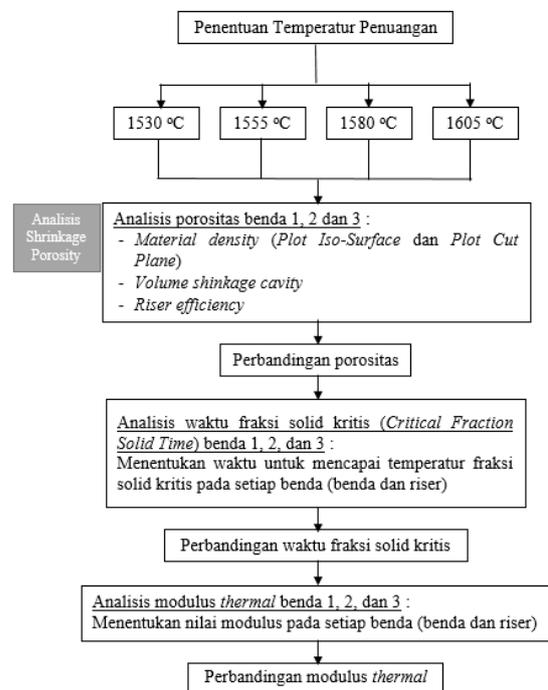
Menganalisis hasil simulasi terkait *shrinkage porosity* dari masing - masing *output criteria* sehingga menghasilkan *volume shrinkage cavity* (*V_{sc}*), waktu fraksi solid kritis, dan modulus

thermal. Perhitungan *volume shrinkage cavity* dilakukan dengan cara hasil *capture* gambar 2D di-*sketch* dan di-*revolve* pada bagian dengan gradasi warna skala 0.00000 (100% *porosity*) kemudian dihitung volumenya dengan bantuan *software CAD*.

P

4. HASIL PENELITIAN

Untuk mengetahui pengaruh temperatur penuangan pada perilaku material, dalam hal ini porositas, hasil simulasi dianalisis dengan bantuan fasilitas *output criteria* yang ada pada *software simulasi SOLIDCast*. Berikut tahapan analisis yang digunakan.

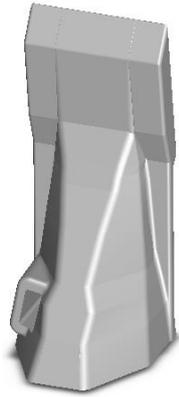


Gambar.12 Flowchart analisis hasil simulasi

4.1. Pembuatan Casting Design

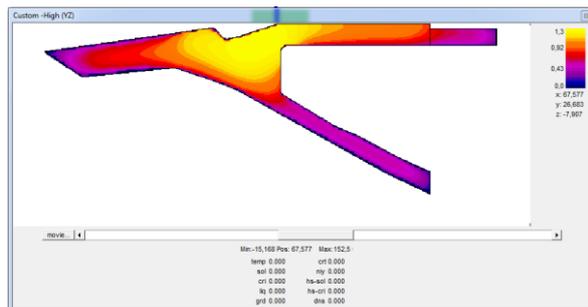
Casting design untuk *Bucket Teeth BWD* tipe *Flared Chisel* ini berawal dari pembuatan model 3D benda. Pembuatan model 3D menggunakan alat bantu salah satu *software CAD*, *SolidWorks*. Pada Gambar.12 menunjukkan hasil pembuatan model 3D benda.

A



Gambar.13 Model 3D benda

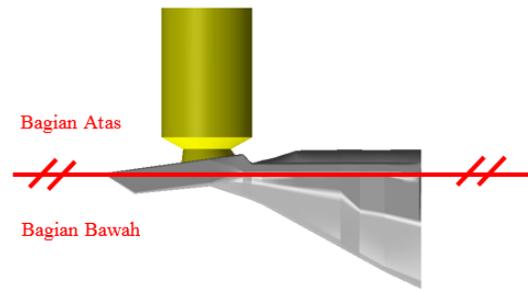
Tahapan selanjutnya adalah menentukan tata letak *riser* serta menghitung dimensi *riser* yang akan ditempatkan pada benda. Hal pertama yang dilakukan adalah menentukan besar modulus pada benda. Untuk mencapai keakuratan dalam hal penentuan besar modulus *thermal*, nilai modulus *thermal* didapatkan dengan cara memanfaatkan fasilitas pada software simulasi *SOLIDCast*. 1,3 cm adalah nilai modulus *thermal* terbesar pada benda yang mengindikasikan bagian paling terakhir membeku.



Gambar.14 Modulus *thermal* benda berdasarkan *custom-high criterion* pada *SOLIDCast*

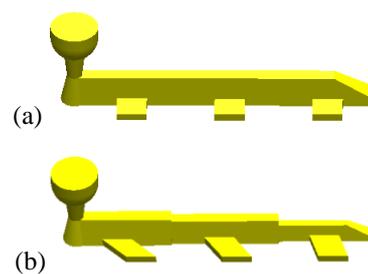
Pada **Gambar.13** menunjukkan modulus *thermal* pada benda dengan setiap warna memiliki skala nilai modulus masing – masing. Warna yang paling terang adalah bagian dengan modulus terbesar.

Ketika nilai modulus *thermal* telah diketahui, tahap selanjutnya adalah merencanakan tata letak dan menghitung dimensi *riser* yang akan ditempatkan. Pada **Gambar.14** menunjukkan lokasi dimana *riser* akan ditempatkan. *Riser* atas dipilih dengan pertimbangan lokasi bagian modulus terbesar benda berada pada bagian tengah dan diperkirakan akan menghasilkan pembekuan terarah menuju *riser*.

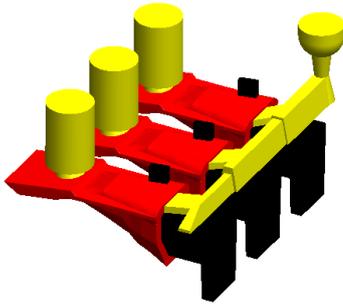


Gambar.15 Posisi *riser* atas pada benda

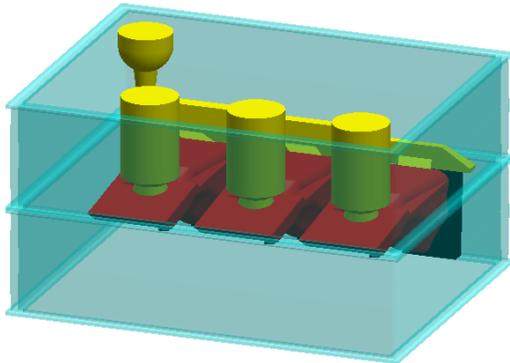
Selanjutnya adalah menentukan sistem saluran yang akan menjadi laluan cairan logam menuju benda. Dengan pertimbangan untuk membuat saluran *unpressurized system*, ditentukan rasio luas penampang saluran masuk : luas penampang saluran terak : luas penampang saluran turun yaitu 4 : 4 : 1, perhitungan lengkap pada **lampiran 3**. Alternatif rancangan *casting* terfokus pada bagian *gating system*, dimana pada alternatif 1 *gating system* dibuat sederhana untuk mengakomodasi rasio luas penampang yang telah ditentukan seperti ditunjukkan pada **Gambar.15 (a)**. Alternatif 2 dibuat untuk mempertimbangkan kecepatan aliran cairan yang dihasilkan pada saluran terak dan proporsi cairan logam yang masuk ke *cavity* benda melalui saluran masuk. Untuk menghasilkan kecepatan aliran cairan yang sama pada setiap bagian, saluran terak direduksi luas penampangnya berdasarkan jumlah benda yang disuplai. Pada saluran masuk dibuat bersudut berdasarkan anjuran Peter Beeley dengan tujuan proporsi aliran volume cairan sama pada setiap saluran masuk. Kemudian, Rancangan sistem saluran alternatif 2 pada **Gambar.15 (b)** menghasilkan *casting design* seperti **Gambar.16** dan ditempatkan pada rangka cetak pada **Gambar.17**



Gambar.16 Rancangan sistem saluran : (a) Alternatif 1, (b) Alternatif 2



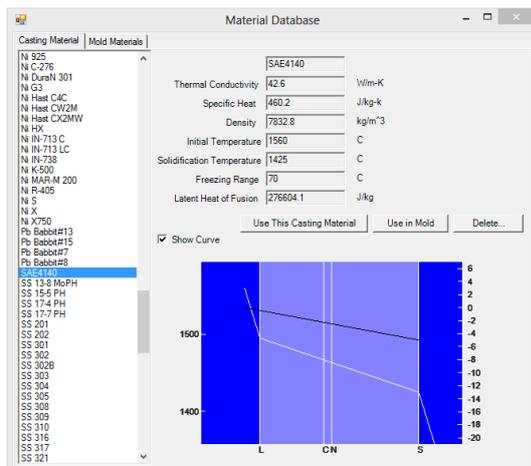
Gambar.17 Casting design yang digunakan



Gambar.18 Penempatan casting pada rangka cetak

4.2. Penentuan Parameter Simulasi

Penentuan parameter yang pertama adalah parameter sistem yang akan mengolah data menjadi salah satu bagian kurva pendinginan. Diantaranya adalah *Critical Fraction Solid* sebesar 45 % dan *Niyama* sebesar 50 % yang mengikuti anjuran *user guide SOLIDCast*. Material yang digunakan adalah AISI 4140, dengan informasi yang telah terkumpul lengkap pada *database software* seperti yang ditunjukkan pada Gambar.18.



Gambar.19 Parameter material AISI 4140 pada database software

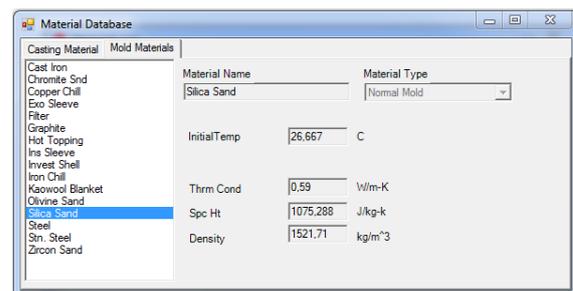
Untuk temperatur penuangan (*Initial Temperature*) ditentukan melalui pendekatan temperatur penuangan benda cor *Bucket Teeth* di bengkel Foundry Polman yang pengukurannya dilakukan pada satu kali peleburan yaitu paling rendah adalah 1530 °C dan paling tinggi adalah 1605 °C dengan temperatur *tapping* sama yaitu 1630 °C, serta ditentukan selisih antara temperatur penuangan yang satu ke yang lain adalah 25 °C.

Selain itu, parameter yang mempengaruhi kurva pendinginan adalah *solidification shrinkage*. Pada Tabel.3 merupakan pendekatan besar % *solidification shrinkage* yang ditentukan dan dihitung pada lampiran 4 menurut R. Wlodawer [12].

Temperatur Penuangan	% <i>Solidification Shrinkage</i>
1530 °C	5,2
1555 °C	5,5
1580 °C	5,9
1605 °C	6,2

Tabel.3 *Solidification shrinkage* berdasarkan temperatur penuangan

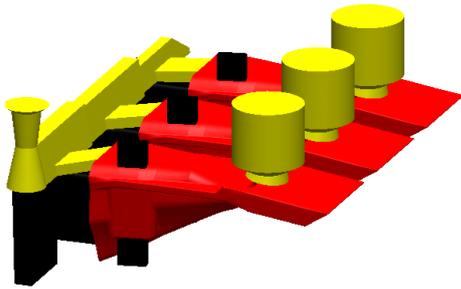
Pada *software* juga diperlukan jenis material cetakan yang akan diaplikasikan pada simulasi yang akan dijalankan. Material cetakan yang akan digunakan adalah *silica sand*. Sama halnya dengan material AISI 4140, informasi terkait parameter material cetakan telah tersedia pada *database software* seperti ditunjukkan pada Gambar.19.



Gambar.20 Parameter material *Silica Sand* pada database software

Hal lain yang diatur sebelum simulasi adalah berat cairan yang dapat dituang ke dalam cetakan *Bucket Teeth* di bengkel Foundry Polman yaitu 40 kg menggunakan ladle yang biasa digunakan untuk penuangan *Bucket Teeth*. Sehingga dilakukan pendekatan agar cairan yang disimulasikan pun memiliki berat yang tidak jauh berbeda dengan kondisi bengkel Foundry Polman. Dengan demikian, *casting design* direkayasa

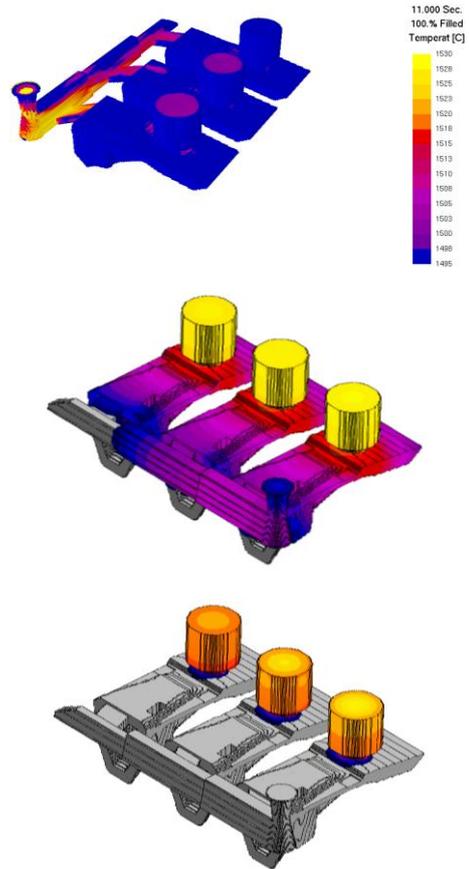
sehingga memiliki kapasitas 40 kg seperti pada Gambar.20.



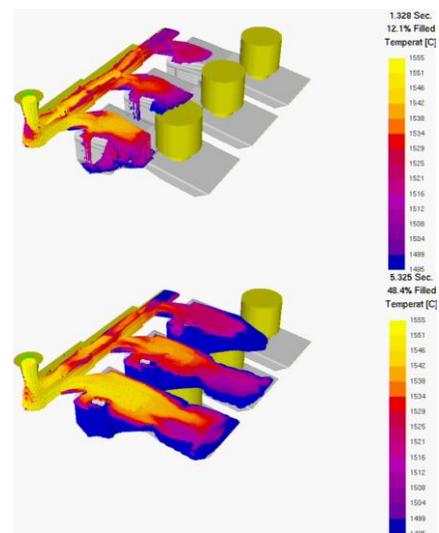
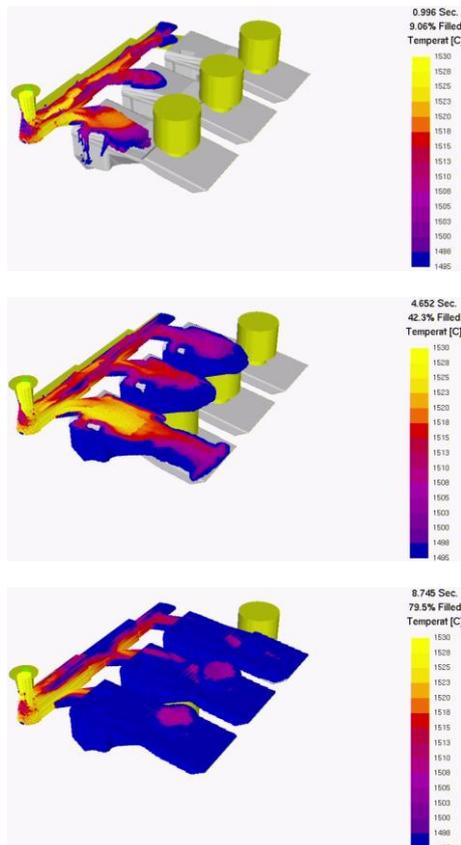
Gambar.21 Reayasa *casting design* untuk simulasi

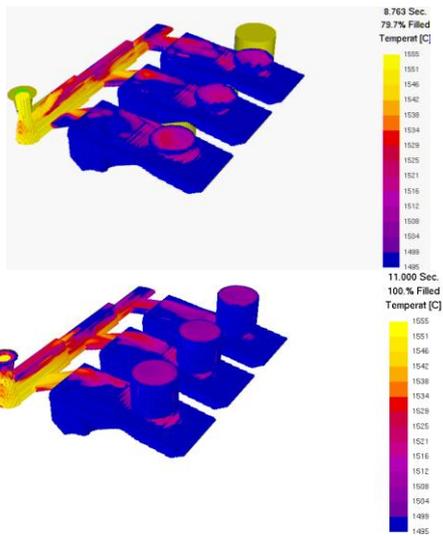
4.3. Proses Simulasi

Simulasi dimulai dengan proses pengisian cairan ke dalam rongga cetak dengan menghitung tekanan dan kecepatan aliran cairan logam menggunakan fasilitas *Flowcast*. Karena *Flowcast* bekerja secara *Computational Fluid Dynamics* (CFD), meningkatnya nilai viskositas cairan karena kontak dengan dinding cetakan pun diperhitungkan. Setelah proses pengisian 100% selesai, proses solidifikasi adalah tahapan selanjutnya. Proses ini berhenti hingga seluruh bagian benda membeku. Dibawah ini adalah visualisasi proses simulasi untuk setiap temperatur penuangan.

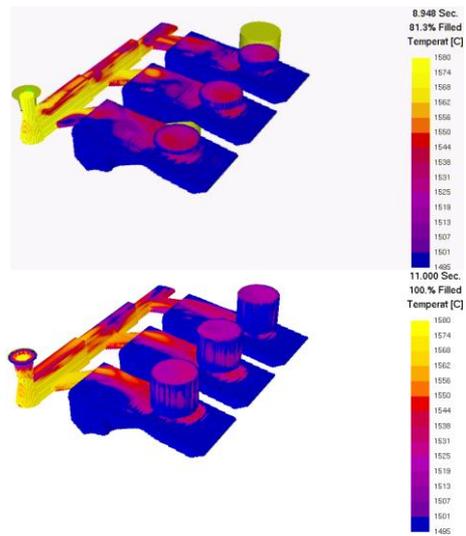


Gambar.22 Simulasi temperatur penuangan 1530 °C

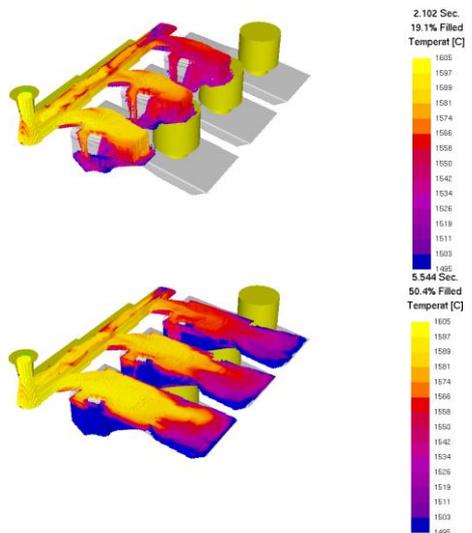
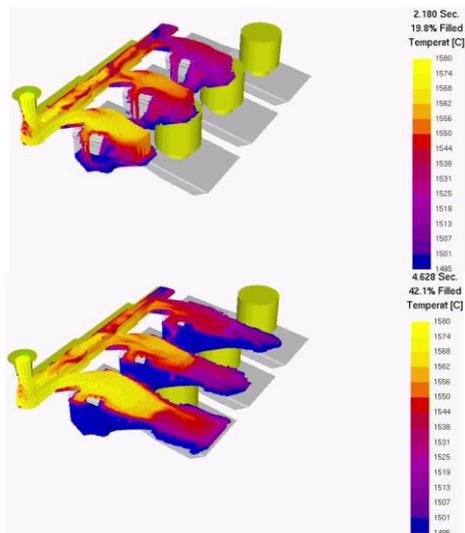


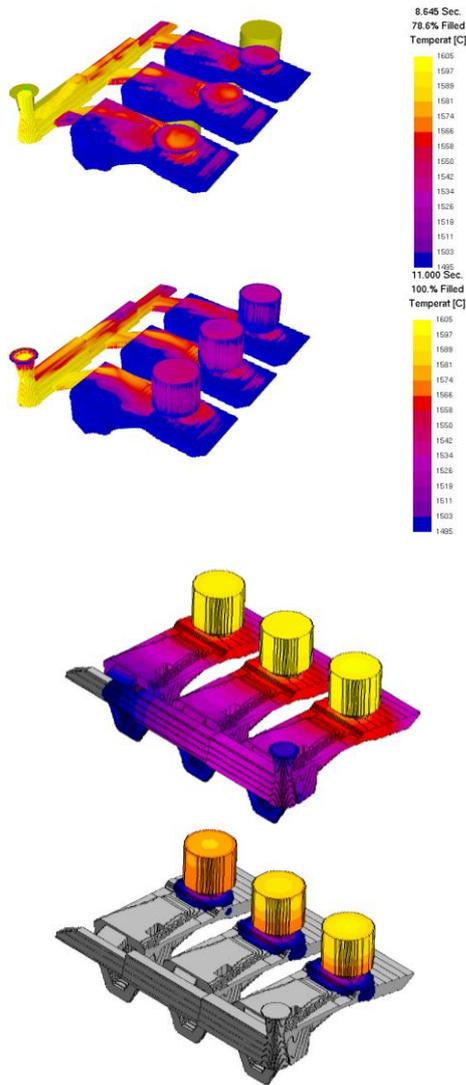


Gambar.23 Simulasi temperatur penguangan 1555 °C



Gambar.24 Simulasi temperatur penguangan 1580 °C





Gambar.25 Simulasi temperatur penuangan 1605 °C

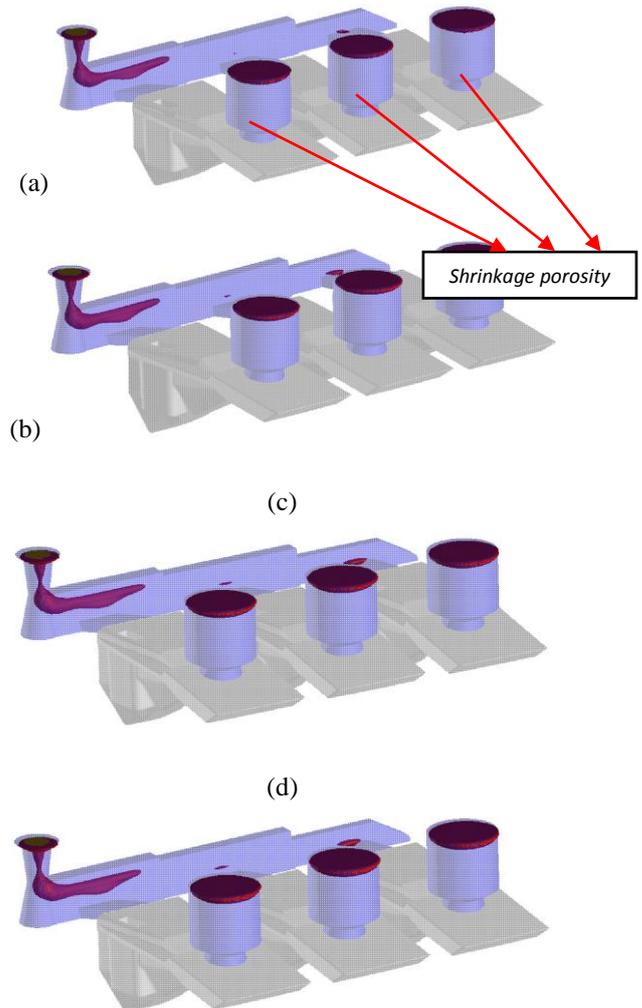
Proses pengisian cairan secara visual dapat terlihat memiliki aliran cairan yang tenang pada *runner*, artinya aliran cairan yang terjadi laminier sehingga potensi terjadinya oksidasi akibat pengisian cairan logam ke dalam rongga cetak kecil dan pada proses pengisian dari sekitar 80% terlihat ketiga benda memiliki ketinggian hampir sama kecuali pada **Gambar.21** karena ada bagian yang diperkirakan mengalami pembekuan lebih cepat dan pengisian tak penuh. Selain itu, pola pembekuan masing – masing temperatur penuangan pada **Gambar.21, 22, 23, dan 24** memiliki karakteristik yang sama. Temperatur pada benda yang berjarak paling jauh dari saluran turun lebih rendah dibandingkan dua benda lain. Hal ini akibat dari jarak tempuh cairan lebih jauh dari dua benda lain, serta kontak langsung cairan dengan dinding cetakan pun mempengaruhi penurunan temperatur akibat adanya perpindahan panas. Dengan demikian, pola pembekuan berurutan dari

benda 1 (paling jauh dari saluran turun), benda 2 (ditengah), dan benda 3 (paling dekat dengan saluran turun).

4.4. Analisis Hasil Simulasi

4.4.1. Analisis porositas

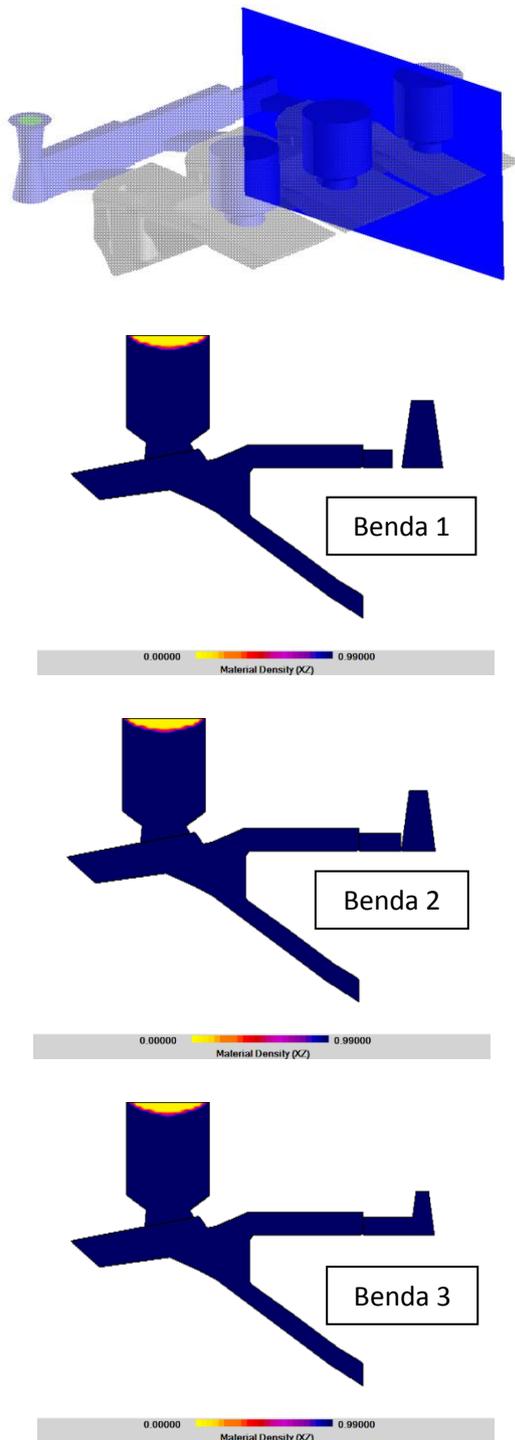
Analisis pertama yang diamati adalah melihat secara visual pada hasil *Plot Iso-Surface* (3D transparan) dengan *output criteria material density* untuk melihat *shrinkage porosity*. Berikut adalah hasilnya.



Gambar.26 Hasil Plot Iso-Surface Temperatur penuangan: (a) 1530 °C, (b) 1555 °C, (c) 1580 °C, (d) 1605 °C

Gambar.26 menunjukkan letak *shrinkage porosity* yang berada pada *casting*. Secara visual pada benda tidak terdapat *shrinkage porosity* (*sound casting*), artinya *casting design* untuk produk ini dapat diaplikasikan pada kondisi di lapangan. Bagian yang diamati adalah *shrinkage porosity* yang terletak pada penambah. Hasil *Plot Iso-Surface* pada masing – masing temperatur penuangan tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan sehingga sulit untuk mengetahui

seberapa besar perubahan volume yang diakibatkan oleh temperatur penguangan yang berbeda. Oleh karena itu, *shrinkage porosity* akan dianalisis secara 2D pada masing – masing potongan secara vertikal pada penambah ketiga benda.



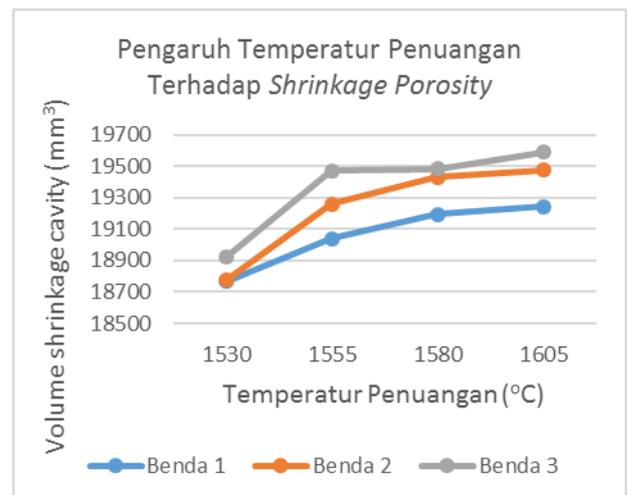
Gambar.27 Hasil Plot Cut Plane

Gambar.27 menunjukkan potongan gambar 2D beserta dengan *shrinkage porosity* masing – masing benda. Dari hasil potongan gambar 2D tersebut didapatkan *volume shrinkage cavity* (V_{sc})

dengan menggunakan bantuan *software* CAD. Adapun volume masing – masing benda berdasarkan temperatur penguangan ditampilkan pada **Tabel.4** dan perbandingannya secara sederhana ditunjukkan pada **Gambar.31**.

Temperatur Penguangan (°C)	Volume Shrinkage Cavity (mm ³)		
	Benda 1	Benda 2	Benda 3
1530	18764.83	18776.43	18921.45
1555	19039.29	19257.37	19471.15
1580	19192.29	19431.04	19484.36
1605	19244.62	19475.22	19587.19

Tabel.4 *Volume shrinkage cavity* berdasarkan temperatur penguangan



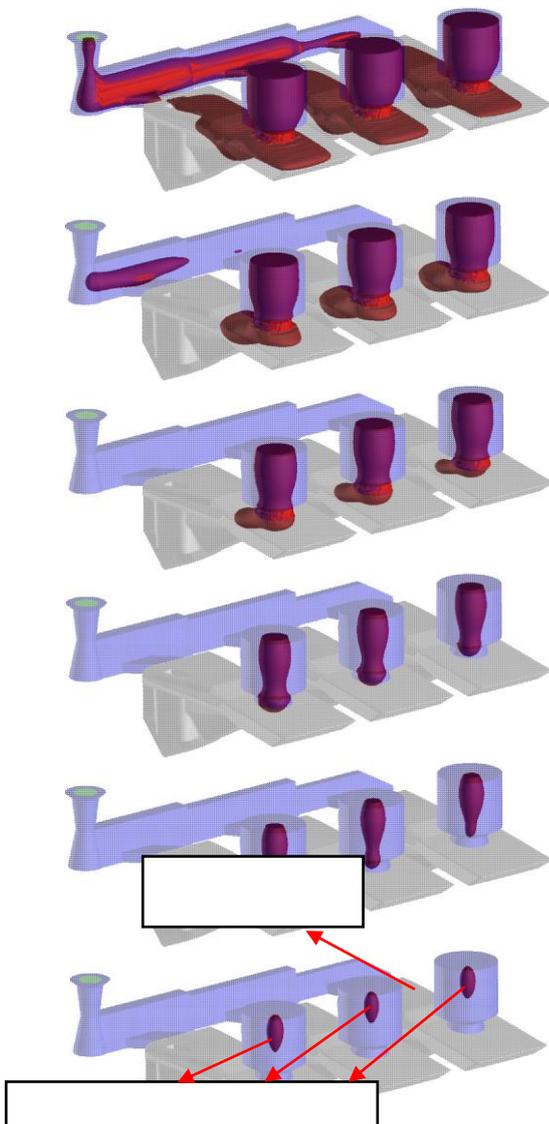
Gambar.28 Grafik pengaruh temperatur penguangan terhadap *shrinkage porosity*

Pada **Gambar.31** menunjukkan bahwa pengaruh temperatur terhadap *shrinkage porosity* meningkat seiring naiknya temperatur penguangan. Dalam hal ini, ketiga benda memiliki *volume shrinkage cavity* yang berbeda. Hasil pada keempat temperatur penguangan memiliki pola perubahan volume yang sama, yaitu semakin meningkat temperatur penguangan maka semakin meningkat pula *volume shrinkage cavity*, dan urutan *volume shrinkage cavity* dari yang terbesar ke yang terkecil selalu dari benda 3, benda 2, dan benda 1.

4.4.2. Analisis waktu fraksi solid kritis

Biasanya, analisis waktu fraksi solid kritis pada *software SOLIDCast* digunakan untuk

mengidentifikasi penyuplai cairan dari riser ke benda, apakah penyuplainya terputus atau tidak. Namun, yang akan dimanfaatkan untuk hal ini adalah untuk mengetahui seberapa lama setiap benda pada setiap casting mencapai temperatur kritis dimana cairan logam tidak dapat mengalir lebih lama. Sebelumnya telah ditentukan % fraksi solid kritis (% CFS) pada penentuan parameter yaitu 45 %, itu sama dengan temperatur 1467 °C, artinya cairan dibawah temperatur tersebut masih dapat mengalir. Sebelum masuk ke tahap mengidentifikasi lama waktu setiap benda mencapai temperatur fraksi solid kritis, akan ditunjukkan pada **Gambar.33** pola cairan logam dibawah temperatur fraksi solid kritis yang sama pada setiap casting.

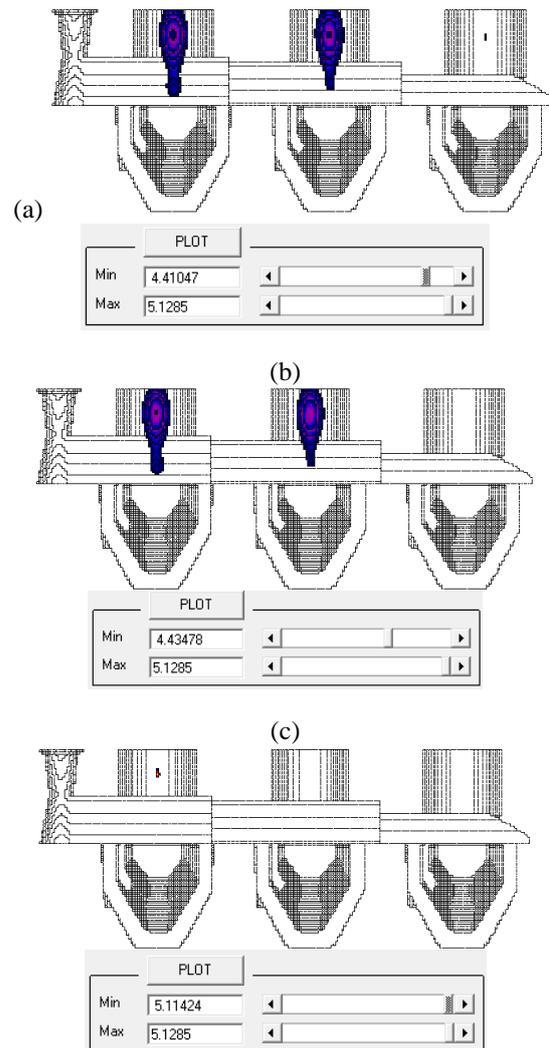


Gambar.29 Pola cairan logam dibawah temperatur fraksi solid kritis

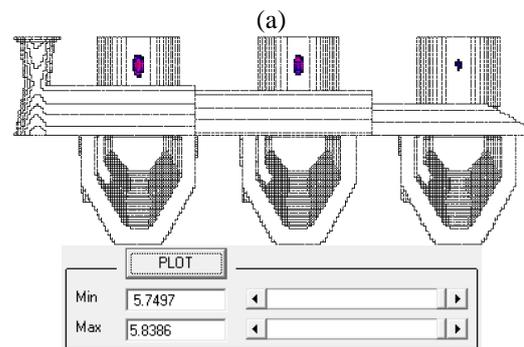
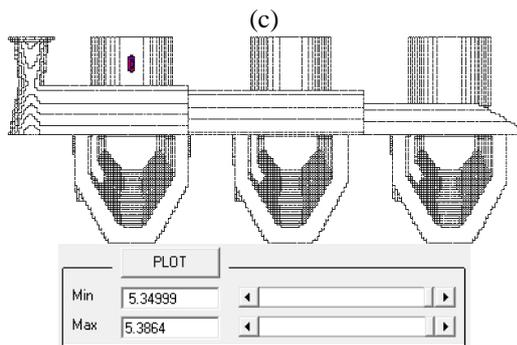
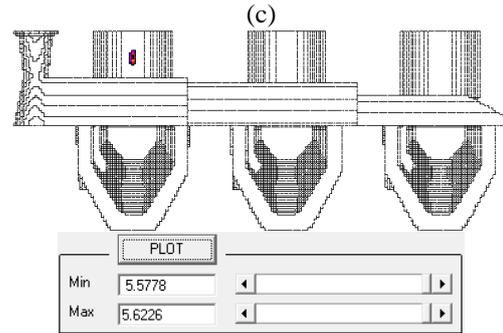
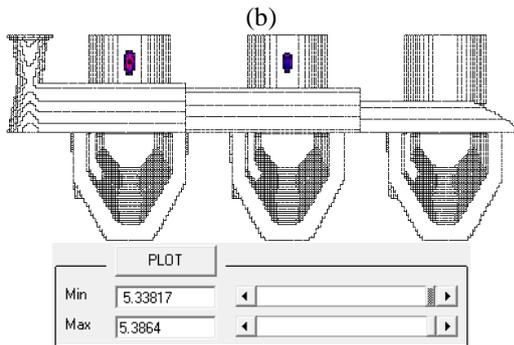
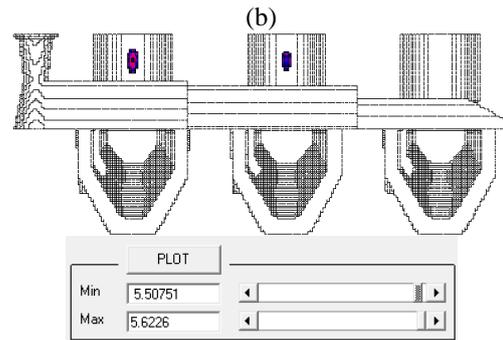
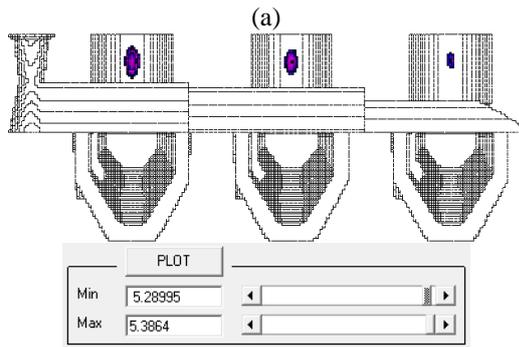
Gambar.33 menunjukkan pola cairan logam yang mengarah menuju riser seiring bertambahnya waktu dan tidak ada aliran cairan

yang terputus, sehingga prediksi tata letak *shrinkage porosity* pada pembahasan sebelumnya di analisis porositas dengan *output criteria material density* tepat karena cairan logam terakhir yang berada dibawah temperatur fraksi solid kritis berada pada riser.

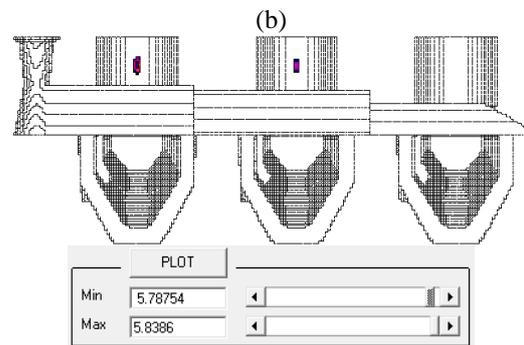
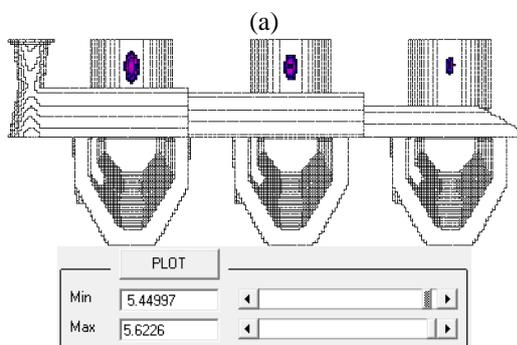
Pada pembahasan analisis porositas menunjukkan hasil, bahwa setiap benda pada setiap casting yang temperatur penuangannya berbeda memiliki *volume shrinkage cavity* yang berbeda pula. Oleh karena itu, akan dimanfaatkan *output criteria* waktu fraksi solid kritis (*Critical Fraction Solid Time*) pada fasilitas *quick plot* untuk melihat perbedaan waktu yang dimiliki setiap benda.



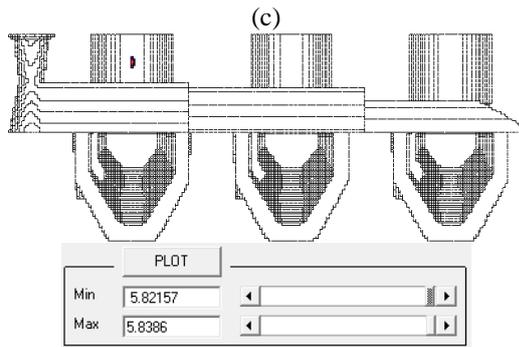
Gambar.30 Hasil *quick plot* temperatur penuangan 1530 °C : Sesaat sebelum mencapai temperatur fraksi solid kritis (a) benda 1, (b) benda 2, dan (c) benda 3



Gambar.31 Hasil *quick plot* temperatur penugangan 1555 °C : Sesaat sebelum mencapai temperatur fraksi solid kritis (a) benda 1, (b) benda 2, dan (c) benda 3



Gambar.32 Hasil *quick plot* temperatur penugangan 1580 °C : Sesaat sebelum mencapai temperatur fraksi solid kritis (a) benda 1, (b) benda 2, dan (c) benda 3

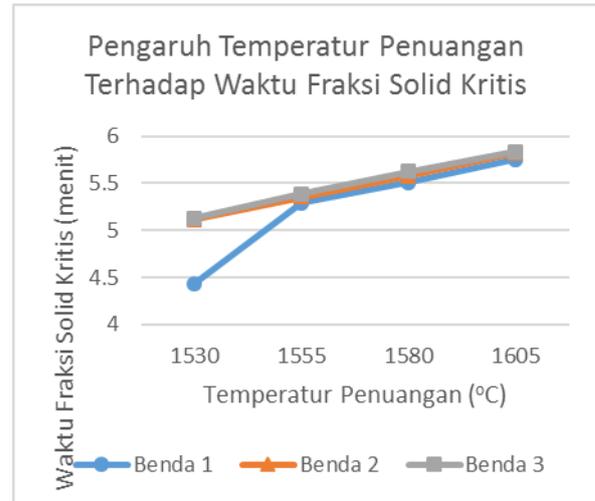


Gambar.33 Hasil quick plot temperatur penguangan 1605 °C : Sesaat sebelum mencapai temperatur fraksi solid kritis (a) benda 1, (b) benda 2, dan (c) benda 3

Pada **Gambar.34, 35, 36, dan 37** menunjukkan hasil *quick plot* dengan *output criteria* waktu fraksi solid kritis masing – masing benda pada setiap *casting* dengan temperatur penguangan yang berbeda. Satuan yang digunakan adalah menit, dimana di bawa gambar *casting* adalah gambar nilai yang diplot kemudian menampilkan visualisasi keadaan *casting* pada waktu tersebut. Pada **Gambar.34** menunjukkan ada bagian yang mencapai temperatur fraksi solid kritis lebih cepat dari bagian lain. Pada kondisi aktual, bagian ini diprediksi akan mengalami pengisian tak penuh sesuai dengan simulasi pada **Gambar.21**. Nilai masing – masing benda ditunjukkan secara jelas pada **Tabel.6** dan perbandingannya ditampilkan pada **Gambar.38**.

Temperatur Penguangan (°C)	CFS (menit)		
	Benda 1	Benda 2	Benda 3
1530	4.43478	5.11424	5.1285
1555	5.28997	5.34999	5.3864
1580	5.50751	5.57781	5.6226
1605	5.75784	5.82157	5.8386

Tabel.5 Lama waktu setiap benda untuk mencapai temperatur fraksi solid kritis

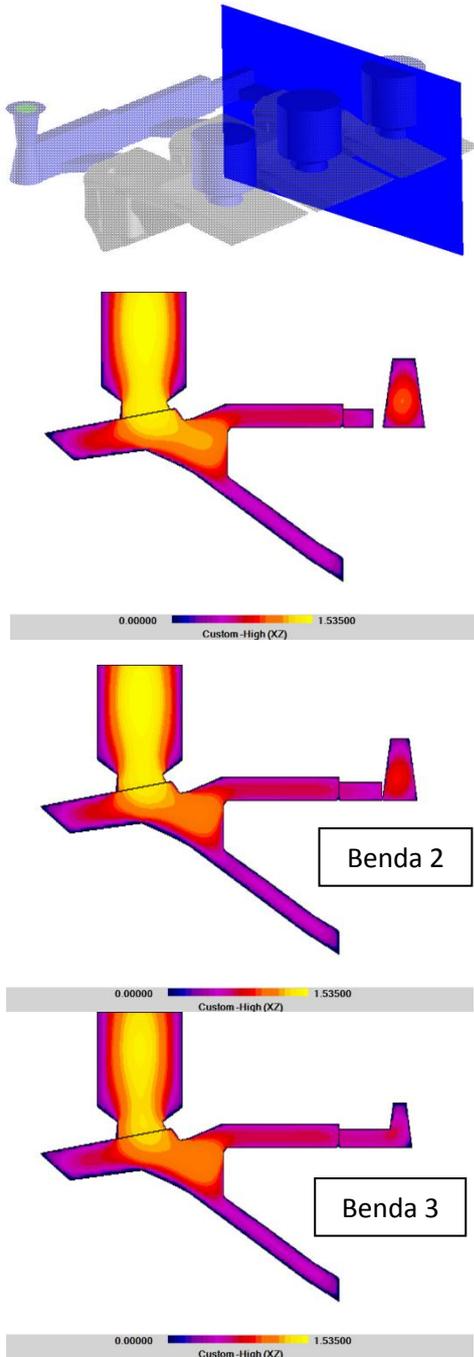


Gambar.34 Grafik pengaruh temperatur penguangan terhadap waktu fraksi solid kritis

Pada **Gambar.38** dapat diamati bagaimana temperatur penguangan dapat mempengaruhi waktu fraksi solid kritis. Semakin tinggi temperatur penguangan, maka semakin lama pula setiap benda untuk mencapai temperatur fraksi solid kritis. Pola grafiknya memiliki karakteristik yang sama dengan grafik pengaruh temperatur penguangan terhadap *shrinkage porosity*, yaitu ada kenaikan nilai seiring meningkatnya temperatur penguangan, artinya ada keterkaitan diantara keduanya. Karena adanya keterkaitan antara lama waktu setiap benda untuk mencapai temperatur fraksi solid kritis dengan *shrinkage porosity* yang terjadi, semakin lama benda untuk mencapai temperatur fraksi solid kritis, maka semakin besar pula *shrinkage porosity* yang terjadi. Dalam hal ini yang dimaksudkan masih dalam ruang lingkup temperatur penguangan yang telah disimulasikan

4.4.3. Analisis modulus thermal

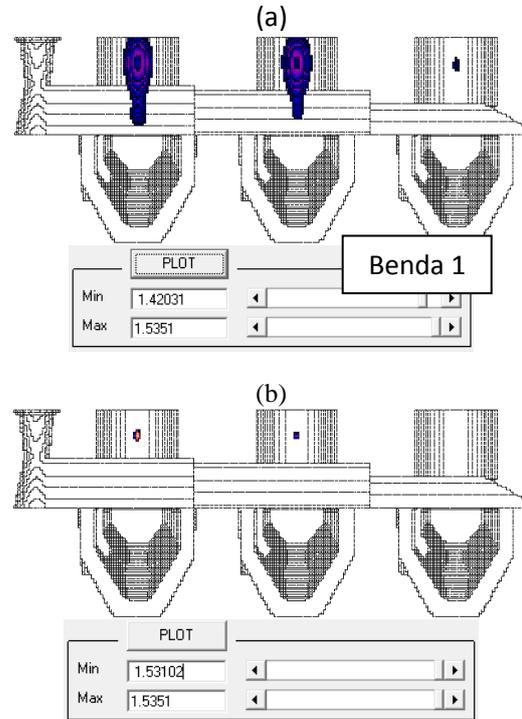
Menurut *Chorinov's rule*, bagian *casting* yang memiliki nilai modulus terbesar (rasio volume : luas permukaan) akan membeku terakhir ketika proses solidifikasi. Sehingga, perhitungan modulus digunakan sebagai acuan untuk menentukan dimensi *riser* yang nantinya dimaksudkan agar membeku paling terakhir. Dengan memanfaatkan konsep pembekuan terarah menuju *riser*, maka *riser* ditempatkan pada bagian *casting* dengan modulus terbesar dengan syarat modulus *riser* harus lebih besar dari benda. Dengan demikian, modulus pun menjadi cara sederhana untuk memprediksi tata letak *shrinkage porosity*. Oleh karena itu, analisis modulus *thermal* menjadi salah satu cara untuk memverifikasi hasil simulasi yang telah dibahas sebelumnya di analisis porositas. Berikut adalah modulus masing – masing benda pada setiap *casting*.



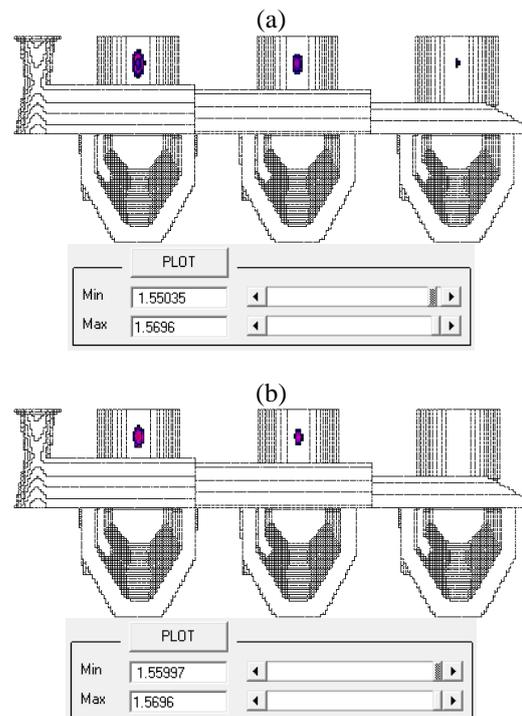
Gambar.35 Hasil Plot Cut Plane

Gradasi warna pada setiap benda dengan temperatur penuangan yang berbeda memiliki pola yang sama yaitu dari benda menuju riser selalu redup menuju terang. Warna terang menunjukkan modulus paling besar dibandingkan dengan warna yang lebih redup. Artinya setiap benda memiliki pembekuan terarah menuju riser. Hal ini didasari oleh *Chorinov's rule* yang menyebutkan bagian *casting* yang memiliki nilai modulus terbesar (rasio volume : luas permukaan) akan membeku terakhir ketika proses solidifikasi. Dengan demikian prediksi *shrinkage cavity* pada analisis porositas serta pola penyuplaian cairan logam pada analisis

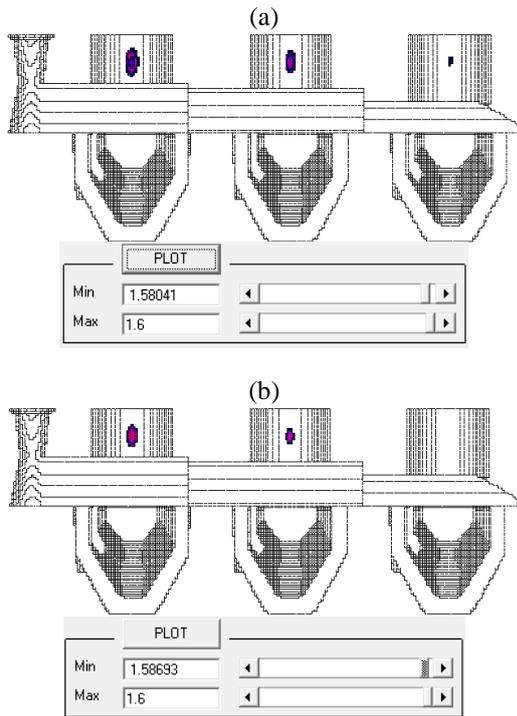
waku fraksi solid sejalan dengan hasil *output criteria custom-high*. Untuk mengetahui nilai modulus masing – masing benda pada setiap casting dengan temperaur penuangan yang berbeda digunakan fasilitas *quick plot* seperti yang ditunjukkan dibawah ini.



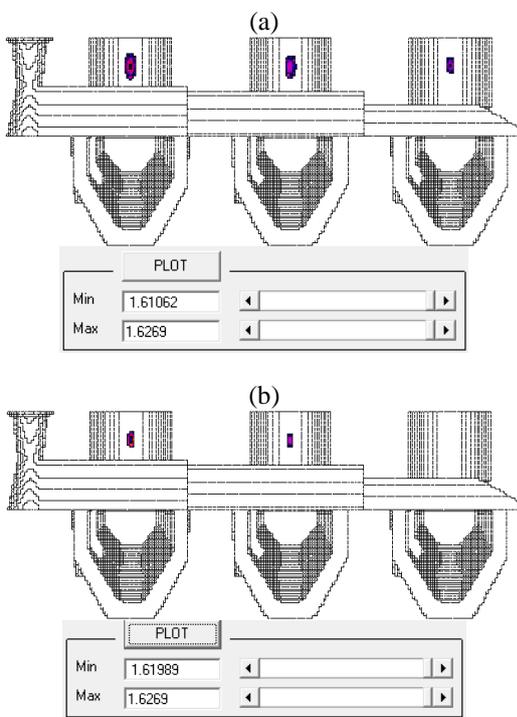
Gambar.36 Hasil *quick plot* temperatur penuangan 1530 °C : Modulus pada (a) benda 1 dan (b) benda 2 dan benda 3



Gambar.37 Hasil *quick plot* temperatur penuangan 1555 °C : Modulus pada (a) benda 1 dan (b) benda 2 dan benda 3



Gambar.38 Hasil *quick plot* temperatur penuangan 1580 °C : Modulus pada (a) benda 1 dan (b) benda 2 dan benda 3

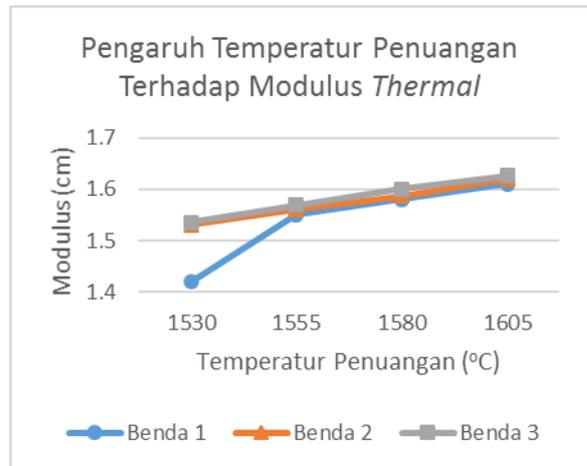


Gambar.39 Hasil *quick plot* temperatur penuangan 1605 °C : Modulus pada (a) benda 1 dan (b) benda 2 dan benda 3

Gambar.43, 44, 45, dan 46 menunjukkan hasil *quick plot* untuk mengetahui nilai modulus masing – masing benda pada setiap *casting* dengan temperatur penuangan yang berbeda. Satuan yang digunakan adalah *centimeters* (cm), dimana disamping gambar *casting* adalah gambar nilai yang diplot kemudian menampilkan visualisasi keadaan *casting* pada waktu tersebut. Nilai modulus benda 1 berada pada plot nilai minimal gambar (a). Sedangkan untuk nilai modulus benda 2 berada pada plot nilai minimal gambar (b). Nilai modulus benda 3 merupakan nilai maksimal modulus. Nilai modulus masing – masing benda ditunjukkan pada **Tabel.7** dan **Gambar.47** merupakan perbandingannya.

Temperatur Penuangan (°C)	Modulus (cm)		
	Benda 1	Benda 2	Benda 3
1530	1.42031	1.53102	1.5351
1555	1.55035	1.55997	1.5696
1580	1.58041	1.58693	1.6000
1605	1.61062	1.61989	1.6269

Tabel.6 Modulus masing – masing benda



Gambar.40 Grafik pengaruh temperatur penuangan terhadap modulus *thermal*

Pada **Gambar.47** menunjukkan pengaruh temperatur penuangan terhadap nilai modulus pada setiap benda. Pola grafik ini hampir sama dengan grafik yang berada pada analisis porositas dan analisis waktu fraksi solid kritis, dimana adanya kenaikan nilai setiap adanya kenaikan temperatur penuangan. Pada **Gambar.21** dan **34** menunjukkan korelasi dengan **Gambar.44** pada temperatur penuangan 1530 °C karena sama – sama diakibatkan oleh pengisian cairan tak penuh, dimana nilai modulusnya memiliki jarak yang jauh dibandingkan dengan modulus benda pada temperatur penuangan yang lain. Namun terlepas dari hal itu, pembahasan di atas menunjukkan keterkaitan antara ketiga analisis, dimana ketika

temperatur penuangan meningkat, akan mempengaruhi nilai modulus sehingga lama waktu setiap benda untuk mencapai temperatur fraksi solid pun bertambah panjang, akibatnya *volume shrinkage porosity* setiap benda meningkat tanpa menghasilkan masalah baru terkait *shrinkage porosity*

5. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan rancangan *casting* produk *Bucket Teeth* tipe *Flared Chisel* dengan *gating system* yang dibuat untuk menghasilkan aliran cairan logam yang laminar sesuai konsep *unpressurized system* dengan *runner* yang direduksi luas permukaannya serta *ingate* yang dibuat bersudut sehingga volume cairan yang masuk pada masing – masing benda naik ke permukaan secara bersamaan.

Rancangan *casting* produk *Bucket Teeth* tipe *Flared Chisel* ini diprediksi akan menghasilkan benda bebas dari *shrinkage porosity* (*sound casting*) berdasarkan hasil simulasi, sehingga dapat diaplikasikan untuk pembuatan produk di lapangan dengan rekomendasi temperatur penuangan dari 1555 °C hingga 1605 °C. Temperatur penuangan 1530 °C tidak direkomendasikan karena adanya potensi pengisian tak penuh saat penuangan cairan.

Selain itu, identifikasi ketahanan rancangan *casting* dari pengaruh temperatur penuangan terhadap *shrinkage porosity* yang terjadi dianalisis dengan menggunakan bantuan *software SOLIDCast 8.2.5* mendapatkan hasil bahwa pengaruh kenaikan temperatur penuangan yang telah ditentukan meningkatkan modulus *thermal* pada *casting*, sehingga lama waktu setiap *casting* untuk mencapai temperatur fraksi solid kritis menjadi lebih lama, akibatnya *volume shrinkage cavity riser* pada setiap *casting* pun meningkat tanpa menghasilkan masalah baru terkait *shrinkage porosity*.

DAFTAR PUSTAKA

- Beeley, P. (1988). *Foundry Technology*. Oxford OX2 8DP: Butterworth - Heinemann.
- Campbell, J. (1992). *Castings*. Oxford OX2 8DP: Butterworth - Heinemann.
- Casting (metalworking)*. (2014, Juli 9). Retrieved from Wikipedia:

- [http://en.wikipedia.org/wiki/Casting_\(metalworking\)#Theory](http://en.wikipedia.org/wiki/Casting_(metalworking)#Theory)
- Davis, J. R. (1998). *Metals Handbook Desk Edition*. ASM International.
- Foundries*. (2014, Juli 10). Retrieved from <http://emt-india.net/process/foundries/pdf/CD A4.pdf>
- Guthrie, J. J. (2005). Carbon and Low Alloy Steels. In *ASM Vol. 1 Properties and Selection : Irons, Steels, and High Performance Alloys* (pp. 249, 708, 710 - 711). ASM International.
- Monroe, R. (2005). Porosity in Castings. AFS Transactions.
- Putra, R. P. (2013). *Analisis Gaya Ekskavasi dengan Mengaplikasikan Model Mckyes pada Bucket Wheel Dredge*. Bandung: Program Studi teknik Mesin Institut Teknologi Bandung.
- Stefnescu, D. M. (1988). Design Consideration. In *ASM Handbook Vol. 15 Casting* (pp. 1248, 1257, 1268 - 1270, 1277, 1280 - 1290). ASM International.
- Training Course Workbook SOLIDCast 8.2.5*. (2011). Finite Solutions Incorporated.
- VDG-Merblatt F 252*. (1977). VDG Jerman.
- Wlodawer, R. (1966). *Directional Solidification of Steel Casting*. Pergamon Press.
- Yudiyanto, O. (2005). *Perancangan Tuangan II*. Bandung: Polman Bandung.