



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR – TL184834**

**STUDI EFEK PRE-HEAT, TEMPERATUR PENUANGAN,  
SERTA JUMLAH ISIAN CETAKAN TERHADAP FLUIDITAS  
DAN DEFECT PADA PERMANENT CASTING PISTON MAHLE  
EUTECTIC ALLOY M124 MENGGUNAKAN METODE ELEMEN  
HINGGA**

**MAR'I MUCHAMMAD**  
**NRP. 0251164000061**

**Dosen Pembimbing**  
**Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.**  
**Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI**  
**Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2020**





## **TUGAS AKHIR – TL 184834**

# **STUDI EFEK PRE-HEAT, TEMPERATUR PENUANGAN, SERTA JUMLAH ISIAN CETAKAN TERHADAP FLUIDITAS DAN DEFECT PADA PERMANENT CASTING PISTON MAHLE EUTECTIC ALLOY M124 MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

MAR'I MUCHAMMAD  
NRP. 0251164000061

Dosen Pembimbing  
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.  
Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT – TL 184834**

**STUDY OF PRE-HEAT, POURING TEMPERATURE, AND  
PATTERN PER MOLD EFFECTS TOWARD FLUIDITY  
AND DEFECT IN THE PERMANENT CASTING OF  
PISTON MAHLE EUTECTIC ALLOY M124 USING  
FINITE ELEMENT METHOD**

MAR'I MUCHAMMAD  
NRP. 0251164000061

Supervisors

Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.  
Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology and System Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020

*(This page is intentionally left blank)*

**STUDI EFEK PRE-HEAT, TEMPERATUR PENUANGAN,  
SERTA JUMLAH ISIAN CETAKAN TERHADAP  
FLUIDITAS DAN DEFECT PADA PERMANENT  
CASTING PISTON MAHLE EUTECTIC ALLOY M124  
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**MAR'I MUCHAMMAD**  
NRP 0251164000061

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D..... (Pembimbing I)
2. Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc..... (Pembimbing II)



**SURABAYA  
AGUSTUS 2020**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



**STUDI EFEK PRE-HEAT, TEMPERATUR PENUANGAN,  
SERTA JUMLAH ISIAN CETAKAN TERHADAP  
FLUIDITAS DAN DEFECT PADA PERMANENT  
CASTING PISTON MAHLE EUTECTIC ALLOY M124  
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**Nama** : Mar'i Muchammad  
**NRP** : 0251164000061  
**Departemen** : Teknik Material dan Metalurgi  
**Pembimbing I** : Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.  
**Pembimbing II** : Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.

**Abstrak**

*Ketidakseimbangan rasio ekspor-impor terhadap komponen mesin pembakaran dalam menjadi masalah Indonesia yang serius dalam mewujudkan kemandirian teknologi, tak terkecuali pada piston. Gravity permanent casting dinilai cocok diterapkan dalam pengecoran piston skala kecil-menengah sebagai langkah awal dalam mewujudkan harapan tersebut. Melalui simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga, perilaku aliran multifasa selama proses pemenuhan cetakan dan solidifikasi dapat dimodelkan. Sebagai tujuan utama dalam pembelajaran ini, dalam memprediksi kualitas proses dan produk coran, variasi yang diaplikasikan, yaitu temperatur cetakan 30°C, 200°C, dan 400°C, temperatur tuang 675°C, 725°C, dan 775°C, serta 1, 2, dan 4 isian cetakan. Hasilnya, pada simulasi pengecoran piston MAHLE eutectic alloy M124 berhasil membantu dalam memahami perilaku aliran multifasa. Terlebih lagi, perubahan variabel secara jelas berpengaruh terhadap perubahan fluiditas aliran, laju solidifikasi, dan pembentukan casting defect. Hasil terbaik didapatkan pada variasi 775°C-30°C dalam satu isian cetakan.*

**Kata Kunci:** *Casting defect, Fluiditas, Permanent casting, Piston MAHLE eutectic alloy M124, Solidifikasi.*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**STUDY OF PRE-HEAT, POURING TEMPERATURE, AND  
PATTERN PER MOLD EFFECTS TOWARD FLUIDITY  
AND DEFECT IN THE PERMANENT CASTING OF  
PISTON MAHLE EUTECTIC ALLOY M124 USING  
FINITE ELEMENT METHOD**

**Student Name** : Mar'i Muchammad  
**NRP** : 0251164000061  
**Department** : Material and Metallurgical Engineering  
**Supervisor** : Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.  
**Co-Supervisor** : Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc.

**Abstract**

*The imbalance of the export-import ratio of internal combustion engine component is one of the significant problems in order to achieve a technological independence in Indonesia, including piston. Gravity permanent casting is considered as a proper method to be applied in small-medium scale piston casting as an initial step for realizing these expectations. Through numerical simulation using finite element methods, the behaviour of the multiphase flow during the mold filling and solidification process can be modeled. The main objectives in this study, in predicting the quality of the process and casting product, the variations applied are pre-heat temperatures of 30°C, 200°C, and 400°C, while pouring temperatures are 675°C, 725°C, and 775°C, with 1, 2, and 4 pattern per mold. As the results, the MAHLE eutectic alloy M124 piston casting simulation succeeded to help in understanding a multiphase flow behaviour. Moreover, the variable changes are clearly seen to affect fluidity, solidification rate, and casting defect formation. The best result are shown at 775°C-30°C on one pattern per mold.*

**Keywords:** *Casting defect, Fluidity, Permanent casting, Piston MAHLE eutectic alloy M124, Solidification.*

*(This page is intentionally left blank)*

## KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmaanirrahiim, Alhamdulillahirobbil ‘Alamiin  
Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena atas ridho-Nya penulis dapat menyelesaikan penelitian Tugas Akhir dengan baik. Atas segala keterbatasan penulis, penulis sadar bahwa penulis tidak akan dapat menyelesaikan penelitian ini tanpa doa, bimbingan, motivasi, saran, dan bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada:

1. Orang tua, yang telah melaksanakan tugasnya sebagai orang tua dengan amat sangat baik dalam merawat dan mendidik anak-anaknya,
2. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D. dan Ibu Dian Mughni Fellicia, S.T., M.Sc. yang tidak pernah bosan dalam membimbing dan menasihati penulis,
3. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T, M.Eng selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS,
4. Bapak Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T. dan Ibu Amaliya Rasyida S.T., M.Sc. selaku dosen wali yang selalu menasihati dan menerima segala keluh kesah penulis selama menjadi mahasiswa,
5. Seluruh Bapak-Ibu dosen dan karyawan TU Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS yang dengan sabar memberikan ilmu kepada penulis. Semoga ilmu yang ibu-bapak berikan dapat menjadi amal jariyah kelak,
6. Teman-teman seperjuangan MT 18,
7. Keluarga Lembaga Dakwah Jurusan Ash-haabul Kahfi,
8. Teman-teman ITS Team Sapuangan,
9. Serta, teman-teman Forum Keluarga Mahasiswa Kota Batik.

Penulis menyadari bahwa laporan ini jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis berharap adanya kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Semoga laporan ini dapat berguna dan bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, 31 Maret 2020  
Penulis

Mar'i Muchammad

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Penelitian Yang Relevan.....	5
2.2 Piston .....	15
2.3 <i>Aluminium Alloy</i> .....	17
2.4 <i>MAHLE Eutectic Alloy M124</i> .....	22
2.5 <i>Gravity Permanent Mold Casting</i> .....	27
2.6 Sistem Saluran ( <i>Gating System</i> ) .....	28
2.6.1 <i>Sprue</i> .....	30
2.6.2 <i>Pouring Basin</i> .....	31
2.6.3 <i>Well Base</i> .....	32
2.6.4 <i>Runner</i> .....	33
2.6.5 <i>Ingate</i> .....	34
2.6.6 <i>Riser / Feeder</i> .....	35
2.7 <i>Casting Defects</i> .....	36
2.8 <i>Finite Elemen Method</i> .....	45
2.8.1 <i>Mold Filling</i> .....	46
2.8.2 <i>Solidifikasi dan Pendinginan</i> .....	53
2.8.3 <i>Mekanisme Pembentukan Defect</i> .....	56
2.8.4 <i>Niyama Criterion</i> .....	60

## **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

3.1	Diagram Alir Penelitian .....	63
3.2	Desain Penelitian .....	64
3.2.1	Variabel Bebas .....	64
3.2.2	Variabel Terikat.....	64
3.2.3	Variabel Kontrol.....	64
3.3	Simulasi.....	64
3.3.1	Model.....	65
3.3.2	<i>Meshing Geometry</i> .....	65
3.3.3	Material .....	66
3.3.4	<i>Boundary Condition</i> .....	66
3.3.5	<i>Operating Condition</i> .....	66
3.3.6	<i>Initial Condition</i> .....	67
3.3.7	<i>Monitor Residual</i> (Iterasi) .....	67
3.4	Geometri Benda Coran.....	67

## **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1	Hasil Simulasi <i>Filling Time</i> (Fluiditas).....	71
4.2	Hasil Simulasi <i>Solidification Time</i> .....	83
4.3	Hasil Simulasi Formasi <i>Defect</i> .....	106

## **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1	Kesimpulan .....	115
5.2	Saran .....	117

## **DAFTAR PUSTAKA ..... 119**

## **LAMPIRAN ..... 125**

<i>Lampiran 1</i> .....	125
<i>Lampiran 2</i> .....	138
<i>Lampiran 3</i> .....	143
<i>Lampiran 4</i> .....	162
<i>Lampiran 5</i> .....	170

## **BIODATA PENULIS ..... 311**



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b>	Mekanisme siklus mesin empat tak. ....	15
<b>Gambar 2. 2</b>	Skema temperatur kerja pada piston berbahan paduan aluminium. ....	17
<b>Gambar 2. 3</b>	Pergeseran posisi atom (dislokasi).....	18
<b>Gambar 2. 4</b>	Bentuk larutan padat (a) substitusi dan (b) intertisi. ....	19
<b>Gambar 2. 5</b>	Diagram fasa <i>binary system</i> aluminium/silikon. ....	20
<b>Gambar 2. 6</b>	Diagram fasa <i>binary system</i> aluminium/tembaga. ....	21
<b>Gambar 2. 7</b>	Diagram fasa <i>binary system</i> aluminium/magnesium. ....	21
<b>Gambar 2. 8</b>	Komponen sistem saluran pada <i>gravity</i> <i>permanent mold casting</i> . ....	28
<b>Gambar 2. 9</b>	Tipe-tipe sistem saluran pada proses pengecoran (a) <i>top gate</i> , (b) <i>bottom gate</i> , (c) <i>parting gate</i> . ....	29
<b>Gambar 2. 10</b>	Jenis-jenis <i>sprue</i> (a) <i>tapered sprue</i> dan (b) <i>straight sprue</i> . ....	30
<b>Gambar 2. 11</b>	Proporsi pouring <i>basin</i> . ....	32
<b>Gambar 2. 12</b>	Fenomena <i>vena contracta</i> pada sistem saluran pengecoran. ....	33
<b>Gambar 2. 13</b>	Dimensi runner (a) <i>wide shallow runner</i> dan (b) <i>square runner</i> . ....	34
<b>Gambar 2. 14</b>	Desain <i>multiple ingate</i> pada (a) pelat persegi tipis dan (b) silinder <i>hollow</i> . ....	35
<b>Gambar 2. 15</b>	Proses terjadinya <i>shrinkage cavity</i> . ....	35
<b>Gambar 2. 16</b>	Potongan area segitiga terhadap lingkaran. ....	46
<b>Gambar 2. 17</b>	Gradien distribusi tekanan. ....	48
<b>Gambar 2. 18</b>	Gaya gesek pada dua lapisan fluida. ....	49
<b>Gambar 2. 19</b>	Skema aliran fluida (a) <i>no-slip boundary</i> <i>condition</i> dan (b) <i>slip boundary condition</i> . ....	50

<b>Gambar 2. 20</b>	Type soldifikasi (a) <i>progressive solidification</i> dan (b) <i>directional solidification</i> . .....	55
<b>Gambar 2. 21</b>	<i>Shrinkage porosity</i> pada dinding piston.....	56
<b>Gambar 2. 22</b>	<i>Surface tension</i> pada elemen <i>free surface</i> .....	60
<b>Gambar 2. 23</b>	Skema ilustrasi hubungan antara volume <i>shrinkage porosity</i> dengan kriteria Niyama.....	62
<b>Gambar 3. 1</b>	Diagram alir penelitian .....	63
<b>Gambar 3. 2</b>	Model persamaan aliran selama proses pengecoran.....	65
<b>Gambar 3. 3</b>	(a) Produk piston dan (b) terminologi piston .....	67
<b>Gambar 3. 4</b>	Cetakan piston MAHLE <i>eutectic alloy</i> M124 satu <i>pattern</i> .....	68
<b>Gambar 3. 5</b>	Cetakan piston MAHLE <i>eutectic alloy</i> M124 dua <i>pattern</i> .....	69
<b>Gambar 3. 6</b>	Cetakan piston MAHLE <i>eutectic alloy</i> M124 empat <i>pattern</i> .....	69
<b>Gambar 4. 1</b>	Potongan penampang kecepatan aliran sesaat memasuki <i>mold cavity</i> , variasi 675°C-400°C (a) s=210 serta (b) s=280 dan variasi 775°C-30°C, (c) s=210 serta (d) s=280, pada satu <i>pattern per mold</i> .....	80
<b>Gambar 4. 2</b>	Potongan penampang kecepatan aliran sesaat memasuki <i>mold cavity</i> , variasi 675°C-400°C (a) s=210 serta (b) s=280 dan variasi 775°C-30°C, (c) s=210 serta (d) s=280, pada dua <i>pattern per mold</i> .....	81
<b>Gambar 4. 3</b>	Potongan penampang kecepatan aliran sesaat memasuki <i>mold cavity</i> , variasi 675°C-400°C (a) s=390 serta (b) s=520 dan variasi 775°C-30°C, (c) s=390 serta (d) s=520, pada empat <i>pattern per mold</i> .....	81
<b>Gambar 4. 4</b>	Pembentukan fraksi solidus pada variasi satu <i>pattern per mold</i> (675°C - 30°C), (a)	

	soldifikasi akibat <i>splashing</i> dan(b) solidifikasi prematur. ....	102
<b>Gambar 4. 5</b>	Pembentukan fraksi solidus pada variasi dua <i>pattern per mold</i> (725°C - 30°C), (a) soldifikasi akibat <i>splashing</i> dan(b) solidifikasi prematur. ....	104
<b>Gambar 4. 6</b>	Pembentukan fraksi solidus pada variasi empat <i>pattern per mold</i> (775°C - 30°C).....	105
<b>Gambar 4. 7</b>	Laju pengisian dan laju fasa solid pada empat <i>pattern per mold</i> variasi 675°C-30°C. .....	111
<b>Gambar 4. 8</b>	Volume tetrahedron .....	112
<b>Gambar 4. 9</b>	Diagram kriteria Niyama terhadap total <i>shrinkage porosity</i> (%). ....	114

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b>	Daftar penelitian yang relevan.....	6
<b>Tabel 2. 2</b>	Komposisi kimia MAHLE <i>aluminium piston alloys</i> (persen massa).....	23
<b>Tabel 2. 3</b>	Perbandingan sifat mekanik MAHLE <i>aluminium piston alloys</i> M124 (cor) dan M124P (tempa).....	25
<b>Tabel 2. 4</b>	Klasifikasi cacat pada coran.....	37
<b>Tabel 2. 5</b>	Nilai batas kriteria Niyama terhadap material.....	61
<b>Tabel 3. 1</b>	Variabel bebas dan level kendali.....	64
<b>Tabel 3. 2</b>	Estimasi faktor pengkali biaya permesinan cetakan.....	66
<b>Tabel 3. 3</b>	Terminologi piston paduan aluminium.....	68
<b>Tabel 4. 1</b>	Hasil simulasi nilai <i>filling time</i> pada variasi temperatur tuang dan temperatur cetakan dalam satu <i>pattern per mold</i> .....	71
<b>Tabel 4. 2</b>	Hasil simulasi nilai <i>filling time</i> pada variasi temperatur tuang dan temperatur cetakan dalam dua <i>pattern per mold</i> .....	74
<b>Tabel 4. 3</b>	Hasil simulasi nilai <i>filling time</i> pada variasi temperatur tuang dan temperatur cetakan dalam empat <i>pattern per mold</i> .....	77
<b>Tabel 4. 4</b>	Hasil simulasi nilai <i>solidification time</i> pada variasi temperatur tuang dan temperatur cetakan dalam satu <i>pattern per mold</i> .....	84
<b>Tabel 4. 5</b>	Hasil simulasi nilai <i>solidification time</i> pada variasi temperatur tuang dan temperatur cetakan dalam dua <i>pattern per mold</i> .....	90
<b>Tabel 4. 6</b>	Hasil simulasi nilai <i>solidification time</i> pada variasi temperatur tuang dan temperatur cetakan dalam empat <i>pattern per mold</i> .....	96

<b>Tabel 4. 7</b>	Persebaran cacat pada variasi temperatur tuang dan temperatur cetakan dalam satu <i>pattern per mold</i> . ....	107
<b>Tabel 4. 8</b>	Persebaran cacat pada variasi temperatur tuang dan temperatur cetakan dalam dua <i>pattern per mold</i> .....	108
<b>Tabel 4. 9</b>	Persebaran cacat pada variasi temperatur tuang dan temperatur cetakan dalam empat <i>pattern per mold</i> .....	109

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Sektor industri kendaraan bermotor merupakan salah satu sektor yang tidak pernah mengalami sepi peminat. Gabungan Industri Kendaraan Bermotor Indonesia (GAIKINDO) mencatat bahwa dalam kurun waktu tiga tahun terakhir (2017-2019), penjualan (*wholesales*) kendaraan bermotor selalu melebihi angka satu juta unit. Sebaliknya, besarnya penjualan justru mengakibatkan timbulnya masalah berupa ketidakseimbangan rasio ekspor-impor. Berdasarkan data, rasio ekspor-impor pada produk komponen mengalami perbedaan yang signifikan, yaitu 17.311.870 : 50.295.267, dibandingkan dengan CBU (*Completely Built Up*) 77.315 : 12.366 dan CKD Set (*Completely Knock Down*) 87.141 : 0 (GAIKINDO Ekspor-Impor, 2020). Data tersebut menjelaskan bahwa sebagian besar proses manufaktur pada industri kendaraan bermotor di Indonesia adalah proses perakitan (*assembly*).

Dalam upaya menekan angka tersebut, institusi pendidikan memegang peran penting dalam menciptakan teknolog sehingga percepatan kemandirian teknologi dapat terealisasikan (Puji, 2017). Pada, penelitian ini piston dipilih karena dianggap sebagai salah satu komponen kendaraan mesin pembarakan dalam yang paling krusial. Harapannya, hal tersebut dapat lebih mudah implementasikan pada komponen lainnya. Faktanya, dari sekian banyak produsen piston di Indonesia, hanya sekitar 5 dari 13 yang merupakan produsen lokal dengan berlabelkan OEM (*Original Equipment Manufacturer*).

Berdasarkan metode manufakturnya, piston dibagi menjadi dua jenis, yaitu piston coran dan tempa. Pada piston coran, desain *gating system* yang tidak sesuai dapat menginisiasi timbulnya cacat pada produk, berupa penyusutan, porositas, dan *hot tears*. Oleh karena itu, ketepatan dan keakuratan desain *gating system* adalah

suatu hal yang mutlak dalam proses ini, khususnya pada geometri yang kompleks seperti piston (Prabhakara, 2011).

Kebutuhan densitas daya yang tinggi, emisi yang rendah, dan tingginya efisiensi bahan bakar memaksakan adanya penelitian tentang peningkatan kualitas pada komponen ini. Namun, mengingat adanya keterbatasan waktu, material, serta biaya mendorong para peneliti melakukan optimalisasi tidak hanya berbasis eksperimental '*trial and error*' untuk memprediksi cacat yang ditimbulkan (Mandaliya, 2013). Mengarah ke konsep optimalisasi, para peneliti telah banyak memanfaatkan simulasi numerik dalam menganalisis cetakan (*internal flow*) dan produk jadi.

Hetu (2010) berhasil membuktikan keakuratan metode *Volume of Fluid* (VOF) melalui pengembangan simulasi aliran *free-surface* dengan mengadaptasi model *Eulerian Front Tracking*. Di samping itu, diperlukan pemahaman yang baik akan fenomena aliran multifasa seiring perkembangan simulasi digital. Mengingat bahwa proses pengecoran melibatkan perubahan *thermo-physical properties* (Laschet, 2004).

Sementara itu, pemrediksian proses terbentuknya dan formasi *defect* juga tidak kalah penting. Pada tahun 2008, D. Kakas berhasil menghindari cacat dengan menurunkan laju solidifikasi pada piston melalui penelitiannya. Selain itu, Zhang (2011) mengklaim bahwa peningkatan temperatur tuang dapat menghindari *hot tears*, sedangkan penambahan *pre-heat* berhasil menghindari *shrinkage defect* dalam komponen.

Oleh karena itu, penelitian ini bermaksud untuk memberikan referensi efek yang ditimbulkan oleh *pre-heat*, temperatur penuangan, serta jumlah isian cetakan selama proses pengecoran, secara eksklusif terhadap piston MAHLE *eutectic alloy* M124 dengan metode *permanent casting (gravity)*. Dari data hasil tersebut diharapkan dapat menjadi solusi pendekatan sebagai alternatif dalam menekan timbulnya cacat, siklus produksi, biaya produksi, serta mencapai kualitas piston yang memenuhi standar sebagai langkah mendukung kemandirian teknologi bangsa.



---

## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan latar belakang di atas, rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh *pre-heat* terhadap fluiditas, proses solidifikasi, dan probabilitas *defect* pada *permanent casting* piston MAHLE *eutectic alloy* M124 menggunakan simulasi metode elemen hingga?
2. Bagaimana pengaruh temperatur penuangan terhadap fluiditas, proses solidifikasi, dan probabilitas *defect* pada *permanent casting* piston MAHLE *eutectic alloy* M124 menggunakan simulasi metode elemen hingga?
3. Bagaimana pengaruh variasi jumlah komponen dalam satu cetakan terhadap fluiditas, proses solidifikasi, dan probabilitas *defect* pada *permanent casting* piston MAHLE *eutectic alloy* M124 menggunakan simulasi metode elemen hingga?

## 1.3 Batasan Masalah

Mempertimbangkan segala keterbatasan peneliti dalam melibatkan seluruh aspek maka batasan masalah dalam penelitian ini ditetapkan sebagai berikut:

1. Tinggi dan kondisi penuangan dianggap sebagai kondisi paling ideal,
2. Data komposisi dan sifat dari material MAHLE *eutectic alloy* M124 serta material cetakan dianggap sesuai standard yang mengacu pada *database software* yang digunakan,
3. Pengaruh perpindahan panas secara radiasi diabaikan,
4. Temperatur penuangan serta *pre-heat* dianggap tidak mengalami perpindahan panas pada awal proses pengecoran.

---

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan perumusan masalah di atas, tujuan yang diharapkan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh *pre-heat* terhadap fluiditas, proses solidifikasi, dan probabilitas *defect* pada *permanent casting* piston MAHLE *eutectic alloy* M124 menggunakan simulasi metode elemen hingga,
2. Menganalisis pengaruh temperatur penuangan terhadap fluiditas, proses solidifikasi, dan probabilitas *defect* pada *permanent casting* piston MAHLE *eutectic alloy* M124 menggunakan simulasi metode elemen hingga,
3. Menganalisis pengaruh variasi jumlah komponen dalam satu cetakan terhadap fluiditas, proses solidifikasi, dan probabilitas *defect* pada *permanent casting* piston MAHLE *eutectic alloy* M124 menggunakan simulasi metode elemen hingga.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Dengan dilakukan penelitian tersebut diharapkan membawa manfaat berupa:

1. Mampu memahami, menjelaskan, dan membandingkan pengaruh *pre-heat*, temperatur penuangan, serta jumlah komponen terhadap efek fluiditas, laju solidifikasi, dan probabilitas *defect*/cacat,
  2. Menganalisis fenomena aliran secara fisis dan mampu memahami korelasi antara laju solidifikasi terhadap timbulnya porositas,
  3. Mampu memberikan sumbangsih nyata sebagai alumni berupa desain cetakan yang *reasonable* kepada Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS, khususnya dalam praktikum mata kuliah dan penelitian di bidang teknologi pengecoran,
  4. Mampu menjadi generasi kreatif dalam menghadapi era teknologi digital serta mewujudkan kemandirian teknologi bangsa.
-

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Penelitian Yang Relevan**

Sebagai landasan dalam penelitian, diperlukan peninjauan terhadap berbagai penelitian sebelumnya yang relevan. Sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2.1 yang menjadi landasan pada penelitian yang berjudul “Studi Efek *Pre-heat*, Temperatur Penuangan, dan Jumlah Isian Cetakan Terhadap Fluiditas dan *Defect* pada *Permanent Casting* Piston MAHLE *Eutectic Alloy* M124 Menggunakan Metode Elemen Hingga”.

Mengutip dari beberapa landasan tersebut, penelitian ini memiliki hipotesis bahwa variasi temperatur cetakan dapat berpengaruh pada hadirnya *shrinkage porosity*. Di samping itu, peningkatan temperatur tuang juga dapat meningkatkan fluiditas pada logam cair, sebagaimana yang diketahui bahwa proses perpindahan panas pada aluminium relatif jauh lebih besar daripada baja sehingga kemungkinan terjadinya *mis run* (logam tidak memenuhi cetakan) pun akan semakin meningkat.

Berkaitan dengan hal tersebut, temperatur tuang dan cetakan memiliki peran dalam menentukan waktu solidifikasi. Untuk mendapatkan waktu solidifikasi yang panjang maka dibutuhkan selilih antara temperatur tuang dan cetakan yang besar. Hasilnya, kesesuaian antara temperatur tuang dan cetakan akan menghasilkan kualitas cor yang baik. Sebaliknya, apabila waktu solidifikasi terlalu singkat maka dapat memungkinkan terjadinya *mis run* dan solidifikasi lokal, begitu pun dengan waktu solidifikasi yang terlalu lama dapat mengakibatkan *hot spot* yang memicu terjadinya *macro shrinkage porosity* (Malhotra, 2016). Adapun penambahan variasi jumlah komponen per cetakan adalah untuk membandingkan keefektifan dalam setiap satu kali proses penuangan.

Tabel 2.1 Daftar penelitian yang relevan

No	Peneliti	Metode	Hasil
1	Jie Zhang, Kangwen Li, Haiwei Ye, Dongqi Zhang, Pengwei Yu (2011).	FEM dengan bantuan ProCast untuk menginvestigasi pengaruh temperatur cetakan, dan temperatur penuangan, dan laju penuangan terhadap tegangan pada <i>aluminium alloy impeller investment casting</i> .	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Peningkatan temperatur awal cetakan dari 300°C–400°C berhasil menghindari cacat akibat penyusutan.</li> <li>2. Semakin tinggi temperatur tuang maka <i>maximum effective stress</i> akan berkurang. Hal tersebut dapat menghindari dari cacat <i>hot tears/crack</i>.</li> <li>3. Perubahan laju aliran penuangan tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap formasi cacat.</li> </ol>
2	D. Kakas, L. Kovacevic, P. Terek (2008).	Studi komparasi simulasi dengan eksperimental pada porositas pengecoran piston berbahan paduan aluminium. Variasi yang dilakukan adalah lebar <i>feeder / side riser</i> dan <i>chill</i> .	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Variasi lebar <i>feeder</i> 5mm dengan penambahan <i>chill</i> menghasilkan zona yang memiliki risiko <i>shrinkage porosity</i> yang besar pada dinding piston. <i>Solidification time</i> yang dihasilkan adalah 11,4 detik.</li> </ol>

No	Peneliti	Metode	Hasil
2.			Simulasi dengan variasi lebar <i>feeder</i> 10mm dengan penambahan <i>chill</i> menghasilkan peningkatan laju solidifikasi, yaitu menjadi 10,4 detik. Namun tetap menyisakan kemungkinan terjadi porositas.
3.			Simulasi dengan variasi lebar <i>feeder</i> 10mm tanpa <i>chill</i> justru menurunkan laju solidifikasi menjadi 20,5 detik tetapi <i>shrinkage porosity</i> berhasil dihindari.
4.			Pada metode eksperimental, terbukti <i>shrinkage defect</i> dan <i>gas defect</i> terdeteksi pada dinding tipis piston setelah divalidasi menggunakan SEM dan EDS ( <i>Energy-dispersive X-ray spectroscopy</i> ).
5.			Penambahan <i>chill</i> yang tidak tepat dapat menginisiasi terjadinya solidifikasi lokal.

No	Peneliti	Metode	Hasil
3	Enesi Salawu, dkk. (2019).	<p>Simulasi komparasi pada <i>top dan bottom gating system</i> pada pengecoran <i>spur gear</i> menggunakan Pro-Cast.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pada sistem saluran atas dengan dua <i>runner</i> menghasilkan <i>pouring time</i> 9.195 detik, sedangkan pada sistem saluran bawah 9.320 detik.</li> <li>2. Pada sistem saluran atas dengan tiga <i>runner</i> menghasilkan <i>pouring time</i> 8.824 detik, sedangkan pada sistem saluran bawah 9.655 detik.</li> </ol>
4	Andri Willy Adianta, dkk. (2018).	<p>Simulasi terhadap variasi temperatur penuangan dan ketebalan pada pengecoran paduan aluminium silikon menggunakan cetakan pasir terhadap fluiditas, karakteristik aliran, dan cacat coran pada.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pada variasi temperatur tuang 785°C didapatkan kecepatan aliran tertinggi, ±0.145 m/s pada rongga 12mm serta distribusi temperatur terbaik, yaitu ±737°C.</li> <li>2. Pada temperatur tuang 735°C memiliki distribusi tekanan tertinggi, ±107.287 MPa pada rongga 5mm.</li> </ol>

No	Peneliti	Metode	Hasil
3.			<p>Cacat permukaan paling banyak ditemukan pada temperatur tuang 785°C, sedangkan paling sedikit pada temperatur tuang 685°C.</p> <p>4. Fluiditas terbaik terbentuk pada temperatur 785°C dimana rongga dengan ketebalan 12mm, 9mm, 7mm, 5mm dan 3 mm terisi penuh dan hanya pada 1 mm yang tidak terpenuhi atau hanya sampai 181.4mm dari 250mm.</p>
5	<p>Rizal Mahendra Pratama dan Soeharto (2012).</p>	<p>Studi eksperimental pada pengecoran piston toroidal dengan variasi <i>gating system</i>; <i>top gating, bottom gating</i>, dan <i>parting line gating</i> pengecoran pasir terhadap presensi porositas.</p>	<p>1. Porositas paling rendah didapatkan pada <i>parting line gating system</i>, tetapi pada tipe saluran ini memiliki penyusutan yang paling besar pada dinding piston daripada hasil coran jenis saluran lainnya.</p>

No	Peneliti	Metode	Hasil
6	Jean-Francois Hetu dan Florin Ilinca (2010).	Optimalisasi FEM pada simulasi 3D dengan menggabungkan fenomena <i>mold filling</i> dan solidifikasi pada pengecoran piston.	<ol style="list-style-type: none"> <li data-bbox="236 225 468 730">1. Penggabungan persamaan Navier-Stokes dan <i>Front Tracking</i> dinyatakan cukup efisien dalam menunjukkan fenomena pengisian cetakan melalui prediksi laju aliran, tekanan, dan gradien temperatur yang telah tervalidasi secara eksperimental.</li> <li data-bbox="505 225 807 730">2. Penelitian ini juga dapat memprediksi adanya deformasi pada <i>free surface</i> dan pengaruh gravitasi terhadap aliran. Pembuktian tersebut dinilai sangat lah penting dalam upaya menyelesaikan simulasi pada aliran konvektif dan <i>non-linear material behaviour</i> yang mewakili fenomena pada <i>gravity casting</i>.</li> </ol>



No	Peneliti	Metode	Hasil
3.		Metode <i>Streamline-Upwind Petrov-Galerkin</i> (SUPG) sangat stabil dalam memberikan bentuk halus pada aliran yang terkonveksi.	Penggabungan persamaan <i>Hyperbolic Front Tracking</i> dengan SUPG dapat menunjukkan fenomena difusi buatan selama proses simulasi pergecoran.
4.			1. Sistem saluran yang mengelilingi benda coran dapat mengurangi risiko terjadinya <i>hot crack</i> pada variasi temperatur tuang 1600°C, tetapi <i>yield</i> dan waktu pengisian meningkat. 2. <i>Filling time</i> meningkat seiring dengan penambahan temperatur tuang. 3. Pada temperatur 1600°C, penambahan material eksotermik dan modifikasi sistem saluran berhasil menurunkan <i>thermal stress</i> .
7	P. Prabhakara Rao, dkk. (2011).	FEM pada solidifikasi guna mengetahui kontur waktu-temperatur terhadap produk coran. Variasi yang ditambahkan adalah perubahan sistem saluran dari <i>side</i> ke <i>round</i> , dan temperatur tuang, dan penambahan material eksotermik.	

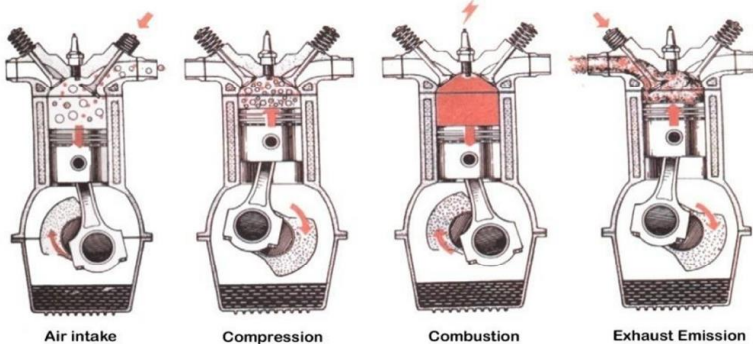
No	Peneliti	Metode	Hasil
8	Reddy & Rajanna (2009).	Menganalisis hasil eksperimen yang diperoleh dari proses desain eksperimental untuk meningkatkan performa (solidifikasi dan sifat mekanik coran) dari <i>gravity permanent casting</i> .	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Solidification time</i> meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur pnuangan, menurun dengan meningkatnya temperatur <i>pre-heat</i> cetakan.</li> <li>2. Unsur Si pada paduan dapat mereduksi <i>freezing range</i>, sedangkan unsur Mg memiliki pengaruh sebaliknya. Fluiditas yang tinggi terjadi pada paduan yang memiliki <i>freezing time</i> yang sempit.</li> </ol>
9	Faizal Nugraha Ramadhan (2017)	Menganalisis pengaruh temperatur tuang dan <i>pre-heat</i> pada piston M124 <i>permanent mold casting</i> secara eksperimental untuk mengetahui nilai kekerasan dan presensi cacat.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Temperatur tuang (700-1000°C) berpengaruh terhadap volume dan kekerasan coran piston. Semakin tinggi temperatur pnuangan maka penyusutan akan menurun. Begitu pun dengan kekerasan piston.</li> </ol>

No	Peneliti	Metode	Hasil
2.			<p><i>Pre-heat</i> (450°C) pada cetakan berpengaruh terhadap volume coran dan kekerasan piston. Volume piston hasil cor dengan <i>pre-heat</i> pada cetakan lebih tinggi jika dibandingkan dengan volume dari coran piston yang dibuat tanpa dilakukan <i>pre-heat</i>. Nilai kekerasan piston yang diberikan <i>pre-heat</i> turun seiring bertambahnya temperatur tuang, tetapi tidak terlalu signifikan.</p>
10	<p>S. Ferhathullah Hussainy (2015)</p>	<p>Mengkomparasikan pembentukan <i>defect</i> dan persebarannya melalui simulasi FEM dan divalidasi secara eksperimental.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Defect</i> dapat diprediksi melalui simulasi FEM selama proses <i> mold fillind</i>, solidifikasi, dan pendinginan.</li> <li>2. Modifikasi (perbesar) <i> riser</i> dan penempatannya, dapat mengurangi <i> defect</i> dan membuat pola aliran (temperatur dan kecepatan) homogen.</li> </ol>

No	Peneliti	Metode	Hasil
11	Denis Chemezov (2018)	<p>Simulasi pengecoran piston menggunakan material besi cor dan paduan aluminium dengan variasi laju penuangan, orientasi komponen, dan penambahan <i>side riser</i>.</p>	<p>3. <i>Pre-heat temperature</i> (200°C – 250°C) pada penelitian ini, berhasil menghindari terjadinya cacat <i>hot crack</i> dan <i>cold shut</i>. Hal tersebut dibuktikan dengan tidak adanya udara yang terdeteksi melalui <i>software</i> serta terpuhinya <i>mold cavity</i>.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Laju aliran yang terlalu cepat meningkatkan risiko <i>shrinkage porosity</i>. Sebaliknya, apabila terlalu lambat maka <i>cold shut</i> semakin meningkat.</li> <li>2. Penempatan orientasi komponen yang paling baik (tanpa <i>riser</i>) pada pengecoran piston adalah posisi terbalik (180°C), tetapi <i>shrinkage</i> terbentuk pada dinding (<i>skirt</i>) piston.</li> <li>3. Penambahan <i>side riser</i> tidak berhasil menghindari terjadinya <i>shrinkage porosity</i> pada <i>crown</i> piston.</li> </ol>

## 2.2 Piston

Piston merupakan salah satu komponen yang paling krusial pada mesin pembakaran dalam. Seperti layaknya sebuah jantung, piston bekerja dengan sangat cepat melakukan gerak translasi bolak-balik (atas-bawah) bagaikan memompa pada ruang bakar dengan memanfaatkan proses pembakaran yang selanjutnya dikonversikan menjadi energi mekanik. Dalam prosesnya, energi yang terkandung dalam bahan bakar diubah menjadi panas dan tekanan. Tekanan ini lah yang menyebabkan adanya pukulan (ekspansi) kemudian menyebabkan pergerakan piston ke bawah sehingga terjadi lah proses konversi energi.



**Gambar 2. 1** Mekanisme siklus mesin empat tak (Wijayanti, 2014).

Pada Gambar 2.1 diperlihatkan bagaimana prinsip kerja piston pada mesin konversi energi. Siklus mesin empat tak memiliki arti bahwa, dalam setiap satu putaran poros engkol (*crankshaft*) piston melakukan kerja sebanyak dua langkah, yaitu langkah isap dan langkah kompresi pada putaran pertama, kemudian langkah kerja dan langkah buang pada putaran kedua. Sedangkan pada siklus mesin dua tak, langkah isap dan kompresi terjadi pada setengah putaran *crankshaft*, selanjutnya langkah kerja dan langkah buang terjadi pada setengah putaran berikutnya, lebih jelasnya diuraikan sebagai berikut:

1. Langkah Isap (*Air Intake*)

Piston bergerak dari titik mati atas (TMA) menuju titik mati bawah (TMB). Katup isap yang terdiri atas campuran bahan bakar dengan udara akan terbuka, sedangkan katup buang tertutup. Campuran bahan bakar masuk ke dalam ruang bakar yang disebabkan oleh tekanan rendah pada ruang pembakaran.

2. Langkah Kompresi

Piston bergerak dari TMB ke TMA. Katup isap dan katup buang keduanya tertutup sehingga pada saat proses kompresi, tekanan dan suhu pada ruang bakar akan meningkat. Akibatnya akan mempermudah proses pembakaran.

3. Langkah Kerja (*Combustion*)

Piston bergerak dari TMA ke TMB. Katup isap dan katup buang masih dalam kondisi tertutup keduanya. Sesaat piston mendekati puncak TMA, busi akan memercikan api seketika campuran bahan bakar akan menghasilkan ledakan dan tekanan yang tinggi. Tekanan tersebut mengakibatkan dorongan piston ke arah TMB. *Crankshaft* akan mengalami gerak rotasi akibat dari pergerakan tersebut yang selanjutnya ditransmisikan melalui *flywheel* dan menggerakkan motor.

4. Langkah Buang (*Exhaust*)

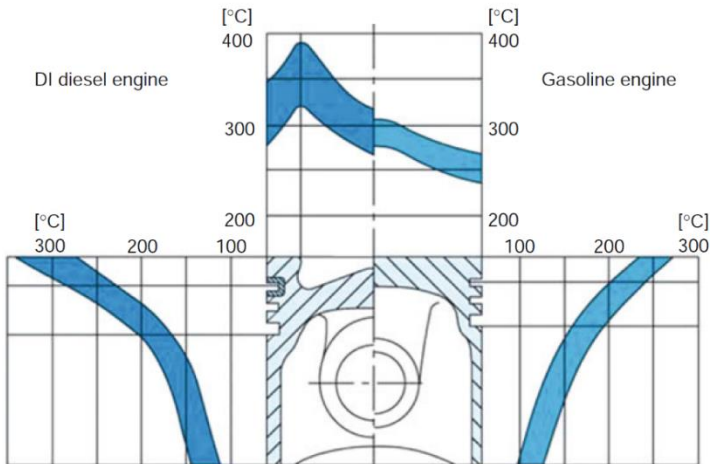
Piston bergerak dari TMB ke TMA. Pergerakan ini disebabkan oleh adanya pergerakan yang memanfaatkan inersia dari desain poros engkol. Gas-gas hasil pembakaran akan keluar dengan terbukanya katup buang dan piston kembali menuju ke atas (Wijayanti, 2014).

Zhao (2012) mengungkapkan bahwa pada saat beroperasi, piston mengalami tegangan dan deformasi akibat dari adanya pembebanan secara siklik berupa tekanan pada saat terjadinya pembakaran dan gesekan antara permukaan piston dengan *crankcase*, terlebih lagi hal ini berlangsung berulang kali serta terjadi dalam waktu yang singkat sehingga memicu munculnya kegagalan.

### 2.3 Aluminium Alloy

Adanya macam-macam kondisi pengoperasian pada mesin pembakaran dalam menginisiasi munculnya berbagai variasi dari tipe mesin. Hal ini lah yang menyebabkan kebutuhan penyesuaian bentuk piston terhadap mesin bakar. Penyesuaian tersebut dapat berupa konstruksi, bentuk, dimensi, material hingga proses manufakturnya. Piston dapat dikatakan sebagai komponen yang paling banyak menerima tekanan dalam ruang bakar, yaitu sekitar 180-200 bar dengan kecepatan mencapai 25 m/s (Gupta, 2015).

Di sisi lain, temperatur ruang bakar dapat mencapai 2.300°C pada saat tahap *combustion*, temperatur ini dapat dicapai dalam kurun waktu yang sangat singkat. Pada temperatur gas buang berkisar pada angka 600-850°C untuk mesin disel, sedangkan untuk mesin bensin mencapai 800-1.050°C. Pada Gambar 2.2 diperlihatkan skema rataan temperatur kerja pada piston berbahan paduan aluminium.

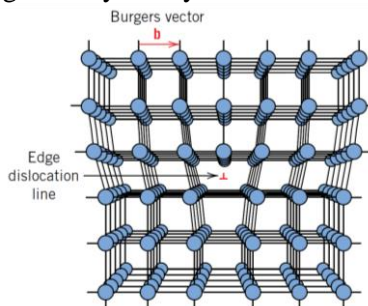


**Gambar 2. 2** Skema temperatur kerja pada piston berbahan paduan aluminium (Mollenhauer, 2010).

Dalam upaya mendukung kerja piston, selain dengan cara optimalisasi desain untuk memperbaiki distribusi termal, dibutuhkan pula material yang sesuai agar mampu bekerja pada temperatur dan tekanan ruang bakar. Pemilihan material sangat lah penting karena perubahan beban dari tiap tahap membutuhkan kekuatan statis dan dinamis yang baik. Disamping itu, *seizure resistance*, tahan aus, dan koefisien gesek yang rendah juga turut dipertimbangkan dalam meningkatkan umur kerja piston (MAHLE, 2016).

Dikenal sebagai salah satu logam yang ringan dan memiliki konduktivitas termal yang baik, aluminium dapat dikatakan sebagai salah satu material yang ideal untuk dijadikan sebagai bahan baku komponen piston (Munyao, 2014). Meskipun dalam wujud bukan paduannya logam ini memiliki nilai kekuatan dan ketahanan aus yang rendah. Namun, masalah ini telah terselesaikan, tepatnya pada 1906, dimana Alfred Wilm menemukan metode *precipitation hardening* untuk meningkatkan sifat paduan logam ini sehingga paduan aluminium dianggap memenuhi syarat sebagai bahan baku piston. Logam tersebut sekarang dikenal dengan nama duralumin (Polmear, 2004).

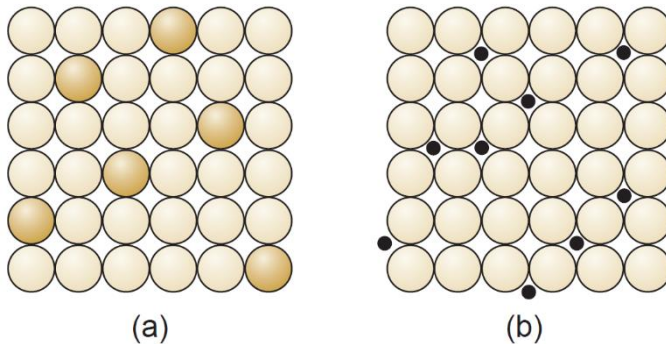
Pemahaman mengenai pengerasan logam dengan penambahan unsur paduan, diadopsi dari perilaku material selama terjadinya deformasi. Para peneliti mengembangkan konsep cacat pada kisi kristal dengan menyebutnya dislokasi.



**Gambar 2.3** Pergeseran posisi atom (dislokasi) (Callister, 2012).



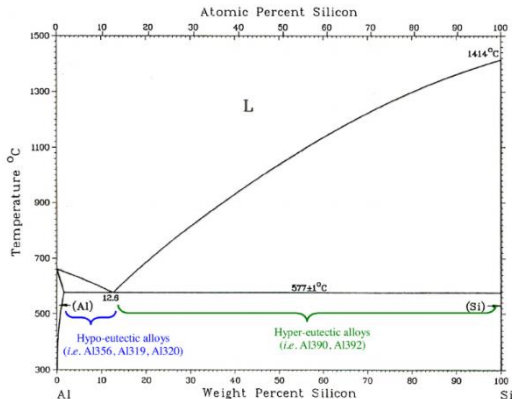
Pada Gambar 2.3 ditunjukkan bagaimana deretan atom yang tidak sejajar pada atom sebaris lainnya ketika diberi pembebanan. Hal ini dapat diselesaikan dengan cara membatasi pergerakan atom dengan kehadiran atom lain, seperti yang dijelaskan pada Gambar 2.4.



**Gambar 2.4** Bentuk larutan padat (a) substitusi dan (b) intertisi (Groover, 2012).

Unsur tambahan pada paduan dapat berperan sebagai atom substitusional apabila memiliki perbedaan ukuran diameter atom  $\pm 15\%$  terhadap atom utama, memiliki struktur kristal yang sama, memiliki afinitas elektron yang kecil, dan elektron valensi serupa, dimana logam bervalensi rendah akan cenderung melarutkan logam yang bervalensi lebih tinggi lainnya. Apabila tidak memiliki salah satu dari keempat syarat tersebut maka unsur akan bertindak sebagai atom intertisional. Umumnya, ada batas kelarutan suatu elemen terhadap paduan, ketika jumlah elemen terlarut melebihi batas kelarutan fasa kedua akan terbentuk dalam paduan. Istilah ini biasa disebut fasa intermediet. Fasa ini dapat berupa senyawa logam yang terdiri atas logam dan non-logam, seperti  $\text{Fe}_3\text{C}$  dan *intermetallic phase* seperti  $\text{Mg}_2\text{Pb}$ . Kontaminan *intermetallic phase* yang timbul dari *molten metal* akan terkonsentrasi pada batas-batas butir. (Groover, 2012).

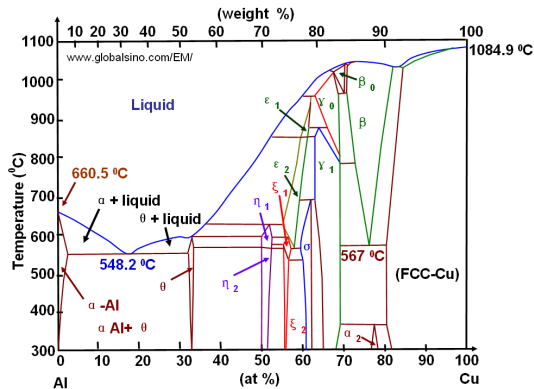
Material logam memiliki nilai kelarutan yang besarnya bergantung kepada naik-turunnya temperatur. Pada temperatur rendah atau dalam keadaan *solid state*, nilai kelarutannya sangat rendah. Batas kelarutan dari paduan logam tersebut dipresentasikan oleh diagram fasa melalui kurva pendinginan yang berasal dari *liquid state* hingga *solid state*. Pada Gambar 2.5 ditunjukkan diagram fasa dari *binary system* (dua material penyusun), yang terdiri atas aluminium/silikon. Pada 7% wt (*weight percent*) silikon yang ditunjukkan, garis *liquidus* berpotongan pada temperatur 620°C saat proses pendinginan. Setelah melalui titik perpotongan tersebut, campuran presipitat utama *solid solution*  $\alpha$  mulai terbentuk.



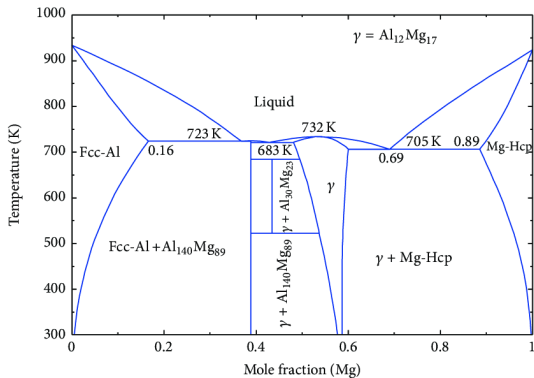
**Gambar 2.5** Diagram fasa *binary system* aluminium/silikon (Haghshenas, 2017).

Larutan pada (*solid solution*) terdiri dari kristal unsur paduan utama (aluminium) dengan unsur lainnya sebagai unsur sekunder, dalam hal ini adalah silikon. Unsur sekunder tersebut tersebar secara acak ke seluruh matriks aluminium. Pada saat pendinginan, presipitat silikon semakin banyak terbentuk hingga pada titik eutektik 577°C, yang mana fasa likuid sepenuhnya mengalami solidifikasi dan pada 12.6% wt silikon terbentuk campuran eutektik

sepenuhnya, sedangkan pada temperatur 200°C batas kelarutan Si terhadap Al adalah 0.01%. Paduan dengan kandungan Si < 12.6% disebut *hypoeutectic range* yang terdiri atas presipitat utama *solid solution α* dan eutektik AlSi, sedangkan untuk paduan dengan Si > 12.6% disebut *hypereutectic range* dengan kristal silikon sebagai presipitat utama dan eutektik AlSi (Haghshenas, 2017). Adapun untuk diagram fasa Al-Cu serta Al-Mg dapat dilihat pada Gambar 2.6 dan Gambar 2.7.



**Gambar 2. 6** Diagram fasa *binary system* aluminium/tembaga (Liao, 2018).



**Gambar 2. 7** Diagram fasa *binary system* aluminium/magnesium (Mezbahul-Islam, 2014).

---

#### 2.4 MAHLE *Eutectic Alloy M124*

Paduan *eutectic piston alloy M124* merupakan paduan klasik yang telah menjadi tolok ukur bagi perkembangan material *piston alloy* lainnya. Piston secara khusus terbuat dari paduan eutektik aluminum-silikon, meskipun ada juga yang terbentuk dalam komposisi hipereutektiknya. Paduan tersebut memiliki *castability* dan *forgeability* yang cukup baik. Piston dengan komposisi hipereutektik memiliki ketahanan aus yang lebih besar. Dalam pengembangannya, paduan M138 dan M244 lebih disukai untuk mesin piston dua tak, sedangkan paduan M126 kebanyakan digunakan di Amerika Serikat untuk mobil penumpang dengan mesin bensin.

Baru-baru ini, paduan M142, M145, dan M174+ telah dikembangkan sebagai material piston dengan proporsi unsur tembaga dan nikel yang lebih tinggi. Adanya penambahan unsur tersebut bertujuan untuk meningkatkan stabilitas termal dan ketahanan termal pada temperatur kerja yang tinggi. Sifat tersebut menyebabkan paduan ini sangat laku dipasaran untuk karakteristik mobil dengan performa yang tinggi. Konsekuensinya, penambahan unsur tembaga dan nikel memiliki beberapa kerugian, seperti dibutuhkan syarat lebih dalam proses pengecoran, kepadatan yang lebih, dan konduktivitas termal yang lebih rendah.

Pada Tabel 2.2 ditunjukkan komposisi kimia pada masing-masing paduan berstandar MAHLE. Tingkat fosfor yang rendah pada lelehan aluminium bertindak sebagai bahan nukleasi untuk silikon. Hal tersebut menghasilkan formasi kristal silikon yang bermanfaat dalam meningkatkan *machinability*. Dalam keterangan pada tabel, paduan M142 dan hipereutektik M145 digunakan untuk mesin bensin, sedangkan paduan M174+ untuk mesin disel. Paduan dengan penempaan, diberikan tambahan penamaan berupa simbol "P". Sedangkan, paduan M-SP25 adalah paduan aluminium bebas silikon dengan kekuatan yang tinggi digunakan khusus untuk piston yang dibuat dengan penempaan yang ditujukan untuk kendaraan balap.

---

**Tabel 2. 2** Komposisi kimia MAHLE aluminium piston alloys (persen massa) (MAHLE, 2016).

	<b>M124</b>	<b>M126</b>	<b>M138</b>	<b>M244</b>	<b>M142</b>	<b>M145</b>	<b>M174+</b>	<b>M-SP25</b>
	AlSi12 CuMgNi	AlSi16C uMgNi	AlSi18C uMgNi	AlSi25C uMgNi	AlSi12C u3Ni2M	AlSi15C u3Ni2M	AlSi12C u4Ni2M	AlCu2,5Mg 1,5FeNi
		g	g	g	g	g	g	g
Si	11-13	14.8-18	17-19	23-26	11-13	14-16	11-13	Maks. 0.25
Cu	0.8-1.5	0.8-1.5	0.8-1.5	0.8-1.5	2.5-4	2.5-4	3-5	1.8-2.7
Mg	0.8-1.3	0.8-1.3	0.8-1.3	0.8-1.3	0.5-1.2	0.5-1.2	0.5-1.2	1.2-1.8
Ni	0.8-1.3	0.8-1.3	0.8-1.3	0.8-1.3	1.75-3	1.75-3	1-3	0.8-1.4
Fe	Maks. 0.7	Maks.	Maks.	Maks.	Maks.	Maks.	Maks.	0.9-1.4
		0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	
Mn	Maks. 0.3	Maks.	Maks.	Maks.	Maks.	Maks.	Maks.	Maks. 0.2
		0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	
Ti	Maks. 0.2	Maks.	Maks.	Maks.	Maks.	Maks.	Maks.	Maks. 0.2
		0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
Zn	Maks. 0.3	Maks.	Maks.	Maks.	Maks.	Maks.	Maks.	Maks. 0.1
		0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	
Cr	Maks.	Maks.	Maks.	Maks.	Maks.	Maks.	Maks.	-
0.05		0.05	0.05	0.05	0.6	0.05	0.05	
V	-	-	-	-	Maks.	Maks.	Maks.	-
					0.18	0.18	0.18	
Zr	-	-	-	-	Maks.	Maks.	Maks.	-
					0.2	0.2	0.2	

---

Paduan piston eutektik M124 juga seringkali digunakan dalam keadaan butir halus (M124V). Butir paduan M124V dibuat sebagian halus dengan cara meningkatkan unsur sodium atau strontium dalam jumlah yang kecil. Keuntungan dari penghalusan butir ini agar sifat *machinability* yang didapat meningkat, tetapi kerugiannya adalah ketahanan aus lebih buruk dari struktur eutektik granular atau struktur mikro dari paduan hasil tempa, M124P, M124VP, dan M-SP25 yang membentuk struktur garis.

Sebelum dilakukan pengujian dengan variabel temperatur, spesimen telah diberikan perlakuan panas berupa *artificial aging* pada temperatur uji untuk jangka waktu yang cukup lama. Prosedur ini ditujukan supaya terjadi persamaan dengan masa pakai piston saat dalam pengoperasian mesin, yang secara aktual lebih lama dari waktu pengujian. Dibandingkan dengan hasil coran, piston tempa menunjukkan kekuatan yang lebih tinggi dan deformalitas plastis yang lebih besar, seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 2.3. Artinya piston tempa lebih diuntungkan pada kondisi kerja di kisaran temperatur bawah hingga menengah kisaran 250°C. Batas atas yang dimaksud, ditujukan untuk kendaraan balap dan *sport* (MAHLE, 2016).

**Tabel 2.3** Perbandingan sifat mekanik MAHLE aluminium piston alloys M124 (cor) dan M124P (tempa) (MAHLE, 2016).

Sifat material	M124	M124P
Kekerasan HB	90-130	100-125
Kekuatan Tarik [MPa]	20 °C	300-370
	150 °C	250-300
	250 °C	80-140
	300 °C	50-100
	350 °C	-
Kekuatan Luluh [MPa]	20 °C	280-340
	150 °C	220-280
	250 °C	60-120
	300 °C	30-70
	350 °C	-
Regangan [%]	20 °C	< 1
	150 °C	1
	250 °C	3
	300 °C	20
	350 °C	30
		10

Kekuatan Fatik [MPa]	20 °C	90-110	110-140
	150 °C	75-85	90-120
	250 °C	45-50	45-55
	300 °C	-	30-40
	350 °C	20-25	-
Young's modulus [MPa]	20 °C	80.000	80.000
	150 °C	77.000	77.000
	250 °C	72.000	72.000
	300 °C	-	69.000
	350 °C	65.000	-
Konduktivitas Termal $\lambda$ [W/mK]	20 °C	145	155
	300 °C	-	165
	350 °C	155	-
	20 – 100 °C	19.6	19.6
	20 – 200 °C	20.6	20.6
Ekspansi Termal $\alpha$ [ $10^{-6}$ m/mK]	20 – 300 °C	21.4	21.4
	20 – 400 °C	22.1	-
	20 °C	2.68	2.68
		1	1
Densitas $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ] Laju Relatif Aus			



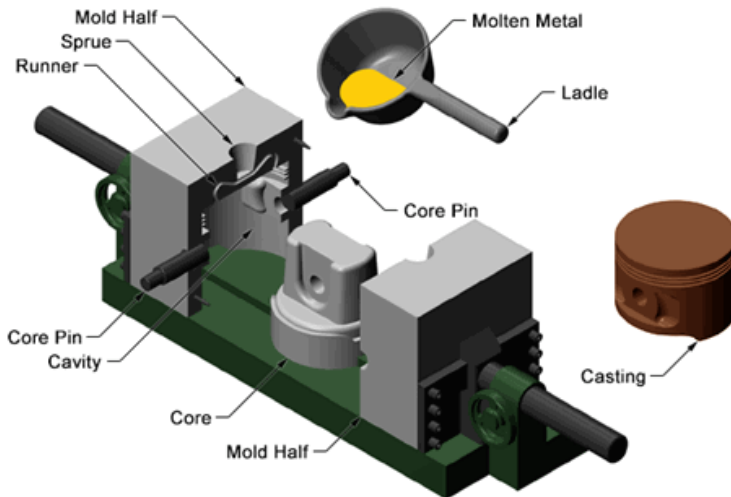
---

## 2.5 Gravity Permanent Mold Casting

*Permanent mold casting* sering disebut juga sebagai *gravity casting*. Metode ini dianggap memiliki keunggulan dalam biaya produksi, khususnya untuk aplikasi komponen besar, ketebalan yang seragam, dan rongga dalam yang rumit (ASM Handbook Volume 15, 1998). Metode pengecoran ini memanfaatkan gaya gravitasi untuk mengalirkan aliran logam masuk kedalam rongga cetakan. Perbedaan yang mencolok antara pengecoran jenis ini dengan pengecoran pasir adalah cetakan pada proses *permanent mold* bersifat *reusable (non expandable)*, sedangkan pada *sand casting* cetakan harus dirusak (*expandable*) ketika memisahkan produk dengan cetakan.

Hasil coran dari metode ini memiliki toleransi geometri yang sangat kecil terhadap desain. Artinya pada metode ini tidak diperlukan banyak proses permesinan. Selain itu, penggunaan cetakan berbahan dasar logam, seperti besi tuang dan baja memiliki nilai konduktifitas termal yang rendah sehingga dapat membentuk jarak cabang dendrit sekunder menjadi kecil. Pembentukan dendrit tersebut memberikan peningkatan sifat mekanik pada hasil coran.

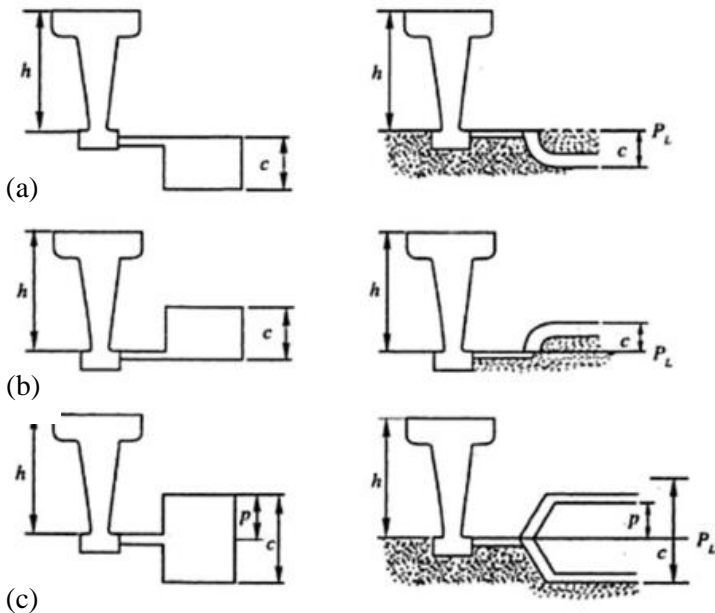
*Gravity casting* memiliki komponen saluran penyusun yang serupa dengan *sand casting*, seperti pada Gambar 2.8. Apabila proses pengisian terjadi terlalu cepat maka risiko terjadinya turbulensi dan terperangkapnya udara akan meningkat. Di sisi lain dikarenakan material paduan memiliki daya hantar termal yang tinggi maka akan meningkatkan probabilitas terbentuknya *premature solidification* sehingga saluran berisiko tertutup oleh logam (Schwam, 2004).



**Gambar 2.8** Komponen sistem saluran pada *gravity permanent mold casting* (CustomPartNet, 2020).

## 2.6 Sistem Saluran (*Gating System*)

Perancangan sebuah sistem saluran pada proses pengecoran bukanlah hal yang spesifik. Dalam proses perancangan ini, setiap komponen pada sistem saluran didesain untuk menghasilkan kualitas produk coran yang baik dan lulus uji. Dengan pertimbangan waktu dan biaya maka proses perhitungan sistem saluran biasanya dilakukan dengan bantuan simulasi numerik yang kemudian divalidasi dengan data eksperimental. *Gating system* secara umum digolongkan menjadi tiga. Penggolongan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.9.



**Gambar 2.9** Tipe-tipe sistem saluran pada proses pengecoran  
(a) *top gate*, (b) *bottom gate*, (c) *parting gate* (Rao, 2018).

### 1. *Top Gate*

Tipe saluran atas tidak cocok untuk material yang banyak mengandung dross pada fasa cairnya. Jenis saluran ini juga memiliki risiko terjadinya turbulensi dan penggerusan (erosi) yang tinggi pada permukaan cetakan. Di sisi lain, jenis saluran atas juga menjadi pertimbangan karena memiliki nilai *yield casting* yang tinggi yang hanya memerlukan sedikit komponen saluran.

### 2. *Bottom Gate*

Salah satu keuntungan pada saluran tipe bawah adalah dapat meminimalisir terjadinya penggerusan pada cetakan. Selain itu, laju aliran pada saluran ini juga lebih mudah dikendalikan sehingga turbulensi aliran logam dapat

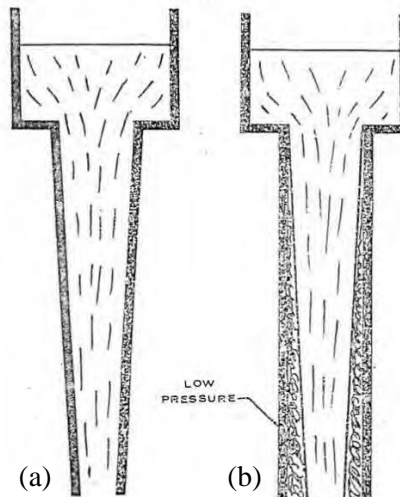
dihindari. Namun, tipe ini memiliki distribusi termal yang kurang baik. Oleh karena itu dikembangkan *side gate* sebagai alternatif untuk menyeragamkan temperatur.

### 3. *Parting Gate*

Tipe saluran ini sangat cocok digunakan untuk pengecoran pasir dengan memanfaatkan keuntungan dari penggabungan tipe *top gate* dan *bottom gate* yang memudahkan dalam proses pelepasan cetakan (Rao, 2018).

#### 2.6.1 *Sprue*

Saluran turun atau yang dikenal dengan istilah *sprue* merupakan saluran yang memiliki fungsi untuk mengontrol kecepatan aliran dengan cara mengecilkan luas penampang saluran. Adanya pengecilan penampang dimaksudkan untuk menghindari kehadiran udara yang terbawa oleh *molten metal* seperti yang ditampakkan pada Gambar 2.10. Oleh karena itu, *sprue* jenis *tapered* (meruncing) lebih disukai dari pada tipe *straight* (lurus).



**Gambar 2.10** Jenis-jenis *sprue* (a) *tapered sprue* dan (b) *straight sprue* (Fahrudin, 2015).

Besar laju aliran dapat diperkirakan dengan menggunakan persamaan kontinuitas (2.1) dengan catatan *top* dan *choke* dinyatakan dalam subskrip t dan c secara berurutan.

$$A_t V_t = A_c V_c \quad (2.1)$$

$$A_t = A_c \frac{V_c}{V_t} \quad (2.2)$$

Persamaan 2.2 kemudian di substitusikan dengan persamaan Bernoulli, dimana kecepatan sebanding dengan akar kuadrat dari energi potensial sehingga diperoleh Persamaan 2.3. Persamaan ini menyatakan korelasi antara luas area dengan tinggi *sprue*:

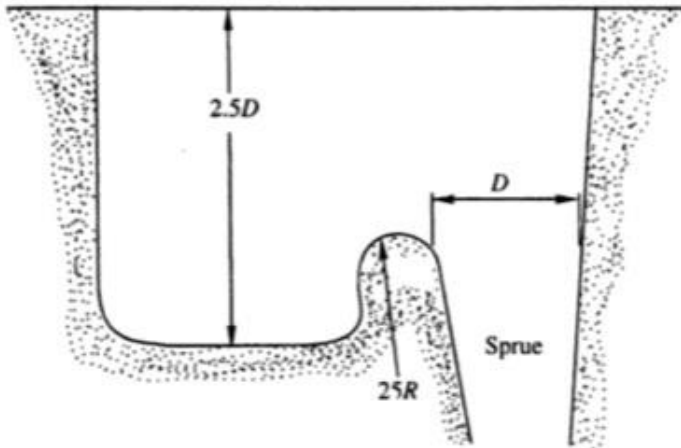
$$A_t = A_c \sqrt{\frac{h_c}{h_t}} \quad (2.3)$$

Dimana,

- $A_t$  = luas area *top sprue* (mm),
- $A_c$  = luas area *choke* (mm),
- $V_t$  = kecepatan aliran pada top *sprue* (mm/s),
- $V_c$  = kecepatan aliran pada *choke* (mm/s),
- $h_c$  = ketinggian *choke* (mm),
- $h_t$  = ketinggian *sprue* (mm).

### 2.6.2 *Pouring Basin*

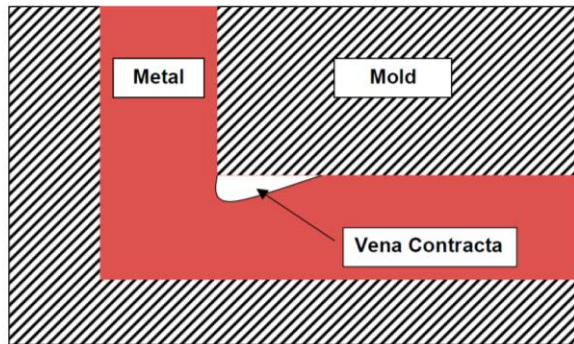
Fungsi utama dari komponen ini adalah sebagai penampung/*reservoir* sementara yang berguna untuk mengontrol kecepatan logam cair sebelum masuk secara langsung ke dalam *sprue*. Kecepatan aliran logam yang tinggi dapat menimbulkan erosi pada *sprue* serta membawa kotoran-kotoran masuk terbawa ke dalam cetakan (Fahrudin, 2015). Untuk memenuhi persyaratan tersebut, dimensi *pouring basin* dianjurkan memiliki standard proporsi kedalaman 2.5 kali dari diameter saluran masuk *sprue*, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.11.



**Gambar 2.11** Proporsi *pouring basin* (Rao, 2018).

### 2.6.3 *Well Base*

Dalam sebuah perancangan *gating system*, keberadaan *well base* tidak mutlak diperlukan. Penambahan *well base* dilakukan atas dasar terjadinya cipratan (*splashing*) ketika adanya perubahan arah dari *sprue* ke *runner*. Cipratan ini lah yang dikhawatirkan mengalami solidifikasi lebih cepat, bahkan lebih cepat dari aliran laminar. Dengan penambahan *well base*, aliran logam akan menghantam permukaan sehingga kehilangan energi kinetik sebelum memasuki *runner*. Hal ini juga merupakan salah satu cara pencegahan terjadinya fenomena *vena contracta*, seperti pada Gambar 2.12. Fenomena ini dapat menyebabkan aliran logam membawa udara dan kotoran ke dalam *mold cavity*.



**Gambar 2. 12** Fenomena *vena contracta* pada sistem saluran pengecoran (Schwam, 2004).

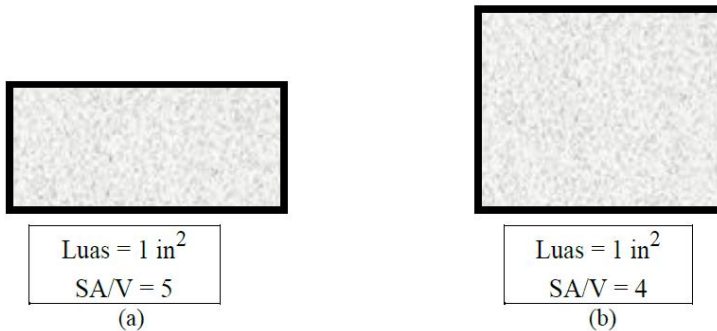
Dalam pendesainan *well base*, ketinggian dianjurkan dua kali lipat dari *runner* dan diameternya lebih besar dua kali lipat dari *sprue base*-nya. Hal ini dimaksudkan agar menghindari terjadinya tekanan arus langsung pada *molten metal*, dimana biasanya terjadi pada diameter *sprue* yang tidak berbentuk lingkaran (Schwam, 2004).

#### 2.6.4 *Runner*

*Runner* adalah saluran yang berfungsi untuk menghindari adanya aliran turbulensi dan *slag* sebelum memasuki *mold cavity*. Dengan pertimbangan tersebut, saluran *runner* didesain dengan sudut lebih dari  $90^\circ$  terhadap arah *sprue* serta dengan radius lebar. Hal ini ditujukan agar perubahan dapat terjadi secara bertahap sehingga *vena contracta* dapat dihindari. Selain itu, hal tersebut juga dapat mencegah terjadinya pembentukan lapisan oksida karena sifatnya yang reaktif jika terpapar atmosfer. Umumnya, *runner* memiliki bentuk berupa irisan seperti trapesium atau setengah lingkaran, sebab irisan tersebut dinilai sangat mudah dibuat untuk tipe sistem saluran terpisah (*parting line*) (Putra, 2019). Di samping itu, untuk menghindari terjadinya gas

yang terperangkap pada aliran logam cair akibat *vortex*, *runner* dianjurkan untuk tidak berbentuk silindris. Dalam beberapa kasus, penambahan *runner extension* terkadang juga dibutuhkan untuk menangkap aliran logam yang paling awal tepat sebelum masuk ke *mold cavity*, dimana aliran tersebut paling banyak mengandung lapisan oksida (Schwam, 2004).

Perbandingan *surface area*/volume menyatakan besar kecilnya *heat loss* dan *friction loss* yang diterima oleh aliran. Semakin besar SA/V maka semakin besar pula *heat loss* dan *friction loss*-nya (Fahrudin, 2015). Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.13.

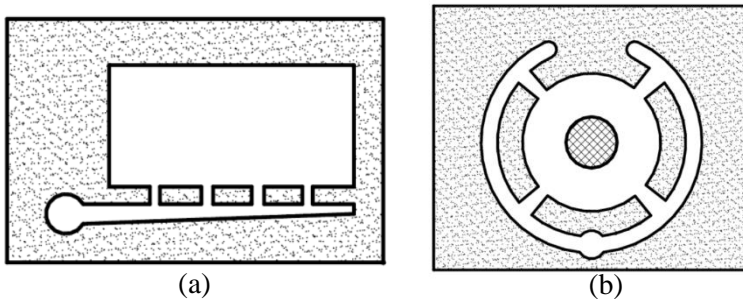


**Gambar 2.13** Dimensi *runner* (a) *wide shallow runner* dan (b) *square runner* (Putra, 2019).

### 2.6.5 *Ingate*

Setelah melewati *runner*, logam coran akan memasuki daerah yang biasa disebut *ingate*, sesaat sebelum masuk ke dalam rongga cetakan. Schwam (2004) mengatakan bahwa dalam beberapa desain sering ditemukan tidak adanya perbedaan antara batas *runner* dan *ingate*, dimana kedua geometri dari saluran ini memiliki bentuk dan ukuran yang sama. Namun, sejatinya kegunaan dari *ingate* adalah untuk mencegah terjadinya kontaminasi dalam rongga cetakan. Jumlah saluran ini dapat terdiri dari satu atau lebih, sesuai dengan pembagian rasio sistem saluran.



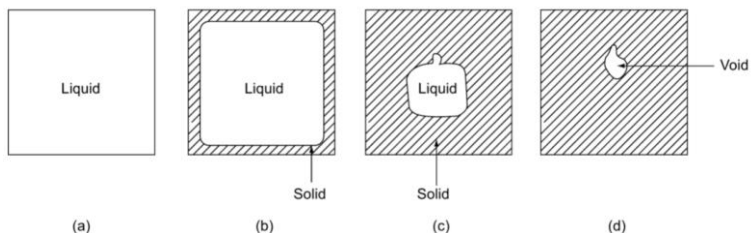


**Gambar 2.14** Desain *multiple ingate* pada (a) pelat persegi tipis dan (b) silinder *hollow* (Rao, 2018).

Pada Gambar 2.14 diperlihatkan desain *multiple ingate* sebagai upaya untuk mendapatkan solidifikasi yang seragam pada produk coran yang memiliki geometri besar dan kompleks. Selain itu, pada penampang *runner* dapat didesain semakin mengecil dengan tujuan sebagai pembatas jumlah aliran logam yang masuk ke dalam *mold cavity*.

### 2.6.6 Riser / Feeder

Menurut Schwam (2004), tujuan dari penambahan *riser* adalah sebagai tempat untuk menyediakan cadangan logam yang menyusut akibat proses solidifikasi. Aturan penambahan toleransi tersebut bergantung pada material coran.



**Gambar 2.15** Proses terjadinya *shrinkage cavity* (Rao, 2018).



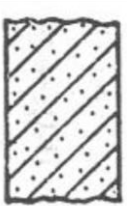
---

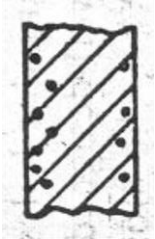
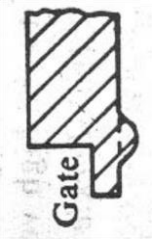
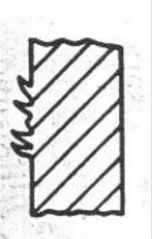
Gambar 2.15(a) menunjukkan telah terjadi proses pemenuhan cetakan oleh logam cair, kemudian proses solidifikasi (Gambar 2.15(b)) akan berlangsung pada seluruh permukaan yang cenderung tipis dan yang terpapar oleh atmosfer atau pun cetakan. Kemudian cairan logam secara bertahap akan kehilangan panas berdasarkan fungsi waktu (Gambar 2.15(c)) hingga pada akhirnya terjadi *shrinkage cavity* (Gambar 2.15(d)) akibat tidak adanya cadangan *molten metal* yang cukup (Rao, 2018).



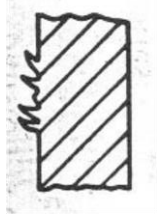
### **2.7 Casting Defects**


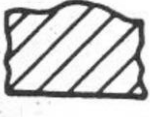
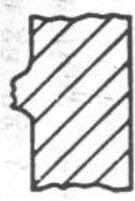

Adanya ketidaksesuaian antara material coran dengan kondisi pemrosesan (desain dan perhitungan) dapat menyebabkan cacat pada hasil coran. Meskipun dalam beberapa kondisi cacat tersebut dapat ditutupi oleh proses manufaktur lain, seperti pengelasan. Namun, kehadiran cacat coran tersebut akan sangat merugikan sifat material apabila formasi cacat coran tidak terdeteksi di dalam produk coran. Macam-macam cacat coran (*casting defects*) yang umum terjadi pada proses pengecoran antara lain *gas defect*, *shrinkage cavities*, *molding material defect*, *pouring metal defect*, serta *metallurgical defect*. Macam-macam cacat tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.4 (Rao, 2018).



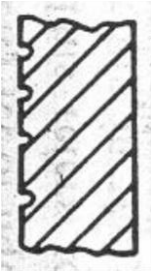
Tabel 2.4 Klasifikasi cacat pada coran (Rao, 2018).

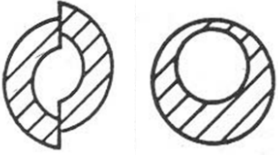
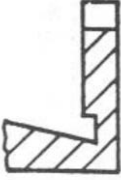
Cacat Coran	Keterangan	Tampak
<i>Gas defects</i>	Terbentuk akibat uap yang terperangkap di dalam coran akibat kondisi cetakan/core yang lembab, permeabilitas, dan sistem ventilasi yang buruk.	
<i>Open holes</i>	Terbentuk akibat uap yang terperangkap di permukaan coran akibat kondisi cetakan/core yang lembab, permeabilitas, dan sistem ventilasi yang buruk.	
<i>Air inclusions</i>	Terbentuk akibat udara atmosfer dan gas lainnya yang ikut terbawa masuk kedalam cetakan pada saat proses penuangan <i>molten metal</i> . Tingginya temperatur penuangan dapat meningkatkan kemampuan aliran logam dalam mengadsorpsi udara, ditambah <i>straight sprue</i> , dan banyaknya lekukan tajam pada sistem saluran <i>unpressurized casting</i> menyebabkan aspirasi udara meningkat.	

Cacat Coran	Keterangan	Tampak
<i>Pin holes</i>	<p>Terbentuk akibat disosiasi air di dalam rongga cetakan. Sesaat logam mengalami solidifikasi, pendinginan dapat menurunkan kelarutan gas sehingga sebagian gas yang tidak terlarut akan terbuang.</p>	
<i>Molding material defects</i>	<p>Terbentuk akibat dari adanya penggerusan material cetakan oleh aliran logam yang panas. Kehadirannya dapat dikontrol dengan menurunkan temperatur, tekanan, dan kecepatan aliran.</p>	
<i>Metal penetration</i>	<p>Terbentuk akibat dari permukaan cetakan yang kasar.</p>	



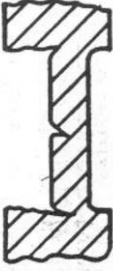
Cacat Coran	Keterangan	Tampak
<p><i>Fusion</i></p>	<p>Biasanya terbentuk pada <i>sand casting</i>, dimana pasir akan tercampur dalam <i>molten metal</i> sehingga membentuk lapisan yang mengkilap dan getas.</p>	
<p><i>Run out</i></p>	<p>Terbentuk apabila terdapat celah pada perpotongan cetakan (<i>cope</i> dan <i>drag</i>).</p>	
<p><i>Rat tails</i></p>	<p>Umumnya terjadi pada <i>sand casting</i>. Terbentuk karena adanya kegagalan pada permukaan rongga cetakan akibat dari kompresi panas logam yang berlebih. Kegagalan tersebut terjadi karena material cetakan memiliki nilai ekspansi termal yang rendah. <i>Rat tails</i> memiliki ciri-ciri panjang, dangkal, dan penurunan bagian yang menyudut.</p>	


Cacat Coran	Keterangan	Tampak
<i>Buckles</i>	Umumnya terjadi pada <i>sand casting</i> . Hampir serupa dengan <i>rat tails</i> . Hanya saja <i>buckles</i> memiliki penurunan permukaan berbentuk V.	
<i>Swell</i>	Umumnya terjadi pada <i>sand casting</i> . Terbentuk akibat adanya tekanan gaya <i>metallosstatic</i> yang dapat menyebabkan perbesaran rongga cetakan. Ditemukan pada permukaan vertikal pada cetakan.	
<i>Drop</i>	Hanya terjadi pada <i>sand casting</i> , dimana pasir pada <i>cope</i> turun akibat penekanan ( <i>ramming</i> ) yang kurang.	
<i>Scar</i>	Cekungan yang terjadi akibat letupan pada permukaan coran yang datar. Disebabkan oleh permeabilitas dan sistem penguapan yang buruk.	

Cacat Coran	Keterangan	Tampak
<i>Blistet</i>	<p>Berbentuk seperti <i>scar</i>, hanya saja tertutup oleh permukaan yang tipis.</p>	
<i>Scab</i>	<p>Hanya terjadi pada <i>sand casting</i>. Terbentuk akibat rongga akibat dari permukaan cetakan yang terangkat sehingga aliran logam masuk kedalam rongga tersebut.</p>	
<i>Dirt</i>	<p>Hanya terjadi pada <i>sand casting</i>. Terbentuk akibat dari partikel pasir yang keluar dari permukaan <i>cope</i> kemudian menempel pada hasil coran. Saat partikel tersebut dihilangkan maka terbentuk adanya permukaan yang bergelombang dan kasar.</p>	

Cacat Coran	Keterangan	Tampak
<i>Shift and Mismatch</i>	Terbentuk akibat dari adanya ketidaksesuaian dalam pemasangan potongan <i>core</i> maupun cetakan ( <i>cope</i> dan <i>drag</i> ).	
<i>Pouring metal defects</i>	Terbentuk karena aliran logam tidak mampu memenuhi seluruh rongga cetakan. Hal ini dapat disebabkan oleh fluiditas yang rendah akibat dari temperatur penuangan yang terlalu rendah, sistem saluran terlalu tipis, dan laju aliran sangat rendah akibat dari sistem saluran yang terlalu kompleks.	



Cacat Coran	Keterangan	Tampak
<i>Cold shut</i>	<p>Terbentuk akibat dari diskontinuitas pada dua aliran yang bertemu pada rongga cetakan.</p> <p>Terbentuk akibat dari terperangkapnya <i>slag</i> yang ikut masuk ke dalam aliran logam. Kontaminan tersebut dapat berupa produk deoksidasi, material refraktori, dan <i>dross</i>.</p>	
<i>Slag inclusions</i>	<p>Kontaminan tersebut dapat berupa produk deoksidasi, material refraktori, dan <i>dross</i>.</p>	
<i>Metallurgical defects</i> <i>Hot tears</i>	<p>Terbentuk akibat dari tegangan termal coran yang berlebih selama proses solidifikasi.</p>	

Cacat Coran	Keterangan	Tampak
<i>Hot spot</i>	<p>Terbentuk pada daerah yang memiliki geometri yang besar. Akibatnya, daerah yang memiliki laju pendinginan terlalu lama memungkinkan terjadinya penyusutan.</p> <p>Terbentuk akibat adanya kehadiran hidrogen dan <i>cooling stresses</i> yang terlalu tinggi. Tegangan tersebut terbentuk karena kontraksi pada saat pendinginan akibat dari distribusi termal yang tidak merata.</p>	
<i>Cold cracks</i>		
<i>Shrinkage cavities</i>	<p>Terbentuk akibat tidak cukupnya logam sebagai <i>feeder</i> selama proses solidifikasi.</p>	

---

## 2.8 *Finite Elemen Method*

Permodelan merupakan salah satu metode yang paling banyak digunakan dalam menggambarkan sebuah fenomena menjadi bentuk matematis, khususnya pada era digitalisasi seperti sekarang ini. Melalui pengembangan model tersebut, sebuah fenomena yang dapat berupa struktur, komponen, proses, atau pun sistem dapat dengan mudah diprediksi dan dikontrol kedepannya. Dalam bidang material dan metalurgi, permodelan dapat diterapkan pada berbagai tingkatan, yang meliputi *submicroscopic scale* yang mencakup struktur atom, *mesoscale* yang membahas ukuran dan struktur butir hingga pada tingkat *macroscopic scale* yang meliputi serangkaian model *bulk material*. Upaya tersebut diharapkan dapat memenuhi adanya kebutuhan terkait material khusus dan berkualitas tinggi.

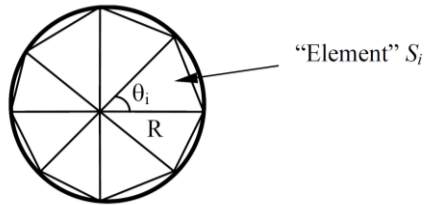
Pengembangan model dan metode permodelan memungkinkan para peneliti untuk menemukan material atau paduan baru yang lebih cepat. Model didapatkan melalui sebuah pengamatan antara interaksi material terhadap variabel proses. Keberhasilan penerapan model juga dapat mempengaruhi perkembangan metode penelitian yang lebih akurat dan produktif. Contohnya pada proses metalurgi fisis, seperti pertumbuhan butir, mekanisme presipitasi, penentuan fasa ekuilibrium, kekuatan bahan, serta pembentukan deformasi yang dapat diterapkan bahkan hingga skala industri.

Berkaitan dengan hal tersebut, metode numerik diperlukan untuk memberikan solusi pendekatan dalam memecahkan masalah sebuah model. Metode tersebut secara umum didefinisikan dalam bentuk persamaan diferensial, baik parsial maupun biasa. *Finite element methods* (FEM) merupakan salah satu metode yang paling banyak dipilih dalam menyelesaikan persamaan diferensial dengan lebih dari satu variabel independen (parsial) (ASM Handbook Volume 22A, 2009).

Secara singkat, FEM bekerja dengan cara mengasumsikan sebuah objek (kompleks) dengan membaginya ke dalam bentuk

---

yang lebih kecil dan simpel. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.16 dalam menentukan besarnya luas lingkaran.



**Gambar 2.16** Potongan area segitiga terhadap lingkaran (Liu, 2003).

Apabila luas potongan segitiga didefinisikan dengan Persamaan 2.4.

$$S_i = \frac{1}{2} R^2 \sin \theta_i \quad (2.4)$$

maka luas lingkaran,  $S_i$  ( $\text{mm}^2$ ) terhadap perpotongan segitiga dapat dinyatakan dalam Persamaan 2.5.

$$S_N = \sum_{i=1}^N S_i = \frac{1}{2} R^2 N \sin \left( \frac{2\pi}{N} \right) \quad (2.5)$$

Dalam kondisi jumlah bagian,  $N = \infty$  maka rumus tersebut diasumsikan mendekati luas lingkaran dengan jari-jari  $R$  (mm) dengan sudut bagian segitiga  $\theta^\circ$  (Liu, 2003).

### 2.8.1 Mold Filling

Perilaku logam selama proses pengisian cetakan hingga pendinginan dapat dijelaskan melalui penerapan hukum dinamika fluida. Pada fasa likuida, sebagian besar logam memiliki sifat seperti layaknya air atau gas. Oleh karena itu, semua fluida kecuali dalam fasa gas dapat dikategorikan sebagai *incompressible materials*, begitu pun dengan logam cair. Fluida tersebut dapat dikarakterisasikan alirannya melalui densitas, tekanan, temperatur, dan kecepatan.

1. Densitas

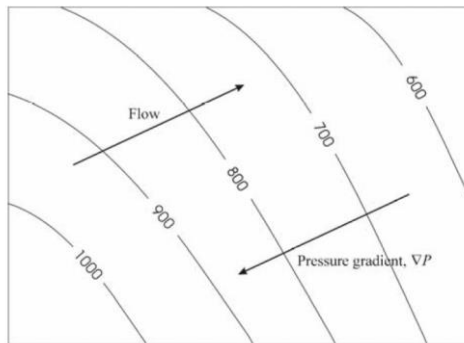
Densitas meliputi jumlah massa, yang diwakili oleh molekul pada satuan volume. Pada aliran *incompressible*, nilai densitas adalah konstan. Hal ini dikarenakan untuk memampatkan sebuah fluida cair diperlukan tekanan yang sangat besar, sebagai contoh diperlukan 400 atm untuk memampatkan densitas air menjadi 98%.

2. Tekanan

Salah satu parameter yang utama dalam mengontrol aliran fluida lainnya adalah tekanan. Secara makroskopis, dalam pergerakan molekul, tekanan mempengaruhi besarnya transfer momentum antar molekul melalui tumbukan. Arah pergerakan tersebut bersifat acak ke segala arah sehingga tekanan pada suatu titik fluida juga dikatakan bekerja ke segala arah. Ketika tekanan,  $P$  (atm) adalah fungsi dari koordinat kartesian  $(x, y, z)$  yang mewakili suatu titik dalam fluida maka gradien tekanan dapat didefinisikan sebagai Persamaan 2.6.

$$\nabla P = \left( \frac{\partial P}{\partial x}, \frac{\partial P}{\partial y}, \frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (2.6)$$

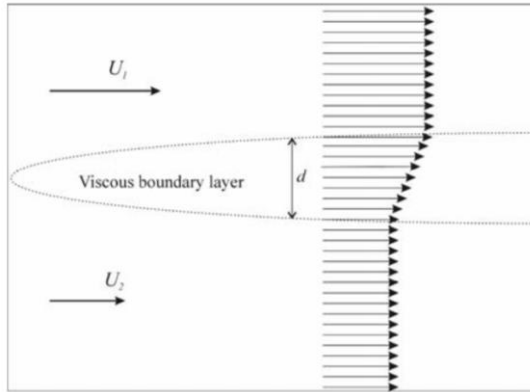
Molekul-molekul di suatu titik fluida sifatnya mentransfer lebih banyak momentum ke molekul lain yang wilayahnya berdekatan daripada momentum yang mereka terima. Akibatnya gaya makroskopik muncul di daerah tersebut. Daerah ini lah yang biasanya digambarkan berupa gradien tekanan, dimana perbedaan tekanan di suatu titik dibagi dengan jaraknya. Gambar 2.17 menunjukkan arah tekanan dan gradien tekanan (Reikher, 2017).



**Gambar 2. 17** Gradien distribusi tekanan (Reikher, 2017).

### 3. Viskositas

Seperti halnya pada tekanan, pergerakan fluida sebagian besar juga mendapatkan gaya tambahan yang berupa gesekan. Gaya gesek tersebut muncul akibat dari tumbukan antar molekul di dalam fluida. Adanya tumbukan tersebut menghasilkan transfer momentum berupa daerah transisi yang dikenal dengan sebutan *viscous boundary layer* (Gambar 2.18), dimana aliran yang cepat akan melambat dan aliran yang lambat akan dipercepat dalam pergerakan fluida. Perlu dicatat, ketika dua lapisan fluida bertukar momentum maka energi kinetik keseluruhan dalam aliran akan berkurang dan panas akan dihasilkan.



**Gambar 2. 18** Gaya gesek pada dua lapisan fluida (Reikher, 2017).

Fluida dengan *dynamic viscous coefficient* (*frictional properties*),  $\mu$  (Ns/m<sup>2</sup>) yang besar akan menghasilkan *viscous force*,  $F_{fr}$  (N) yang besar pula. Di samping itu, besarnya perbedaan kecepatan ( $U_1 - U_2$ ) (m/s) akan menghasilkan laju perpindahan momentum yang besar pula. Begitu pun jarak,  $d$  (m) juga memiliki peran dalam menentukan besar-kecilnya laju transfer momentum. Hasil tersebut dapat dituliskan melalui Persamaan (satu dimensi) 2.7,

$$F_{fr} = A\mu \frac{U_1 - U_2}{d} \quad (2.7)$$

menjadi persamaan diferensial:

$$\tau = \mu \frac{\partial U}{\partial z} \quad (2.8)$$

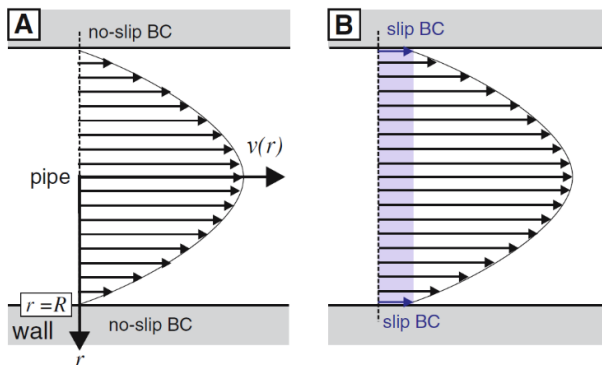
Persamaan di atas diartikan bahwa,  $F_{fr}$  (N) bekerja pada fluida berkecepatan  $U_2$  (m/s) pada koordinat  $z$  (m), yang mana  $A$  (m<sup>2</sup>) merupakan area kontak aliran, yang selanjutnya

dikenal sebagai tegangan geser,  $\tau$  ( $\text{N/m}^2$ ) yang ditunjukkan penyederhanaannya pada Persamaan 2.8.

Perlu diketahui bahwa *viscous force* akan sama dengan nol apabila aliran telah mencapai kondisi seragam atau tidak ada perbedaan kecepatan. Namun, pada kondisi riilnya, molekul fluida akan senantiasa mengalami benturan dengan dinding atau wadah kemudian memantul kembali ke aliran sehingga keseragaman akan sulit tercapai.

Sesaat setelah berinteraksi dengan permukaan dinding, molekul fluida kembali ke aliran. Komponen momentum fluida akan normal terhadap dinding, tetapi arah tangensialnya acak. Istilah ini lah yang sering dikenal sebagai *no-slip boundary condition* (Gambar 2.19). Artinya kecepatan komponen fluida tangensial ke permukaan dianggap sama dengan nol yang menandakan adanya *viscous shear stress* di dekat dinding/permukaan (Berg 2008).

**Gambar 2.19** Skema aliran fluida (a) *no-slip boundary*



*condition* dan (b) *slip boundary condition* (Berg, 2008).

Terlebih lagi, permukaan dinding yang memiliki tingkat kekasaran tinggi berdampak pada hilangnya kecepatan aliran. Biasanya ditandai oleh butir-butir aliran fluida yang menempel, berubah arah, dan terjebak di permukaan yang



kasar. Hal tersebut mengarah ke konsep aliran turbulen, dimana terjadi ketidakstabilan aliran akibat dari gerakan osilasi dalam fluida. Aliran tersebut dapat mempercepat perpindahan momentum yang menghasilkan lebih banyak gesekan (Reikher, 2017).

#### 4. Temperatur dan Entalpi

Keadaan termal dalam fluida dinyatakan dalam bentuk temperatur,  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), yang merupakan besaran yang sebanding dengan nilai energi kinetik dalam pergerakan molekul. Besaran tersebut digunakan untuk mengetahui energi termal spesifik pada fluida,  $I$  (Joule/kg), yang dapat dilihat pada Persamaan 2.9.

$$I = C_V T \quad (2.9)$$

Dimana subskrip  $v$  pada  $C_V$  (Joule/kg $^{\circ}\text{C}$ ) adalah penanda panas spesifik pada volume konstan, yang mewakili banyaknya panas yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur pada satuan massa per  $1^{\circ}\text{C}$  dalam volume yang terjaga. Keadaan ini diperlukan pada *compressible gas*, dimana jika dibiarkan memuai pada saat pemanasan maka akan membutuhkan lebih banyak energi untuk menaikkan temperaturnya.

Di sisi lain, pada *incompressible fluids*, keadaan tersebut tidak terlalu berpengaruh karena nilai  $C_V \approx C_P$ . Akibatnya penggunaan panas spesifik yang konstan terhadap tekanan,  $C_P$  lebih sering digunakan untuk alasan kemudahan pengukuran (dalam tekanan atmosfer). Nilai  $C_P$  selanjutnya digunakan untuk menghitung entalpi,  $E$  (Joule) yang merupakan jumlah energi internal pada sistem,  $U$  (Joule) ditambah produk tekanan,  $P$  (kg/m.s $^2$ ) kali volume,  $V$  (m $^3$ ) sistem yang dituliskan pada Persamaan 2.10 (Brunner, 2014).

$$E = U + PV \quad (2.10)$$

*Equations of motion* pada proses pengisian cetakan dapat diekspresikan melalui persamaan Navier-Stokes (Persamaan 2.11) untuk *incompressible viscous fluid* yang menggambarkan hukum kekekalan momentum, dalam hal ini adalah logam cair. Persamaan ini menunjukkan bahwa gradien tekanan dan *viscous force* sebagai pembentuk gaya internal yang utama dan gaya eksternal yang dapat diwakilkan oleh gaya gravitasi maupun elektromagnetik yang membentuk model persamaan aliran.

$$\rho \left[ \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U}(\nabla \cdot \mathbf{U}) \right] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{U} + \rho \mathbf{G} \quad (2.11)$$

$\Downarrow$   
*local*  
*acceleration*

$\Downarrow$   
*convection*  
*acceleration*

$\Downarrow$   
 gradien  
 tekanan

$\Downarrow$   
 tegangan  
 viskos

$\Downarrow$   
 gaya  
 eksternal

Selanjutnya persamaan tersebut diuraikan dalam koordinat kartesian, berupa Persamaan 2.12 pada koordinat  $x$ , Persamaan 2.13 pada koordinat  $y$ , dan Persamaan 2.14 pada koordinat  $z$ :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + G_x \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \cdot \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + G_y \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \cdot \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + G_z \quad (2.14)$$

Komponen  $u$ ,  $v$ , dan  $w$  merupakan bagian dari kecepatan fluida vektor  $\mathbf{U}$  (m/s) di sebuah titik pada aliran.  $G = G_x, G_y, G_z$  (m/s<sup>2</sup>) adalah gaya eksternal, yang pada persamaan tersebut diasumsikan sebagai gaya gravitasi. Pada *incompressible flow*, aliran memiliki nilai densitas yang tetap sehingga pada rasio *dynamic viscous coefficient*,  $\mu$  (kg/m.s) terhadap densitas,  $\rho$

(kg/m<sup>3</sup>) dapat disederhanakan menjadi  $\nu$ , yaitu *kinematic viscous coefficient* (m<sup>2</sup>/s).

Hukum kekekalan massa juga merupakan prinsip penting dalam persamaan pembentuk aliran (*governing equation*) pada *equations of motion* fluida, di samping hukum kekekalan momentum. Suatu massa (kuantitas) tidak dapat dibentuk maupun dilenyapkan yang kemudian diekspresikan ke dalam bentuk persamaan kontinuitas (2.15). Pada *incompressible fluid*, persamaan tersebut diturunkan ke dalam bentuk *zero divergence* dari vektor kecepatan.

$$\text{div}\mathbf{U} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.15)$$

Persamaan utama yang terakhir dalam membentuk aliran fluida berkaitan dengan hukum kekekalan energi. Hukum ini diperlukan dalam melacak adanya perubahan temperatur dan juga pertumbuhan fraksi padat, khususnya dalam proses solidifikasi. Dalam bentuk *incompressible fluid*, Persamaan energi (2.16) ditulis dalam bentuk entalpi (Khan 2018).

$$\left( \frac{\partial E}{\partial t} + u \frac{\partial E}{\partial x} + v \frac{\partial E}{\partial y} + w \frac{\partial E}{\partial z} \right) = m \left( \frac{k}{\rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + h \cdot (T_{\text{fluid metal}} - T_{\text{surface}}) \right) \quad (2.16)$$

Pada Persamaan 2.16 dijelaskan bahwa besarnya perpindahan panas kali massa (kg) sebanding dengan laju perubahan entalpi  $E$  (W), dimana  $k$  merupakan koefisien konduktifitas termal (W/m.K) dan  $h$  adalah koefisien konvektivitas termal (W/m<sup>2</sup>.K).

### 2.8.2 Solidifikasi dan Pendinginan

Proses solidifikasi selama pengecoran dapat tuliskan sebagai bentuk dari banyaknya energi yang dilepaskan selama pemadatan.

Seperti yang diketahui, bahwa molekul dalam fasa cair memiliki lebih banyak ruang bebas dalam bergerak daripada fasa padatnya, yang terkunci dalam struktur kristaloid. Akibatnya, pada saat pendinginan energi akan dilepaskan dalam bentuk panas laten,  $L$  (Joule/kg). Energi tersebut dapat dituliskan dalam bentuk entalpi,  $E$  (Joule/kg) seperti pada Persamaan 2.17. Dalam persamaan tersebut,  $f_s$  merupakan banyaknya fasa solid dalam *molten metal*.

$$E = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT + L (1 - f_s) \quad (2.17)$$

Mekanisme pertukaran energi termal selama proses pengecoran adalah melalui konduksi, konveksi, dan radiasi. Namun pada penelitian ini, radiasi diabaikan. Laju perpindahan panas sebuah material secara konduksi diwaliki oleh koefisien konduktivitas termal,  $k$  (W/m.K). Persamaan konduktivitas termal, *Fourier Law* (2.18) dalam satu dimensi dapat ditulis sebagai berikut:

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.18)$$

Berdasarkan persamaan diatas, *heat flux*,  $q''$  (W/m<sup>2</sup>) nilainya sebanding dengan gradien temperatur, dimana  $T$  (K) merupakan perbedaan temperatur pada daerah sejauh  $x$  (m) (Reikher, 2017).

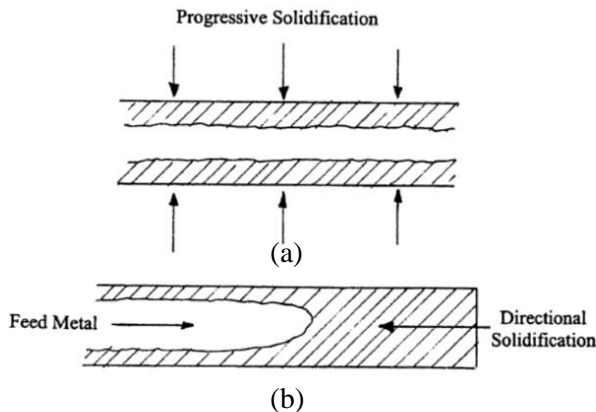
Pada mekanisme konveksi, perpindahan panas dapat melalui udara bebas, kontak dengan peralatan, perlakuan pendinginan (udara, air, maupun oli), proses coating pada cetakan, dan penambahan *exothermic sleeve* (ASM Handbook Volume 22A, 2009). Faktor kekasaran permukaan, jenis pelapisan, dan proses pelubrikan juga penting dalam menentukan nilai  $h$  (W/m<sup>2</sup>.K), koefisien konvektivitas termal. Hubungan tersebut dapat dilihat pada Persamaan 2.19.

$$q'' = h \cdot (T_{fluid\ metal} - T_{surface}) \quad (2.19)$$

Dimana pada proses penambahan *exothermic sleeve* dan pendinginan cetakan (*water cooled mold surface*),  $q''$  berubah terhadap fungsi waktu,  $q(t)''$ . Hal tersebut dituliskan melalui Persamaan 2.20 (Reikher 2017).

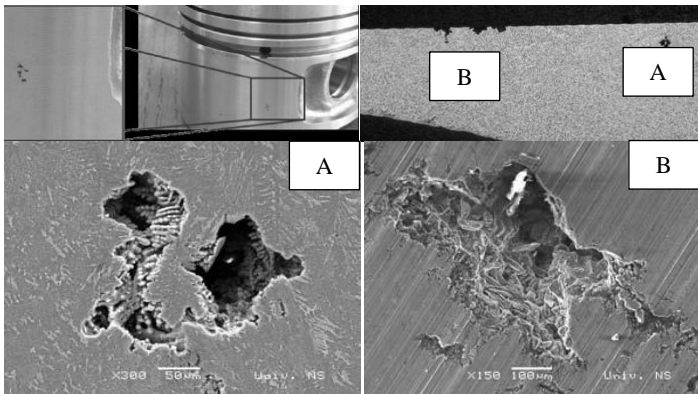
$$q_1'' = q(t)'' \quad (2.20)$$

Laju perpindahan panas berdampak pada pola pembentukan fraksi solid. Desain saluran cetakan dengan *friction loss* dan *heat loss* terbesar memungkinkan terbentuknya *progressive solidification* (Gambar 2.20(a)). Hal tersebut terjadi karena aliran logam kehilangan temperatur hingga batas temperatur likuidusnya sehingga fraksi solid terbentuk sebelum *molten metal* sepenuhnya memasuki cetakan. Selain itu, dampak yang ditimbulkan oleh *progressive solidification* adalah tidak berfungsinya *feeder/riser* dalam mengisi rongga akibat penyusutan. Di sisi lain, perancangan proses pengecoran yang tepat, biasanya membentuk pola *directional solidification* (Gambar 2.20(b)) sehingga cacat *mis run*, *cold shut*, maupun *shrinkage porosity* dapat dihindari (Chastain, 2004).



**Gambar 2. 20** Tipe soldifikasi (a) *progressive solidification* dan (b) *directional solidification* (Chastain, 2004).

Geometri yang tipis memiliki *heat loss* yang lebih besar, ditambah lagi dengan geometri yang kompleks yang menjadikan sulitnya terbentuk *directional solidification*, layaknya pada piston. Pada penelitian Kakas (2008) berhasil membuktikan bahwa cacat yang terjadi pada dinding piston selama proses solidifikasi adalah akibat dari terjadinya *progressive solidification* atau pembentukan fraksi solid yang tidak bermula dari sudut dinding, dapat dilihat pada Gambar 2.21. Untuk mencegah hal tersebut, peningkatan laju solidifikasi diperlukan dengan menambahkan *side feeder* atau meningkatkan temperatur aliran, yakni dengan meningkatkan temperatur tuang atau cetakan (*pre-heat*).



**Gambar 2. 21** *Shrinkage porosity* pada dinding piston (Kakas, 2008).

### 2.8.3 Mekanisme Pembentukan *Defect*

Pembentukan cacat/*defect* selama proses pengecoran dapat dimodelkan melalui persamaan ekuilibrium dan kompatibilitas (*strain-displacement*). Persamaan ini memodelkan serangkaian mekanika kontinum pada aliran mekanis. *Equilibrium equation* (Persamaan 2.21 – 2.23) menggambarkan kesetimbangan gaya yang bekerja pada suatu elemen.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = -F_x \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = -F_y \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = -F_z \quad (2.23)$$

Dimana  $\sigma$  ( $\text{N/m}^2$ ) adalah komponen tegangan normal,  $\tau$  ( $\text{N/m}^2$ ) adalah tegangan geser, dan  $F$  ( $\text{N}$ ) adalah komponen gaya pada unit volume  $(x, y, z)$ . Demikian pula halnya dengan hubungan *strain-displacement* yang dituliskan dalam Persamaan 2.24 – 2.26 pada masing-masing koordinat:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \text{ dan } \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2.24)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \text{ dan } \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad (2.25)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \text{ dan } \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.26)$$

Dimana  $\varepsilon$  adalah regangan normal,  $\gamma$  adalah regangan geser, dan  $u, v, w$  adalah elemen perpindahan dalam komponen  $x, y, z$ . Selanjutnya, persamaan tersebut dihubungkan melalui persamaan konstitutif (2.27) yang dikenal sebagai hukum Hooke. Hukum ini mewakili sifat mekanik sebuah material dalam daerah elastis berupa  $E$  ( $\text{N/m}^2$ ), modulus elastisitas / *young modulus*.

$$\sigma = \varepsilon E \quad (2.27)$$

Setelah melewati pembebanan di atas batas luluh/*yield*, hukum Hooke tidak berlaku. Hubungan antara tegangan dan regangan berlaku *non-linear*. Pembebanan yang terus-menerus akan mengakibatkan pengerasan (atau pelunakan lebih jarang) dari

material efek dari peregangan (pemipihan) butir, istilah ini kemudian dikenal sebagai *strain hardening* (ASM Handbook Volume 22A, 2009).

Di samping persamaan ekuilibrium dan kompatibilas, persamaan gas ideal (*state equation*) juga berperan dalam mekanisme pembentukan cacat. Pergerakan gas ideal terjadi saat molekul gas berinteraksi melalui tumbukan yang acak satu sama lain. Variabel termodinamika sangat penting dalam menentukan pergerakan gas tersebut, seperti tekanan, densitas dan temperatur (Pelton, 2018).

$$P = R\rho T \quad (2.28)$$

Melalui Persamaan (2.28) gas ideal, dapat diketahui bahwa keadaan termodinamik dari gas ideal ditentukan hanya oleh dua parameter; densitas dan temperatur, temperatur dan tekanan, atau tekanan dan densitas. Dimana  $R$  merupakan konstanta gas universal dengan nilai  $R = 8.3144 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , sedangkan  $P$  adalah tekanan ( $\text{N/m}^2$ ),  $\rho$  adalah densitas ( $\text{kg/m}^3$ ), dan  $T$  adalah temperatur (K).

Secara praktis, aliran udara selama pengecoran ikut serta masuk ke dalam cetakan. Karena itu, penetapan konsep kondisi batas (*boundary condition*) *free surface* sangat mempengaruhi hasil simulasi. Pengaruh aliran udara dalam cairan (terutama logam) dapat dianggap tidak ada karena molekulnya yang sangat ringan. Kondisi ini sering disebut dengan *kinematic boundary condition*, yang menyatakan bahwa kecepatan pada *free surface*,  $\mathbf{U}_b$  (m/s) sama dengan kecepatan aliran fluida  $\mathbf{U}$  (m/s), dituliskan melalui Persamaan 2.29.

$$\mathbf{U}_b = \mathbf{U}(t, x, y, z) \quad (2.29)$$

Di sisi lain, adanya asumsi mengenai kondisi tekanan pada *free surface*,  $P_0$  (atm) sama dengan tekanan udara atmosfer,  $P_a$  (atm) mengehendaki munculnya konsep *boundary condition*



lainnya, berupa *dynamic boundary condition*, dapat dilihat pada Persamaan 2.30.

$$P_0 = P_a \quad (2.30)$$

$P_a$  dapat dikatakan konstan sepanjang bagian yang berdekatan dengan *free surface* apabila pengaruh gravitasi terhadap variasi tekanan di udara diabaikan. Selama proses pengisian, udara memiliki kemungkinan tidak dapat keluar dengan cepat sehingga tekanan udara di rongga meningkat, akibatnya nilai  $P_a$  berlaku fungsi waktu. Sebagai tambahan, *bubble* yang terjebak pada logam memiliki tekanan yang berbeda-beda.

Prinsipnya, molekul likuida pada *free surface* tidak hanya berinteraksi dengan molekul likuidanya saja, melainkan di satu sisi berinteraksi dengan molekul udara. Gaya antar molekul ini mengakibatkan terbentuknya gaya (asimetri) makroskopik yang nilainya sebanding dengan kelengkungan pada daerah *interface*. Gaya tersebut dinyatakan dalam tekanan permukaan,  $P_s$  (atm), yang merupakan hasil dari koefisien *surface tension*,  $\sigma_s$  (N/m) dan *interface curvature*,  $k$  ( $m^{-1}$ ), ditunjukkan pada Persamaan 2.31.

$$P_s = \sigma_s k = \sigma_s (\nabla \cdot \mathbf{n}) \quad (2.31)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{n} = \frac{\partial n_x}{\partial x} + \frac{\partial n_y}{\partial y} + \frac{\partial n_z}{\partial z} \quad (2.32)$$

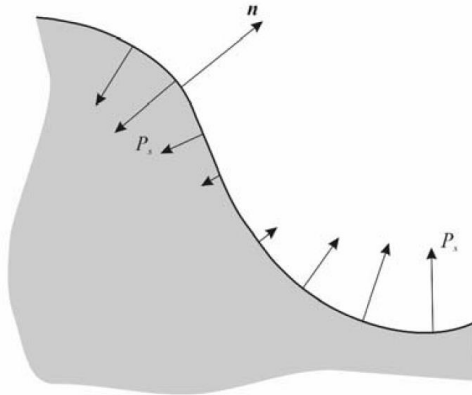
$\nabla \cdot \mathbf{n}$  merupakan persamaan divergen (2.32) dari unit vektor yang normal terhadap permukaan. Terlebih lagi, pembentukan lapisan oksida logam dalam logam dapat meningkatkan gaya antar molekul pada *free surface*,  $P_s$ . Efek dari *surface tension* akan tampak pada geometri yang lebar. Dengan menambahkan efek dari tekanan permukaan, berlaku persamaan berikut:

$$P_0 = P_a + P_s \quad (2.33)$$

dan

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial n} = 0 \quad (2.34)$$

Berdasarkan Persamaan 2.33, ditegaskan bahwa pengaruh *dynamic boundary condition* pada *free surface* terhadap kecepatan,  $\mathbf{U}$  (m/s) sangat kecil atau dapat diabaikan berkaitan dengan gesekan antara fluida dan udara yang kecil. Sebagaimana yang ditunjukkan oleh Persamaan 2.34, laju aliran dekat *free surface* memiliki arah vektor normal terhadap permukaan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.22 (Reikher, 2017).



**Gambar 2.22** *Surface tension* pada elemen *free surface* (Reikher, 2017).

#### 2.8.4 *Niyama Criterion*

Pada Persamaan 2.35, dapat dilihat bahwa kriteria Niyama bekerja dengan cara mengkorelasikan besarnya porositas dengan parameter termal. Fungsi sederhana dari kriteria ini menghasilkan batas apakah logam tersebut dapat dikatakan mengalami *shrinkage porosity* dan telah tervalidasi oleh pengecoran logam berbahan baja (Liotti, 2006).

$$N = \frac{G_s}{\sqrt{\dot{T}}} \quad (2.35)$$

Dimana:

- $N$  = Nilai batas Niyama ((°C.s)<sup>0.5</sup>/cm),  
 $G_s$  = Gradien temperatur (°C/cm),  
 $\dot{T}$  = laju pendinginan (°C/s).

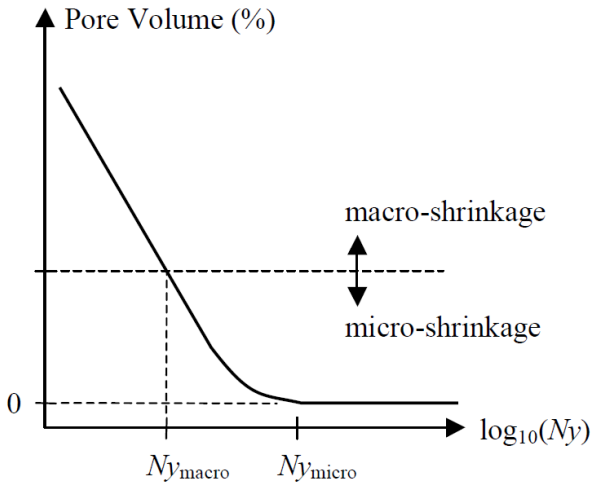
**Tabel 2.5** Nilai batas kriteria Niyama terhadap material (Liotti, 2006).

Material	Nilai Batas (N)
Baja	1
Besi Tuang	0.75
Paduan Aluminium	0.25-0.30
Paduan Tembaga	1.3

Pada Tabel 2.5 ditunjukkan nilai batas kriteria Niyama. Bahwasanya, porositas dianggap ada apabila hasil perhitungan berdasarkan kriteria Niyama tidak melampaui nilai batas (Carlson, 2008). Jain (2007) mengatakan bahwa nilai kriteria Niyama diambil pada saat mendekati akhir solidifikasi dengan catatan temperatur Niyama adalah lebih 10% dari temperatur dimana 100% fraksi solid, seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan 2.36.

$$T_{Ny} = T_{sol} + 0.1(T_{liq} - T_{sol}) \quad (2.36)$$

Semakin jauh nilai Niyama terhadap batasnya maka kecenderungan membentuk *macroporosity* akan semakin meningkat, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.23.



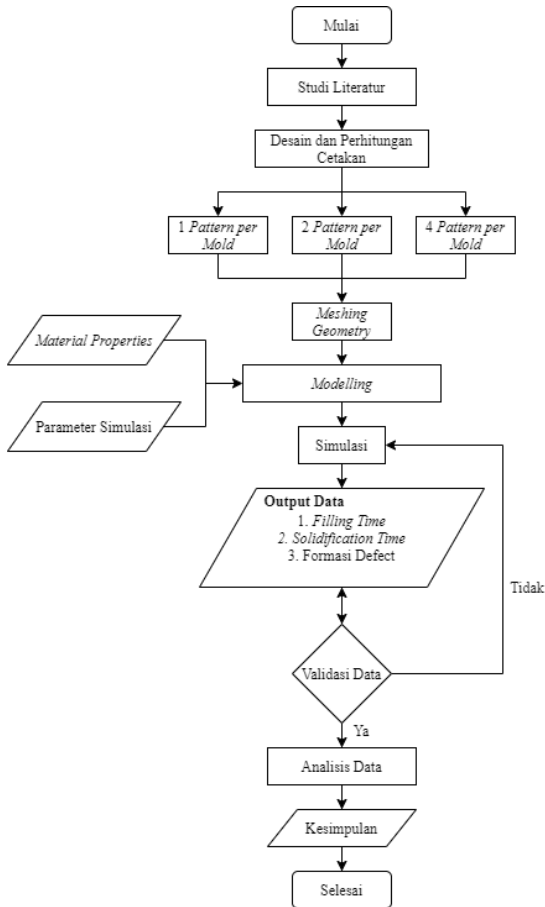
**Gambar 2. 23** Skema ilustrasi hubungan antara volume *shrinkage porosity* dengan kriteria Niyama (Jain, 2007)

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dalam penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar

3.1.



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

### 3.2 Desain Penelitian

Untuk mencapai tujuan penelitian maka penelitian ini diberikan variasi variabel, antara lain:

#### 3.2.1 Variabel Bebas

Variasi faktor dan level yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Variabel bebas dan level kendali

Variabel bebas	Level		
	1	2	3
Temperatur <i>Pre-heat</i> (°C)	30	200	400
Temperatur Penuangan (°C)	675	725	775
Jumlah Isian Cetakan	1	2	4

#### 3.2.2 Variabel Terikat

Untuk mendapatkan kualitas produk coran yang sesuai harapan maka penelitian ini memiliki beberapa variabel terikat sebagai pertimbangan dalam menentukan kualitas produk, seperti *filling time*, *solidification time*, serta formasi *defect*.

#### 3.2.3 Variabel Kontrol

Untuk mendapatkan hasil yang mendekati kondisi riil maka ditetapkan variabel kontrol, seperti temperatur ambient 30°C dan tekanan ambient 1 atm atau 101325 pa.

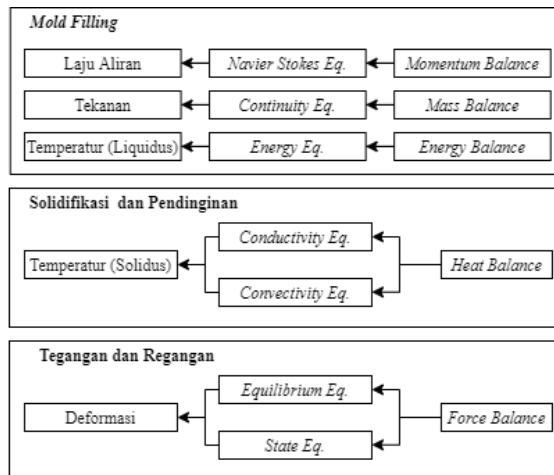
### 3.3 Simulasi

Simulasi pada penelitian ini menggunakan aplikasi Pro-Cast 2019.0 dengan *thermo-physical material properties* yang didapatkan melalui aplikasi JMatpro 7.0. Selain itu, telah diinput pula beberapa parameter penting berupa model, material, *boundary condition*, *operating condition*, *solution*, *initialize*, *monitor*

*residual* (iterasi), dan *meshing geometry*. Hasil tersebut kemudian akan dihitung (diiterasi) dan dicocokkan dengan *Niyama Criterion* sebagai validasi hasil simulasi. Apabila hasil simulasi memenuhi kriteria tersebut maka akan dilanjutkan ke tahap analisis data.

### 3.3.1 Model

Model yang digunakan dalam simulasi ini *adalah momentum balance, mass balance, dan energy balance* pada proses *mold filling*, *heat balance* pada proses solidifikasi, dan *force balance* untuk mengetahui kemungkinan deformasi atau cacat selama proses pengecoran. Model tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Model persamaan aliran selama proses pengecoran (Fu, 2009).

### 3.3.2 Meshing Geometry

Pada penelitian ini dipilih *tetrahedral unstructured meshes* yang mengacu pada penelitian Xu (1996). Penelitian ini berhasil menunjukkan pengaruh *unstructured meshes* dalam menentukan tingkat keakuratan pada ruang diskritisasi dalam berbagai variasi sistem saluran terhadap proses pengisian cetakan.

### 3.3.3 Material

Jenis material cetakan dan coran yang digunakan dalam penelitian ini merujuk pada ASM Handbook Volume 15-*Casting* (1998), berupa:

1. Material coran = MAHLE *eutectic alloy* M124
2. Material cetakan = besi cor kelabu (EN-GJL-200)
3. Material *core* = baja AISI 1040

Alasan dipilihnya material cetakan besi kelabu karena memiliki biaya permesinan yang lebih terjangkau. Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.2.

**Tabel 3. 2** Estimasi faktor pengkali biaya permesinan cetakan (ASM Handbook Volume 15, 1998).

Nama	Dimensi (mm)
<i>Gray iron</i>	1
<i>Cast low-alloy steel</i>	1.44
<i>Gray iron with tool steel inserts</i>	1.73
<i>Cast tool steel</i>	2.16

### 3.3.4 Boundary Condition

*Boundary condition* pada penelitian ini ditetapkan berupa temperatur ambient (30°C), koefisien konveksivitas udara bebas (10 W/m<sup>2</sup>K), nilai percepatan gravitasi (9.81 m/s<sup>2</sup>), dan tekanan atmosfer (1 atm).

### 3.3.5 Operating Condition

Untuk mendapatkan hasil yang mendekati kondisi nyata dan secara spesifik sebagai batasan dalam penelitian ini maka ditetapkan kondisi operasi berupa ukuran cetakan sesuai desain perhitungan, tinggi penuangan tepat pada bibir *pouring basin* (0 mm), dan sifat-sifat material yang telah ditetapkan sesuai yang tertera pada lampiran.



### 3.3.6 Initial Condition

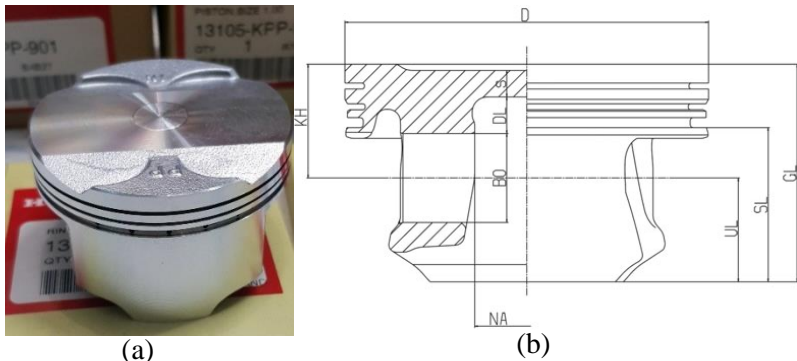
Pada penelitian ini ditentukan *initial condition* sebagai variabel berupa variasi temperatur penuangan dan *pre-heat* cetakan.

### 3.3.7 Monitor Residual (Iterasi)

Pada tahap ini, hasil simulasi dapat dikatakan valid apabila memenuhi kriteria konvergensi dan dapat dikatakan memiliki porositas apabila memenuhi kriteria Niyama untuk paduan aluminium sebesar 0.25-0.3 (Liotti, 2006).

## 3.4 Geometri Benda Coran

Penentuan dimensi benda coran merujuk pada piston komersial yang digunakan pada kendaraan Honda CB150R 150cc diameter 63.5mm, seperti pada Gambar 3.3.



**Gambar 3.3** (a) Produk piston dan (b) terminologi piston tipe empat tak mesin bensin pada kendaraan merek Honda CB150R 150cc (MAHLE, 2016).

Penjelasan lebih lanjut mengenai terminologi dan dimensi tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.3.

---

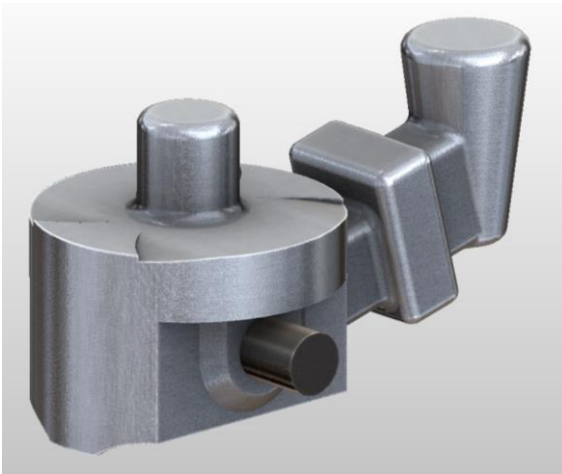
**Tabel 3. 3** Terminologi piston paduan aluminium (MAHLE, 2016).
 

---

<b>Nama</b>	<b>Dimensi (mm)</b>
BO: <i>Pin bore <math>\emptyset</math> (piston pin <math>\emptyset</math>)</i>	13
NA: <i>Pin boss spacing</i>	8
D: <i>Piston <math>\emptyset</math></i>	63.5
KH: <i>Compression height</i>	23.5
s: <i>Crown thickness</i>	13.5
DL: <i>Elongation length</i>	3.5
SL: <i>Skirt length</i>	32.9
GL: <i>Total height</i>	43.5
UL: <i>Lower height</i>	20

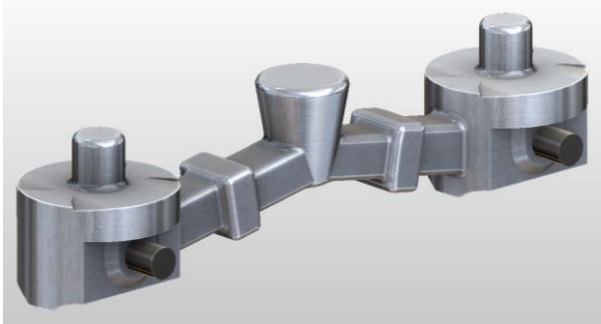
---

Pada Gambar 3.4, Gambar 3.5, dan Gambar 3.6 ditunjukkan desain 3D sistem saluran pada pengecoran *gravity permanent* piston MAHLE *eutectic alloy* M124 pada satu, dua, dan empat *pattern per mold* secara berurutan, dengan perhitungan dan penjelasan yang telah terlampir pada lampiran 1 dan 2.

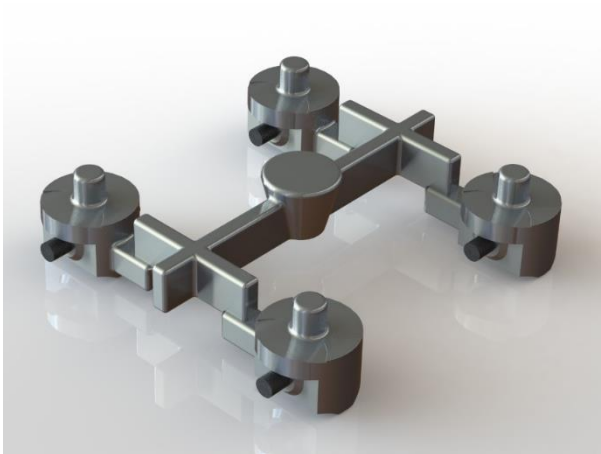


**Gambar 3. 4** Cetakan piston MAHLE *eutectic alloy* M124 satu *pattern*.

---



**Gambar 3.5** Cetakan piston MAHLE *eutectic alloy* M124 dua *pattern*.



**Gambar 3.6** Cetakan piston MAHLE *eutectic alloy* M124 empat *pattern*.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

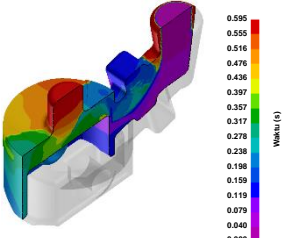
## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

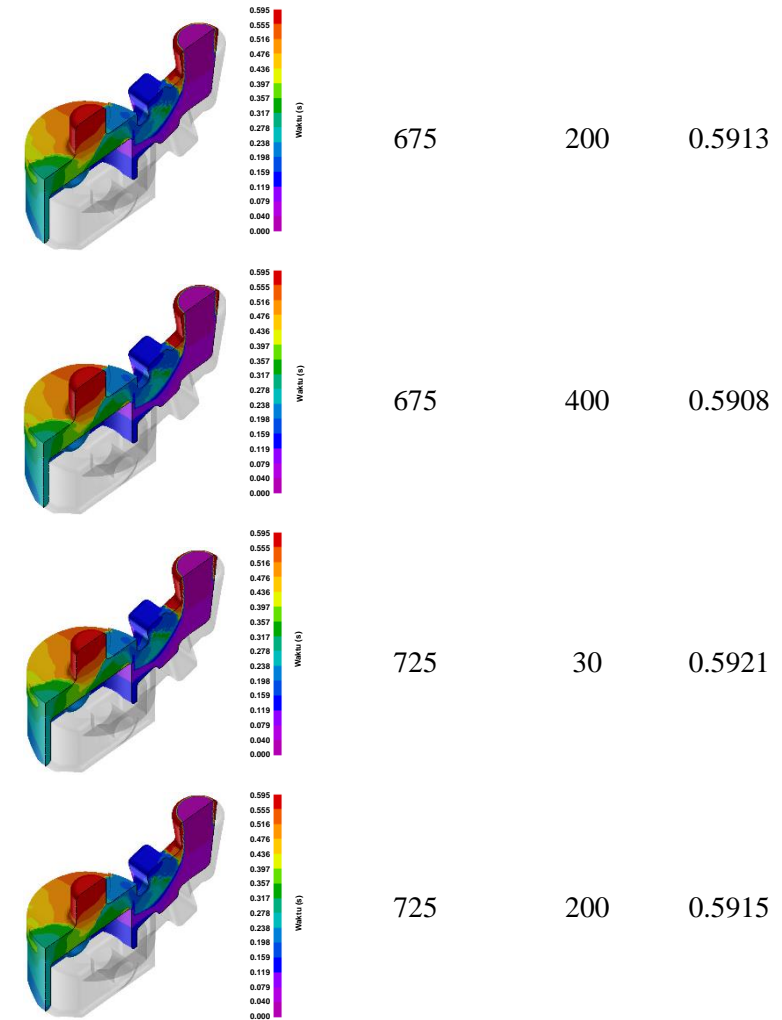
### 4.1 Hasil Simulasi *Filling Time* (Fluiditas)

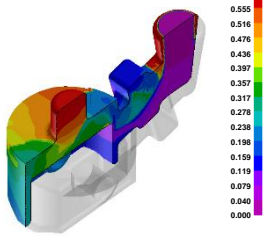
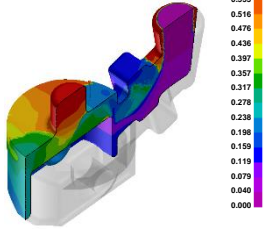
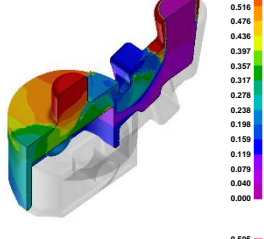
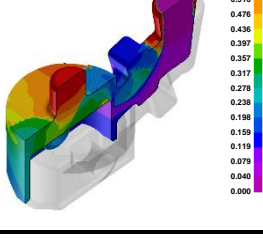
Setelah melalui proses *solving* menggunakan metode elemen hingga, didapatkan hasil simulasi berupa *filling time*, *solidification time*, serta formasi *defect*. Hasil ini lah yang kemudian dianalisis sehingga menghasilkan kombinasi yang sesuai untuk pengecoran piston MAHLE *eutectic alloy* M124 pada *gravity permanent casting*.

Analisis fluiditas bertujuan untuk mengetahui karakteristik dan kemampuan alir logam cair terhadap variasi temperatur yang diberikan. Simulasi pada temperatur tuang ( $675^{\circ}\text{C}$ - $775^{\circ}\text{C}$ ) terhadap variasi temperatur *pre-heat* ( $30^{\circ}\text{C}$ - $400^{\circ}\text{C}$ ) cetakan berhasil menunjukkan terjadinya perubahan *filling time* sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 4.1. Meskipun perubahan tersebut tidak terjadi secara signifikan pada sistem saluran yang diterapkan. Perubahan ini terjadi mengingat bahwa pada *range* temperatur tersebut perubahan nilai densitas dan viskositas terhadap temperatur yang terjadi sangat lah landai.

**Tabel 4. 1** Hasil simulasi nilai *filling time* pada variasi temperatur tuang dan temperatur cetakan dalam satu *pattern per mold*.

Gradien <i>Filling Time</i>	Temperatur Tuang ( $^{\circ}\text{C}$ )	Temperatur Cetakan ( $^{\circ}\text{C}$ )	<i>Filling Time</i> (s)
	675	30	0.5921



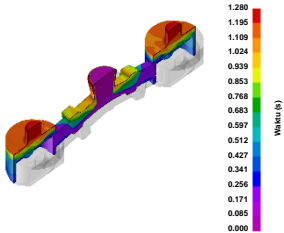
	725	400	0.5909
	775	30	0.5921
	775	200	0.5917
	775	400	0.5911

Berdasarkan data hasil simulasi diatas, Tabel 4.1, kenaikan temperatur cetakan (*pre heat*) berpengaruh terhadap penurunan nilai viskositas dan densitas pada logam cair, yang ditandai oleh

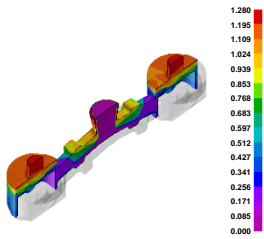
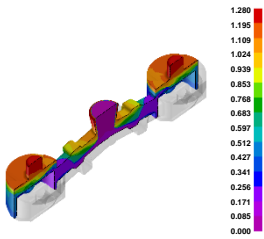
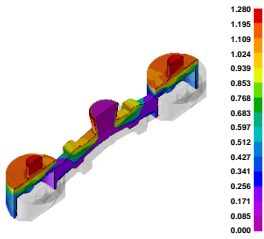
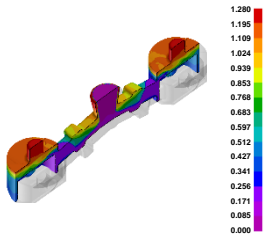
peningkatan *filling time* pada tiap kenaikan temperatur cetakan yang diberikan. Di sisi lain, selisih antara temperatur tuang terhadap temperatur cetakan juga menentukan nilai *filling time*, yang mana semakin kecil selisih temperatur, yang mana pada penelitian ini adalah 675°C-400°C maka waktu yang diperlukan logam cair untuk memenuhi cetakan semakin cepat.

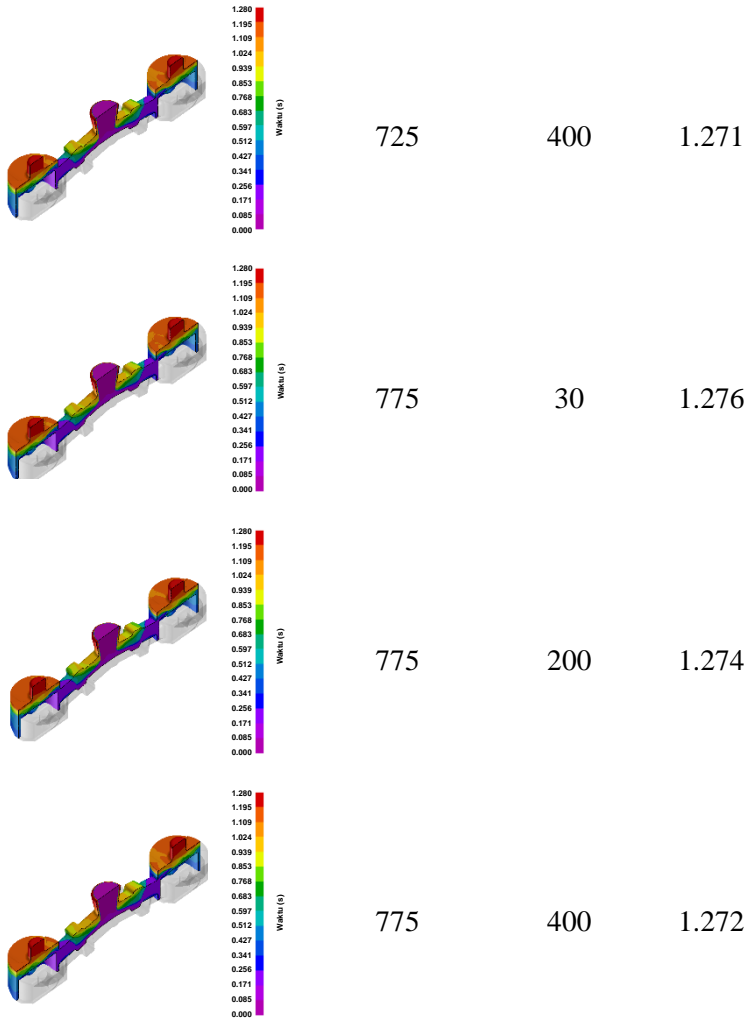
Berkaitan dengan hal tersebut, pada seluruh variasi temperatur tuang dan temperatur cetakan yang diberikan pada dua *pattern per mold*, Tabel 4.2 dan empat *pattern per mold*, Tabel 4.3 juga memiliki tipikal pola aliran dan tren perubahan yang serupa terhadap besarnya *filling time*. Hasilnya, seiring dengan penambahan temperatur cetakan maka akan menghasilkan waktu pengisian yang semakin singkat, sedangkan meningkatnya temperatur tuang bekerja sebaliknya.

**Tabel 4. 2** Hasil simulasi nilai *filling time* pada variasi temperatur tuang dan temperatur cetakan dalam dua *pattern per mold*.

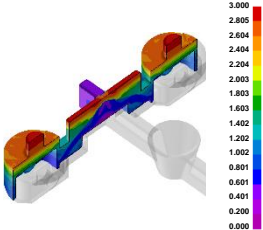
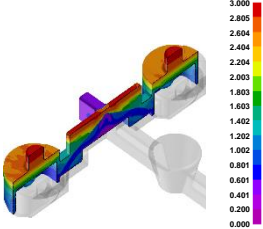
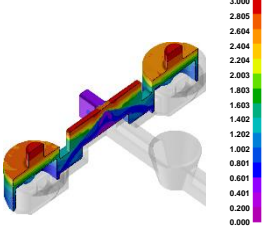
Gradien <i>Filling Time</i>	Temperatur Tuang (°C)	Temperatur Cetakan (°C)	<i>Filling Time</i> (s)
	675	30	1.275

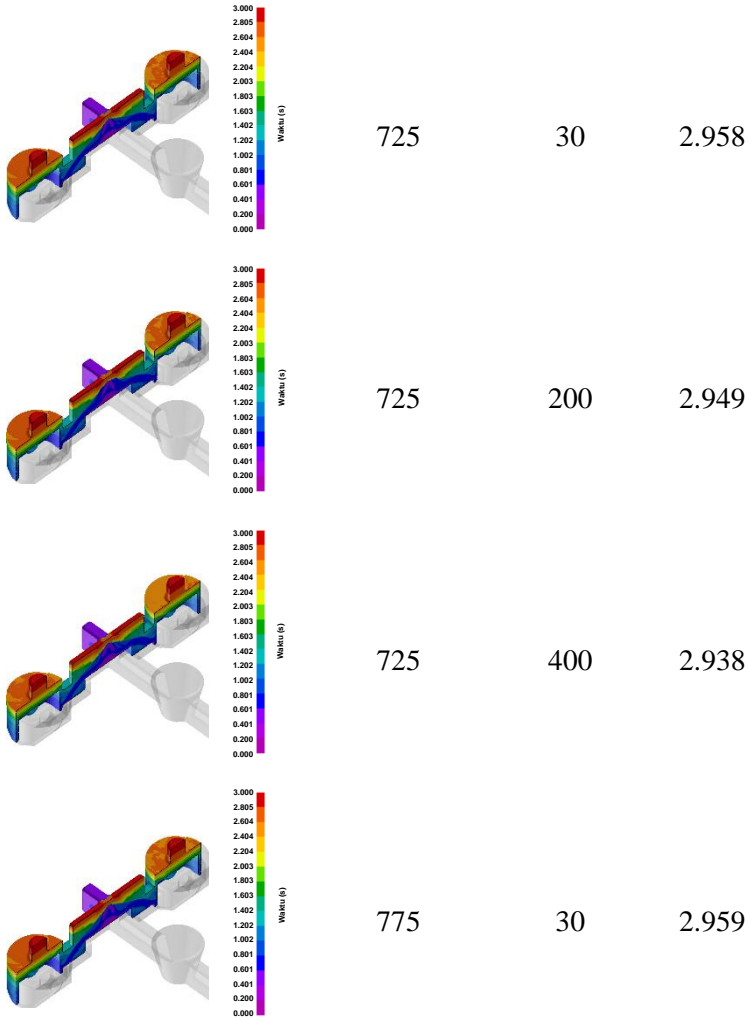


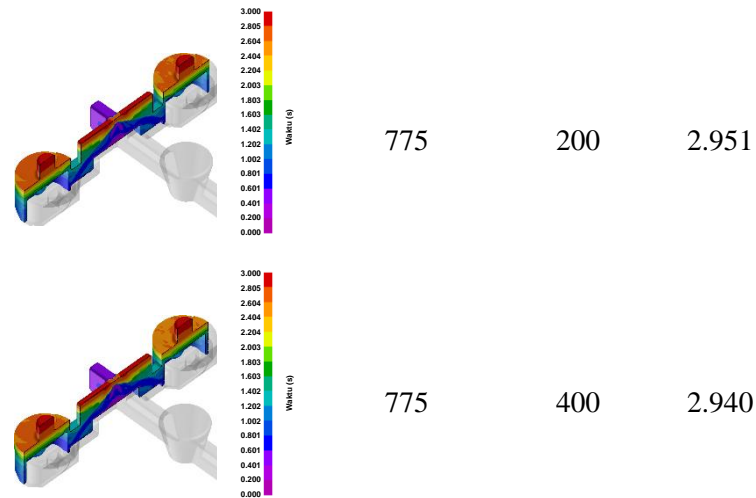
	675	200	1.273
	675	400	1.271
	725	30	1.276
	725	200	1.274



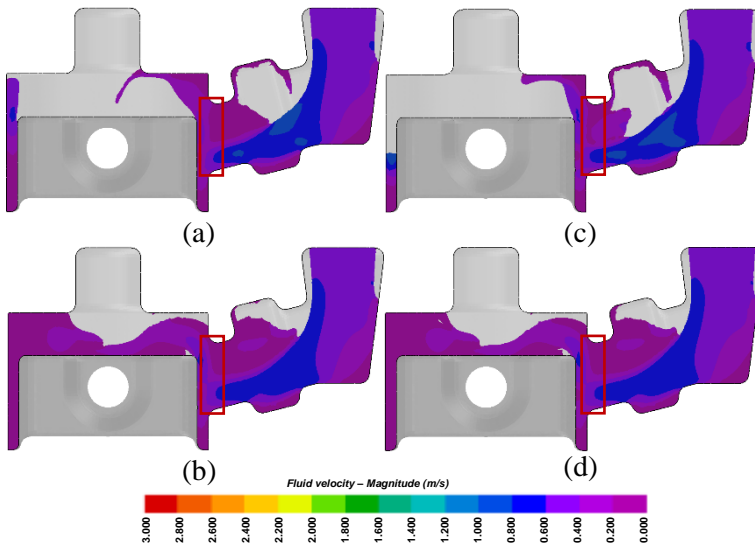
**Tabel 4.3** Hasil simulasi nilai *filling time* pada variasi temperatur tuang dan temperatur cetakan dalam empat *pattern per mold*.

Gradien <i>Filling Time</i>	Temperatur Tuang (°C)	Temperatur Cetakan (°C)	<i>Filling Time</i> (s)
	675	30	2.956
	675	200	2.947
	675	400	2.936

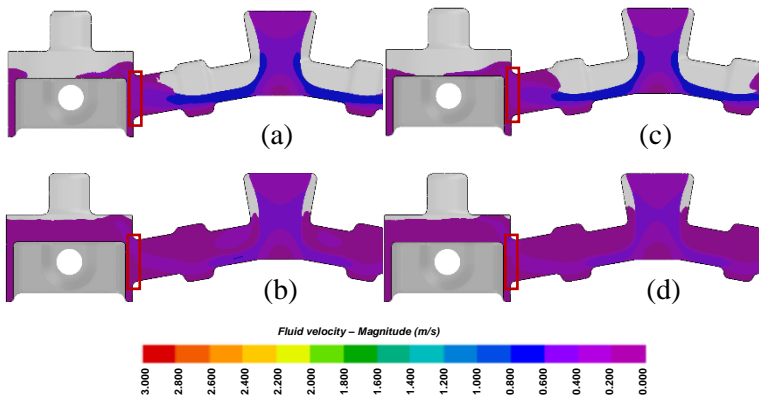




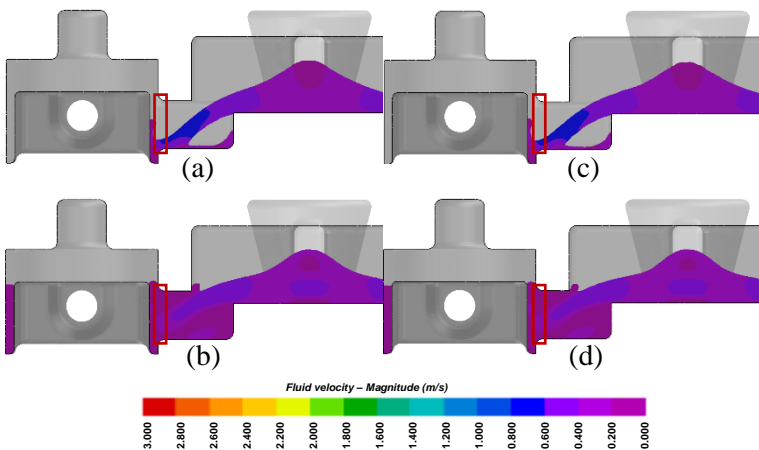
Pada masing-masing variasi *pattern per mold*, didapatkan hasil *filling time* tertinggi pada 675°C-400°C dan terendah pada 775°C-30°C. Kecepatan aliran sesaat memasuki *mold cavity*, dalam bentuk gradien kecepatan, memiliki rentang nilai 0-0.800 m/s pada variabel satu *pattern s* (Gambar 4.1), 0-0.600 m/s pada dua *pattern* (Gambar 4.2), dan 0-0.400 m/s pada empat (Gambar 4.3) *pattern per mold*.



**Gambar 4. 1** Potongan penampang kecepatan aliran sesaat memasuki *mold cavity*, variasi 675°C-400°C (a) s=210 serta (b) s=280 dan variasi 775°C-30°C, (c) s=210 serta (d) s=280 pada satu *pattern per mold*.



**Gambar 4.2** Potongan penampang kecepatan aliran sesaat memasuki *mold cavity*, variasi 675°C-400°C (a)  $s=300$  serta (b)  $s=400$  dan variasi 775°C-30°C, (c)  $s=300$  serta (d)  $s=400$  pada dua *pattern per mold*.



**Gambar 4.3** Potongan penampang kecepatan aliran sesaat memasuki *mold cavity*, variasi 675°C-400°C (a)  $s=390$  serta (b)  $s=520$  dan variasi 775°C-30°C, (c)  $s=390$  serta (d)  $s=520$  pada empat *pattern per mold*.

Hasil kecepatan fluida sesaat memasuki *mold cavity* yang ditunjukkan oleh gambar di atas lebih kecil daripada kecepatan yang di desain, dimana  $Q = v_{pouring}$  desain sebesar 0.4725 kg/s, apabila dikonversikan dalam satuan m/s adalah:

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$V = \frac{0.4725 \text{ kg}}{2740 \text{ kg/m}^3}$$

$$Q = \frac{V}{t} = A_{ingate} \cdot v_{ingate} = 1.72445 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$A_{ingate} = 4,144816 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\frac{1.72445 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{4,144816 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = v_{ingate}$$

$$v_{ingate} = 0.416 \text{ m/s}$$

Berdasarkan persamaan Navier-Stokes, bahwa laju aliran dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain tekanan, densitas, viskositas, dan gaya eksternal lainnya secara molekular (Reikher, 2017). Variabel tersebut besarnya dipengaruhi oleh perubahan temperatur dan geometri benda. Adianta (2018) mengatakan bahwa kesesuaian temperatur dengan geometri, dalam kasusnya adalah tebal *mold cavity* terhadap fluiditas, merupakan keharusan dalam meningkatkan kualitas coran. Temperatur penuangan secara teori dapat meningkatkan laju aliran, namun ketidaksesuaian desain cetakan justru dapat menurunkan laju aliran.

Pada Gambar 4.1, Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 menunjukkan bahwa kecepatan aliran daerah *ingate* pada variasi temperatur 775°C-30°C relatif lebih besar daripada 675°C-400°C. Namun, hasil akhirnya tidak demikian. Hal tersebut disebabkan oleh vektor aliran fluida pada *ingate* mengalami tumbukan tegak lurus terhadap dinding piston sehingga efek *bounce-back* pada laju yang lebih cepat akan menimbulkan lebih besar deselerasi. Hasil ini juga serupa dengan penelitian Prabhakara (2011) yang mengalami penurunan angka *filling time* pada penambahan temperatur tuang.



---


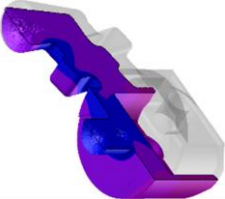
#### 4.2 Hasil Simulasi *Solidification Time*

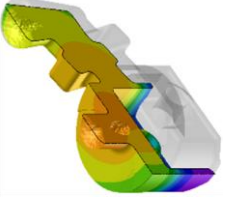

Pada penelitian ini, analisis terhadap waktu solidifikasi dilakukan untuk mengetahui efek yang ditimbulkan oleh temperatur penuangan dan temperatur cetakan dalam membentuk fraksi solidus secara bertahap. Bahwasanya, cepat atau lambatnya *filling time* bukan merupakan satu-satunya faktor dalam menentukan kualitas proses pengecoran. Umumnya, waktu solidifikasi dapat membantu dalam pengidentifikasi *molten metal* yang telah mengalami solidifikasi sebelum cetakan penuh. Hal tersebut sangat diperlukan dalam membantu proses evaluasi sistem saluran.

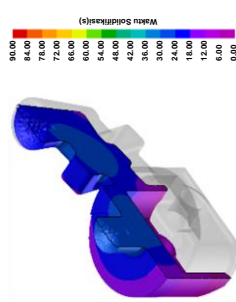
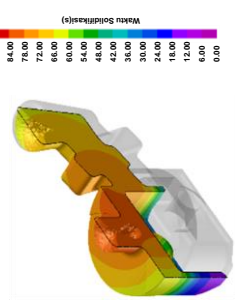
Setelah dilakukan proses *solving* terhadap proses pengecoran *gravity permanent casting* pada paduan aluminium MAHLE *eutectic alloy* M124. Didapatkan hasil berupa waktu awal terbentuknya fraksi solidus hingga tahapan akhir pembentukan fraksi solidus pada variasi temperatur tuang 675°C, 725°C, dan 775°C dengan variasi temperatur cetakan 30°C, 200°C, dan 400°C. Hasil tersebut kemudian dijadikan referensi dalam pengkarakterisasian perilaku aliran multifasa fluida selama proses pengecoran ini.

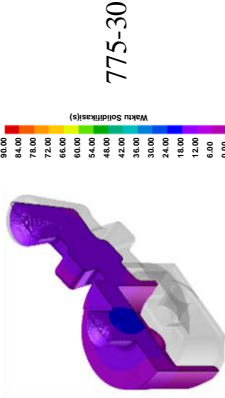
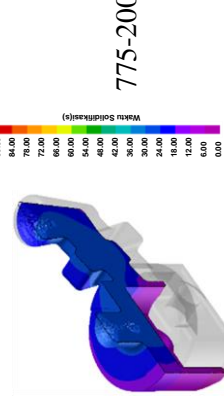
Dibandingkan dengan hasil nilai *filling time*, *solidification time* memiliki tren yang berbeda. Waktu solidifikasi mengalami perubahan yang signifikan sejalan dengan bertambahnya temperatur tuang maupun temperatur cetakan. Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.4 untuk satu *pattern*, Tabel 4.5 untuk dua *pattern*, dan Tabel 4.6 untuk empat *pattern per mold*.

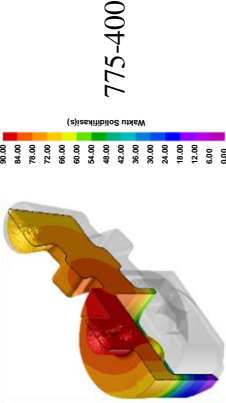
**Tabel 4.4** Hasil simulasi nilai *solidification time* pada variasi temperatur tuang dan temperatur cetakan dalam satu *pattern per mold*.

Gradien Solidification Time	T <sub>p</sub> - T <sub>m</sub> (°C)	Solidifikasi			
		t <sub>0</sub> (s)	t <sub>1</sub> (s)	%Fill	%Solid
 <p>675-30</p>	0.3133 <sup>[1]</sup>	16.41 <sup>[1]</sup>	53.06 <sup>[1]</sup>	5.913x10 <sup>-6</sup> [1] 100 <sup>[1]</sup>	
					 <p>675-200</p>

Gradien <i>Solidification Time</i>	$T_p - T_m$ (°C)	Solidifikasi			
		$t_0$ (s)	$t_1$ (s)	%Solid	
 <p>675-400</p>	1.598	75.02	100	2.251x10 <sup>-2</sup>	
					 <p>725-30</p>
		0.6249	17.36	100	2.761x10 <sup>-5</sup>
				100	100 <sup>1</sup>

Gradien Solidification Time	T <sub>p</sub> - T <sub>m</sub> (°C)	Solidifikasi			
		t <sub>0</sub> (s)	t <sub>1</sub> (s)	%Fill	%Solid
 <p>725-200</p>	0.5220 <sup>[2]</sup>	0.5509 <sup>[2]</sup>	88.27 <sup>[2]</sup>	1.658x10 <sup>-5</sup> [2]	
		0.9662	100	3.560x10 <sup>-3</sup>	
 <p>725-400</p>	2.052	80.82	100	1.872x10 <sup>-2</sup>	
		100	100	100	

Gradien <i>Solidification Time</i>	$T_p - T_m$ (°C)	Solidifikasi			
		$t_0$ (s)	$t_1$ (s)	%Fill	%Solid
 <p>775-30</p>	0.4885 <sup>[2]</sup>	0.5534 <sup>[2]</sup>	82.56 <sup>[2]</sup>	1.673x10 <sup>-5</sup> [2]	
	0.8282	18.78	100	100	
 <p>775-200</p>	1.113	28.50	100	2.354x10 <sup>-4</sup>	
			100	100	

Gradien Solidification Time	$T_p - T_m$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Solidifikasi		
		$t_0$ (s)	$t_1$ (s)	%Solid
	775-400	2.360	87.56	$1.533 \times 10^{-2}$
		100	100	100

\* [1] Solidifikasi prematur


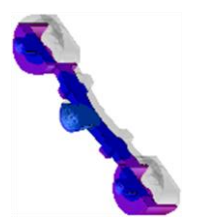
[2] *Splashing* (solidifikasi)

Waktu solidifikasi yang didapatkan pada simulasi tidak hanya merepresentasikan perubahan waktu terhadap perubahan fraksi solid saja, melainkan juga dapat melihat probabilitas terjadinya solidifikasi prematur dan *mis run sensitivity* akibat perilaku *splashing* aliran yang berinteraksi dengan cetakan (Wu dkk., 2018). Hadirnya *splashing* atau cipratan ditimbulkan karena adanya tumbukan antar molekul fluida. Selain itu, tumbukan tersebut juga memicu terjadinya turbulensi aliran yang dapat menggerus cetakan serta dapat membentuk porositas dari gas yang terjebak.

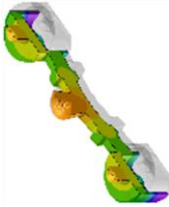

Hasilnya, pada variasi satu *pattern per mold*, setiap kenaikan temperatur tuang dan temperatur cetakan berdampak pada penurunan laju solidifikasi. Berdasarkan data hasil simulasi, Tabel 4.4, variasi 675°C-30°C menunjukkan adanya solidifikasi prematur, dimana solidifikasi terjadi sebelum logam paduan sepenuhnya memenuhi cetakan (53.06% *fill*). Akibatnya, hasil coran berisiko mengalami cacat *mis run* dan atau *cold shut*, meskipun dalam skala mikro. Hal tersebut tentunya merugikan bagi sifat mekanik material yang dihasilkan.

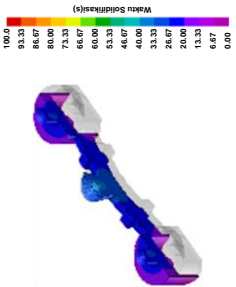
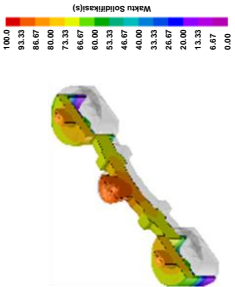
Kecenderungan terbentuknya solidifikasi prematur terjadi karena temperatur tuang (675°C) mendekati temperatur solidus paduan (568°C-499°C) sehingga ketika terjadi tumbukan terhadap dinding cetakan maka butiran tersebut secara berhamburan memiliki risiko pemadatan yang lebih tinggi dan mempropagasi pembentukan nukleus (butir) secara heterogen yang tidak sempurna. Meskipun kadang kala dapat kembali ke bentuk *molten metal* apabila temperatur alirannya masih di atas temperatur solidus, seperti pada variasi yang ditunjukkan dengan notasi [2]. Hal tersebut dapat diraih dengan pemberian *pre-heat* pada cetakan.

**Tabel 4.5** Hasil simulasi nilai *solidification time* pada variasi temperatur tuang dan temperatur cetakan dalam dua *pattern per mold*.


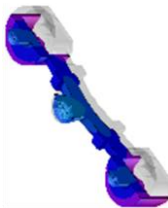
Gradien Solidification Time	T <sub>p</sub> - T <sub>m</sub> (°C)	Soldifikasi			
		t <sub>0</sub> (s)	t <sub>1</sub> (s)	%Fill	%Solid
	675-30	0.3862 <sup>[2]</sup>	0.5680 <sup>[2]</sup>	30.51 <sup>[2]</sup>	1.579x10 <sup>-5</sup> [2]
		0.5795 <sup>[1]</sup>	21.03 <sup>[1]</sup>	44.75 <sup>[2]</sup> 45.65 <sup>[1]</sup>	0 <sup>[2]</sup> 2.429x10 <sup>-3</sup> [1]
	675-200	0.4878 <sup>[2]</sup>	0.5358 <sup>[2]</sup>	38.51 <sup>[2]</sup>	2.817x10 <sup>-5</sup> [2]
		0.7764 <sup>[1]</sup>	31.42 <sup>[1]</sup>	42.26 <sup>[2]</sup> 61.13 <sup>[1]</sup>	0 <sup>[2]</sup> 7.966x10 <sup>-6</sup> [1]

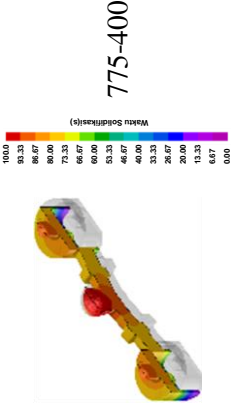


Gradien Solidification Time	$T_p - T_m$ (°C)	Solidifikasi			
		$t_0$ (s)	$t_1$ (s)	%Fill	%Solid
 <p>675-400</p>	1.440	83.44	100	$8.727 \times 10^{-6}$	
	0.4861 <sup>[2]</sup>	0.5445 <sup>[2]</sup>	38.34 <sup>[2]</sup>	$2.632 \times 10^{-5}$ <sup>[2]</sup>	
 <p>725-30</p>	0.7592 <sup>[1]</sup>	22.38 <sup>[1]</sup>	100 <sup>[1]</sup>	100 <sup>[1]</sup>	
	0.7592 <sup>[1]</sup>	22.38 <sup>[1]</sup>	59.70 <sup>[1]</sup>	$4.338 \times 10^{-6}$ <sup>[1]</sup>	

Gradien Solidification Time	$T_p - T_m$ (°C)	Solidifikasi			
		$t_0$ (s)	$t_1$ (s)	%Fill	%Solid
 <p>725-200</p>	0.9950 <sup>[1]</sup>	33.63 <sup>[1]</sup>	78.20 <sup>[1]</sup>	1.921x10 <sup>-6</sup> <sup>[1]</sup>	
	1.871	88.92	100	100	
 <p>725-400</p>	1.871	88.92	100	3.678x10 <sup>-6</sup>	
	1.871	88.92	100	100	

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Gradien <i>Solidification Time</i>	$T_p - T_m$ (°C)	Solidifikasi			
		$t_0$ (s)	$t_1$ (s)	%Fill	%Solid
 <p>775-30</p>	775-30	0.9198 <sup>[1]</sup>	24.11 <sup>[1]</sup>	72.23 <sup>[1]</sup>	1.042x10 <sup>-5</sup> [1] 100 <sup>[1]</sup>
 <p>775-200</p>	775-200	1.229 <sup>[1]</sup>	35.70 <sup>[1]</sup>	96.46 <sup>[1]</sup>	2.636x10 <sup>-6</sup> [1] 100 <sup>[1]</sup>



Gradien Solidification Time	$T_p - T_m$ (°C)	Solidifikasi		
		$t_0$ (s)	$t_1$ (s)	%Solid
	775-400	2.541	94.56	7.553x10 <sup>-3</sup>
		100	100	100

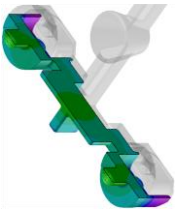

- \* [1] Solidifikasi prematur  
[2] *Splashing* (solidifikasi)

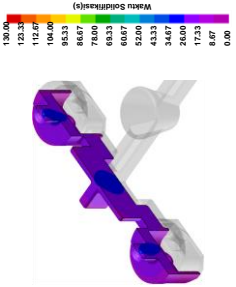
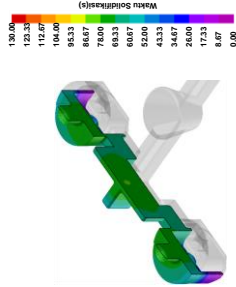
Kemungkinan terjadinya *splashing* akan meningkat seiring dengan kenaikan temperatur tuang dan cetakan. Viskositas dan densitas yang rendah akan meningkatkan risiko turbulensi dan *splashing*. Melalui hasil simulasi, temperatur tuang dan temperatur cetakan terlihat secara jelas memiliki pengaruh signifikan dalam menghindari terjadinya solidifikasi prematur. Ditinjau dari hasil proses solidifikasi, kenaikan temperatur dapat menghindari terjadinya solidifikasi prematur. Namun, konsekuensinya berupa turbulensi dan *splashing* sehingga risiko terjadinya cacat *mis run* dan atau *cold shut* pun akan meningkat. Meskipun hal tersebut dapat ditangani seiring dengan peningkatan temperatur cetakan yang membuat temperatur lebih stabil dalam menjaga fasa likuidusnya. Hal tersebut dapat dilihat pada %*fill* awal mula terjadinya fasa solidus yang secara signifikan meningkat seiring dengan kenaikan temperatur cetakan.

Hasil pada variasi dua *pattern per mold* menunjukkan bahwa solidifikasi prematur terjadi tidak hanya pada satu variasi saja, seperti pada satu *pattern per mold*. Solidifikasi prematur pada dua *pattern* terjadi pada seluruh variasi temperatur cetakan 30°C dan 200°C, sedangkan *mis run sensitivity* tertinggi akibat dari *splashing* terjadi pada variasi temperatur 675°C-30°C, 675°C-200°C, dan 725-30°C.

**Tabel 4. 6** Hasil simulasi nilai *solidification time* pada variasi temperatur tuang dan temperatur cetakan dalam empat *pattern per mold*.


Gradien Solidification Time	T <sub>p</sub> - T <sub>m</sub> (°C)	Solidifikasi			
		t <sub>0</sub> (s)	t <sub>1</sub> (s)	%Fill	%Solid
 <p>Waktu Solidifikasi(s)</p> <p>130.00 123.33 116.67 110.00 103.33 96.67 90.00 83.33 76.67 70.00 63.33 56.67 50.00 43.33 36.67 30.00 23.33 16.67 0.00</p>	675-30	0.9079 <sup>[2]</sup>	0.9564 <sup>[2]</sup>	31.10 <sup>[2]</sup>	7.497x10 <sup>-6</sup> [2]
		1.031 <sup>[1]</sup>	30.71 <sup>[1]</sup>	35.26 <sup>[1]</sup>	3.293x10 <sup>-6</sup> [1]
 <p>Waktu Solidifikasi(s)</p> <p>130.00 123.33 116.67 110.00 103.33 96.67 90.00 83.33 76.67 70.00 63.33 56.67 50.00 43.33 36.67 30.00 23.33 16.67 0.00</p>	675-200	1.165 <sup>[2]</sup>	1.176 <sup>[2]</sup>	39.86 <sup>[2]</sup>	1.114x10 <sup>-5</sup> [2]
		1.180 <sup>[1]</sup>	44.22 <sup>[1]</sup>	40.35 <sup>[1]</sup>	6.678x10 <sup>-6</sup> [1]

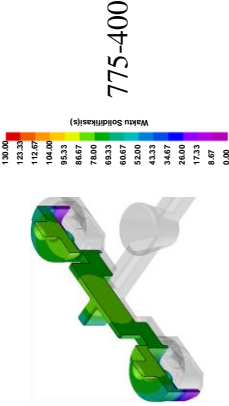
Gradien Solidification Time	$T_p - T_m$ (°C)	Solidifikasi			
		$t_0$ (s)	$t_1$ (s)	%Fill	%Solid
 <p>675-400</p>	675-400	1.624 <sup>[1]</sup>	109.70 <sup>[1]</sup>	55.51 <sup>[1]</sup>	7.138x10 <sup>-6</sup> [1] 100 <sup>[1]</sup>
 <p>725-30</p>	725-30	1.144 <sup>[1]</sup>	33.02 <sup>[1]</sup>	39.10 <sup>[1]</sup>	1.580x10 <sup>-5</sup> [1] 100 <sup>[1]</sup>

Gradien Solidification Time	T <sub>p</sub> - T <sub>m</sub> (°C)	Solidifikasi			
		t <sub>0</sub> (s)	t <sub>1</sub> (s)	%Fill	%Solid
 <p>725-200</p>	1.400 <sup>[1]</sup>	46.55 <sup>[1]</sup>	47.81 <sup>[1]</sup>	2.344x10 <sup>-6</sup> [1] 100 <sup>[1]</sup>	
 <p>725-400</p>	2.260 <sup>[1]</sup>	117.60 <sup>[1]</sup>	77.06 <sup>[1]</sup>	7.416x10 <sup>-7</sup> [1] 100 <sup>[1]</sup>	

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



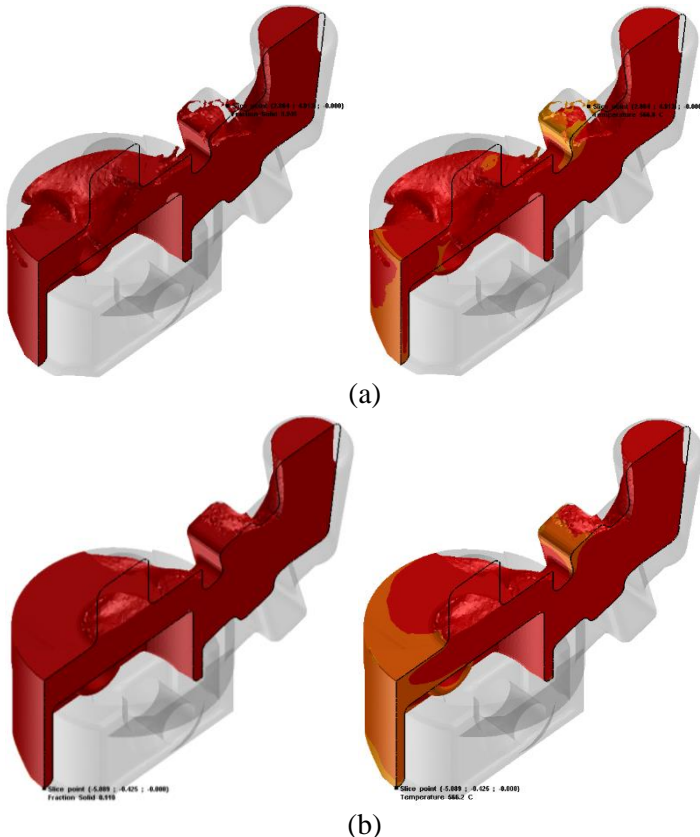
Gradien <i>Solidification Time</i>	$T_p - T_m$ (°C)	Solidifikasi			
		$t_0$ (s)	$t_1$ (s)	%Fill	%Solid
 <p>775-30</p>	1.319 <sup>[1]</sup>	34.84 <sup>[1]</sup>	44.99 <sup>[1]</sup>	1.300x10 <sup>-6</sup> [1] 100 <sup>[1]</sup>	
	775-200	1.551 <sup>[1]</sup>	49.37 <sup>[1]</sup>	52.90 <sup>[1]</sup>	4.308x10 <sup>-6</sup> [1] 100 <sup>[1]</sup>

Gradien Solidification Time	$T_p - T_m$ (°C)	Solidifikasi		
		$t_0$ (s)	$t_1$ (s)	%Solid
 <p>775-400</p>		2.692 <sup>[1]</sup>	124.70 <sup>[1]</sup>	1.756x10 <sup>-6</sup> [1]
			91.64 <sup>[1]</sup>	100 <sup>[1]</sup>

\* [1] Solidifikasi prematur  
[2] *Splashing* (solidifikasi)

Dalam memenuhi efisiensi proses pengecoran, dalam hal ini banyaknya *patter per mold* dalam satu siklus, temperatur tuang dan temperatur cetakan memiliki peran yang krusial. Dengan menggunakan *pouring rate* yang sama pada satu dan dua *pattern per mold* seketika memasuki *mold cavity*, 0.4725 kg/s, hasil simulasi proses pengecoran pada empat *pattern per mold* menunjukkan sebagian besar terjadi solidifikasi prematur. Solidifikasi prematur tercepat terjadi pada variasi 675°C-30°C, dimana bermula saat logam cair memenuhi 35.26% rongga cetakan (termasuk sistem saluran), terlebih lagi ketika telah mencapai 100%*fill*, telah terjadi pepadatan sebesar 5.892%. Hal menunjukkan bersanya risiko *mis run* dan atau *cold shut* pada sebagian hasil coran yang lebih tinggi dibandingkan variasi lainnya. Kehadiran prematur soldifikasi dapat diminimalisir seiring dengan peningkatan temperatur tuang dan cetakan, dapat dilihat pada variasi 775°C-400°C, dimana soldifikasi prematur bermula sesaat seluruh logam cair hampir sepenuhnya (91.64%) mengisi cetakan.

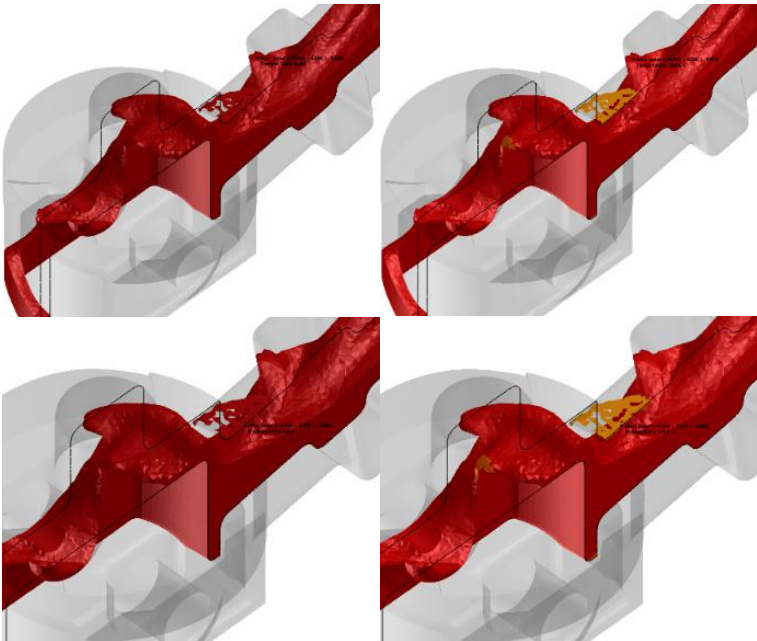
Di samping itu, melalui simulasi ini, dapat diketahui juga bagaimana kecenderungan efek yang ditimbulkan variasi temperatur yang diberikan terhadap *mis run sensitivity* pada fenomena *splashing*. Pada Gambar 4.4 dapat dilihat secara jelas bagaimana kecenderungan *splashing* akibat tumbukan aliran logam dapat terbentuk pada pengecoran satu *pattern per mold*. Sistem saluran pada penelitian ini, *reducer* kecepatan ditambahkan sebagai pengontrol aliran (turbulensi), sesaat sebelum bertumbukan dengan dinding piston, sekaligus sebagai filter kontaminan (bawah) dan *aluminium dross*, dimana *aluminium dross* selalu terbentuk pada permukaan *molten metal*.



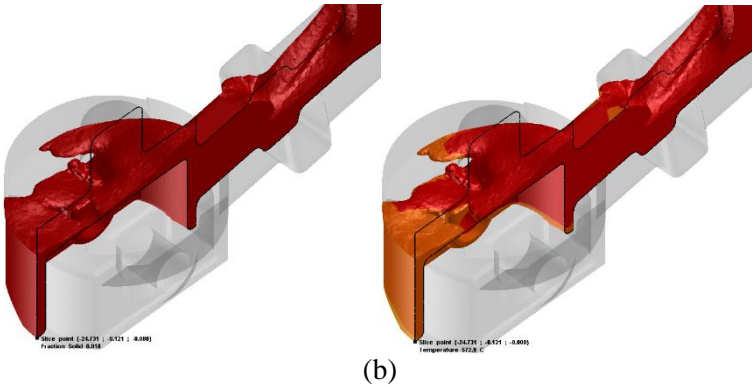
**Gambar 4.4** Pembentukan fraksi solidus pada variasi satu *pattern per mold* ( $675^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ ), (a) soldifikasi akibat *splashing* dan (b) solidifikasi prematur.

Pada satu *pattern per mold*, solidifikasi prematur hanya terjadi pada variasi temperatur  $675^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ . Sebagaimana yang dikehutai bahwa temperatur variasi tersebut sangat lah mendekati dengan temperatur solidus dari paduan ( $568^{\circ}\text{C} - 499^{\circ}\text{C}$ ), hasilnya ketika logam mengalami tumbukan maka temperatur tidak cukup stabil dalam menjaga fasa likuidnya sehingga terbentuk lah solidifikasi, Gambar 2.20(a). Prematur soldifikasi yang terjadi

pada pengecoran satu *pattern* bermula dari dinding piston paling bawah sehingga terbentuk *edge effect* pada perambatan dan pertumbuhan fasa solidnya atau dikenal dengan istilah *directional solidification*, Gambar 2.20(b) (Chastain, 2004). Proses awal pembentukan solidifikasi pada dua *pattern* juga memiliki tipikal yang serupa dengan satu *pattern*, yaitu *directional solidification*. Hal tersebut ditunjukkan oleh Gambar 4.5.

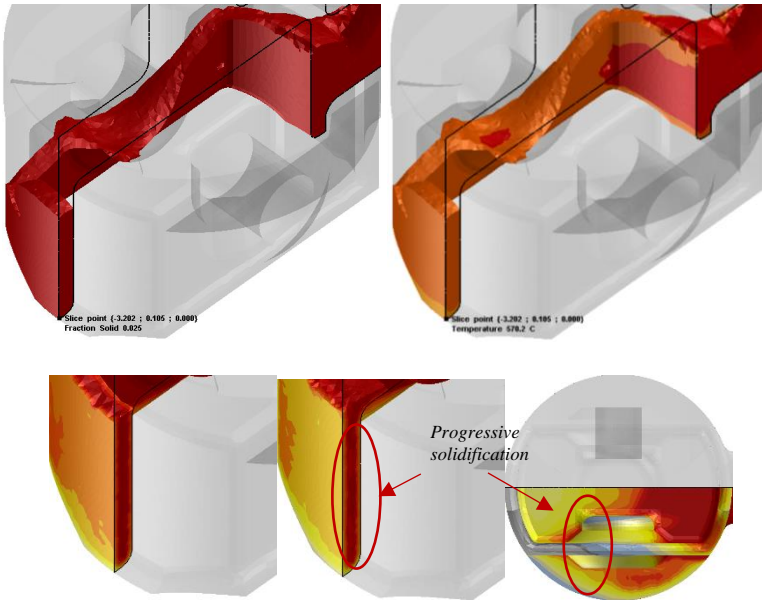


(a)



**Gambar 4.5** Pembentukan fraksi solidus pada variasi dua *pattern per mold* ( $725^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ ), (a) soldifikasi akibat *splashing* dan (b) solidifikasi prematur.

Dibandingkan dengan hasil satu *pattern* dan dua *pattern*, pada pengecoran empat *pattern* memiliki pola perambatan dan pertumbuhan fasa solid yang berbeda (Gambar 4.6). Pada variasi ini terlihat secara jelas pola *progressive solidification*, artinya bahwa pemberian temperatur tuang dan cetakan pada seluruh variasi empat *pattern*, pada sistem saluran yang digunakan menghasilkan tidak cukup kecepatan aliran. Konsekuensinya, temperatur mencapai batas solidus sebelum fluida sepenuhnya memenuhi cetakan. Hal ini berdampak pada risiko cacat selama pembentukan fraksi solid, meskipun pada variasi empat *pattern* hampir seluruhnya dapat menghindari terjadinya soldifikasi akibat tumbukan, kecuali pada variasi  $675^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$  dan  $675^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ . Dalam kondisi ini lah variasi temperatur tuang dan cetakan memainkan perannya dalam menentukan kualitas proses pengecoran.



**Gambar 4.6** Pembentukan fraksi solidus pada variasi empat *pattern per mold* ( $775^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ ).

---




























### 4.3 Hasil Simulasi Formasi *Defect*

Simulasi pada penelitian ini tidak hanya memprediksi penyebab dan proses terbentuknya cacat selama proses pemenuhan cetakan dan soldifikasi, melainkan juga berorientasi pada hasil coran, yang mana digambarkan oleh persebaran *defect* yang berupa *shrinkage porosity*. Melalui penelitian ini, dapat dilihat bahwa untuk mendapatkan efisiensi proses dan kualitas hasil pengecoran yang tinggi maka memainkan variabel temperatur tuang dan cetak merupakan alternatif yang paling ekonomis dibandingkan dengan *trial and error* desain sistem saluran, penambahan piranti pendingin, dan material cetakan. Hal tersebut mengacu pada kondisi riil dalam proses pengecoran, dimana jumlah hasil coran tiap siklus dan waktu yang diperlukan untuk mencapai temperatur solidus maupun temperatur akhir, yang nantinya digunakan sebagai temperatur awal cetakan akan mempengaruhi efisiensi pada siklus proses pengecoran.




























Simulasi berhasil mendapatkan persebaran cacat berupa *voids* akibat dari penyusutan dan *shrinkage porosity*, baik skala makro maupun mikro. Adapun terjadinya cacat *mis run* dan atau *cold shut* juga dapat diperkirakan diperlihatkan melalui proses pembentukan fraksi solid, yang telah dibahas pada sub-bab 4.2. Berikut merupakan formasi *defect* pada hasil simulasi pengecoran piston MAHLE *eutectic alloy* M124.



**Tabel 4. 7** Persebaran cacat pada variasi temperatur tuang dan temperatur cetakan dalam satu *pattern per mold*.

Variasi $T_{\text{tuang}} - T_{\text{cetakan}}$	<i>Shrinkage Porosity (Atas)</i>	<i>Shrinkage Porosity (Depan)</i>	<i>Voids</i>
675°C-30°C			
675°C-200°C			
675°C-400°C			
725°C-30°C			
725°C-200°C			
725°C-400°C			
775°C-30°C			
775°C-200°C			
775°C-400°C			

**Tabel 4. 8** Persebaran cacat pada variasi temperatur tuang dan temperatur cetakan dalam dua *pattern per mold*.

Variasi $T_{\text{tuang}} - T_{\text{cetakan}}$	<i>Shrinkage Porosity (Atas)</i>	<i>Shrinkage Porosity (Depan)</i>	<i>Voids</i>
675°C-30°C			
675°C-200°C			
675°C-400°C			
725°C-30°C			
725°C-200°C			
725°C-400°C			
775°C-30°C			
775°C-200°C			
775°C-400°C			

**Tabel 4.9** Persebaran cacat pada variasi temperatur tuang dan temperatur cetakan dalam empat *pattern per mold*.

Variasi $T_{\text{tuang}} - T_{\text{cetakan}}$	<i>Shrinkage Porosity (Atas)</i>	<i>Shrinkage Porosity (Depan)</i>	<i>Voids</i>
675°C-30°C			
675°C-200°C			
675°C-400°C			
725°C-30°C			
725°C-200°C			
725°C-400°C			
775°C-30°C			
775°C-200°C			
775°C-400°C			

Kualitas akhir dari sebuah hasil proses pengecoran, salah satunya dapat dilihat melalui persebaran formasi *defect/cacat*, dalam hal ini adalah *shrinkage porosity*. Variasi satu, dua, dan empat *pattern*, secara berurutan dalam Tabel 4.7, Tabel 4.8, dan Tabel 4.9 menunjukkan bahwa adanya pengaruh temperatur terhadap besarnya porositas yang dihasilkan.

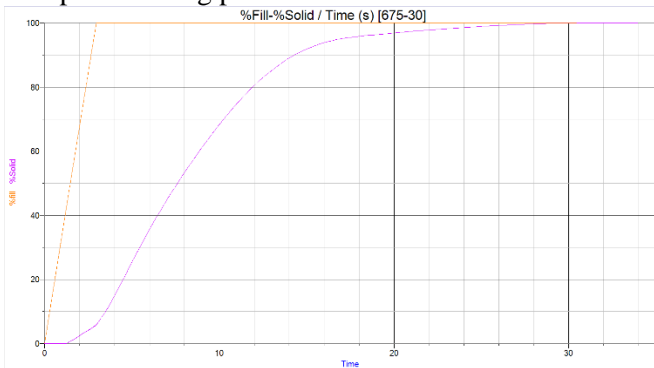
Hasilnya, dapat dilihat secara jelas bahwa semakin tinggi temperatur cetakan maka risiko terjadinya *shrinkage porosity* akan semakin meningkat seragam di seluruh komponen piston. Lain halnya pada daerah dinding piston, dimana temperatur tuang bekerja sebaliknya. Melalui hasil tersebut dapat diprediksi bahwa porositas yang terjadi pada dinding piston kemungkinan terjadi karena adanya *cold shut*, dimana cenderung terjadi pada komponen yang terlalu tipis (Respati dkk., 2010).

Komponen dengan geometri yang tipis memiliki rasio *surface area* terhadap volume yang besar, akibatnya semakin besar pula *heat loss* dan *friction loss*-nya (Fahrudin, 2015). Hal ini lah yang menyebabkan terjadinya penutupan/tidak bertemunya antar butir ketika proses pertumbuhan butir, selanjutnya *riser/feeder* tidak dapat menyediakan cukup *molten metal* untuk memenuhi daerah yang tertutup. Mengingat pada Gambar 4.7 terlihat jelas terjadi *progressive solidification*.

Konduktivitas termal pada paduan (aluminium) lebih besar dibandingkan dengan konduktivitas cetakan (besi cor). Dampaknya, tiap kenaikan temperatur tuang, pada penelitian ini, dapat menghindari terjadinya porositas akibat *cold shut*, sedangkan kenaikan temperatur cetakan (dibawah temperatur likuidus) hanya menambah *hot spot region* yang berdampak pada meningkatnya risiko *shrinkage porosity*, terlebih lagi pada komponen dengan geometri yang relatif besar, lebar, dan dalam. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.7, yang mana pada salah satu grafik laju fasa solid dan laju pengisian (675°C-30°C) menunjukkan bahwa pada awal pembentukan butir, laju solidifikasi sangat lah cepat yang bermula pada dinding piston, lalu melambat pada daerah *crown piston* dan

*riser*. Pada daerah laju solidifikasi yang lambat ini lah yang mengakibatkan terbentuknya *shrinkage porosity*.

Waktu solidifikasi akan semakin bertambah sejalan dengan peningkatan temperatur, baik temperatur cetakan maupun tuang. Namun, pada kasus ini lebih tepatnya adalah temperatur cetakan karena memiliki laju perpindahan panas yang lambat, terlebih lagi kenaikan temperatur tuang justru berhasil mengurangi risiko cacat *cold shut* pada dinding piston.



**Gambar 4.7** Laju pengisian dan laju fasa solid pada empat *pattern per mold* variasi 675°C-30°C.

Berkaitan dengan penelitian ini, Kakas (2008) telah melakukan penelitian secara simulasi dan eksperimental bahwa penambahan komponen pendingin, *chill*, yang diletakkan pada dinding piston hanya menyebabkan porositas. Hal tersebut sesuai dengan penelitian ini karena porositas yang terjadi pada dinding piston adalah akibat dari *cold shut* bukan dari *shrinkage porosity* sehingga diperlukan *treatment* untuk menurunkan laju solidifikasi (*side feeder/riser*), bukan meningkatkan laju solidifikasi dengan menambahkan *chill*.

Besarnya porositas yang berhasil diprediksi menggunakan simulasi elemen hingga adalah sebesar rata-rata 2% (*micro shrinkage porosity*) dan tertinggi pada *hot spot region* dibawah *riser* sebesar 90% (*macro shrinkage porosity*). Mengingat bahwa

satu *element meshing* berbentuk tetrahedron dengan sisi 1mm maka volume porositas,  $V_t$  dapat diperkirakan sebagai berikut:

$$V_t = \frac{1}{3} A \times H$$

$$V_t = \frac{1}{3} \left[ \frac{1}{2} (\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC}) \cdot \overrightarrow{AD} \right]$$

$$V_t = \frac{1}{6} (\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC}) \cdot \overrightarrow{AD}$$

dimana apabila bentuk tetrahedron (Gambar 4.8) diasumsikan dalam perhitungan seluruhnya memiliki sisi  $\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{AC} = \overrightarrow{BC} = \overrightarrow{AD} = \overrightarrow{BD} = \overrightarrow{CD} = 1\text{mm}$  maka,

$$\vec{A} = (0i, 0j, 0k)$$

$$\vec{B} = (0.5i, 0j, 1k)$$

$$\vec{C} = (1i, 0j, 0k)$$

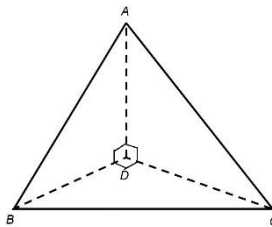
$$\vec{D} = (0.5i, 1j, 0k)$$

sehingga,

$$V_t = 0.167 \text{ mm}^3$$

$$V_{tmacro} = 0.9 \times V_t = 0.1503 \text{ mm}^3$$

$$V_{tmicro} = 0.02 \times V_t = 0.00334 \text{ mm}^3$$



**Gambar 4.8** Volume tetrahedron

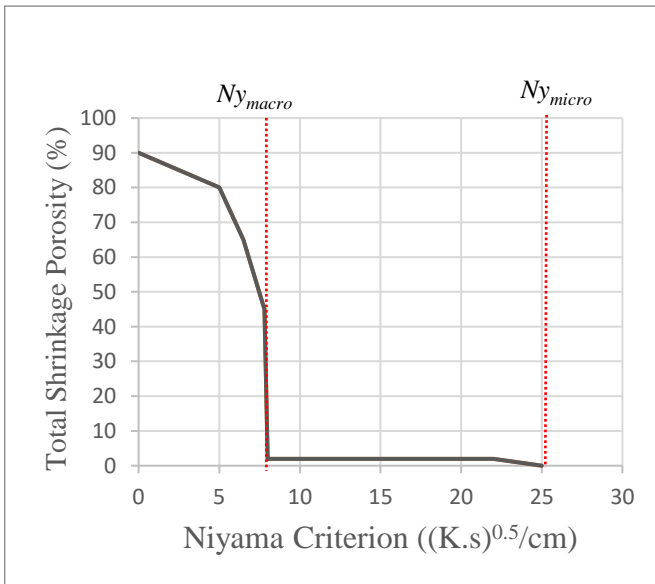
Hasil penelitian ini juga menjawab dari penelitian Jie Zhang (2011), yang mana temperatur cetakan dalam mempercepat

fluiditas dapat menghindari cacat (*cold shut*) pada pengecoran *impeller* dan Kakas (2008) pada penelitiannya, dimana hasil simulasi yang dilakukan dengan menurunkan laju solidifikasi dengan cara penambahan *side feeder* tidak tampak terjadi *micro shrinkage porosity*, dikarenakan pada penelitiannya, porositas dapat terdeteksi apabila hanya memiliki nilai skala diatas 85% porositas. Namun, ketika dilakukan sebuah eksperimen, diluar prediksi bahwa *micro shrinkage porosity* tersebar di permukaan dan dalam dinding piston, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2,21 sebelumnya. Melalui penelitian ini, dengan pemrediksian hingga skala *micro*, sebuah kehadiran porositas berbasis simulasi dapat terprediksi berikut dengan persebarannya, baik skala *micro* maupun *macro*.

Berdasarkan standard Volkswagen (2012) VW50093 mengenai porositas pada coran, standar minimum *defect* yang dapat ditoleransi pada hasil cor berkisar  $<0.5\text{mm}$  dengan jarak minimum dua kali diameternya, untuk *individual pores* diameternya  $\leq 2\text{mm}$ , serta apabila dalam sebuah kumpulan *pores*, tidak ada *pores* yang tidak memenuhi syarat lebih dari empat *pores*. Apabila dikonversikan, besarnya lebar/diameter porositas pada 90% porositas adalah  $0.966\text{mm}$  dan pada 2% adalah  $0.272\text{mm}$ . Berdasarkan standard tersebut maka dapat disimpulkan bahwa porositas yang dianggap tidak memenuhi standard berlokasi tepat dibawah *riser*. Namun, diterima atau tidaknya *defect* tersebut tentu akan menimbulkan konsekuensi pada sifat mekanik material piston sehingga oprimalisasi kedepannya tetap perlu dilakukan.

Pada Gambar 4.9 didapatkan hasil batas Niyama pada parameter yang diterapkan dalam penelitian ini. Bahwasanya, kriteria Niyama digunakan dalam memprediksi kehadiran *porosity*, meskipun kriteria tersebut sekarang ini belum mampu memprediksi porositas pada *aluminium alloy* secara akurat. Akan tetapi, melalui gradien kriteria Niyama, *treatment* yang perlu diaplikasikan kedepannya dapat diperkirakan demi mencapai batas nilai Niyama makro ( $8K^{0.5}.s^{0.5}/\text{cm}$ ) bahkan batas Niyama ( $25K^{0.5}.s^{0.5}/\text{cm}$ ). Seperti yang telah dijelaskan pada bab 2, dimana

untuk mencapai batas Niyama terdapat alternatif, yaitu meningkatkan gradien temperatur dan atau menurunkan laju pendinginan.



**Gambar 4.9** Diagram kriteria Niyama terhadap total *shrinkage porosity* (%).

Setelah melalui serangkaian proses analisis data, didapatkan hasil terbaik berdasarkan hasil simulasi berupa pengecoran pada satu *pattern per mold* dengan variasi 775°C-30°C. Hal ini dikarenakan pada desain sistem saluran yang diterapkan, pada seluruh variasi temperatur cetakan 30°C hampir seluruhnya mengalami solidifikasi prematur, kecuali pada 725°C-30°C dan 775°C-30°C dalam satu *pattern*. Di sisi lain, kenaikan temperatur *pre-heat*, justru menambah risiko hadirnya porositas. Dibandingkan dengan variasi 725°C-30°C, pada 775°C-30°C berhasil menghindari cacat *cold shut* pada dinding piston karena kenaikan temperatur tuang dapat meningkatkan nilai Niyama.



## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga merupakan salah satu alternatif yang cukup ekonomis dalam memodelkan sebuah perilaku aliran multifasa selama proses pengecoran sekaligus memprediksi persebaran cacat/*defect* hasil produk coran. Dalam penelitian *gravity permanent casting* piston MAHLE *eutectic alloy* M124, variasi temperatur cetakan, temperatur tuang, dan jumlah *pattern per mold* merupakan langkah awal yang strategis dalam menentukan kualitas proses pengecoran dan hasil coran, dibandingkan dengan penambahan komponen pendingin, komparasi material cetakan, dan rekayasa perpindahan panas lainnya, atau pun desain sistem saluran. Hasil pada penelitian ini dapat disimpulkan berupa:

1. Temperatur *pre-heat* cetakan
  - a. Kenaikan temperatur *pre-heat* cetakan dapat meningkatkan fluiditas *molten metal*. Hal tersebut ditandai oleh penurunan *filling time*, dimana hasil tercepat diraih pada variasi 675°C-400°C, yaitu 0.5908s pada satu *pattern*, 1.271s pada dua *pattern*, dan 2.936s pada empat *pattern*,
  - b. Secara signifikan, penambahan temperatur *pre-heat* cetakan berdampak pada penurunan laju solidifikasi, yang ditandai oleh *solidification time* yang meningkat. Selain itu, temperatur *pre-heat* cetakan juga dapat menghindari terjadinya soldifikasi prematur,
  - c. Risiko terjadinya *shrinkage porosity* pada *crown piston* dapat ditekan dengan penurunan temperatur *pre-heat* cetakan. Ukuran porositas pada *crown piston* yang terdeteksi sebesar 0.1503 mm<sup>3</sup>.
2. Temperatur tuang
  - a. Seperti halnya pada temperatur cetakan, kenaikan temperatur tuang berdampak pada kenaikan fluiditas

- logam cair. Namun, dalam penelitian ini hasilnya berkebalikan dengan efek yang ditimbulkan oleh temperatur cetakan. Hal tersebut terjadi karena tumbukan fluida terhadap dinding piston menyebabkan deselerasi sesaat memasuki *mold cavity*. *Filling time* terlama terjadi pada variasi 775°C-30°C, yaitu 0.5921s pada satu *pattern*, 1.276s pada dua *pattern*, dan 2.959s pada empat *pattern*,
- b. Peningkatan temperatur tuang juga berdampak pada penurunan laju solidifikasi dan berhasil menghindari terjadinya solidifikasi prematur, tetapi tidak signifikan yang dihasilkan oleh temperatur cetakan. Hal tersebut karena konduktivitas termal cetakan lebih rendah daripada paduan,
  - c. Cacat *cold shut* pada dinding piston dapat diminimalisir seiring dengan peningkatan temperatur tuang. Butir *pores* yang tersebar pada dinding piston berkisar  $0.00334 \text{ mm}^3$ .
3. Jumlah komponen dalam satu cetakan
- a. Dengan menggunakan *pouring rate* yang sama 0.416 m/s, fluiditas aliran pada empat *pattern* menghasilkan laju aliran yang paling rendah sesaat memasuki *mold cavity*, yaitu 0 m/s-400 m/s,
  - b. Berkaitan dengan dampak pada laju aliran, pada satu *pattern* memiliki *heat loss* dan *friction loss* terendah sehingga risiko terjadinya solidifikasi prematur pun rendah, diikuti oleh dua *pattern* dan empat *pattern*,
  - c. Variasi jumlah komponen pada penelitian ini tidak berdampak pada persebaran *defect*. Hal tersebut dapat dikarenakan tiap variasinya memiliki sistem saluran yang serupa. Namun, *riser/feeder* bekerja paling optimal pada variasi dua *pattern*, dimana tidak menunjukkan adanya *voids* dalam komponen piston.

---

## 5.2 Saran

Adapun saran dalam penelitian ini kedepannya adalah sebagai berikut:

1. Mengoptimalkan variasi sistem saluran pada setiap jumlah komponen dalam satu cetakan.
2. Menambahkan *output* berupa tegangan termal selama proses terjadinya solidifikasi untuk mendeteksi cacat *hot tears*.
3. Melakukan validasi secara eksperimental untuk mengetahui keakuratan *casting parameter simulation* yang diterapkan dalam sistem saluran penelitian ini.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- Adianta, Andri Willy, Suprianto, Arnius Daelya, Mikael F. Bangun. 2018. "Studi Fluiditas dan Karakteristik Aliran pada Pengecoran Al-Si Alloy Menggunakan Simulasi Numerik." *TALENTA Conference Series: Energy and Engineering (EE)*. Medan: TALENTA . Vol 1, Issue 1, 7-12.
- American Foundrymen's Society. 1973. *Basic Principles of Gating & Riserling*. Illonis: AFS Training & Research Institute.
- ASM Handbook Volume 15. 1998. *CASTING*. ASM International.
- ASM Handbook Volume 22A . 2009. *Fundamentals of Modeling for Metals Processing*. Ohio: ASM International.
- ASM International. 2009. *CASTING Design and Performance*. Ohio: ASM International.
- Berg, Steffen. 2008. "Two-Phase Flow in Porous Media with Slip Boundary Condition." *Transport in Porous Media* 275-292.
- Bohacek, Jan, Abdellah Kharicha, Andreas Ludwig, Menghuai Wu, dan dan Ebrahim Karimi-Sibaki. 2018. "Heat Transfer Coefficient at Cast-Mold Interface During Centrifugal Casting: Calculation of Air Gap." *Metallurgical and Materials Transactions B* 49 1420-1422.
- Brunner, Gerd. 2014. "Supercritical Fluid Science and Technology." Dalam *Hydrothermal and Supercritical Water Processes*, oleh Andreas Braeuer, 9-93. Elsevier.
- Callister, Jr. William D. 2012. *Materials Science and Engineering An Introduction 9E*. Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Carlson, Kend. D. dan Christoph Beckermann. 2008. *Use of the Niyama Criterion To Predict Shrinkage-Related Leaks in High-Nickel Steel and Nickel-Based Alloy Castings*. Chicago: Steel Founders' Society of America.
- Chastain, Steve. 2004. *Metal Casting: A Sand Casting Manual for the Small Foundry*. Jacksonville: Stephen Chastain.

- 
- Chemezov, Denis, Lyudmila Smirnova, & Elena Bogomolova. 2018. "Metal Mold Casting of Cast Iron and Aluminium Pistons." *International Scientific Journal Theoretical & Applied Science* Vol 61, Issue 05, 132-141.
- CustomPartNet. 2020. "Permanent Mold Casting." *Custompart.net*. <https://www.custompartnet.com/>.
- Fahrudin, Achmad. 2015. *Simulasi dan Perbaikan Pengecoran Cetakan Pasir Pada Crackshaft Sinjai (Mesin Jawa Timur) Material FCD 600*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Firdaus, Muhammad Bahtiyar. 2016. *Analisa Proses Perpindahan Panas Pada Pengecoran Paduan Al-12%Si Dengan Metode Elemen Hingga*. surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Fu, M.W. & Yong, M. S. 2009. "Simulation-enabled Casting Product Defect Prediction in Die Casting Process." *International Journal of Production Research* Vol. 47, No. 18, 5203-5216.
- GAIKINDO. 2020. *Export Report*. Indonesian Automobile Industry Data.
- GAIKINDO. 2020. *Import Report*. Indonesian Automobile Industry Data.
- GAIKINDO. 2020. *Wholesales Report (Jan-Mar)*. Indonesian Automobile Industry Data.
- GAIKINDO. 2018. *Wholesales Report*. Indonesian Automobile Industry Data.
- GAIKINDO. 2019. *Wholesales Report*. Indonesian Automobile Industry Data, 6.
- GAIKINDO. 2017. *Wholesales Report*. Indonesian Automobile Industry Data.
- Gao, Yiqi, Sun Sijia, dan Jin. Hui. 2019. "Casting simulation of cast steel joint based on Pro-CAST." *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 592 1-7.
- Groover, Mikell P. 2012. *Materials, Processes, and Systems 5th Edition*. Hoboken, New Jersey: Wiley.
-

- 
- Gupta, Rakesh Kumar. 2015. "Investigation of Seizure Failure of Heavy Duty Engine Piston : A Review." *International of Research Journal of Engineering and Applied Science* 17-21.
- Haghshenas, M., J. Jamali. 2017. "Assessment of Circumferential Cracks in Hypereutectic Al-Si Clutch Housings." *Case Studies in Engineering Failure Analysis* 11-20.
- Hetu, Jean-Francois, Florin Ilinca. 2010. "A Finite Element Method For Casting Simulations." *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications: An International Journal of Computation and Methodology* 657-679.
- Hussainy, S. Ferhathullah, Mohiuddin, M. Viquar, Laxminarayana, P., Krishnaiah, A., & S. Sundarrajan. 2015. "A Practical Approach to Eliminate Defects in Gravity Die Cast Al-Alloy Casting Using Simulation Software." *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology* Vol 4, Issue 1, 114-124.
- Jain, N., K.D. Carlson, dan Beckermann. C. 2007. "Round Robin Study to Assess Variations in Casting Simulation Niyama Criterion Predictions." *Proceedings of the 61st Technical and Operating Conference, Steel Founders' Society of America*. Chicago.
- Kakas, D., L.Kovecic, T.Pal. 2008. "Improvement of Casting Process Control by Computer Simulation and Experimental Observation." *International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN)*. Chalkidiki, Yunani: EEAM dan PCCM. 273-280.
- Khan, M. A. A. dan Sheikh, A.K. 2018. "A Comparative Study of Simulation Somftware For Modelling metal Casting Processes." *International Journal Simulation Model* 197-209.
- Koshal, Dalbir. 2010. *Manufacturing Engineer's Reference Book*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
-

- 
- Laschet, Gottfried. 2004. "Thermo-mechanical Analysis of Cast/Mould Interaction In Casting Processes." *Z. Metallkd.* 95 1087-1096.
- Liao, Yougui. 2018. *Practical Electron Microscopy and Database*. Diakses 5 15, 2020. <http://www.globalsino.com/EM/> .
- Liotti, E. dan Previtali, B. 2006. "Study of The Validity of The Niyama Criteria Function Applied to The Alloy AlSi7Mg." *la Metallurgia Italiana* 33-37.
- Liu, Yijun. 2003. *Introduction To The Finite Element Method*. Cincinnati: University of Cincinnati.
- Mahendra, Rizal Pratama, dan Soeharto. 2012. "Studi Eksperimen Pengaruh Jenis Saluran pada Aluminium Sand Casting terhadap Porositas Produk Toroidal Piston." *JURNAL TEKNIK ITS* Vol. 1, No. 1, F-126-130.
- MAHLE, GmbH. 2016. *Pistons and Engine Testing*. Stuttgart, Jerman: Springer Nature.
- Malhotra, Vasdev., & Yogesh Kumar. 2016. "Study of Process Parameteres of Gravity Die Casting Defects." *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)* Vol 7, Issue 2, 208–211.
- Mandaliya, P. J. 2013. "Study of Piston Sleeve Manufactured by Sand Casting Process To Reduce Rejection Rate Using Simulation Software." *International Journal of Mechanical and Production* 161-167.
- Mezbahul-Islam, Mohammad., Ahmad Omar Mostafa., and Mamoun Medraj. 2014. "Essential Magnesium Alloys Binary Phase Diagrams and Their Thermochemical Data." *Journal of Materials* 1-33.
- Mollenhauer, Klaus. 2010. *Handbook of Diesel Engines*. Berlin, Jerman: Springer.
- Muniao, Elijah Musango. 2014. "Simulation of Thermal-Mechanical Strength for Marine Engine Piston Using FEA." *International Journal of Engineering Research and Applications* 319-323.
-



- 
- Pelton, Arthur D. 2018. *Phase Diagrams and Thermodynamic Modeling of Solutions*. Kanada: Elsevier.
- Polmear, I.J. 2004. *Aluminium Alloys – A Century of Age Hardening*. Melbourne, Australia: Materials Forum Volume 28.
- Prabhakara, Rao. 2011. “Modeling and Simulation of Solidification in Alloy Steel Sand Casting.” *International Journal of Thermal Technologies* 107-113.
- Puji, Prasetyono Agus. 2017. *Sebuah Mimpi Kemandirian Teknologi*. Jakarta, 3 Juli. Diakses Mei 11, 2020. <https://www.ristekbrin.go.id>.
- Putra, Rifky Kurnia. 2019. *Simulasi Dan Optimasi Desain Pengecoran Cetakan Pasir Pada Produk Idler Menggunakan Metode Taguchi*. Surabaya: Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
- Ramadhan, Faizal Nugraha. 2017. *Analisis Pengaruh Temperatur Tuang dan Temperatur Pre-Heat Cetakan Pada Proses Permanent Mold Casting Terhadap Nilai Kekerasan dan Presentase Cacat Volume Coran Piston Berbasis Al-Si*. Undergraduate Thesis, Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Rao, P.N. 2018. *Manufacturing Technology: Foundry, Forming and Welding, 5e*. New Delhi, India: McGraw Hill.
- Reikher, Alexandre. 2017. *Casting : An Analytical Approach*. London, United Kingdom: Springer-Verlag London Limited.
- Respati, S. M., Bondan, H. Purwanto, dan dan M. S. Mauluddin. 2010. *Pengaruh Tekanan dan Temperatur Cetakan Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Hasil Pengecoran Pada Material Aluminium Daur Ulang*. Semarang: Universitas Wahid Hasyim.
- Salawu, Enesi Y., Emuowhochere Oghenevwegba, Oluseyi O. Ajayi A., O. Inegbenebor, E. T. Akinlabi, dan S. T. Akinlabi. 2019. “Effect of Multi-gating System on Solidification of Molten Metals in Spur Gear Casting: A
-

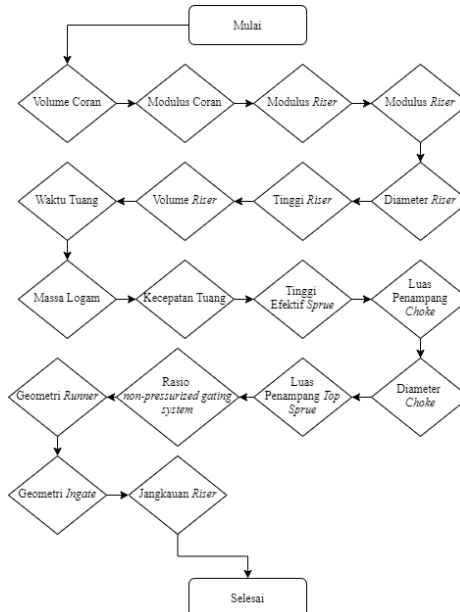
- 
- Simulation Approach.” *TMS 2019 148th Annual Meeting & Exhibition Proceedings*. Cham, Swiss: Springer. 667-677.
- Schwam, David. 2004. *Gating of Permanent Molds for Aluminum Castings*. Cleveland, Ohio: Department of Materials Science, Department of Materials Science.
- Volkswagen. 2012. *Volkswagen Standard VW 50093 "Porosity of Metal Castings"*. Jerman: Volkswagen Aktiengesellschaft.
- Wijayanti, Fitri. 2014. “Analisis Pengaruh Bentuk Permukaan Piston Terhadap Kinerja Motor Bensin.” *Jurnal Imiah Teknik Mesin* Vol. 2, No. 1.
- Wu, M., M. Ahmadein, dan A. Ludwig. 2018. “Premature Melt Solidification During Mold Filling And Its Influence on The As-Cast Structure.” *Frontiers of Mechanical Engineering* Vol 13, 53–65.
- Xu, Z. A., F. Mampaey. 1996. “Experimental and Simulation Study on Mold Filling with Various Gating Systems.” *AFS Trans* vol. 179, 155-166,.
- Zhang, Jie., Kangwen Li, Haiwei Ye, Dongqi Zhang, Phang Wei. 2011. “Numerical Simulation of Solidification Process for Impeller Investment Casting.” *Applied Mechanics and Materials* Vol 80-81, 961-964.
-

## LAMPIRAN

### Lampiran 1

#### Perhitungan Desain *Gating System* Cetakan (Metode Modulus)

Berikut terlampir diagram alir perhitungan sistem saluran yang digunakan pada pengecoran *gravity permanent* menggunakan metode Modulus.



**Gambar 1.** Diagram alir perhitungan sistem saluran dengan metode modulus.

#### 1. Satu *Pattern*

##### a. Volume coran ( $V_{coran}$ )

$$V_{coran} = V_{desain} + V_{allowance}$$

ASM International tentang *casting design and performance* (2009) mengatakan bahwa persentase volumetris penyusutan sekitar 3.8 % dan menurut Groover

(2012), *shrinkage allowance* pada aluminium diberikan sekitar 1,3 mm/m sehingga didapatkan:

$$V_{desain} = 64080.14 \text{ mm}^3$$

$$V_{coran} = 66611.89 \text{ mm}^3$$

b. Modulus benda cor ( $M_c$ )

$$\begin{aligned} M_c &= \frac{V_{coran}}{\text{Luas Permukaan}} \\ &= \frac{66611.89 \text{ mm}^3}{19103.98 \text{ mm}^2} \\ M_c &= 3.4868 \text{ mm} \end{aligned}$$

c. Modulus riser ( $M_r$ )

$$\begin{aligned} M_r &= 1,2 \times M_c \\ &= 1,2 \times 3.4868 \text{ mm} \\ M_r &= 4.1842 \text{ mm} \end{aligned}$$

d. Diameter riser ( $D_r$ )

$$\begin{aligned} D_r &= 6 \times M_c \\ &= 6 \times 3.4868 \text{ mm} \\ D_r &= 20.9208 \text{ mm} \end{aligned}$$

e. Tinggi riser ( $H_r$ )

$$\begin{aligned} M_r &= \frac{D_r \times H_r}{4H_r + D_r} \\ 4.1842 &= \frac{20.9208 \text{ mm} \times H_r}{4H_r + 20.9208 \text{ mm}} \\ 16.7368H_r + 87.5368 &= 20.9208H_r \\ H_r &= \frac{87.5368}{20.9208 - 16.7368} \text{ mm} \\ &= 20.9208 \text{ mm} \\ H_r &= D_r \end{aligned}$$

f. Volume riser ( $V_r$ )

$$\begin{aligned} V_r &= \frac{\pi \times D_r^3}{4} \\ &= \frac{3.14 \times (20.9208)^3}{4} \end{aligned}$$

$$V_r = 7187.9413 \text{ mm}^3$$

- g. Waktu tuang (*intricately shaped thin-walled*) ( $t$ )

$$\begin{aligned} t &= K_3 \sqrt[3]{W'} \\ &= 1.62 \sqrt[3]{(V_{coran} + V_r) \times \rho} \\ &= \\ &= 1.62 \sqrt[3]{73799.8313 \text{ mm}^3 \times 2.74 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3} \\ &= 1.62 \sqrt[3]{0.2022} \\ &= 1.62 \times 0.5870 \\ t &= 0.9509 \text{ s} \end{aligned}$$

- h. Massa logam yang dibutuhkan (asumsi desain dengan *yield casting* 45%)

$$\begin{aligned} \text{Massa}_{\text{logam}} &= \frac{\text{Massa}_{\text{coran+riser}}}{\text{yield casting}} \\ &= \frac{0.2022 \text{ kg}}{0.45} \\ \text{Massa}_{\text{logam}} &= 0.4493 \text{ kg} \end{aligned}$$

- i. Kecepatan tuang ( $v_{pouring}$ )

$$\begin{aligned} v_{pouring} &= \frac{\text{Massa}_{\text{logam}}}{t} \\ &= \frac{0.4493 \text{ kg}}{0.9509 \text{ s}} \\ v_{pouring} &= 0.4725 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

- j. Tinggi efektif *sprue* ( $H_s$ )

$$\begin{aligned} H_s &= h_{total} - \frac{p^2}{2c} \\ &= 50 - \frac{23.81^2}{2 \times 44.07} \\ &= 50 - 6.4320 \\ H_s &= 43.5680 \text{ mm} \end{aligned}$$

- k. Luas penampang *choke* ( $A_c$ )

$$A_c = \frac{\text{Massa}_{\text{logam}}}{\rho \times t \times C \sqrt{2 \times g \times H_s}}$$

$$= \frac{0.4493}{2.74 \times 10^{-6} \times 0.9509 \times 0.9\sqrt{2} \times 9810 \times 43.5680}$$

$$A_c = 207.2408 \text{ mm}^2$$

- l. Diameter *choke* ( $D_c$ )

$$D_c = \sqrt{\frac{4 \times A_c}{\pi}}$$

$$= \sqrt{\frac{4 \times 207.2408}{3.14}}$$

$$= \sqrt{264.0010}$$

$$D_c = 16.2481 \text{ mm}$$

- m. Luas penampang *top sprue* ( $A_t$ )

$$A_t = \frac{A_c \sqrt{H_{total}}}{\sqrt{H_{total} - H_s}}$$

$$= \frac{207.2408 \sqrt{50}}{\sqrt{6.4320}}$$

$$A_t = 577.8129 \text{ mm}^2$$

- n. Diameter *top sprue* ( $D_t$ )

$$D_t = \sqrt{\frac{4 \times A_t}{\pi}}$$

$$= \sqrt{\frac{4 \times 577.8129}{3.14}}$$

$$= \sqrt{736.0674}$$

$$D_t = 27.1306 \text{ mm}$$

- o. Rasio *non-pressurized gating system* (Koshal 2010).

$$A_s : A_r : A_g$$

$$A_s = A_c$$

$$1 : 2 : 2$$

- p. Geometri *runner* ( $A_r, S_{r1}, S_{r2}$ )

$$A_r = 207.2408 \text{ mm}^2 \times 2$$

$$= 414.4816 \text{ mm}^2$$

$$= S_{r1} \times S_{r2}$$

$$A_r = 16.2481 \text{ mm} \times S_{r2}$$

$$S_{r2} = \frac{414.4816 \text{ mm}^2}{16.2481 \text{ mm}}$$

$$S_{r2} = 25.5095 \text{ mm}$$

$$S_{r1} = 16.2481 \text{ mm}$$

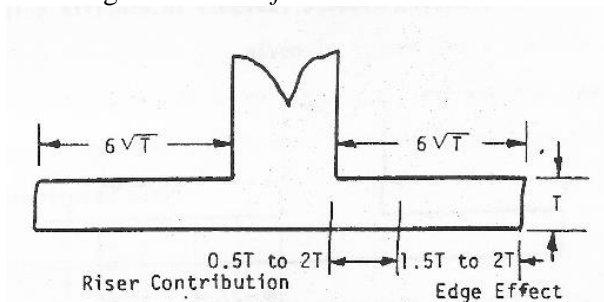
q. Geometri *ingate* ( $A_g, S_{g1}, S_{g2}$ )

$$A_g = A_r = 414.4816 \text{ mm}^2$$

$$S_g = S_g = \sqrt{414.4816 \text{ mm}^2}$$

$$S_g = S_g = 20.3588 \text{ mm}$$

r. Jangkauan *riser* / *feeder*



**Gambar 2.** Jangkauan *riser* pada *bar* (American Foundrymen's Society 1973).

$$\text{Jangkauan riser} = 6\sqrt{T}$$

$$\text{Riser contribution} = 0.5T - 2T$$

$$\text{Edge effect} = 1.5T - 2T$$

Dimana  $T$  diasumsikan sebagai tebal pada mahkota piston, yaitu 1.368 cm sehingga didapatkan pengaruh *riser* sebagai berikut:

$$\text{Jangkauan riser} = 7.017691928 \text{ cm}$$

$$\text{Riser contribution} = 0.684 - 2.736 \text{ cm}$$

$$\text{Edge effect} = 2.052 - 2.736 \text{ cm}$$

## 2. Dua Pattern

- a. Volume coran ( $V_{coran2}$ )

$$V_{coran2} = 66611.89 \text{ mm}^3 \times 2$$

$$V_{coran2} = 133223.78 \text{ mm}^3$$

- b. Modulus benda cor ( $M_{c2}$ )

$$M_{c2} = \frac{V_{coran2}}{\text{Luas Permukaan}_2}$$

$$= \frac{133223.78 \text{ mm}^3}{38207.96 \text{ mm}^2}$$

$$M_{c2} = 3.4868 \text{ mm}$$

- c. Modulus riser ( $M_{r2}$ )

$$M_{r2} = 1,2 \times M_{c2}$$

$$= 1,2 \times 3.4868 \text{ mm}$$

$$M_{r2} = 4.1842 \text{ mm}$$

- d. Diameter riser ( $D_{r2}$ )

$$D_{r2} = 6 \times M_{c2}$$

$$= 6 \times 3.4868 \text{ mm}$$

$$D_{r2} = 20.9208 \text{ mm}$$

- e. Tinggi riser ( $H_{r2}$ )

$$M_{r2} = \frac{D_{r2} \times H_{r2}}{4H_{r2} + D_{r2}}$$

$$4.1842 = \frac{20.9208 \text{ mm} \times H_{r2}}{4H_{r2} + 20.9208 \text{ mm}}$$

$$16.7368H_{r2} + 87.5368 = 20.9208H_{r2}$$

$$H_{r2} = \frac{87.5368}{20.9766 - 16.7368} \text{ mm}$$

$$= 20.9208 \text{ mm}$$

$$H_{r2} = D_{r2}$$

- f. Volume riser ( $V_{r2}$ )

$$V_{r2} = \frac{\pi \times D_{r2}^3}{4}$$

$$= \frac{3.14 \times (20.9208)^3}{4}$$



$$V_{r2} = 7187.9413 \text{ mm}^3$$

g. Waktu tuang (*intricately shaped thin-walled*) ( $t_2$ )

$$t_2 = K_3 \sqrt[3]{W'}^7$$

$$t_2 = 1.62 \sqrt[3]{(V_{coran2} + V_{r2}) \times \rho}$$

$$=$$

$$1.62 \sqrt[3]{73799.8313 \text{ mm}^3 \times 2.74 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3}$$

$$= 1.62 \sqrt[3]{0.2022}$$

$$= 1.62 \times 0.5870$$

$$t_2 = 0.9509 \text{ s}$$

h. Massa logam yang dibutuhkan (asumsi desain dengan *yield casting* 45%)

$$Massa_{logam2} = \frac{Massa_{coran2+riser2}}{yield \text{ casting}}$$

$$= \frac{2 \times 0.2022 \text{ kg}}{0.45}$$

$$Massa_{logam2} = 0.8986 \text{ kg}$$

i. Kecepatan tuang ( $v_{pouring2}$ )

$$v_{pouring2} = \frac{Massa_{logam2}}{2 \times t_2}$$

$$= \frac{0.8986 \text{ kg}}{19.018 \text{ s}}$$

$$v_{pouring2} = 0.4725 \text{ kg/s}$$

j. Tinggi efektif *sprue* ( $H_{s2}$ )

$$H_{s2} = h_{total} - \frac{p^2}{2c}$$

$$= 50 - \frac{23.81^2}{2 \times 44.07}$$

$$= 50 - 6.4320$$

$$H_{s2} = 43.5680 \text{ mm}$$

k. Luas penampang *choke* ( $A_{c2}$ )

$$A_{c2} = \frac{Massa_{logam2}}{\rho \times t_2 \times C \sqrt{2 \times g \times H_{s2}}}$$

$$= \frac{0.8986}{2.74 \times 10^{-6} \times 0.9509 \times 0.9\sqrt{2} \times 9810 \times 43.5680}$$

$$A_{c2} = 414.4816 \text{ mm}^2$$

- l. Diameter *choke* ( $D_{c2}$ )

$$D_{c2} = \sqrt{\frac{4 \times A_{c2}}{\pi}}$$

$$= \sqrt{\frac{4 \times 414.4816}{3.14}}$$

$$= \sqrt{528.0010}$$

$$D_{c2} = 22.9783 \text{ mm}$$

- m. Luas penampang *top sprue* ( $A_{t2}$ )

$$A_{t2} = \frac{A_{c2} \sqrt{H_{total}}}{\sqrt{H_{total} - H_{s2}}}$$

$$= \frac{414.4816 \sqrt{50}}{\sqrt{6.4320}}$$

$$A_{t2} = 1155.6258 \text{ mm}^2$$

- n. Diameter *top sprue* ( $D_{t2}$ )

$$D_{t2} = \sqrt{\frac{4 \times A_{t2}}{\pi}}$$

$$= \sqrt{\frac{4 \times 1155.6258}{3.14}}$$

$$= \sqrt{1472.1348}$$

$$D_{t2} = 38.3684 \text{ mm}$$

- o. Rasio *non-pressurized gating system*.

$$A_{s2} : A_{r2} : A_{g2}$$

$$A_{s2} = A_{c2}$$

$$1 : 2 : 2$$

- p. Geometri *runner* ( $A_{r2}, S_{r2}$ )

$$A_{r2} = 414.4816 \text{ mm}^2 \times 2$$

$$A_{r2} = 829.9632 \text{ mm}^2$$

karena menggunakan dua sistem *runner* maka:

$$\begin{aligned}A_{r21} &= A_{r22} \\A_{r21} &= \frac{829.9632 \text{ mm}^2}{2} \\&= 414.4816 \text{ mm}^2 \\&= S_{r211} \times S_{r212} \\A_{r21} &= 22.9783 \text{ mm} \times S_{r212} \\S_{r212} &= \frac{414.4816 \text{ mm}^2}{22.9783 \text{ mm}} \\S_{r212} &= 18.0380 \text{ mm} \\S_{r211} &= 22.9783 \text{ mm}\end{aligned}$$

q. Geometri *Ingate* ( $A_{g2}, S_{g2}$ )

$$\begin{aligned}A_{g21} &= A_{g22} = A_{r21} = A_{r22} = 414.4816 \text{ mm}^2 \\S_g &= \sqrt{414.4816 \text{ mm}^2} \\S_g &= 20.3588 \text{ mm}\end{aligned}$$

### 3. Empat Pattern

- a. Volume coran ( $V_{coran4}$ )

$$V_{coran4} = 66611.89 \text{ mm}^3 \times 4$$

$$V_{coran4} = 266447.56 \text{ mm}^3$$

- b. Modulus benda cor ( $M_{c4}$ )

$$M_{c4} = \frac{V_{coran4}}{\text{Luas Permukaan}_4}$$

$$= \frac{266447.56 \text{ mm}^3}{76415.92 \text{ mm}^2}$$

$$M_{c4} = 3.4868 \text{ mm}$$

- c. Modulus riser ( $M_{r4}$ )

$$M_{r4} = 1,2 \times M_{c4}$$

$$= 1,2 \times 3.4868 \text{ mm}$$

$$M_{r4} = 4.1842 \text{ mm}$$

- d. Diameter riser ( $D_{r4}$ )

$$D_{r4} = 6 \times M_{c4}$$

$$= 6 \times 3.4868 \text{ mm}$$

$$D_{r4} = 20.9208 \text{ mm}$$

- e. Tinggi riser ( $H_{r4}$ )

$$M_{r4} = \frac{D_{r4} \times H_{r4}}{4H_{r4} + D_{r4}}$$

$$4.1842 = \frac{20.9208 \text{ mm} \times H_{r4}}{4H_{r4} + 20.9208 \text{ mm}}$$

$$16.7368H_{r4} + 87.5368 = 20.9208H_{r4}$$

$$H_{r4} = \frac{87.5368}{20.9208 - 16.7368} \text{ mm}$$

$$= 20.9208 \text{ mm}$$

$$H_{r4} = D_{r4}$$

- f. Volume riser ( $V_{r4}$ )

$$V_{r4} = \frac{\pi \times D_{r4}^3}{4}$$

$$= \frac{3.14 \times (20.9208)^3}{4}$$

$$V_{r4} = 7187.9413 \text{ mm}^3$$

g. Waktu tuang (*intricately shaped thin-walled*) ( $t_4$ )

$$t_4 = K_3 \sqrt[3]{W^7}$$

$$t_4 = 1.62 \sqrt[3]{(V_{coran4} + V_{r4}) \times \rho}$$

$$=$$

$$1.62 \sqrt[3]{73799.8313 \text{ mm}^3 \times 2.74 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3}$$

$$= 1.62 \sqrt[3]{0.2022}$$

$$= 1.62 \times 0.5870$$

$$t_4 = 0.9509 \text{ s}$$

h. Massa logam yang dibutuhkan (asumsi desain dengan *yield casting* 45%)

$$Massa_{logam4} = \frac{Massa_{coran2+riser2}}{\text{yield casting}}$$

$$= \frac{4 \times 0.2022 \text{ kg}}{0.45}$$

$$Massa_{logam4} = 1.7972 \text{ kg}$$

i. Kecepatan tuang ( $v_{pouring4}$ )

$$v_{pouring4} = \frac{Massa_{logam4}}{4 \times t_4}$$

$$= \frac{1.7972 \text{ kg}}{3.8036 \text{ s}}$$

$$v_{pouring4} = 0.4725 \text{ kg/s}$$

j. Tinggi efektif *sprue* ( $H_{s4}$ )

$$H_{s4} = h_{total} - \frac{p^2}{2c}$$

$$= 50 - \frac{23.81^2}{2 \times 44.07}$$

$$= 50 - 6.4320$$

$$H_{s4} = 43.5680 \text{ mm}$$

k. Luas penampang *choke* ( $A_{c4}$ )

$$A_{c4} = \frac{Massa_{logam4}}{\rho \times t_4 \times C \sqrt{2 \times g \times H_{s4}}}$$

$$= \frac{1.7972}{2.74 \times 10^{-6} \times 0.9509 \times 0.9\sqrt{2} \times 9810 \times 43.5680}$$

$$A_{c4} = 828.9632 \text{ mm}^2$$

- l. Diameter *choke* ( $D_{c4}$ )

$$D_{c4} = \sqrt{\frac{4 \times A_{c4}}{\pi}}$$

$$= \sqrt{\frac{4 \times 828.9632}{3.14}}$$

$$= \sqrt{1056.0020}$$

$$D_{c4} = 32.4962 \text{ mm}$$

- m. Luas penampang *top sprue* ( $A_{t4}$ )

$$A_{t4} = \frac{A_{c4} \sqrt{H_{total}}}{\sqrt{H_{total} - H_{s4}}}$$

$$= \frac{828.9632 \sqrt{50}}{\sqrt{6.4320}}$$

$$A_{t4} = 2311.2516 \text{ mm}^2$$

- n. Diameter *top sprue* ( $D_{t4}$ )

$$D_{t4} = \sqrt{\frac{4 \times A_{t4}}{\pi}}$$

$$= \sqrt{\frac{4 \times 2311.2516}{3.14}}$$

$$= \sqrt{2944.2696}$$

$$D_{t4} = 54.2611 \text{ mm}$$

- o. Rasio *non-pressurized gating system*.

$$A_{s2} : A_{r2} : A_{g2}$$

$$A_{s2} = A_{c2}$$

$$1 : 2 : 2$$

- p. Geometri *runner* ( $A_{r4}, S_{r4}$ )

$$A_{r4} = 828.9632 \text{ mm}^2 \times 2$$

$$A_{r4} = 1657.9264 \text{ mm}^2$$

karena menggunakan empat sistem *runner* maka:

$$A_{r44} = A_{r44} = A_{r44} = A_{r44}$$

$$A_{r41} = \frac{1657.9264 \text{ mm}^2}{4}$$

$$A_{r41} = 414.4816 \text{ mm}^2$$

$$A_{r41} = S_{r411} \times S_{r412}$$

$$A_{r41} = 32.4962 \text{ mm} \times S_{r412}$$

$$S_{r412} = \frac{414.8556 \text{ mm}^2}{32.4962 \text{ mm}}$$

$$S_{r412} = S_{r422} = S_{r432} = S_{r442} = 12.7548 \text{ mm}$$

$$S_{r411} = S_{r421} = S_{r431} = S_{r441} = 32.4962 \text{ mm}$$

q. Panjang *runner extension*

$$S_{re} = 2 \times S_{r412}$$

$$S_{re} = 2 \times 12.7548 \text{ mm}$$

$$S_{re} = 25.5096 \text{ mm}$$

r. Geometri *Ingate* ( $A_{g4}, S_{g4}$ )

$$A_{r41} = A_{g41} = A_{g42} = A_{g43} = A_{g44} = 414.4816 \text{ mm}^2$$

$$S_g = \sqrt{414.4816 \text{ mm}^2}$$

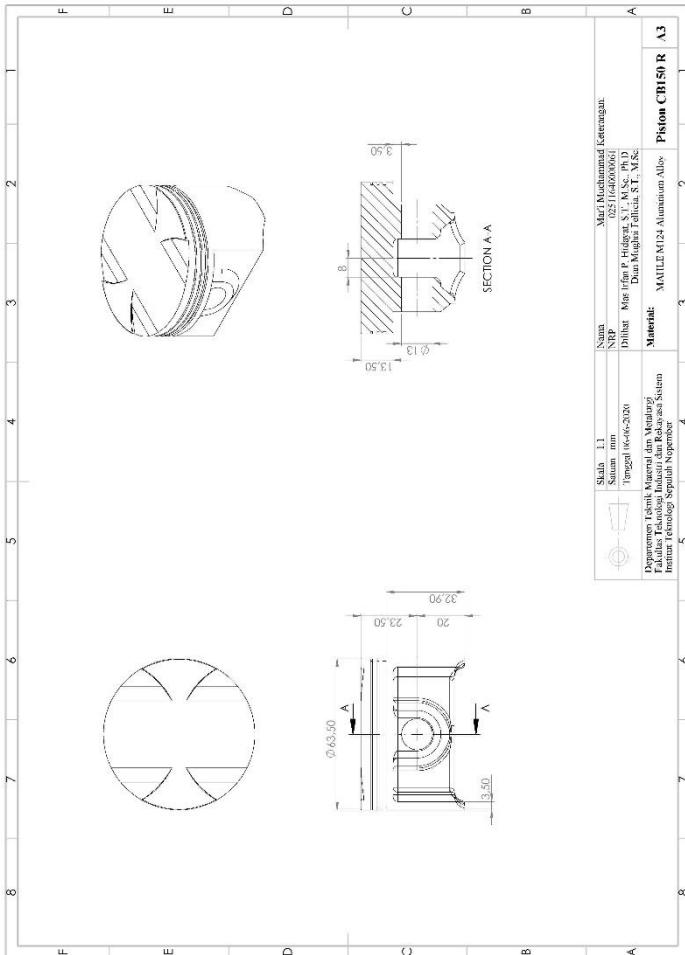
$$S_g = 20.3588 \text{ mm}$$

Lampiran 2

**Gambar Cetakan Piston MAHLE Eutectic Alloy M124 (Gravity Casting)**

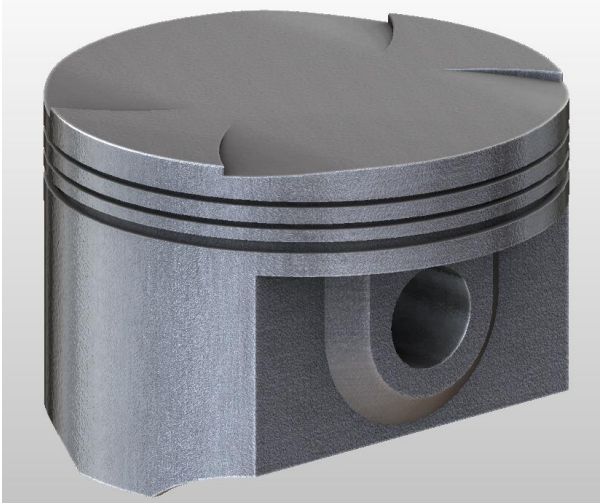
**1. Produk Piston**

a. Gambar perspektif

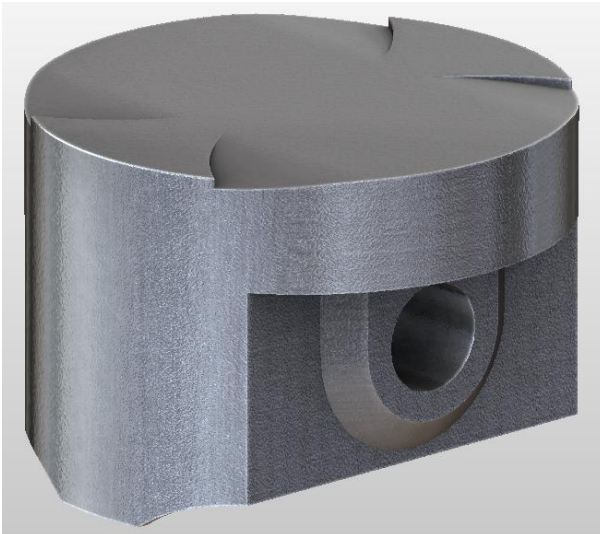




b. Gambar 3D



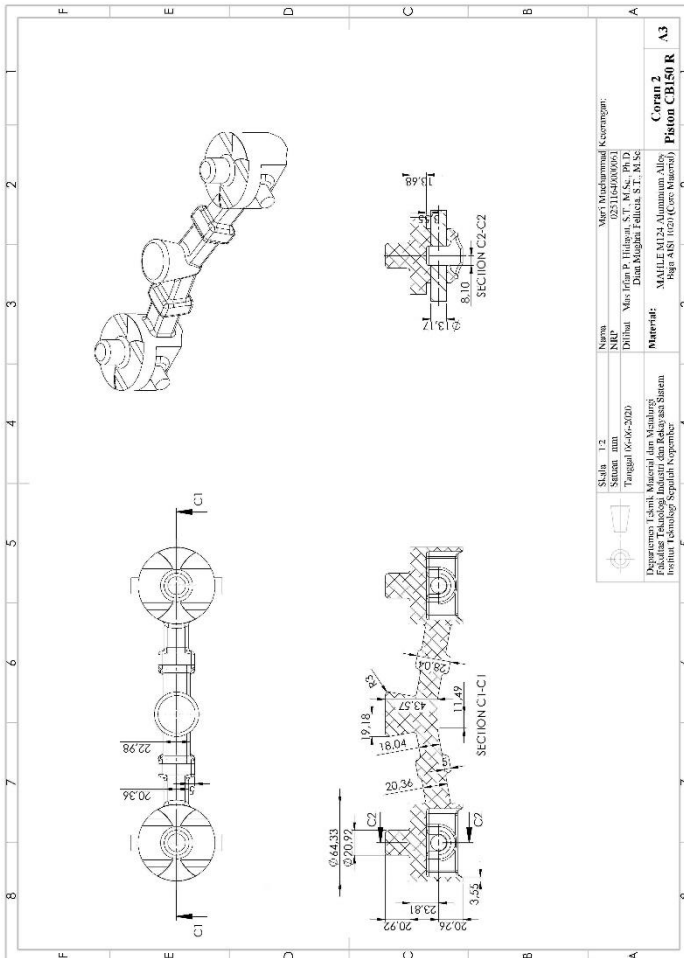
**Gambar 4.** Piston (produk) MAHLE *eutectic alloy* M124.



**Gambar 5.** Piston (coran) MAHLE *eutectic alloy* M124.

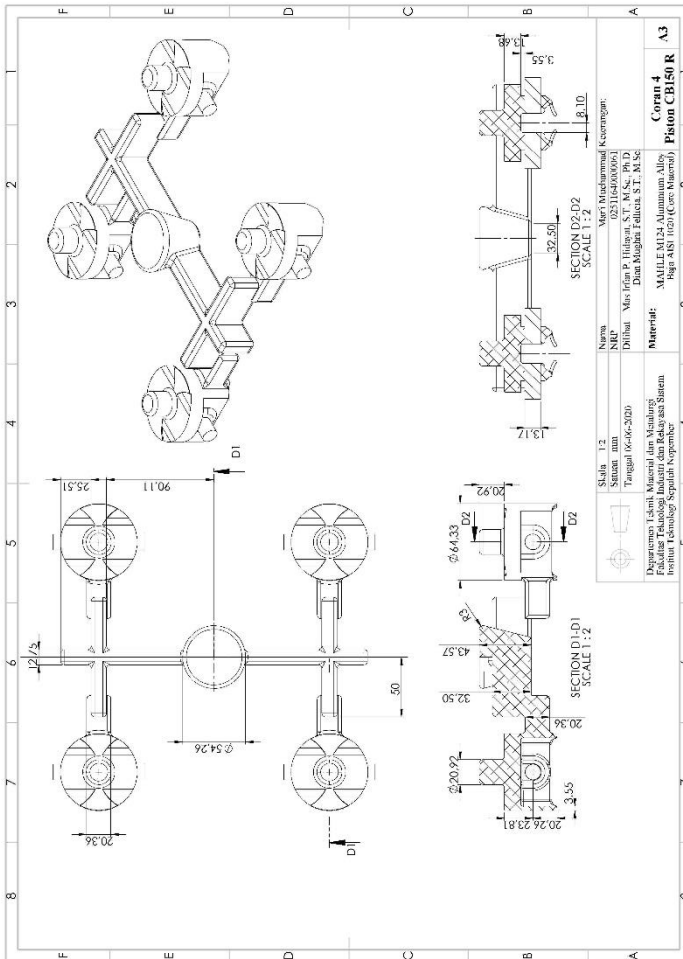


### 3. Perspektif Cetakan Dua *Pattern*



**Gambar 7.** Perspektif cetakan piston MAHLE *eutectic alloy* M124.dua *pattern*.

4. Perspektif Cetakan Dua Pattern



Gambar 8. Perspektif cetakan piston MAHLE eutectic alloy M124 empat pattern.

*Lampiran 3*

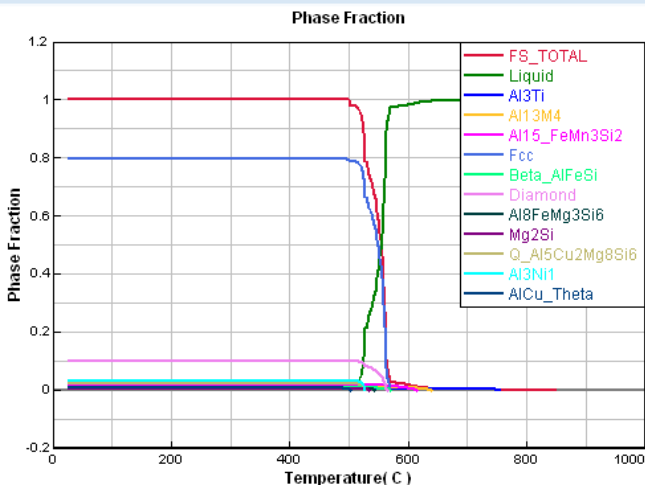
**Material Properties.**

**1. Material Coran (MAHLE Eutectic Alloy M124)**

**Tabel 1.** Komposisi kimia MAHLE *eutectic alloy* M124/AlSi12CuNiMg.

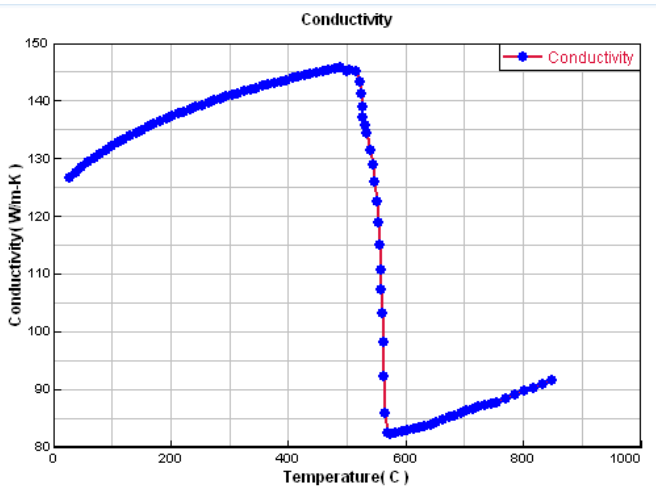
Unsur	%wt
Si	12.0
Cu	1.5
Mg	1.3
Ni	1.3
Fe	0.7
Mn	0.3
Ti	0.2
Zn	0.3
Cr	0.05
Al	Sisanya

a. Fraksi fasa

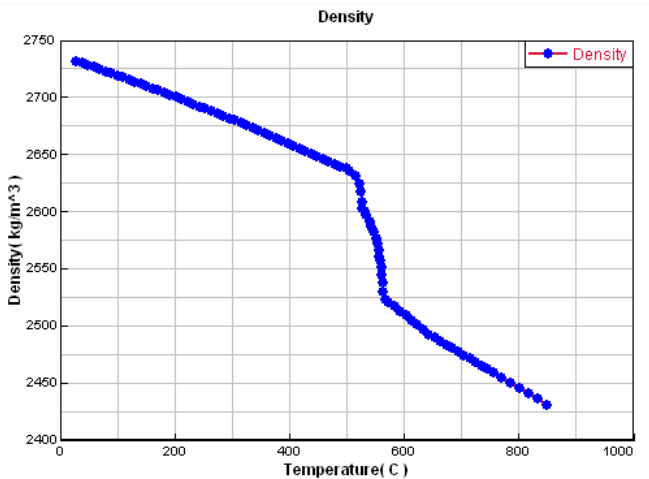


**Gambar 9.** Fraksi fasa MAHLE *eutectic alloy* M124.

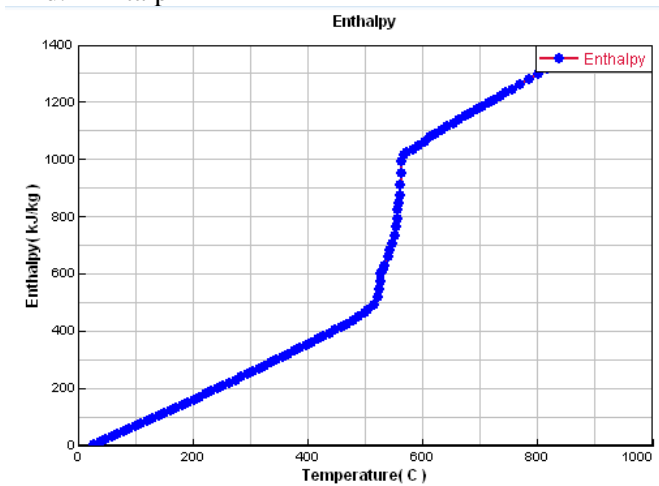
## b. Konduktivitas termal

**Gambar 10.** Konduktivitas termal MAHLE *eutectic alloy* M124.

## c. Densitas

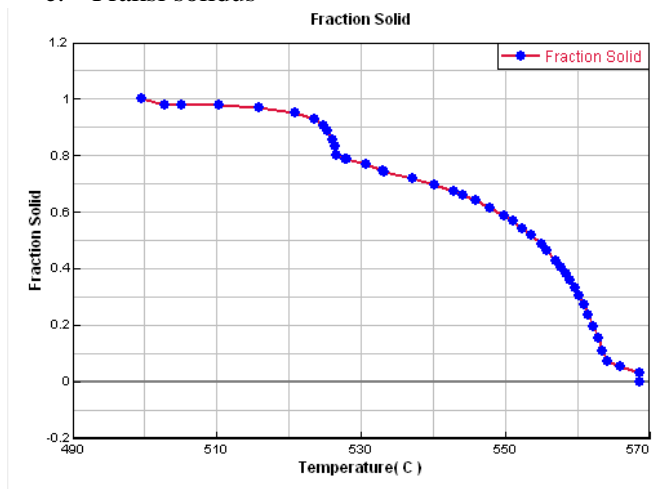
**Gambar 11.** Densitas MAHLE *eutectic alloy* M124.

d. Entalpi



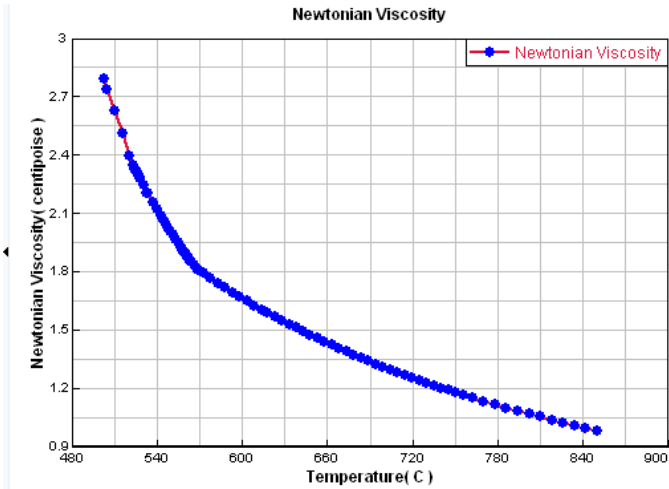
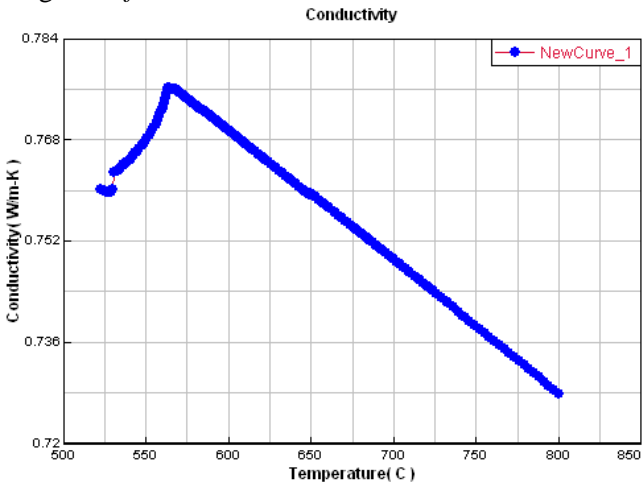
**Gambar 12.** Entalpi MAHLE *eutectic alloy* M124.

e. Fraksi solidus



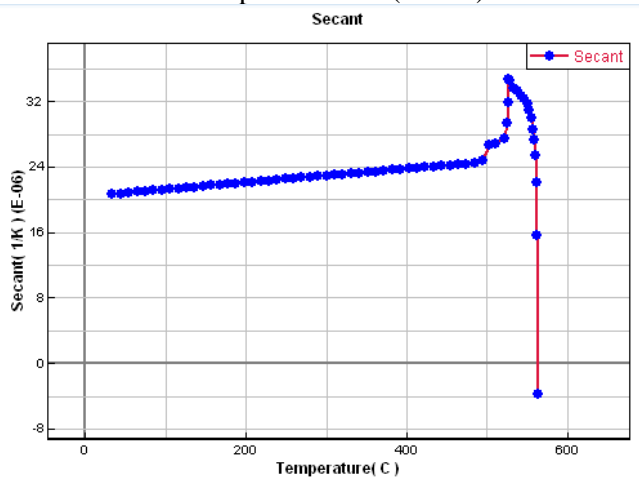
**Gambar 13.** Fraksi solidus MAHLE *eutectic alloy* M124.

## f. Viskositas Newtonian

**Gambar 14.** Viskositas Newtonian MAHLE *eutectic alloy* M124.g. *Surface tension***Gambar 15.** *Surface tension* MAHLE *eutectic alloy* M124.

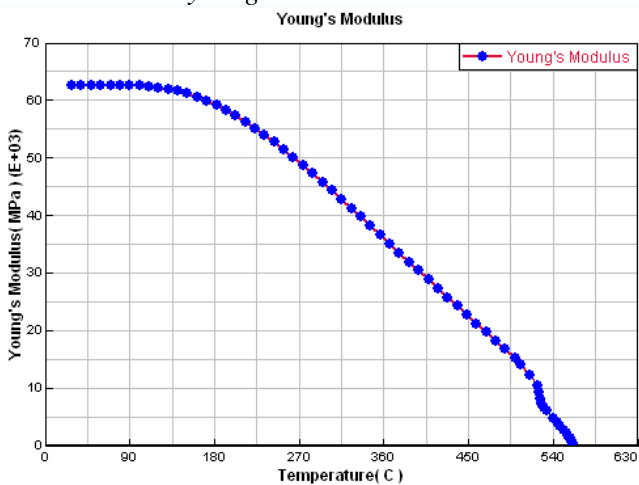


h. Koefisien ekspansi termal (*secant*)

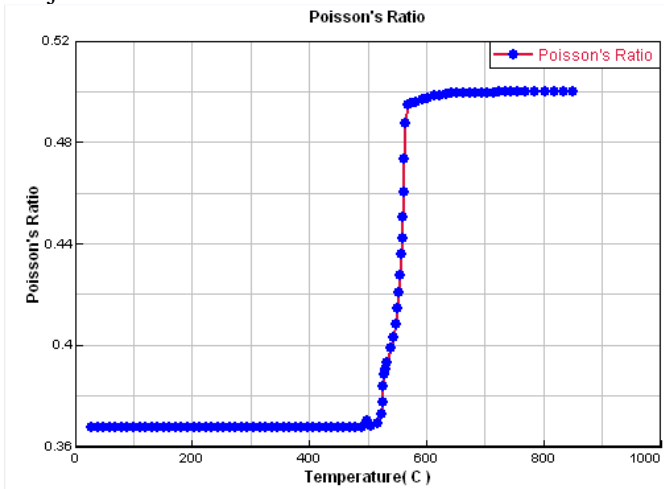


**Gambar 16.** Koefisien ekspansi termal MAHLE *eutectic alloy* M124.

i. *Modulus young*



**Gambar 17.** *Modulus young* MAHLE *eutectic alloy* M124.

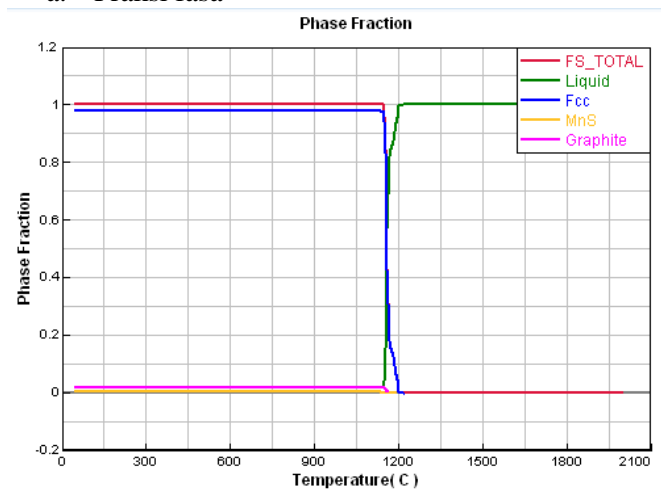
j. *Poisson ratio***Gambar 18.** *Poisson ratio* MAHLE eutectic alloy M124.

## 2. Material Cetakan Besi Cor Kelabu (EN-GJL-200)

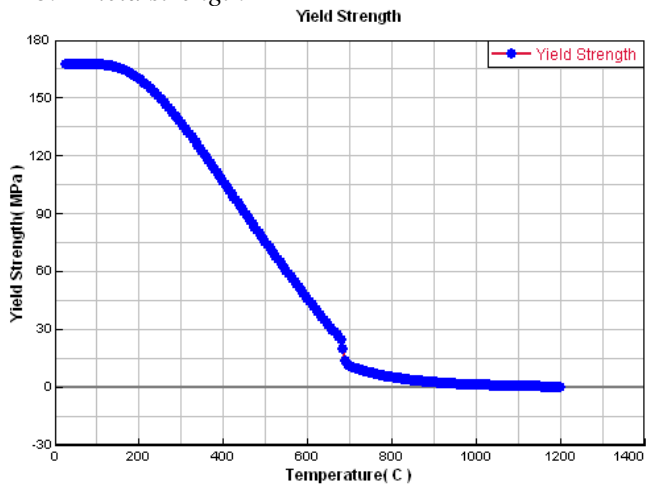
**Tabel 2.** Komposisi kimia besi cor kelabu.

Unsur	%wt
C	3.44
S	0.008
P	0.017
Si	1.63
Mn	0.8
Ni	0.12
Mg	0.005
Fe	Sisanya

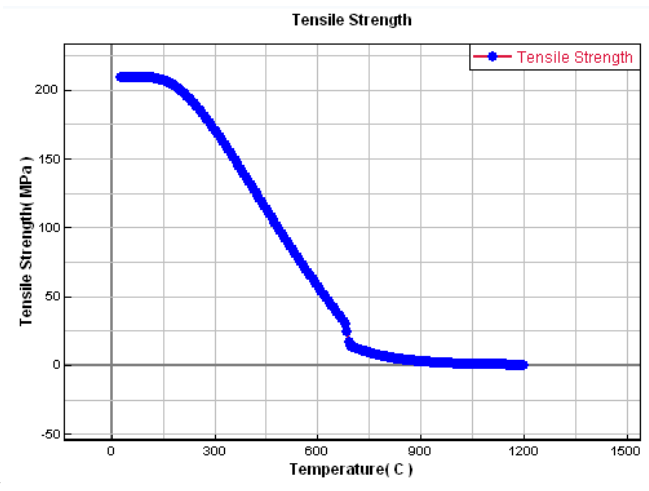
### a. Fraksi fasa



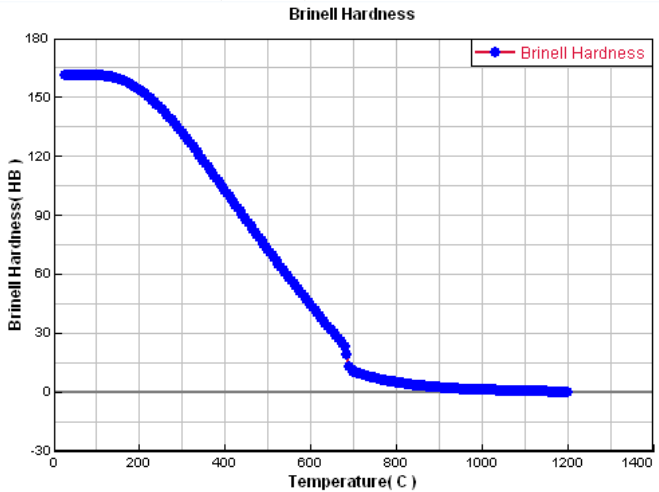
**Gambar 19.** Fraksi fasa besi cor kelabu.

b. *Yield strength***Gambar 20.** *Yield strength* besi cor kelabu.

## c. Kekuatan tarik

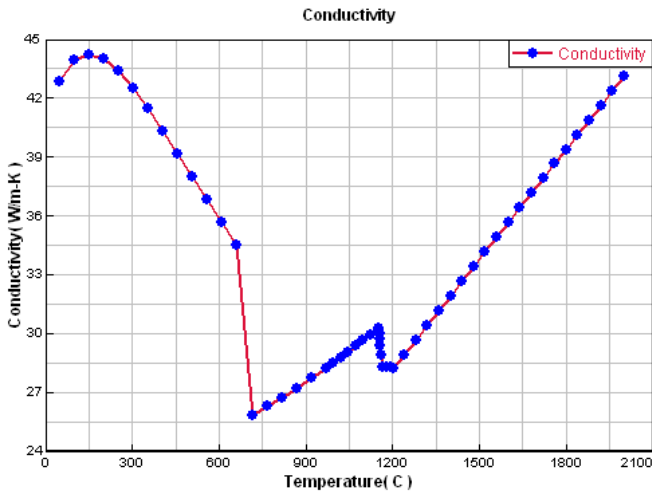
**Gambar 21.** Kekuatan tarik besi cor kelabu.

d. Kekerasan (Brinell)



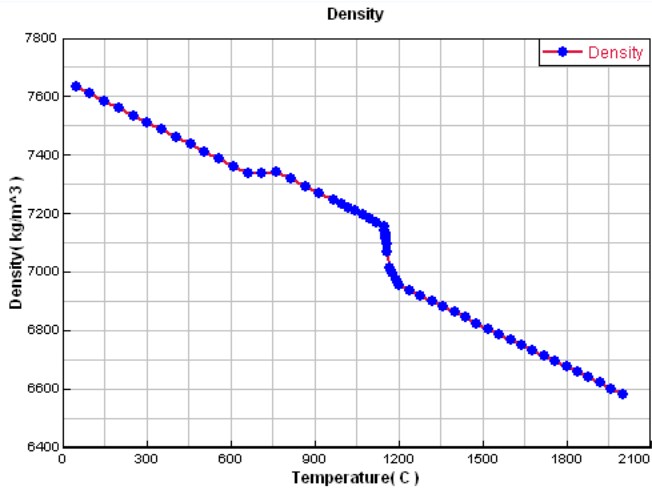
**Gambar 22.** Kekerasan besi cor kelabu.

e. Konduktivitas termal



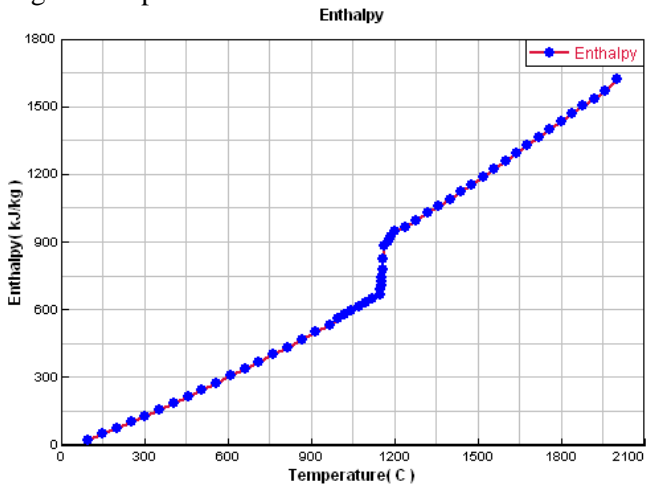
**Gambar 23.** Konduktivitas termal besi cor kelabu.

## f. Densitas



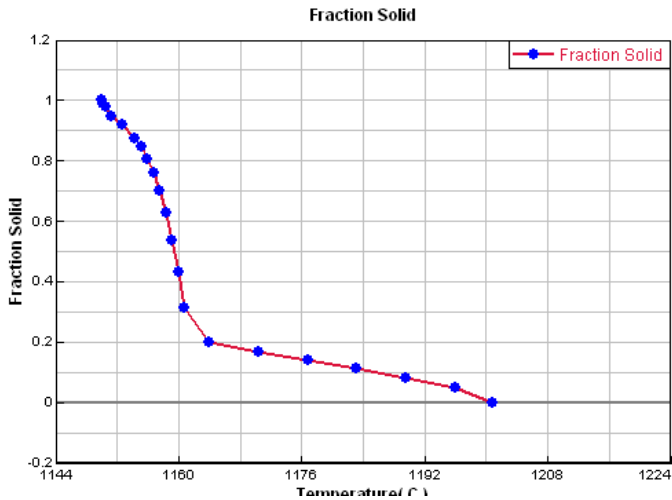
Gambar 24. Densitas besi cor kelabu.

## g. Entalpi



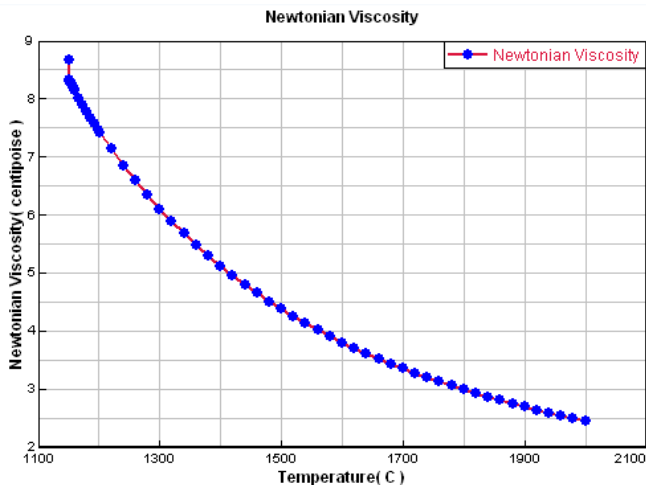
Gambar 25. Entalpi besi cor kelabu.

h. Fraksi solidus



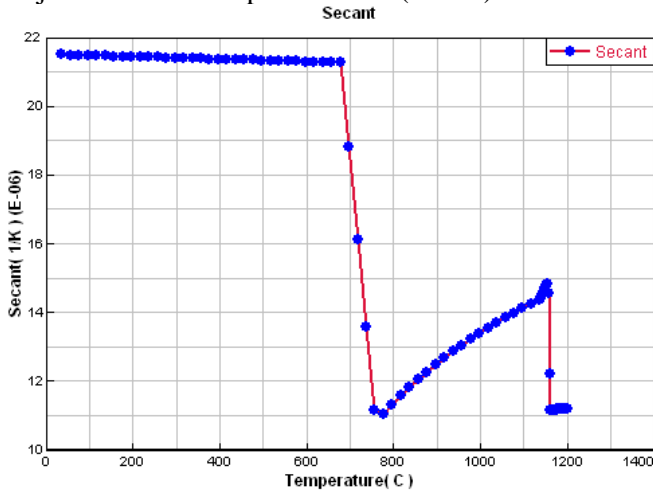
Gambar 26. Fraksi solidus besi cor kelabu.

i. Viskositas Newtonian



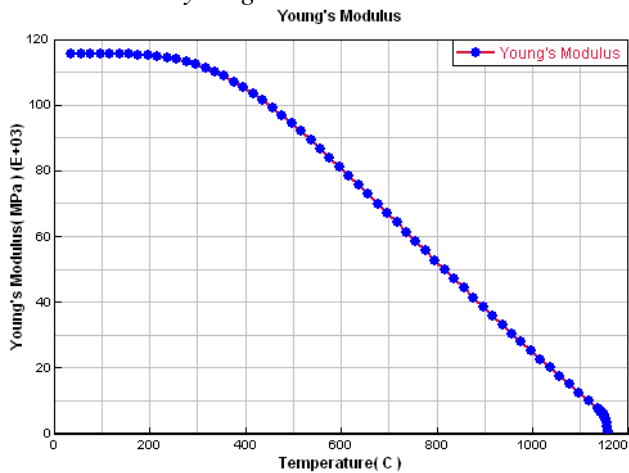
Gambar 27. Viskositas Newtonian besi cor kelabu.

j. Koefisien ekspansi termal (*secant*)



**Gambar 28.** Koefisien ekspansi termal besi cor kelabu.

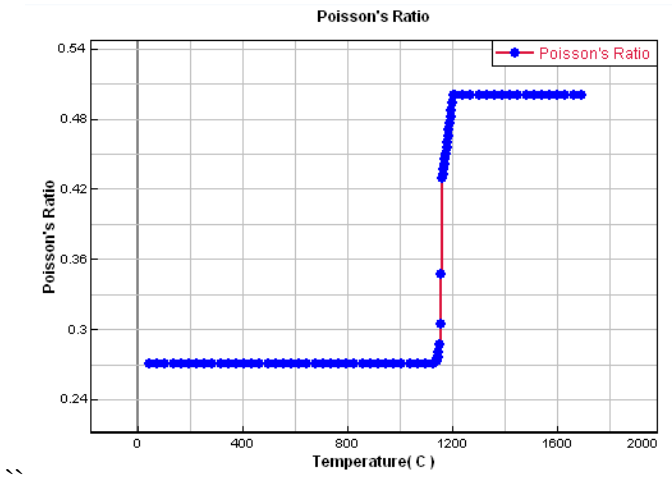
k. *Modulus young*



**Gambar 29.** *Modulus young* besi cor kelabu.

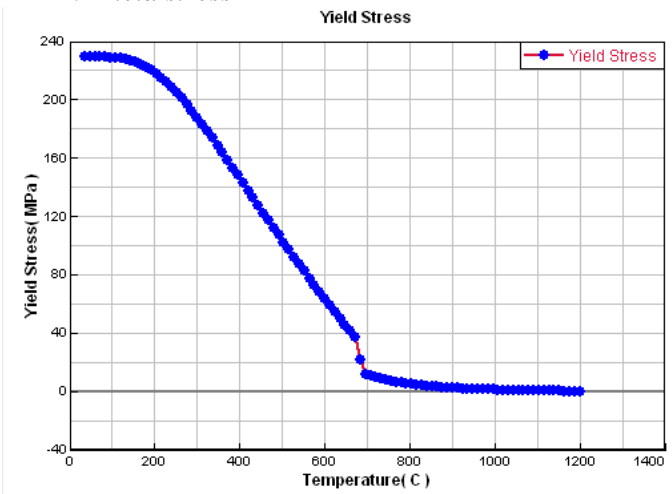


l. *Poisson ratio*



**Gambar 30.** *Poisson ratio* besi cor kelabu.

m. *Yield stress*



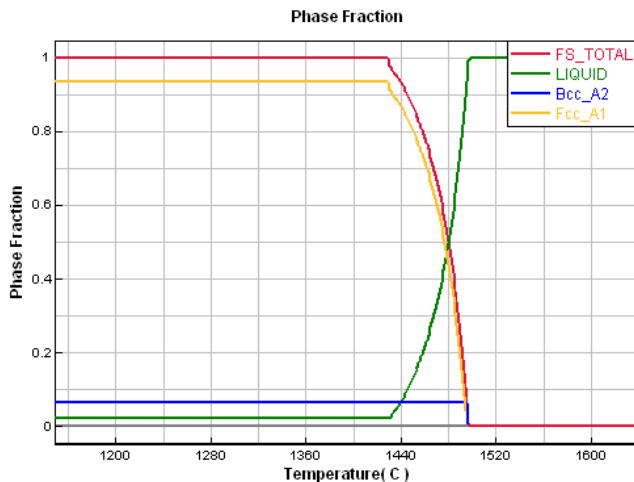
**Gambar 31.** *Yield stress* besi cor kelabu.

### 3. Material Core (Baja AISI 1020)

**Tabel 3.** Komposisi kimia baja AISI 1040.

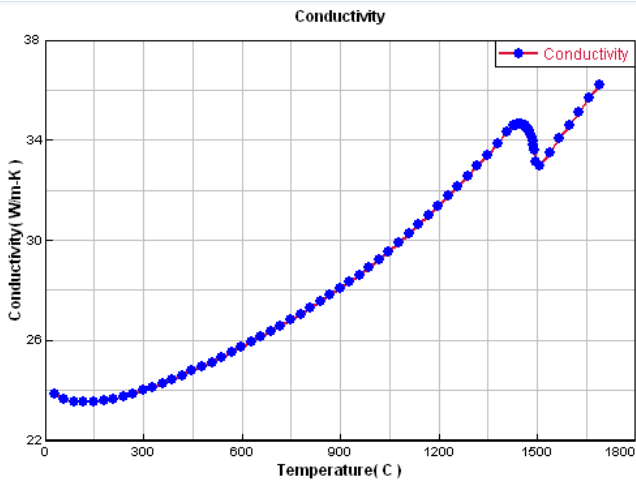
Unsur	%wt
C	0.415
S	0.029
P	0.031
Mn	0.643
Al	0.006
As	0.033
Cu	0.12
Ni	0.63
Si	0.11
Fe	Sisanya

#### a. Fraksi solidus



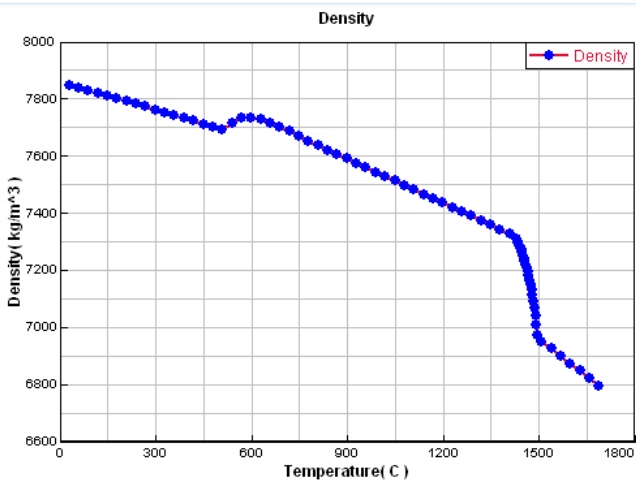
**Gambar 32.** Fraksi solidus baja AISI 1040.

b. Konduktivitas termal



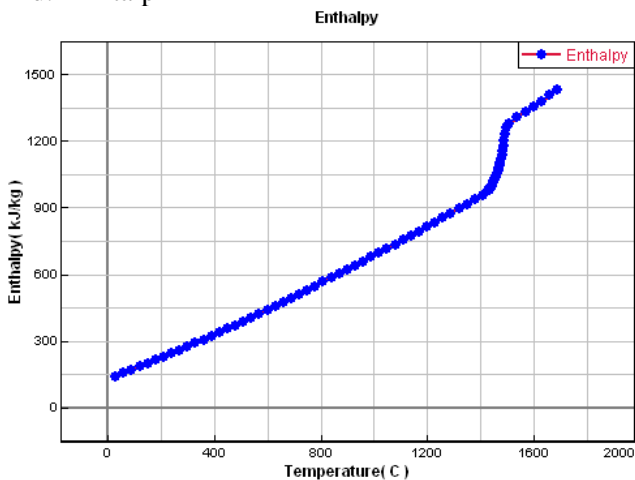
**Gambar 33.** Konduktivitas termal baja AISI 1040.

c. Densitas

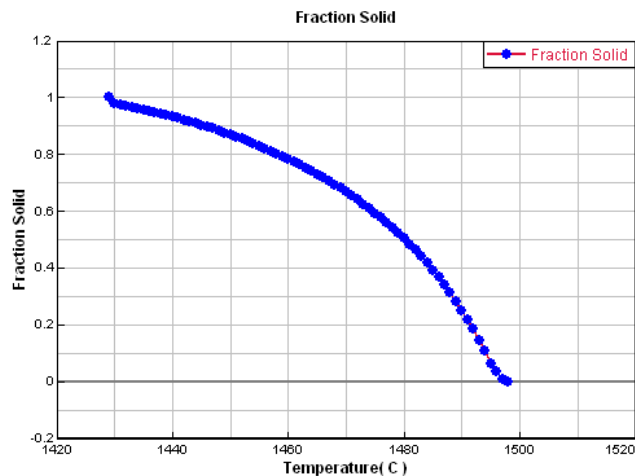


**Gambar 34.** Densitas baja AISI 1040.

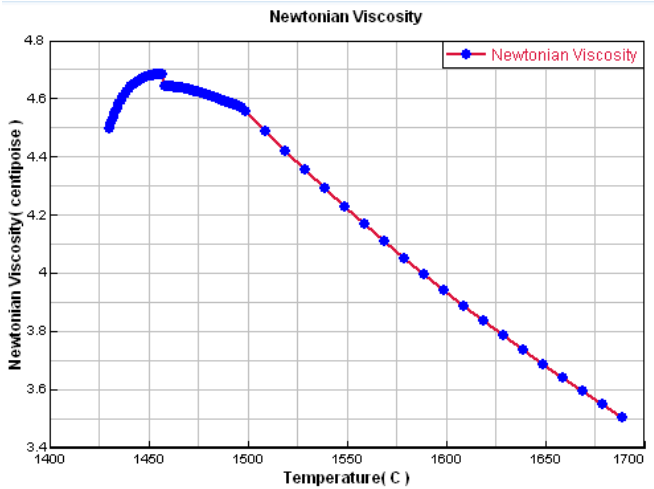
## d. Entalpi

**Gambar 35.** Entalpi baja AISI 1040.

## e. Fraksi solidus

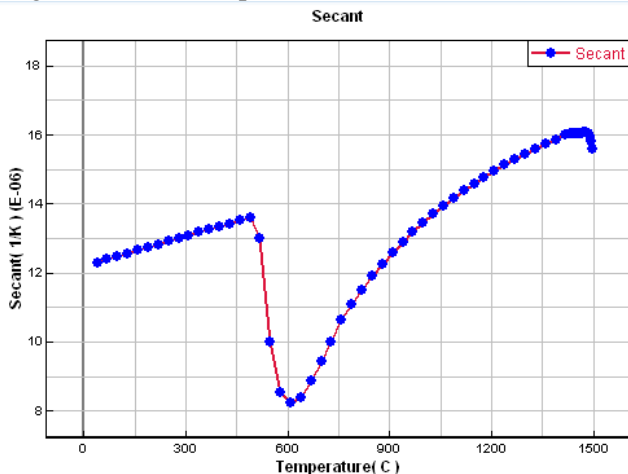
**Gambar 36.** Fraksi solidus baja AISI 1040.

f. Viskositas Newtonian

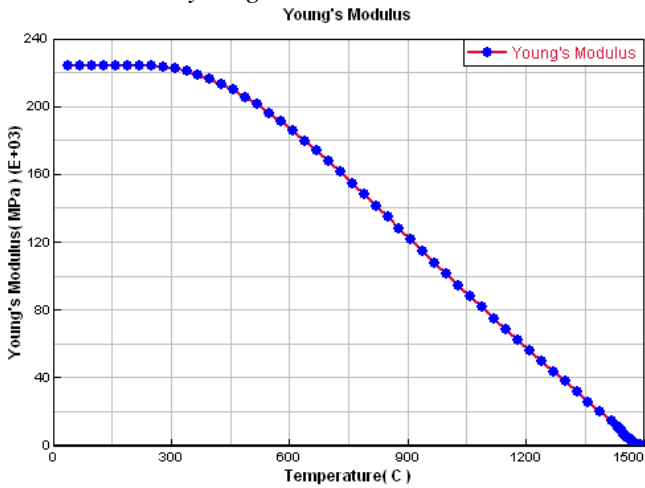
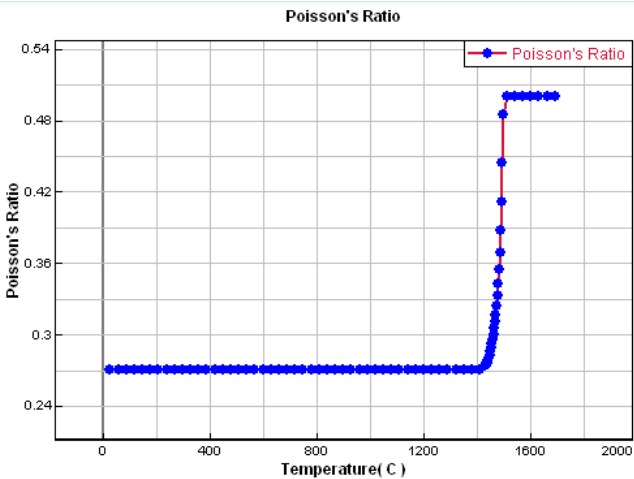


**Gambar 37.** Viskositas Newtonian baja AISI 1040.

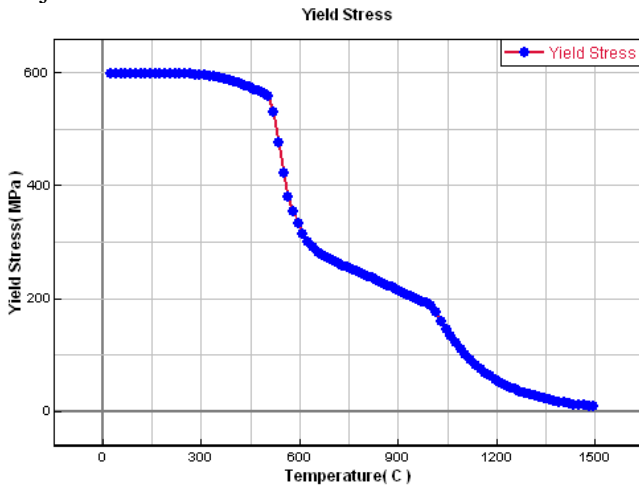
g. Koefisien ekspansi termal (*secant*)



**Gambar 38.** Koefisien ekspansi termal baja AISI 1040.

h. *Modulus young***Gambar 39.** *Modulus young* baja AISI 1040.i. *Poisson ratio***Gambar 40.** *Poisson ratio* baja AISI 1040.

j. *Yield stress*



**Gambar 41.** *Yield stress* baja AISI 1040.

## Lampiran 4

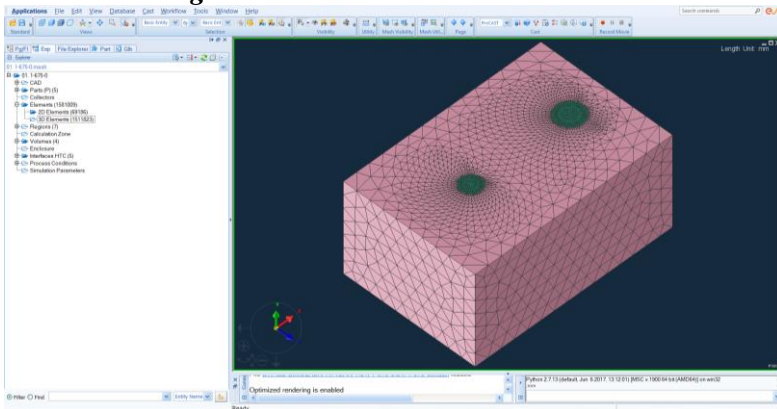
### Parameter Input

#### 1. Geometri Piston

Volume = 66611.89 cubic millimeters  
Surface area = 19103.98 square millimeters  
Center of mass: ( millimeters )  
X = 0.00  
Y = 13.17  
Z = 0.00

**Gambar 42.** *Geometry properties (solidwork) piston setelah diberikan shrinkage allowance.*

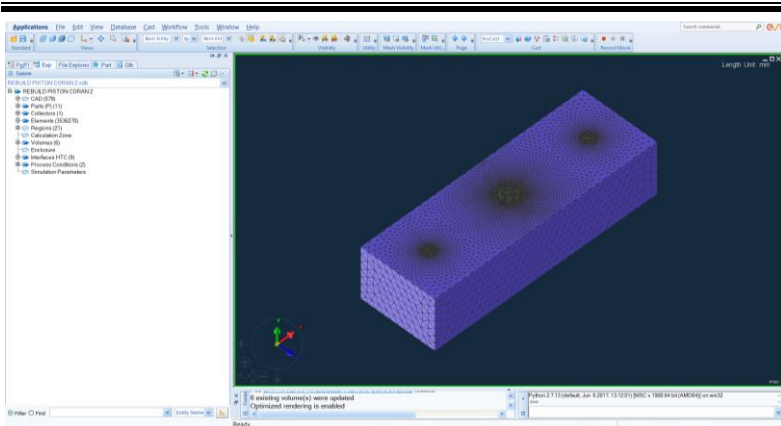
#### 2. Meshing Geometri



**Gambar 43.** *Proses meshing (tetrahedral-linear) pada satu pattern per mold.*

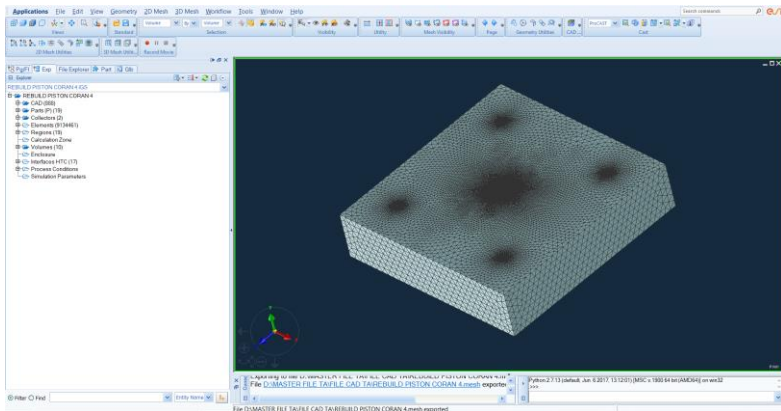
Proses *meshing* diberikan dengan bentuk elemen tetrahedral-linear berukuran 1 mm pada paduan dan *core*, sedangkan pada cetakan 10 mm. *Mesh* membentuk 1511823 elemen (*virtual mold* 150 mm x 100 mm x 70 mm) pada satu *pattern per mold*,





**Gambar 44.** Proses *meshing* (tetrahedral-linear) pada dua *pattern per mold*.

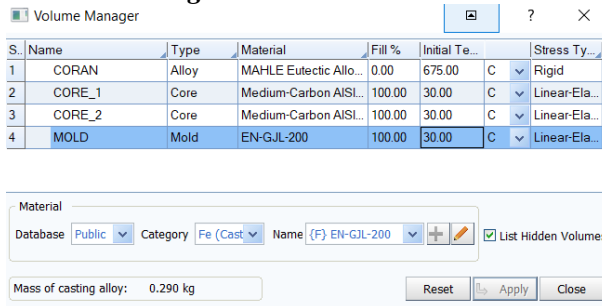
3536278 elemen (*virtual mold* 300 mm x 100 mm x 70 mm) pada dua *pattern per mold*,



**Gambar 45.** Proses *meshing* (tetrahedral-linear) pada empat *pattern per mold*.

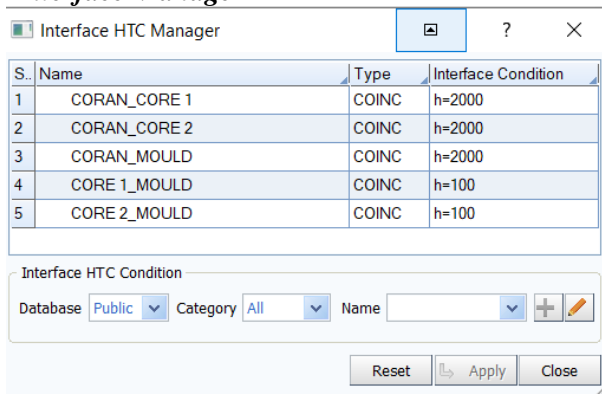
serta 9134461 elemen (*virtual mold* 300 mm x 300 mm x 70 mm) pada empat *pattern per mold*.

### 3. Volume Manager



Gambar 46. Volume manager.

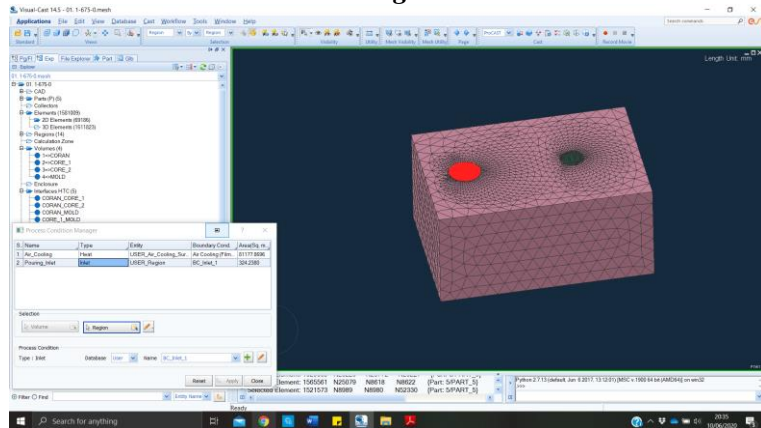
### 4. Interface Manager



Gambar 47. Interface manager.

Pada *interface* diberikan koefisien konvektivitas termal,  $h = 100 \text{ W/m}^2\text{k}$  yang merupakan asumsi dari celah udara (*air gap*) selama proses pengecoran (Bohacek dkk., 2018) dan  $h = 2000 \text{ W/m}^2\text{k}$  pada *molten metal* terhadap cetakan dan *core* (Gao dkk., 2019)

## 5. Process Condition Manager



**Gambar 48.** Process condition manager.

Pada tahap ini, diberikan *boundary condition* berupa pendinginan udara, dimana temperatur ambient  $30^{\circ}\text{C}$  dan koefisien konvektivitas termal,  $h = 10 \text{ W/m}^2\text{k}$ . Selain itu, pada *pouring inlet* diasumsikan pada rata pada ketinggian efektif sprue terhadap *choke*. Dalam kondisi riil, hal tersebut dapat dicapai dengan penambahan *pouring basin*.

## 6. Parameter Simulasi

Simulation Parameters [?] [X]

File Category Unit

Pre-defined Parameters Select Pre-Defined Set  Show String Selection

General Thermal Flow Turbulence +

Parameter		Type	Value	Value Unit	F(t) Unit
<b>NSTEP</b>	Stop criterion : Max.nu...	Const	50000		
<b>TFINAL</b>	Stop criterion : Final Ti...	Const	0.0000e+00	sec	▼
<b>TENDFILL</b>	Stop criterion : Time af...	Const	0.0000e+00	sec	▼
<b>TSTOP</b>	Stop criterion : Final T...	Const	4.5000e+02	C	▼
<b>TSTOP_PART</b>	Stop criterion : Select ...				
<b>INILEV</b>	Restart Step	Const	0		
<b>DT</b>	Initial Timestep	Const	1.0000e-03	sec	▼
<b>DTMAXFILL</b>	Maximum Timestep fo...	Const	1.0000e-01	sec	▼ sec ▼
<b>DTMAX</b>	Maximum Timestep	Const	1.0000e+00	sec	▼ sec ▼
<b>TUNITS</b>	Temperature results U...	Const	C	▼	
<b>QUNITS</b>	Heat Flux results Units	Const	W/m <sup>2</sup>	▼	
<b>VUNITS</b>	Velocity results Units	Const	m/sec	▼	
<b>PUNITS</b>	Pressure results Units	Const	bar	▼	
<input type="checkbox"/> Advanced					

Help

[Select GATENODE] [Apply] [Cancel] [Close]

**Gambar 49.** Parameter simulasi umum.

Simulation Parameters [Icon] ? X

File Category Unit

Pre-defined Parameters Select Pre-Defined Set  Show String Selection

General **Thermal** Flow Turbulence +

Parameter		Type	Value	Value Unit
<b>THERMAL</b>	Thermal model activati...	Const	ON (Temperature)	
<b>TFREQ</b>	Temperature results sto...	Const	10	
<b>MFSPATH</b>	Multiple solidification pa...	Const	OFF	
<b>POROS</b>	Porosity model activation	Const	ON (Advanced)	
<b>MACROFS</b>	Porosity - critical macro...	Const	7.0000e-01	
<b>PIPEFS</b>	Porosity - critical piping ...	Const	3.0000e-01	
<b>FEEDLEN</b>	Porosity - Feeding length	Const	5.0000e+00	mm
<b>NIYAMA</b>	Niyama criterion	Const	0.250000	
<b>NIYAMA_STAR</b>	Dimensionless Niyama ...	Const	0.000000	
<b>NYS_ADJUST</b>	Calibration parameter f...	Const	1.000000	
<b>GATEFEED</b>	Porosity gate feeding (p...	Const	OFF	
<b>GATENODE</b>	Porosity gate feeding n...	Const	0	
<b>MOLDRIG</b>	Mold rigidity factor (cast...	Const	1.0000e+00	
<b>GATEFS</b>	Porosity gate feeding s...	Const	0.950000	
<b>ACCORDION</b>	MiLE algorithm activation	Const	no accordion	
<b>HOTSPOTS</b>	Hot spots computation ...	Const	ON	
<b>THMODULE</b>	Chvorinov's thermal mo...	Const	ON	
<b>THMODULE_PA...</b>	Mold for thermal modulu...		<b>MOULD</b>	
<b>BURNON</b>	Solid fraction at critical t...	Const	0.000000	
<b>BURNONT</b>	Critical temperature val...	Const		C
<input type="checkbox"/> Advanced				

Help

**Gambar 50.** Parameter simulasi termal.

## Simulation Parameters

File Category Unit

Pre-defined Parameters Select Pre-Defined Set  Show String Selection

General Thermal Flow Turbulence +

Parameter		Type	Value	Value Unit	F(t) Unit
FLOW	Flow model activation	Const	ON(3, switch ov...		
FREESF	Free surface model a...	Const	ON (Rapid filling)		
FREESFOPT	Free surface algorithms	Const	Advanced1 (ma...		
GAS	Gas model activation	Const	OFF		
VFREQ	Velocity results storag...	Const	10		
PREF	Reference pressure	Const	1.0000e+00	atm	
PINLET	Activation of a pressur...	Const	OFF		
LVSURF	Maximum fill fraction	Const	1.0000e+00		
LVMASS	Maximum mass of cas...	Const	0.000000	kg	
LVMASS_PART	Select volumes for LV...				
COURANT	Filling parameter	Const	1.0000e+02		
WSHEAR	Slip algorithm at mold ...	Const	ON (turbulent)		
WALLF	Wall Slip parameter	Const	8.0000e-01		sec
PFREQ	Particle tracking launc...	Const	0		
JUNCTION	Metal front tracking alg...	Const	0		
OXIDATION	Particles sedimentatio...	Const	0		
TILT	Tilt pouring activation	Const	OFF		
<input type="checkbox"/>	Pouring Con...				
<input type="checkbox"/>	Advanced1				
<input type="checkbox"/>	Advanced2				

Help

Select GATENODE Apply Cancel Close

**Gambar 51.** Parameter simulasi aliran.

Simulation Parameters [Image] ? X

File Category Unit

Pre-defined Parameters Select Pre-Defined Set  Show String Selection

General Thermal Flow Turbulence +

Parameter	Type	Value	Value Unit
TURB Turbulence model activat..	Const.	ON (Realizable k-e... <span>▼</span> )	
CMU Proportionality constant p...	Const.	9.0000e-02	
SIGMAK Diffusivity modifier param...	Const.	1.0000e+00	
SIGMAE Diffusivity modifier param...	Const.	1.3000e+00	
CONE Proportionality constant p...	Const.	1.4400e+00	
CTWO Proportionality constant p...	Const.	1.9200e+00	
KAPPA Von Karman's constant	Const.	4.0000e-01	
TBRELAX Turbulence relaxation par...	Const.	1.0000e+00	
TBCONVTOL Convergence for the turbu...	Const.	1.0000e-03	

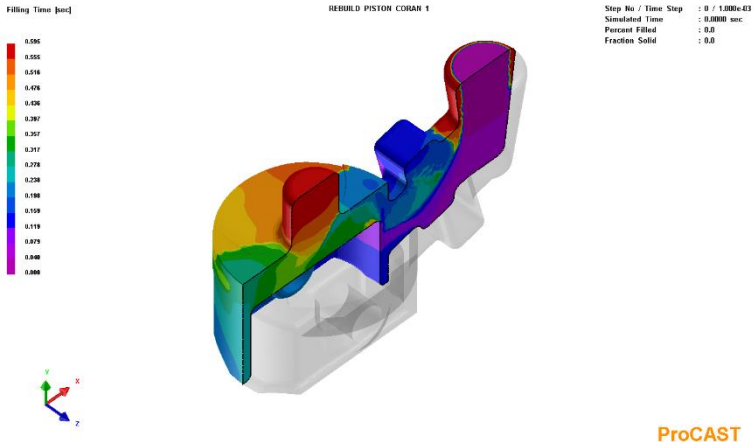
Help

Select GATENODE [Image] Apply Cancel Close

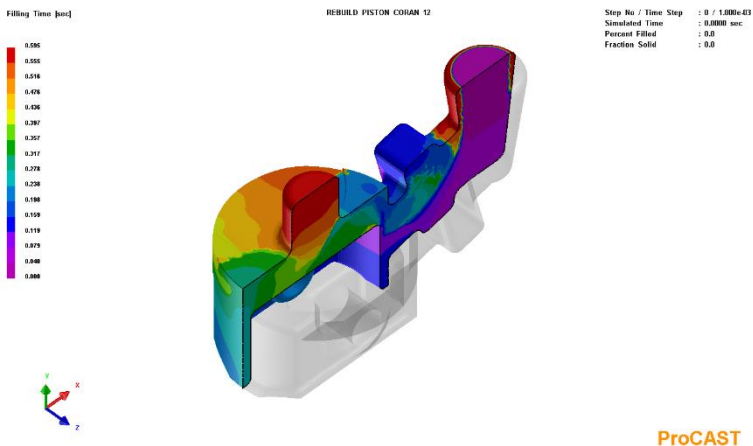
**Gambar 52.** Parameter simulasi turbulensi.

## Lampiran 5

## Hasil Simulasi

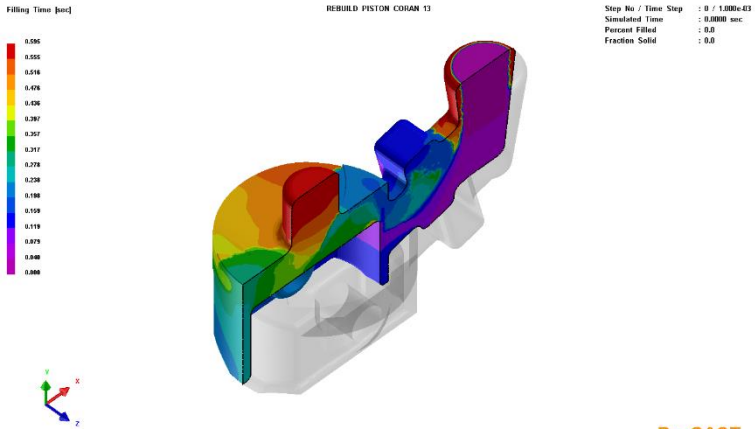
1. *Filling Time*a. *Satu pattern per mold*

**Gambar 53.** *Filling time* dalam satu *pattern per mold* pada variasi 675°C – 30°C.

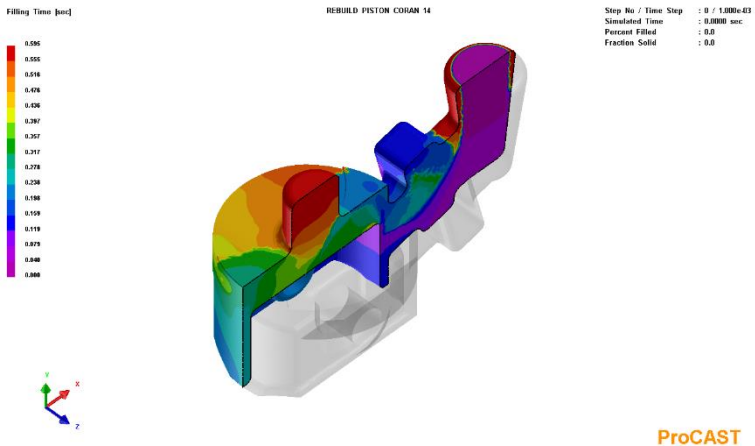


**Gambar 54.** *Filling time* dalam satu *pattern per mold* pada variasi 675°C – 200°C.

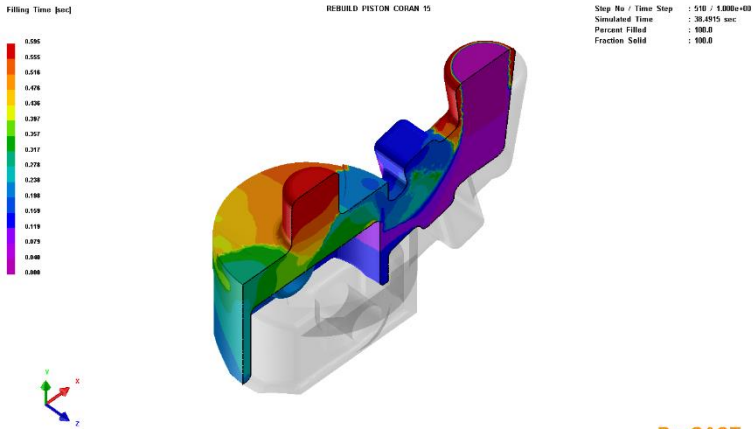




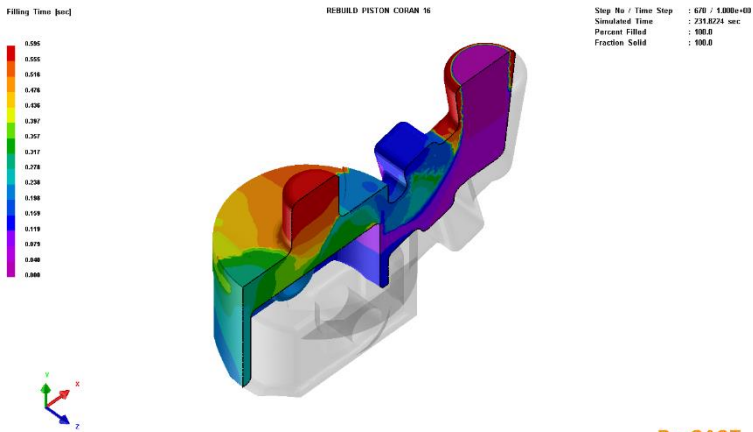
**Gambar 55.** *Filling time dalam satu pattern per mold pada variasi 675°C – 400°C.*



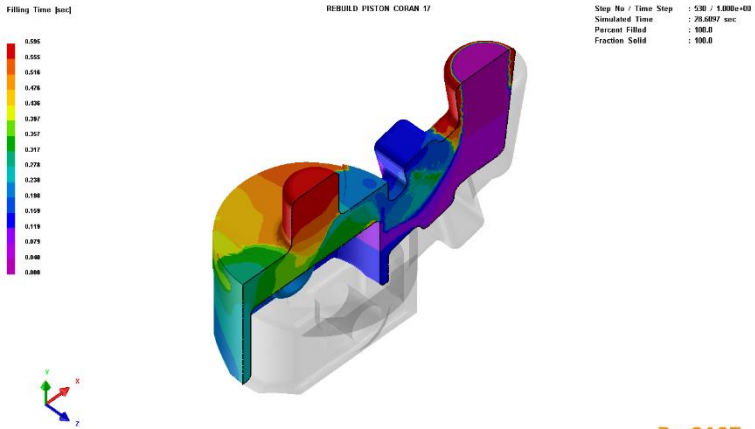
**Gambar 56.** *Filling time dalam satu pattern per mold pada variasi 725°C – 30°C.*



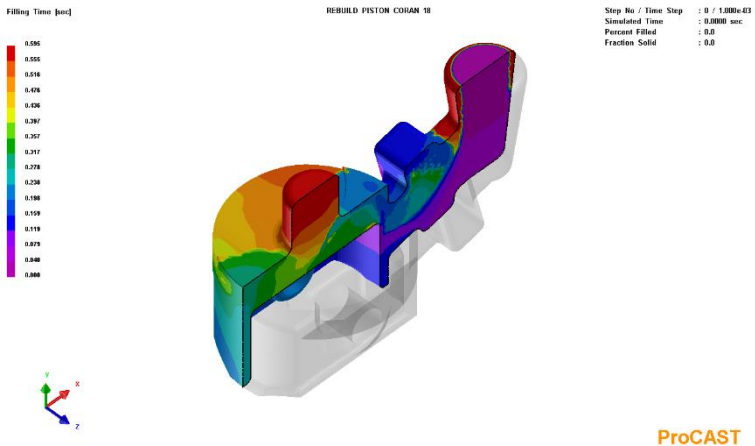
**Gambar 57.** Filling time dalam satu pattern per mold pada variasi 725°C – 200°C.



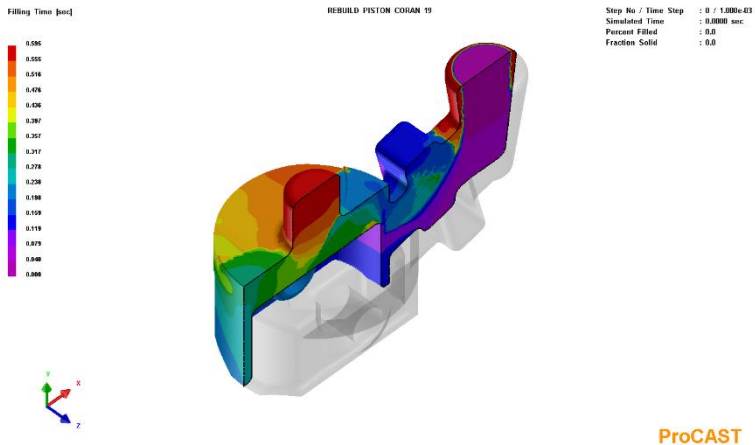
**Gambar 58.** Filling time dalam satu pattern per mold pada variasi 725°C – 600°C.



**Gambar 59.** Filling time dalam satu pattern per mold pada variasi 775°C – 30°C.

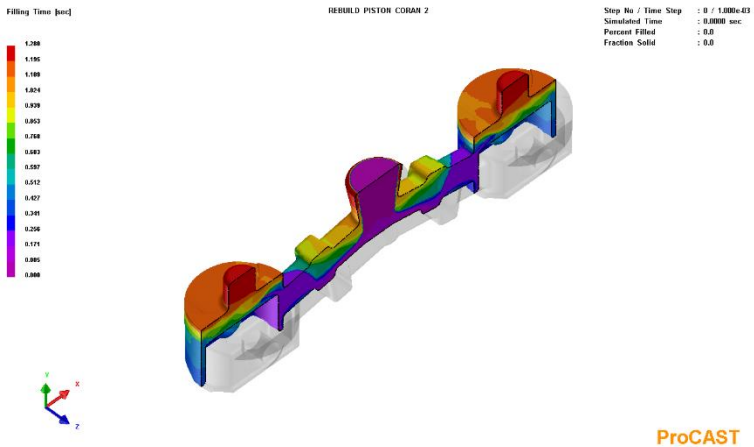


**Gambar 60.** Filling time dalam satu pattern per mold pada variasi 775°C – 200°C.

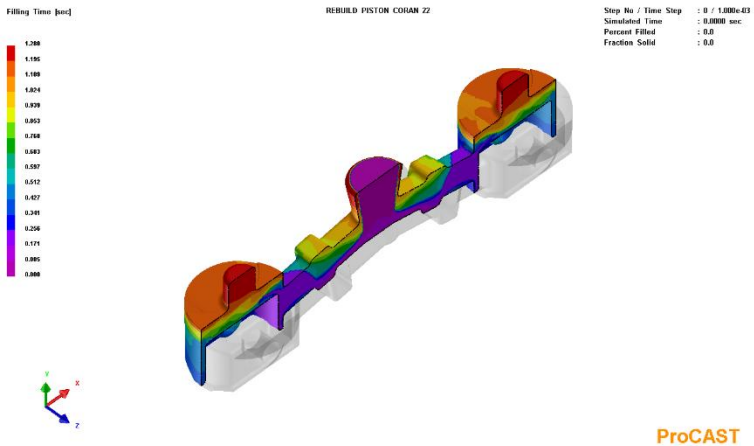


**Gambar 61.** *Filling time* dalam satu *pattern per mold* pada variasi 775°C – 400°C.

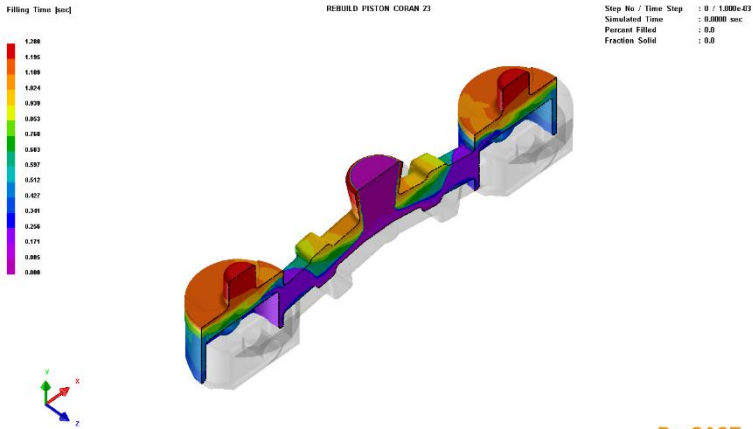
*b. Dua pattern per mold*



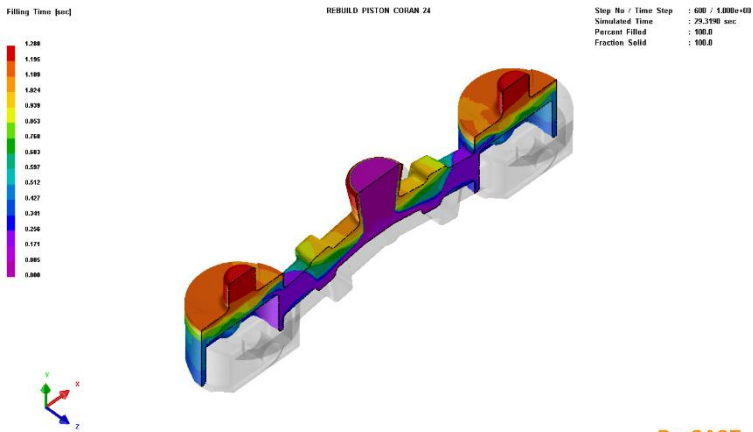
**Gambar 62.** *Filling time dalam dua pattern per mold pada variasi 675°C – 30°C.*



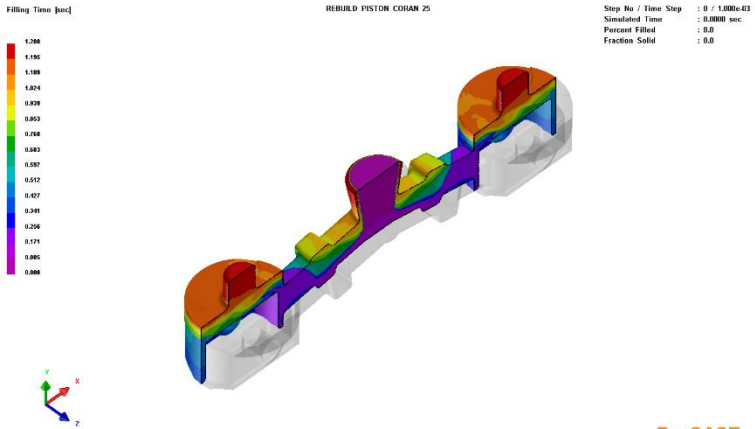
**Gambar 63.** *Filling time dalam dua pattern per mold pada variasi 675°C – 200°C.*



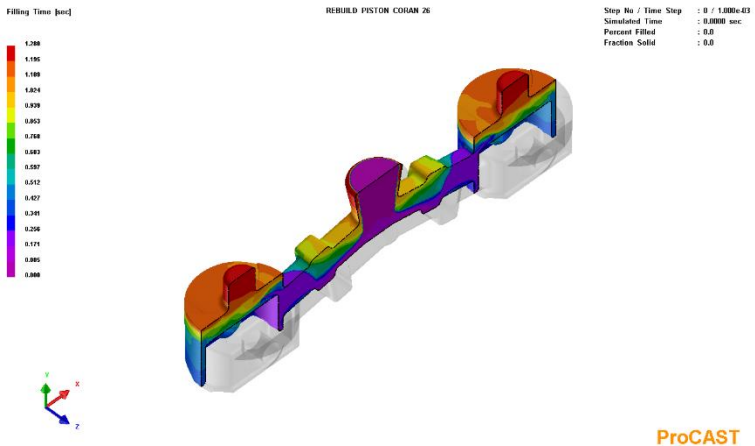
**Gambar 64.** *Filling time dalam dua pattern per mold pada variasi 675°C – 400°C.*



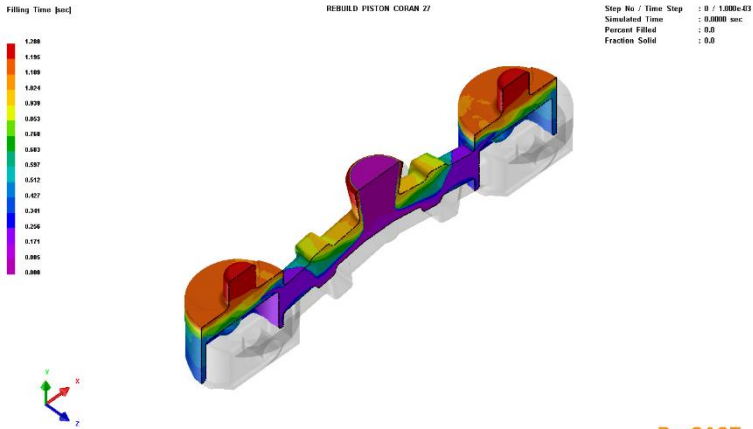
**Gambar 65.** *Filling time dalam dua pattern per mold pada variasi 725°C – 30°C.*



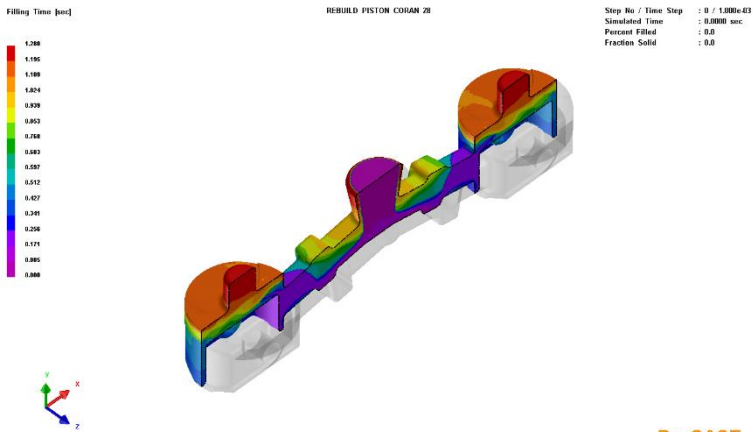
**Gambar 66.** *Filling time dalam dua pattern per mold pada variasi 725°C – 200°C.*



**Gambar 67.** *Filling time dalam dua pattern per mold pada variasi 725°C – 600°C.*

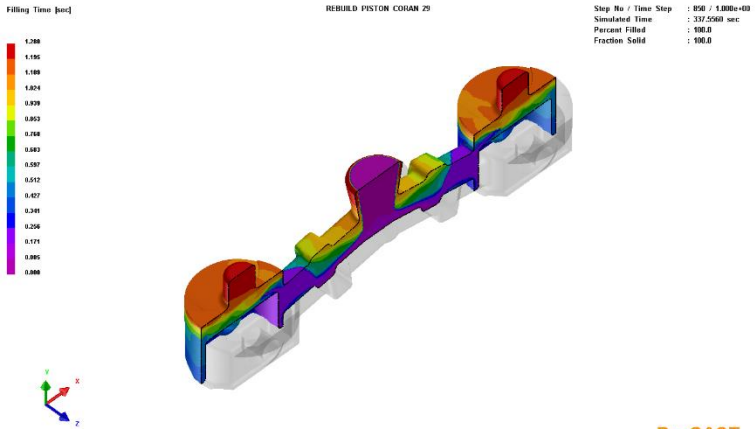


**Gambar 68.** *Filling time* dalam dua pattern per mold pada variasi  $775^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ .



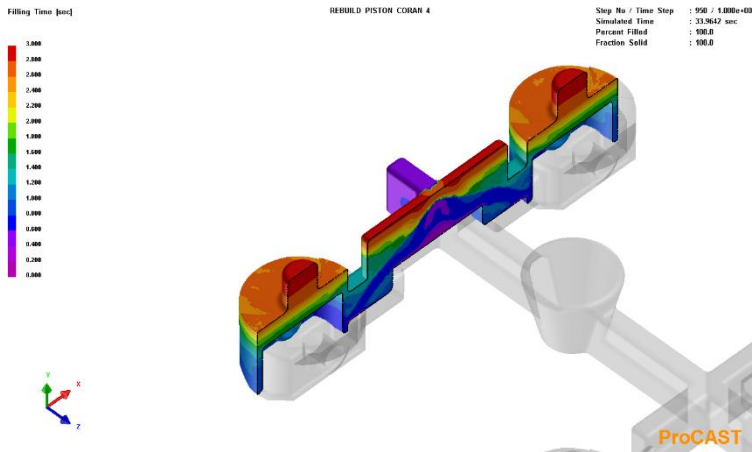
**Gambar 69.** *Filling time* dalam dua pattern per mold pada variasi  $775^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ .



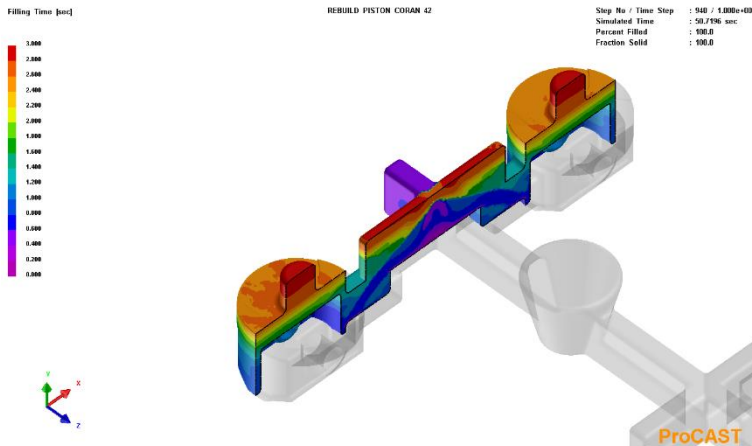


**Gambar 70.** *Filling time* dalam dua *pattern per mold* pada variasi  $775^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$ .

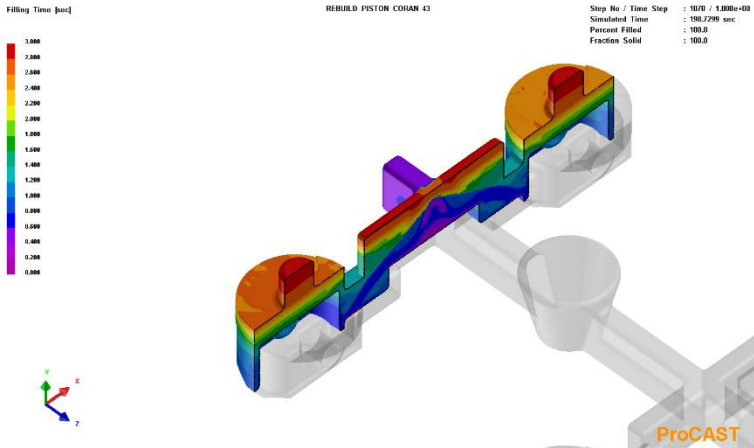
c. Empat *pattern per mold*



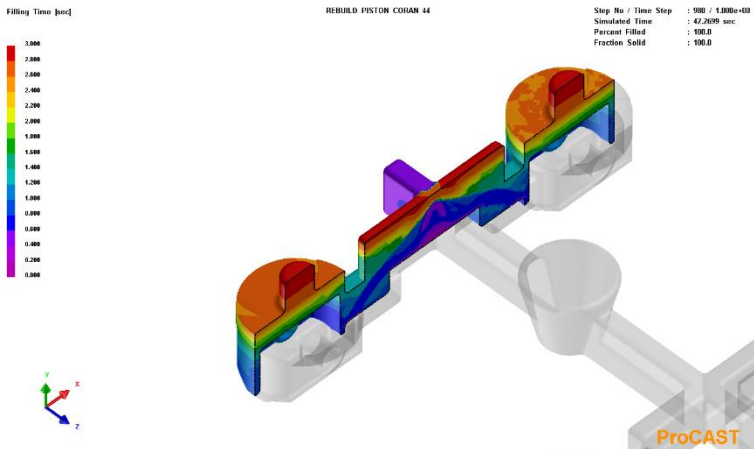
**Gambar 71.** Filling time dalam empat *pattern per mold* pada variasi 675°C – 30°C.



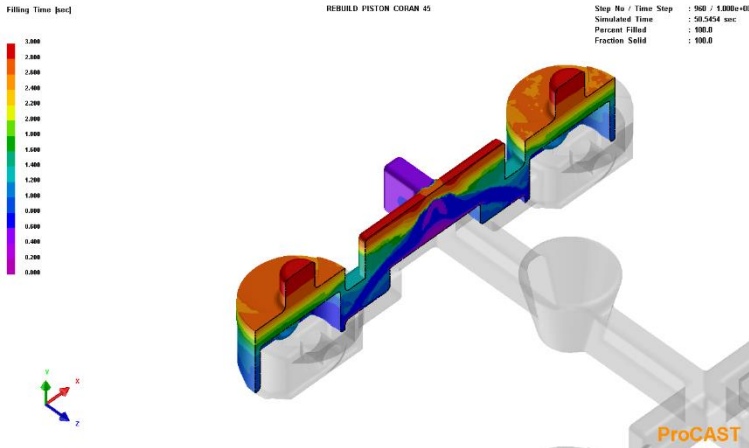
**Gambar 72.** Filling time dalam empat *pattern per mold* pada variasi 675°C – 200°C.



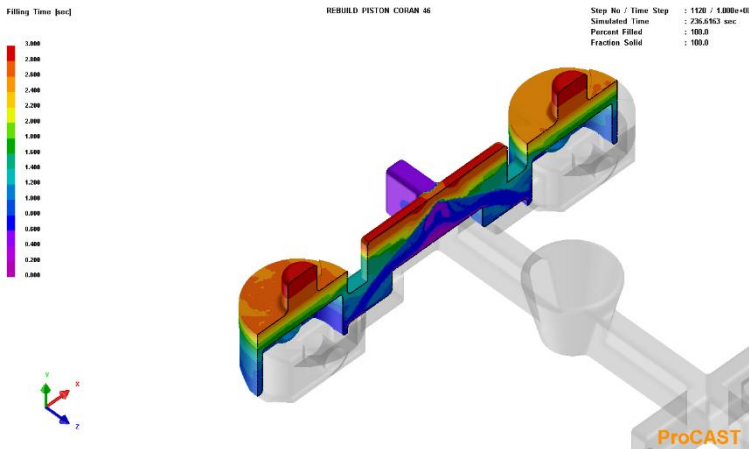
**Gambar 73.** *Filling time dalam empat pattern per mold pada variasi 675°C – 400°C.*



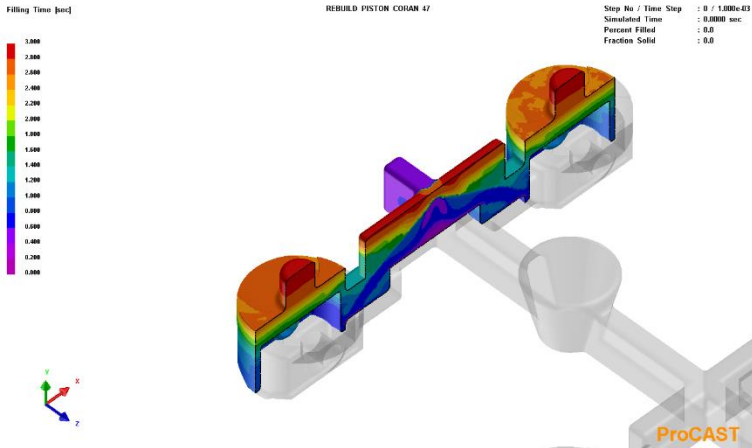
**Gambar 74.** *Filling time dalam empat pattern per mold pada variasi 725°C – 30°C.*



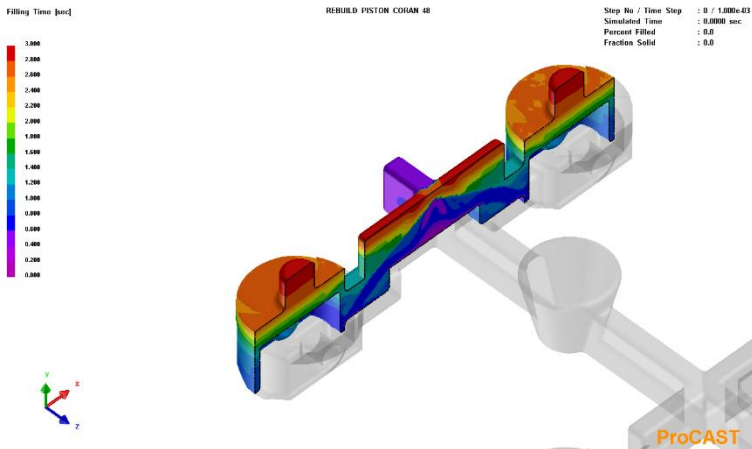
**Gambar 75.** Filling time dalam empat *pattern per mold* pada variasi 725°C – 200°C.



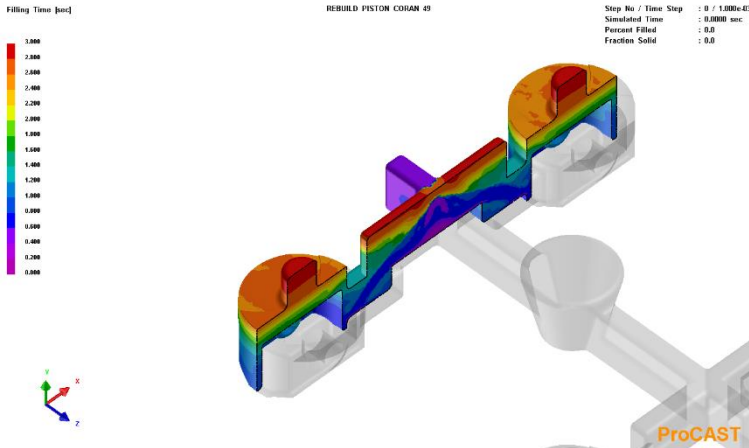
**Gambar 76.** Filling time dalam empat *pattern per mold* pada variasi 725°C – 600°C.



**Gambar 77.** *Filling time* dalam empat pattern per mold pada variasi 775°C – 30°C.



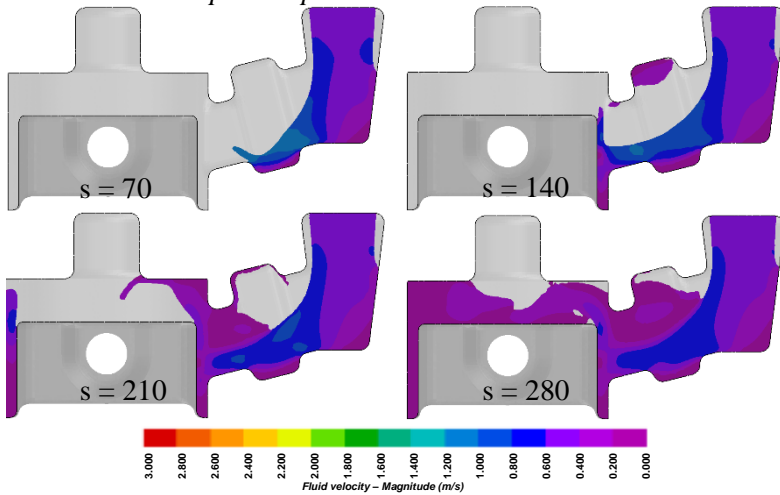
**Gambar 78.** *Filling time* dalam empat pattern per mold pada variasi 775°C – 200°C.



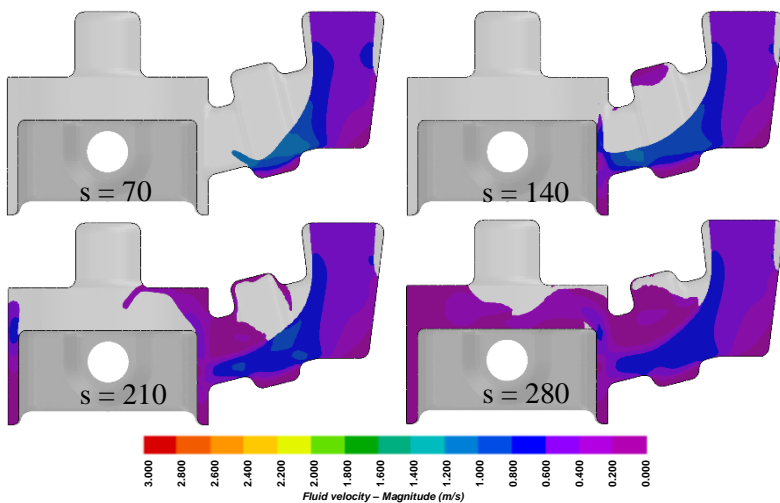
**Gambar 79.** Filling time dalam empat *pattern per mold* pada variasi 775°C – 400°C.

## 2. Fluid Velocity Magnitude

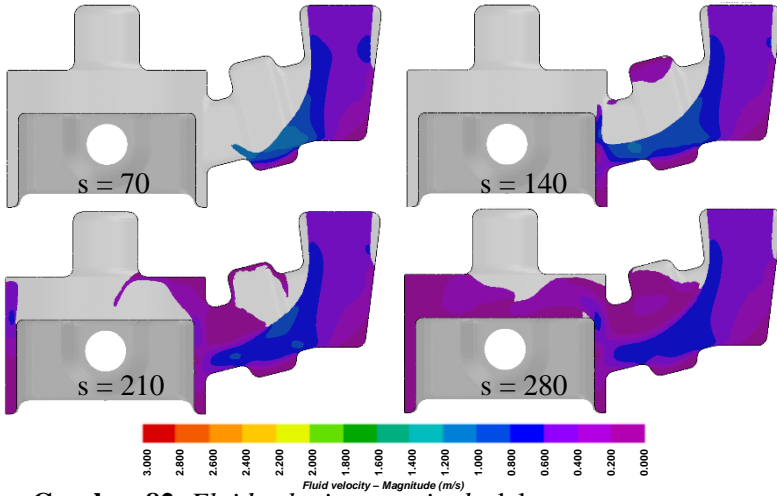
### a. Satu pattern per mold



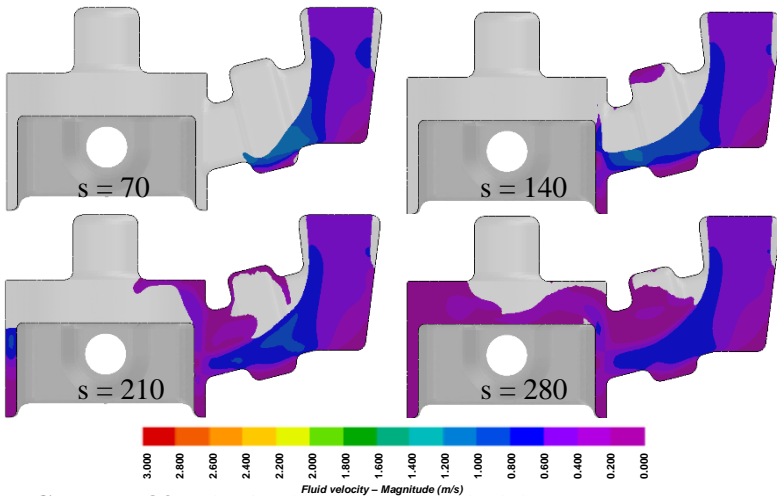
**Gambar 80.** Fluid velocity magnitude dalam satu pattern per mold pada variasi 675°C – 30°C.



**Gambar 81.** Fluid velocity magnitude dalam satu pattern per mold pada variasi 675°C – 200°C.

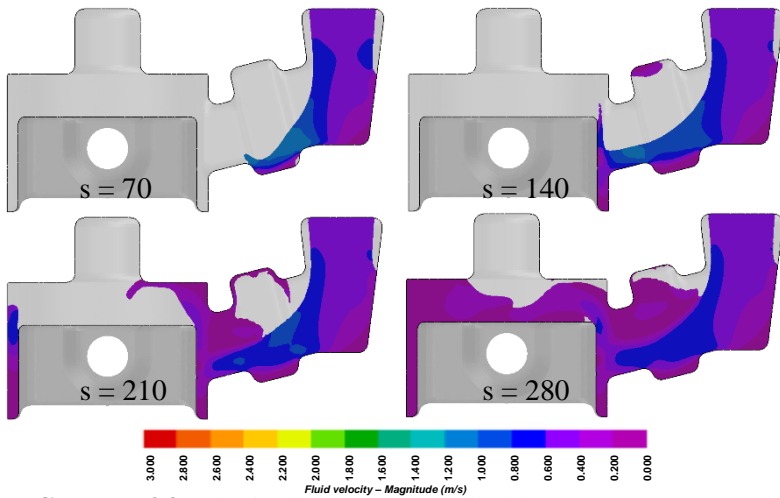


**Gambar 82.** *Fluid velocity magnitude* dalam satu *pattern per mold* pada variasi  $675^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$ .

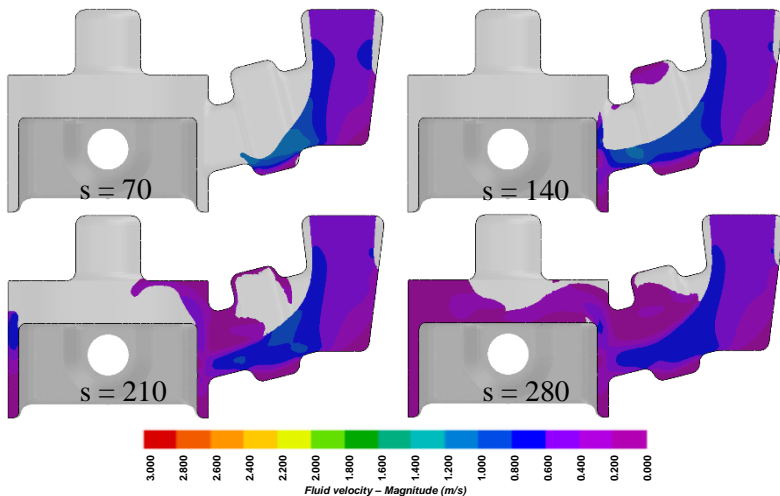


**Gambar 83.** *Fluid velocity magnitude* dalam satu *pattern per mold* pada variasi  $725^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ .

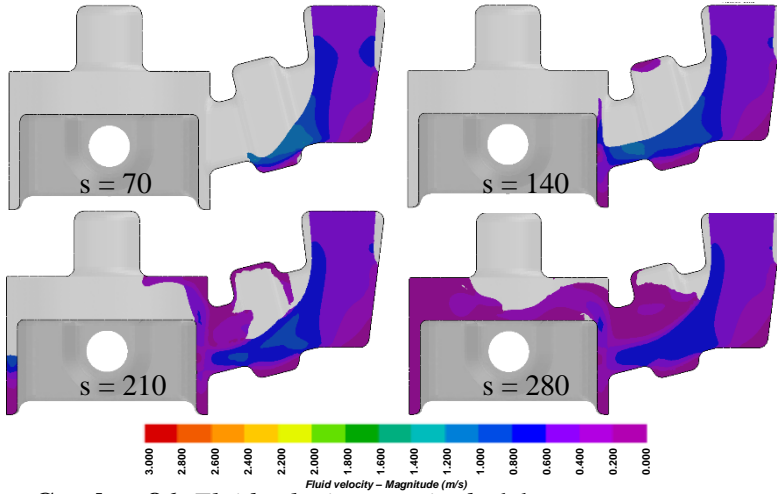




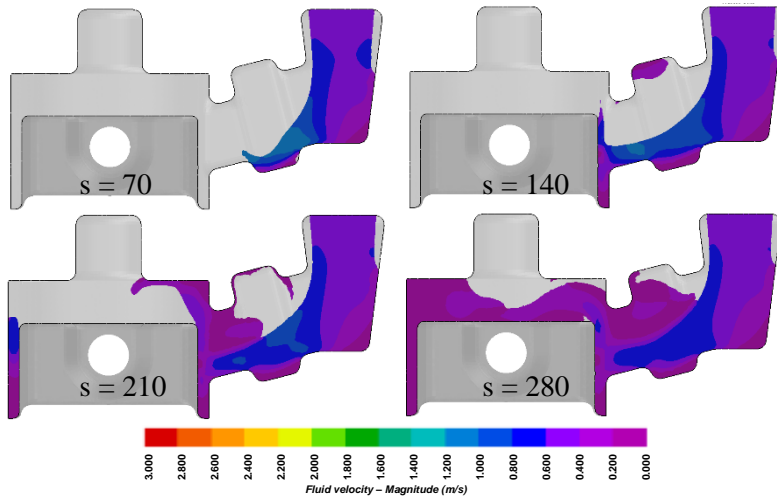
**Gambar 84.** *Fluid velocity magnitude* dalam satu *pattern per mold* pada variasi 725°C – 200°C.



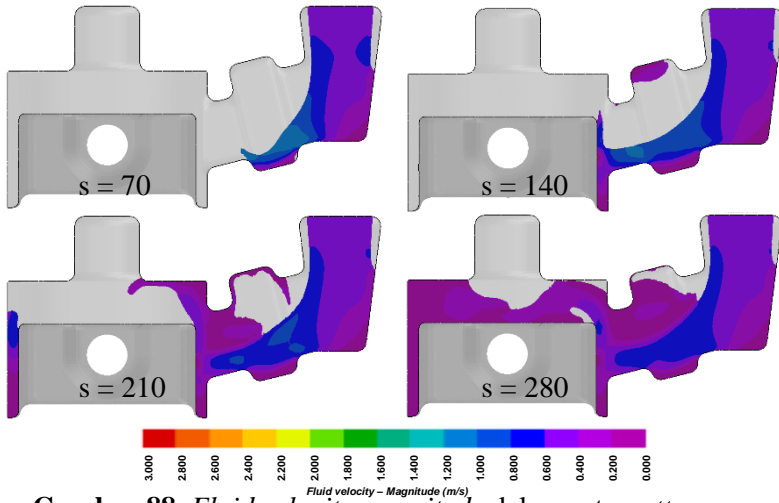
**Gambar 85.** *Fluid velocity magnitude* dalam satu *pattern per mold* pada variasi 725°C – 400°C.



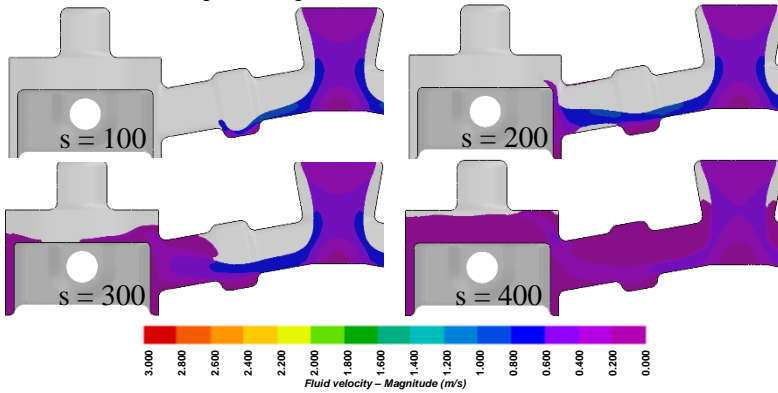
**Gambar 86.** Fluid velocity magnitude dalam satu pattern per mold pada variasi  $775^{\circ}C - 30^{\circ}C$ .



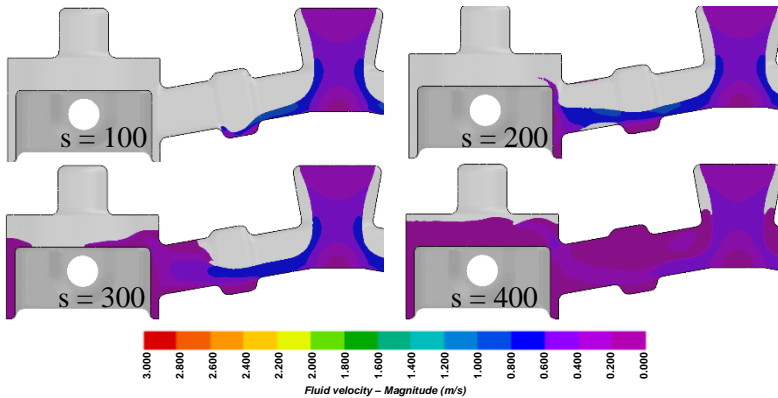
**Gambar 87.** Fluid velocity magnitude dalam satu pattern per mold pada variasi  $775^{\circ}C - 200^{\circ}C$ .



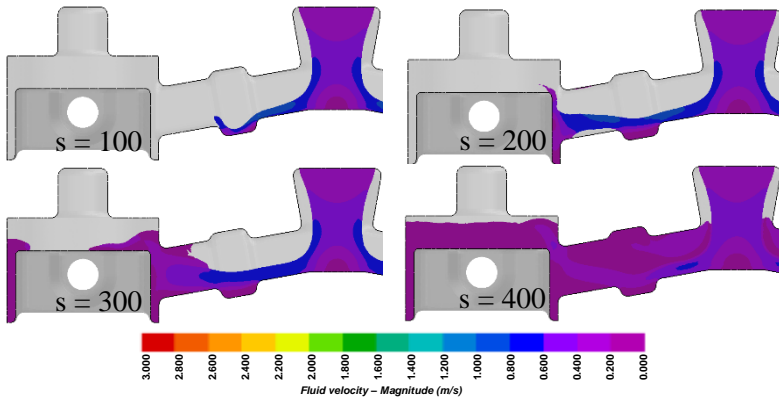
**Gambar 88.** *Fluid velocity magnitude* dalam satu *pattern per mold* pada variasi 775°C – 400°C.

*b. Dua pattern per mold*

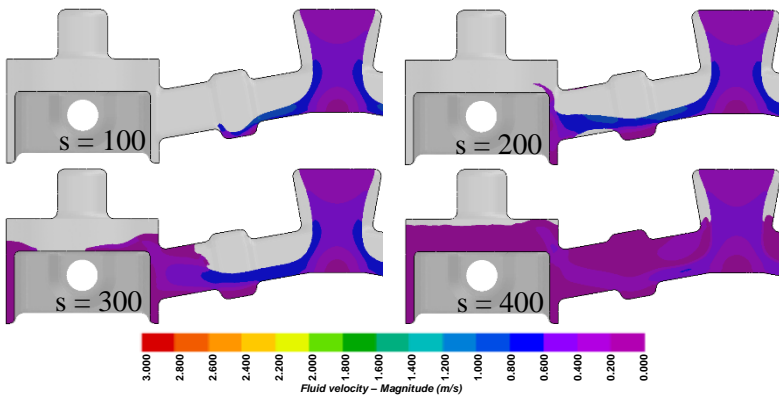
**Gambar 89.** Fluid velocity magnitude dalam dua pattern per mold pada variasi  $675^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ .



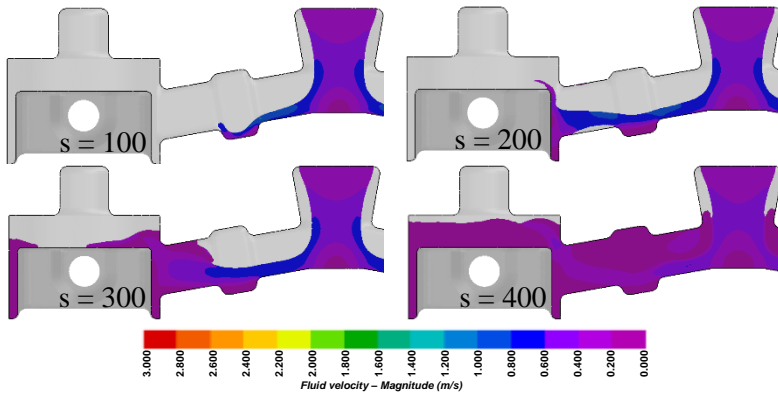
**Gambar 90.** Fluid velocity magnitude dalam dua pattern per mold pada variasi  $675^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ .



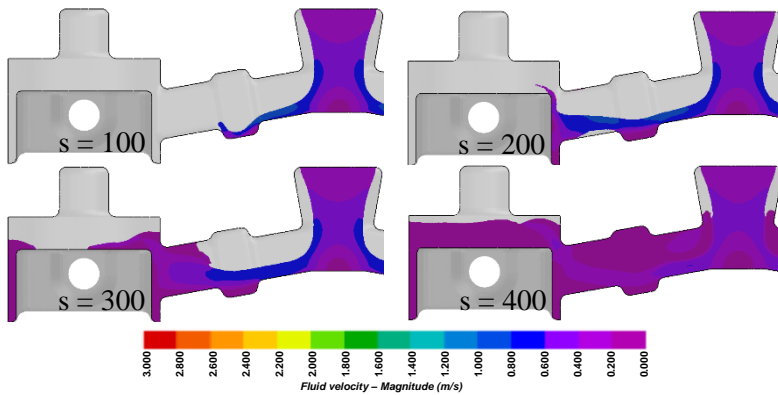
**Gambar 91.** *Fluid velocity magnitude* dalam dua *pattern per mold* pada variasi  $675^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$ .



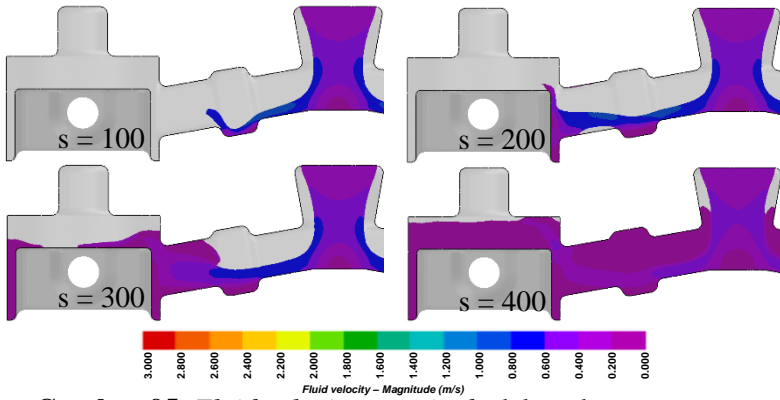
**Gambar 92.** *Fluid velocity magnitude* dalam dua *pattern per mold* pada variasi  $725^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ .



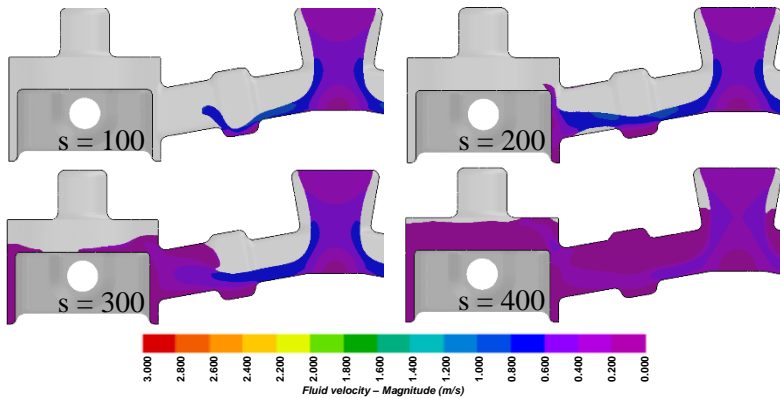
**Gambar 93.** *Fluid velocity magnitude* dalam dua *pattern per mold* pada variasi  $725^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ .



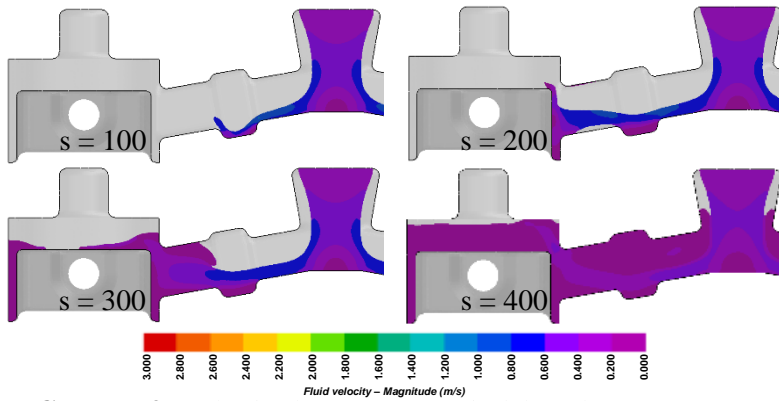
**Gambar 94.** *Fluid velocity magnitude* dalam dua *pattern per mold* pada variasi  $725^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$ .



**Gambar 95.** *Fluid velocity magnitude* dalam dua pattern per mold pada variasi  $775^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ .



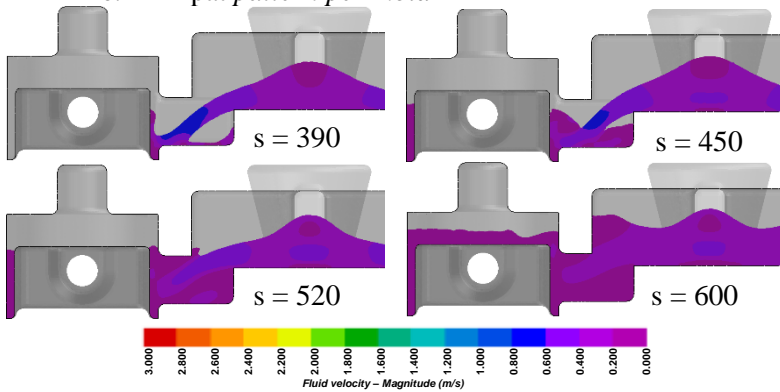
**Gambar 96.** *Fluid velocity magnitude* dalam dua pattern per mold pada variasi  $775^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ .



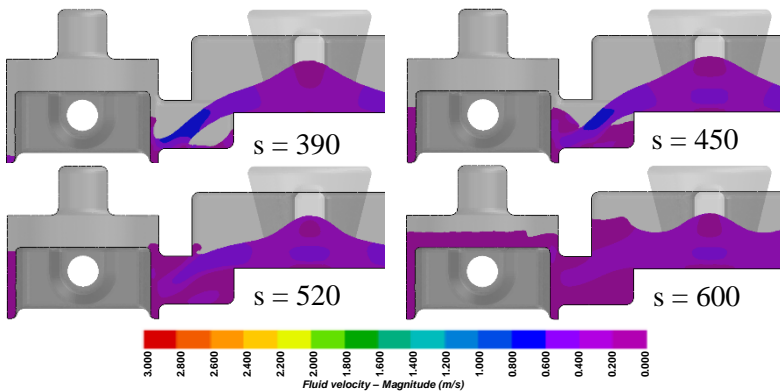
**Gambar 97.** *Fluid velocity magnitude* dalam dua *pattern per mold* pada variasi  $775^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$ .



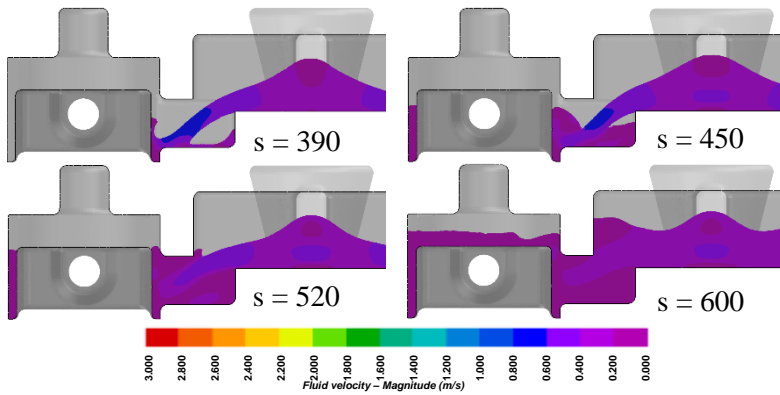
c. Empat pattern per mold



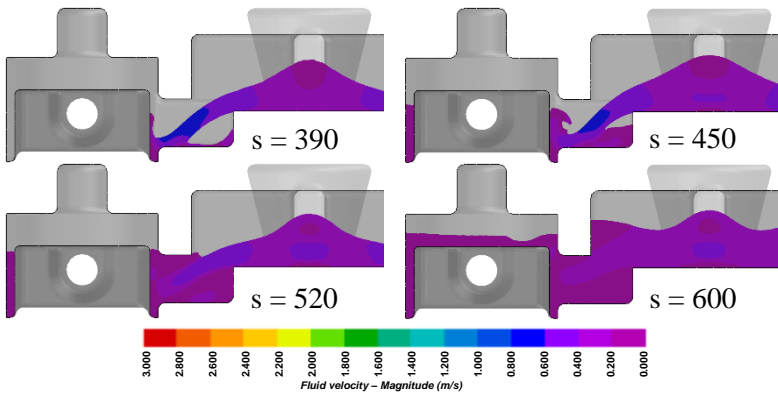
**Gambar 98.** Fluid velocity magnitude dalam empat pattern per mold pada variasi 675°C – 30°C.



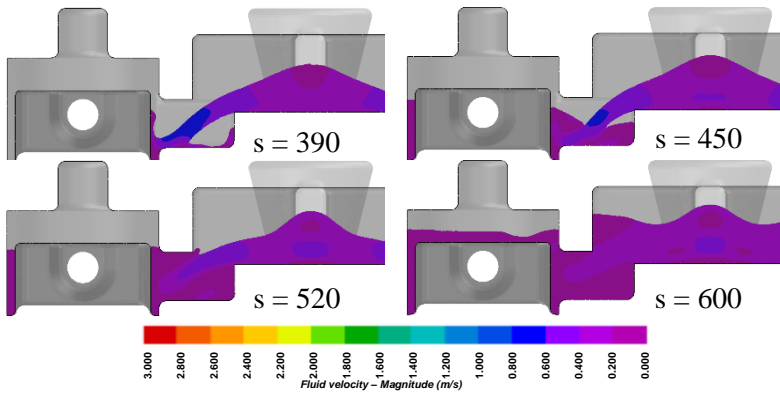
**Gambar 99.** Fluid velocity magnitude dalam empat pattern per mold pada variasi 675°C – 200°C.



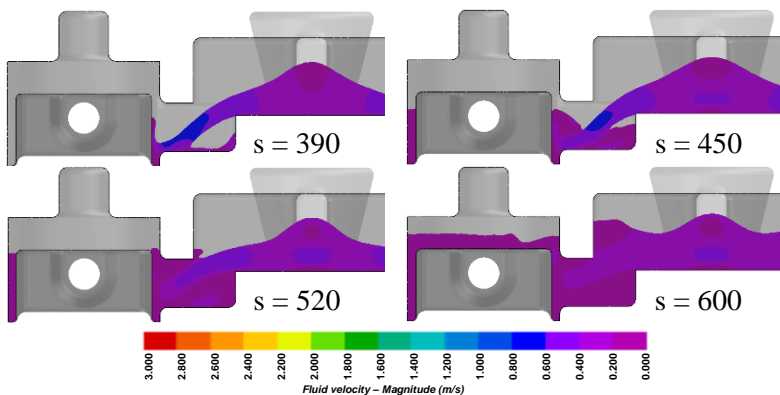
**Gambar 100** Fluid velocity magnitude dalam empat pattern per mold pada variasi 675°C – 400°C.



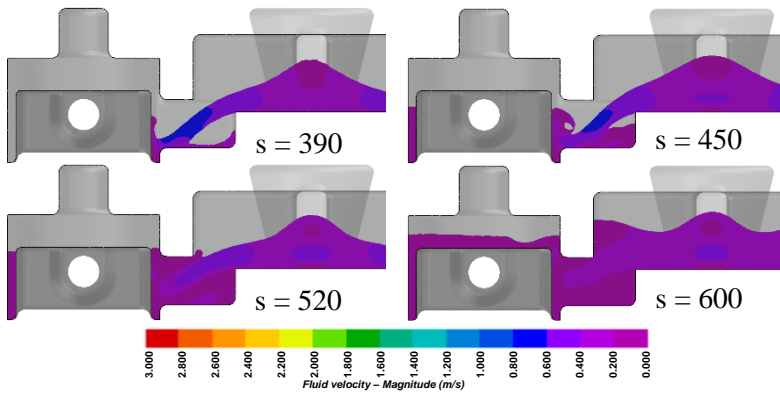
**Gambar 101.** Fluid velocity magnitude dalam empat pattern per mold pada variasi 725°C – 30°C.



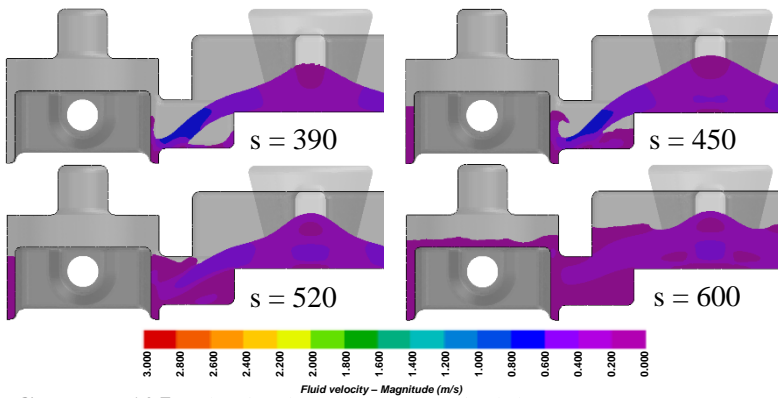
**Gambar 102.** *Fluid velocity magnitude* dalam empat *pattern per mold* pada variasi  $725^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ .



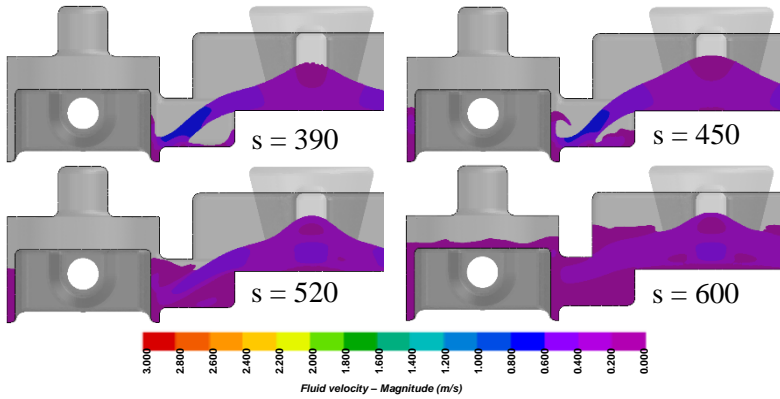
**Gambar 103.** *Fluid velocity magnitude* dalam empat *pattern per mold* pada variasi  $725^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$ .



**Gambar 104.** *Fluid velocity magnitude* dalam empat *pattern per mold* pada variasi  $775^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ .



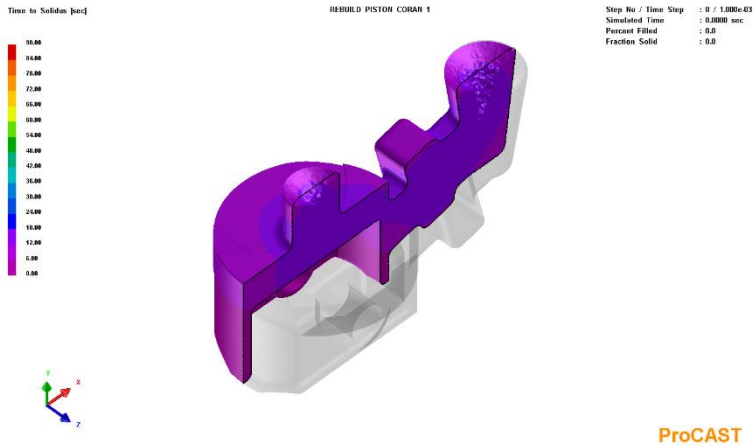
**Gambar 105.** *Fluid velocity magnitude* dalam empat *pattern per mold* pada variasi  $775^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ .



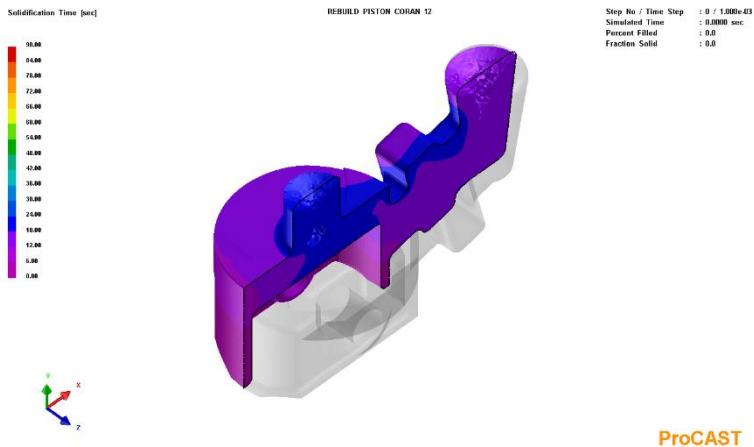
**Gambar 106.** *Fluid velocity magnitude* dalam empat *pattern per mold* pada variasi  $775^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$ .

### 3. Solidification Time

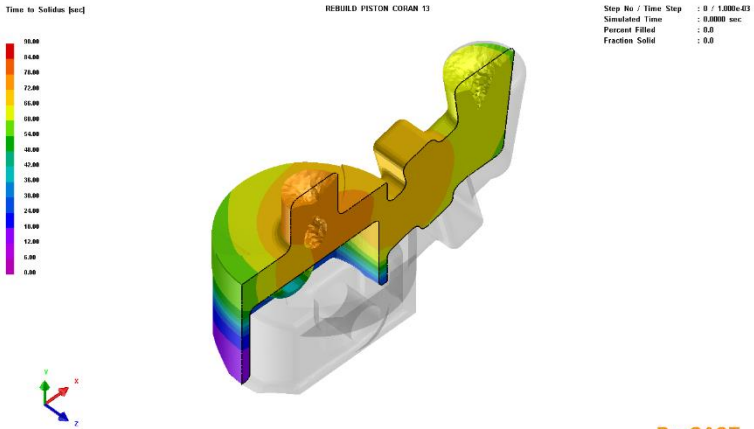
#### a. Satu pattern per mold



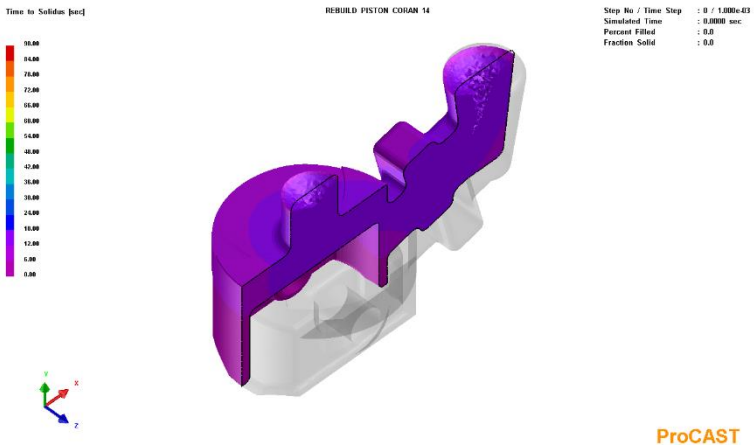
**Gambar 107.** Solidification time dalam satu pattern per mold pada variasi 675°C – 30°C.



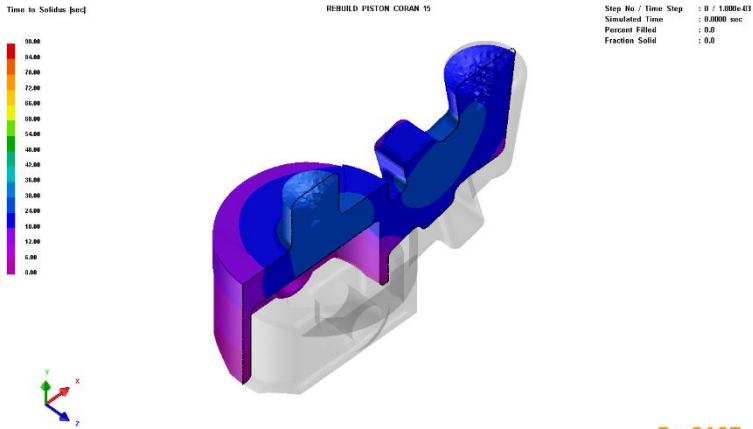
**Gambar 108.** Solidification time dalam satu pattern per mold pada variasi 675°C – 200°C.



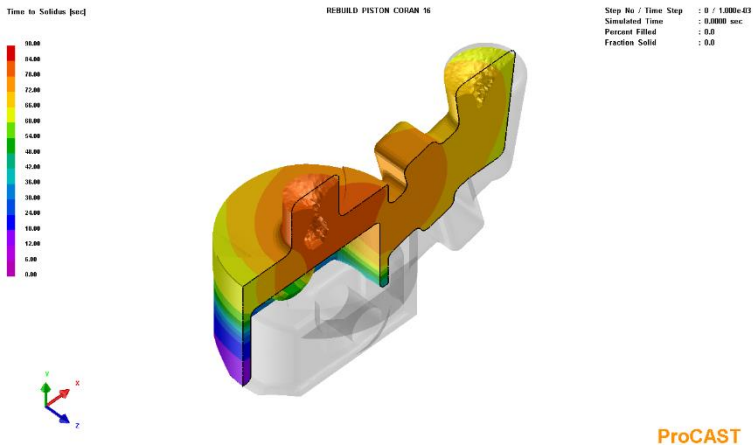
**Gambar 109.** *Solidification time dalam satu pattern per mold pada variasi 675°C – 400°C.*



**Gambar 110.** *Solidification time dalam satu pattern per mold pada variasi 725°C – 30°C.*

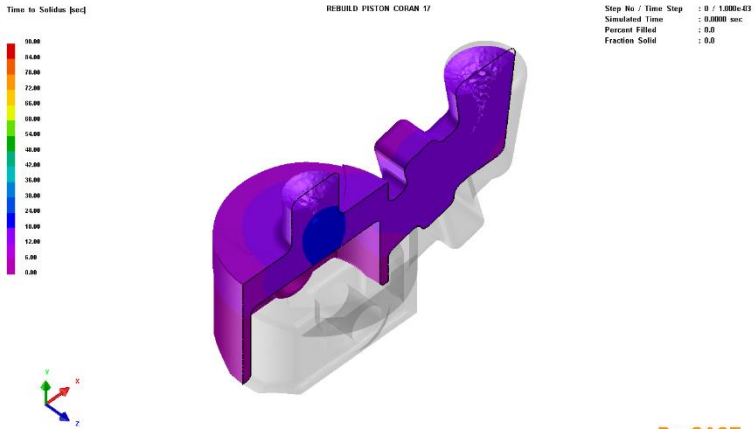


**Gambar 111.** *Solidification time dalam satu pattern per mold pada variasi 725°C – 200°C.*

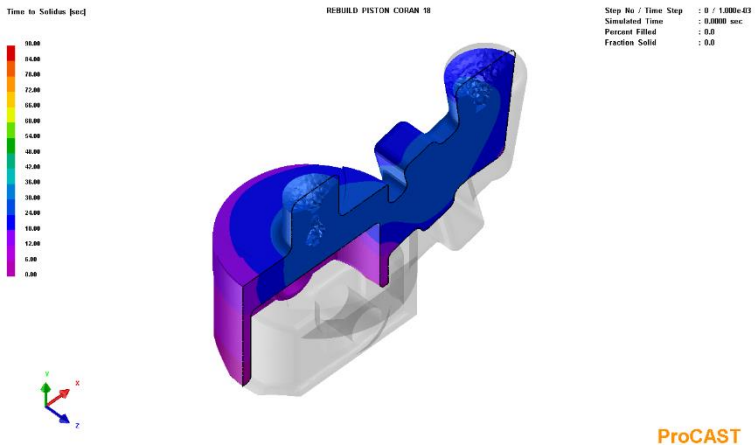


**Gambar 112.** *Solidification time dalam satu pattern per mold pada variasi 725°C – 400°C.*

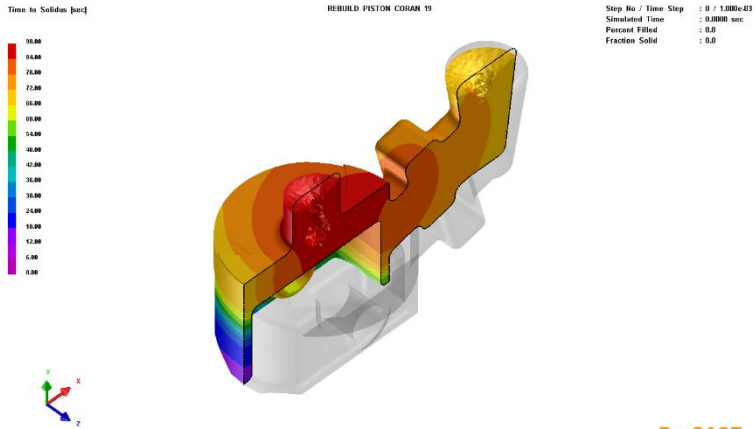




**Gambar 113.** *Solidification time dalam satu pattern per mold pada variasi 775°C – 30°C.*

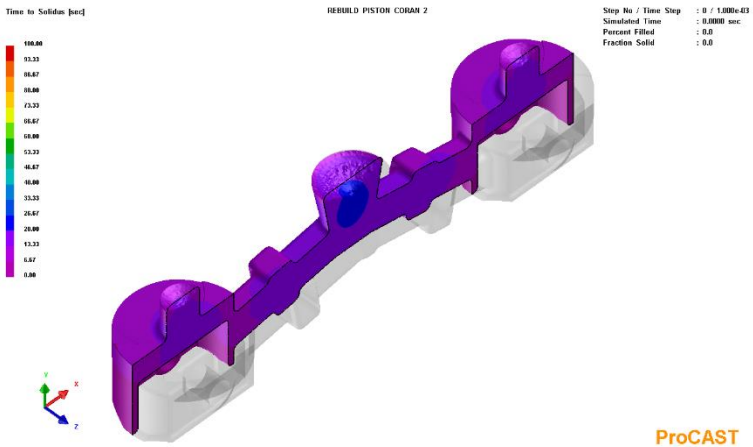


**Gambar 114.** *Solidification time dalam satu pattern per mold pada variasi 775°C – 200°C.*

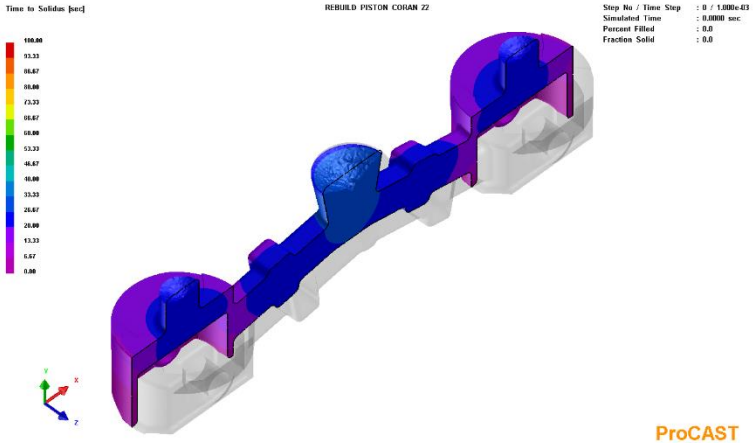


**Gambar 115.** *Solidification time* dalam satu *pattern per mold* pada variasi  $775^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$ .

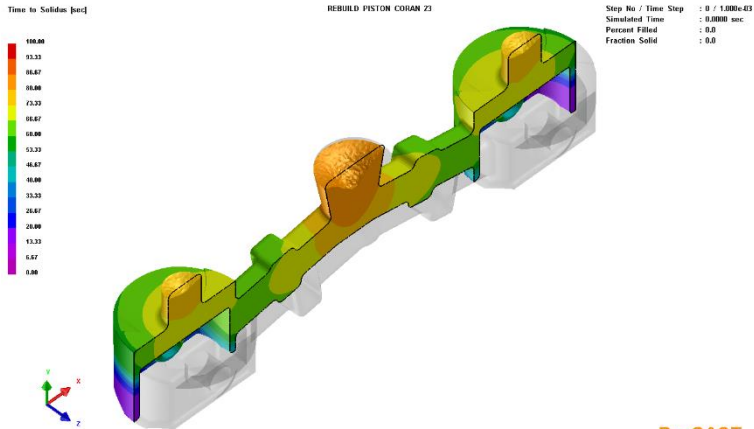
*b. Dua pattern per mold*



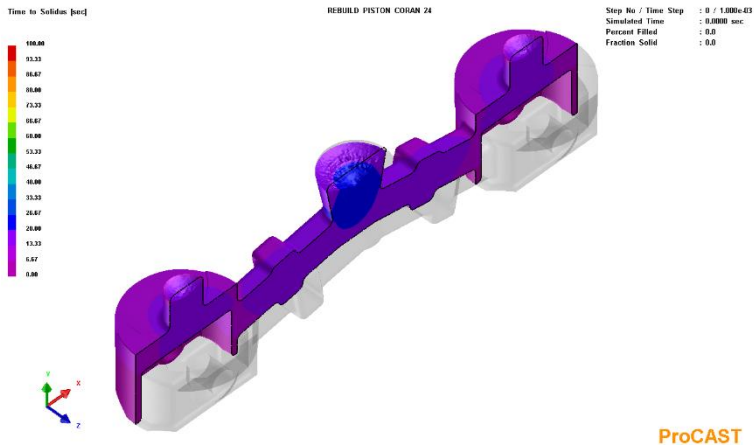
**Gambar 116.** *Solidification time dalam dua pattern per mold pada variasi 675°C – 30°C.*



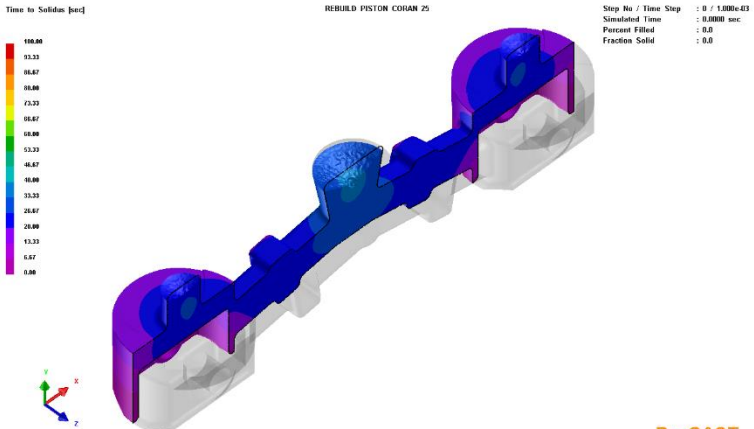
**Gambar 117.** *Solidification time dalam dua pattern per mold pada variasi 675°C – 200°C.*



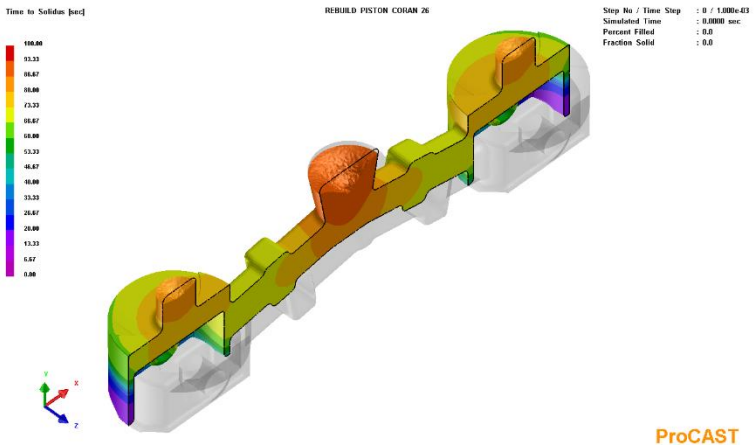
**Gambar 118.** *Solidification time* dalam dua pattern per mold pada variasi  $675^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$ .



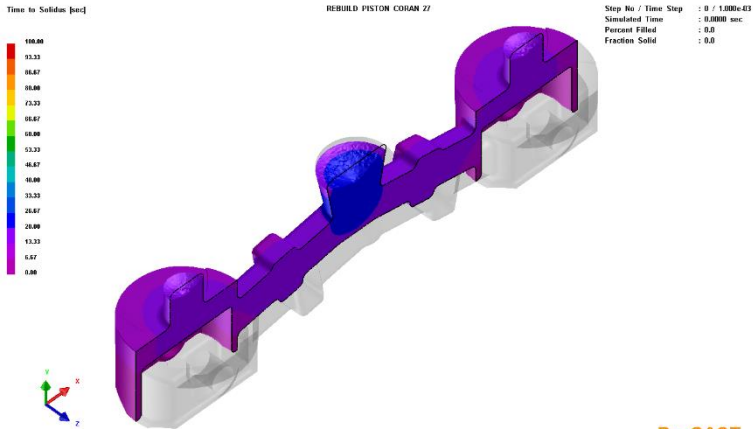
**Gambar 119.** *Solidification time* dalam dua pattern per mold pada variasi  $725^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ .



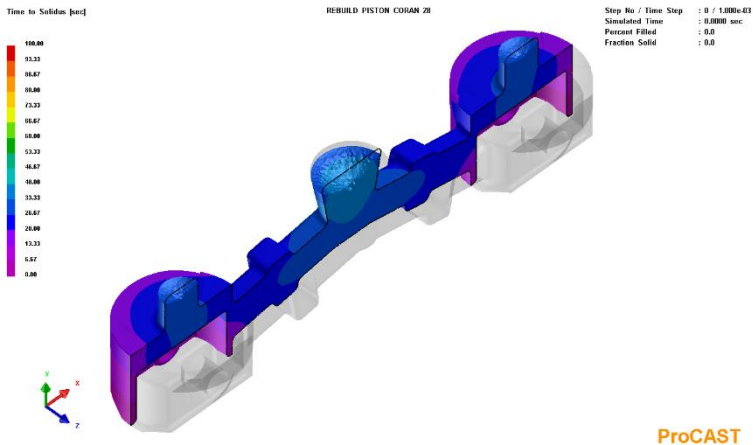
**Gambar 120.** *Solidification time dalam dua pattern per mold pada variasi 725°C – 200°C.*



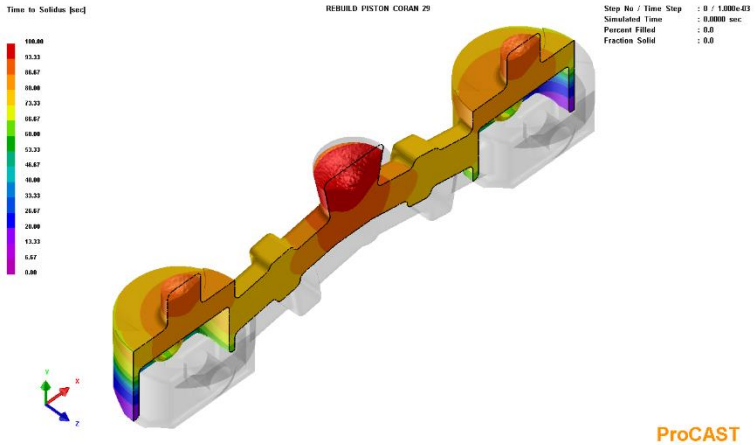
**Gambar 121.** *Solidification time dalam dua pattern per mold pada variasi 725°C – 400°C.*



**Gambar 122.** *Solidification time* dalam dua *pattern per mold* pada variasi 775°C – 30°C.

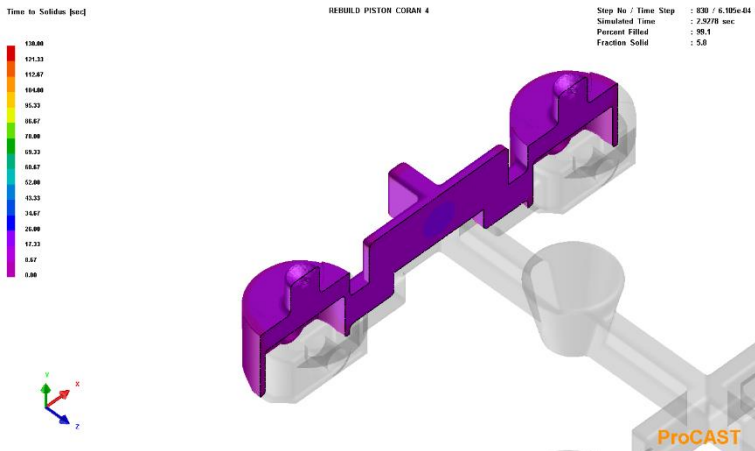


**Gambar 123.** *Solidification time* dalam dua *pattern per mold* pada variasi 775°C – 200°C.

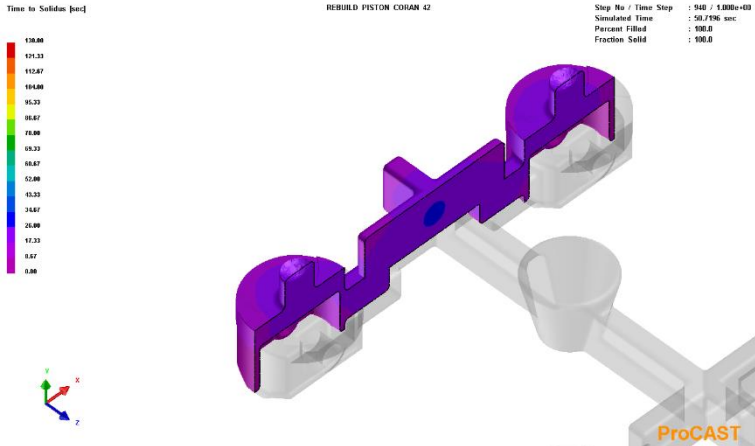


**Gambar 124.** *Solidification time* dalam dua pattern per mold pada variasi 775°C – 400°C.

c. Empat *pattern per mold*

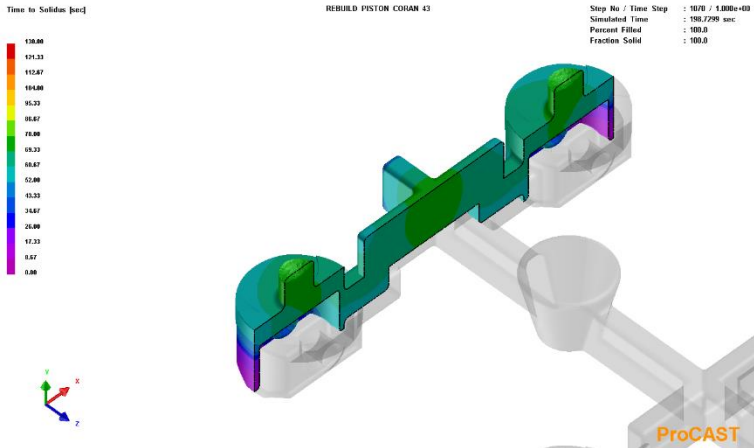


**Gambar 125.** *Solidification time* dalam empat *pattern per mold* pada variasi 675°C – 30°C.

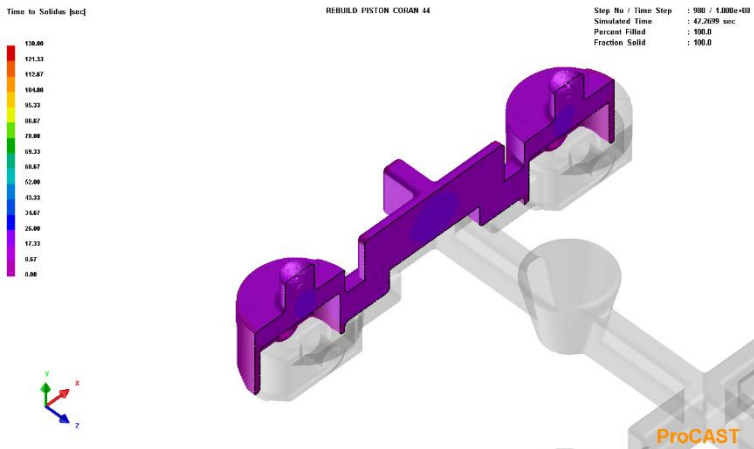


**Gambar 126.** *Solidification time* dalam empat *pattern per mold* pada variasi 675°C – 200°C.

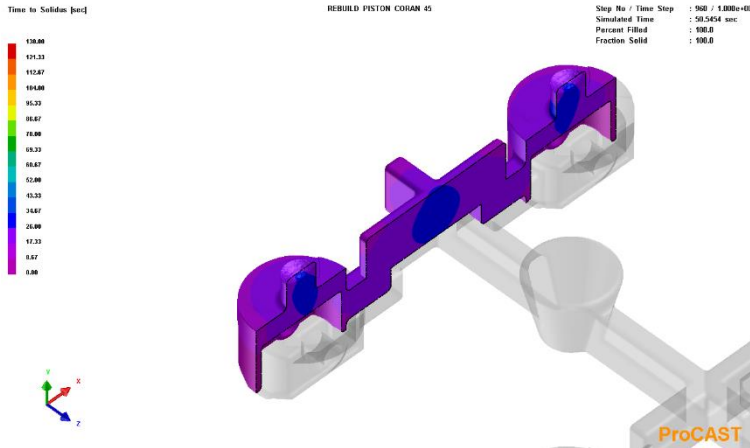




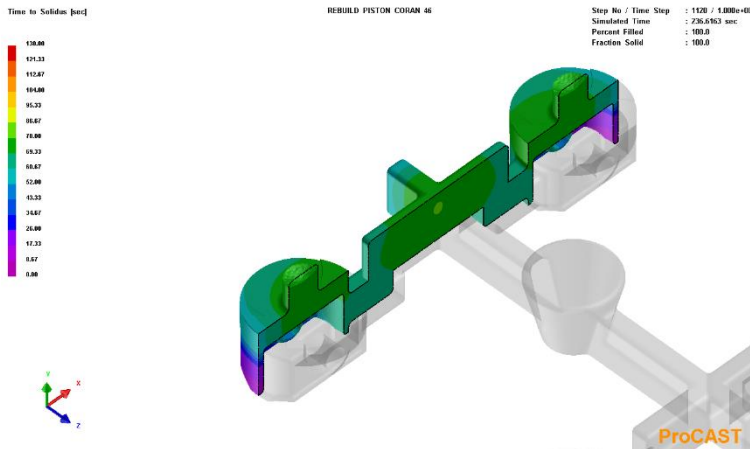
**Gambar 127.** *Solidification time dalam empat pattern per mold pada variasi 675°C – 400°C.*



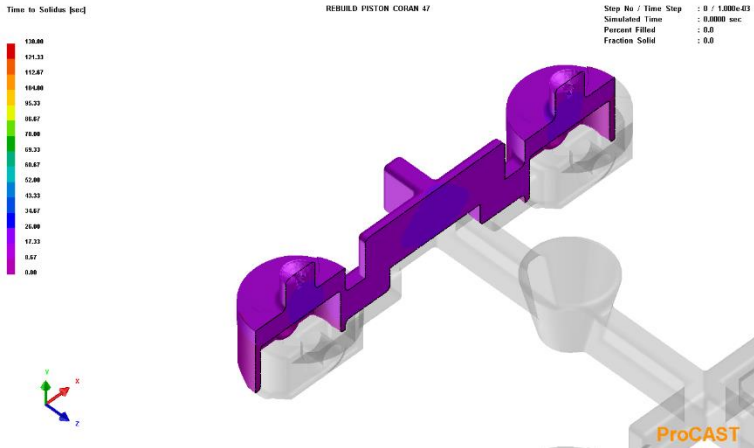
**Gambar 128.** *Solidification time dalam empat pattern per mold pada variasi 725°C – 30°C.*



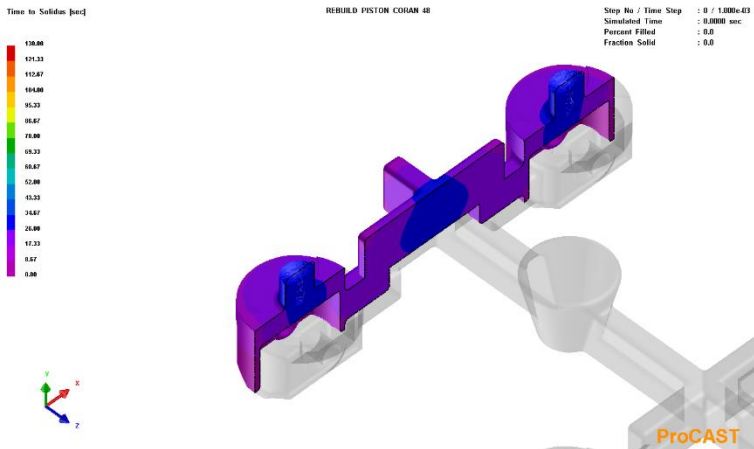
**Gambar 129.** *Solidification time dalam empat pattern per mold pada variasi 725°C – 200°C.*



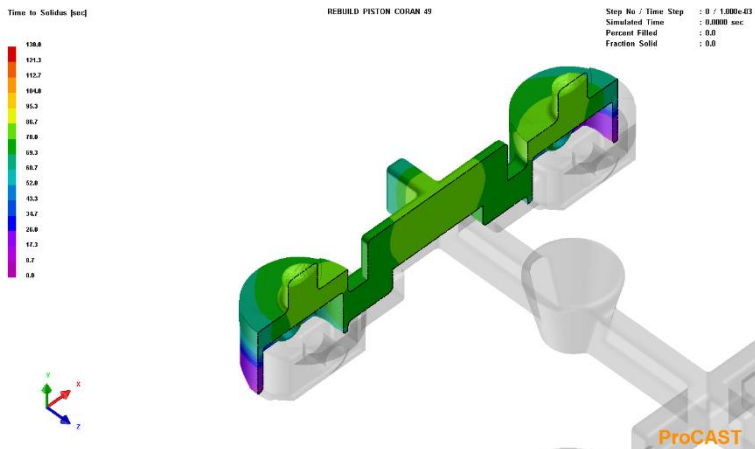
**Gambar 130.** *Solidification time dalam empat pattern per mold pada variasi 725°C – 400°C.*



**Gambar 131.** *Solidification time* dalam empat *pattern per mold* pada variasi  $775^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ .



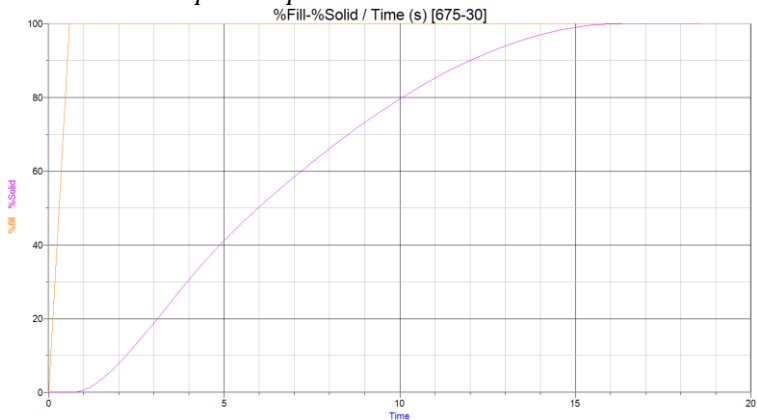
**Gambar 132.** *Solidification time* dalam empat *pattern per mold* pada variasi  $775^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ .



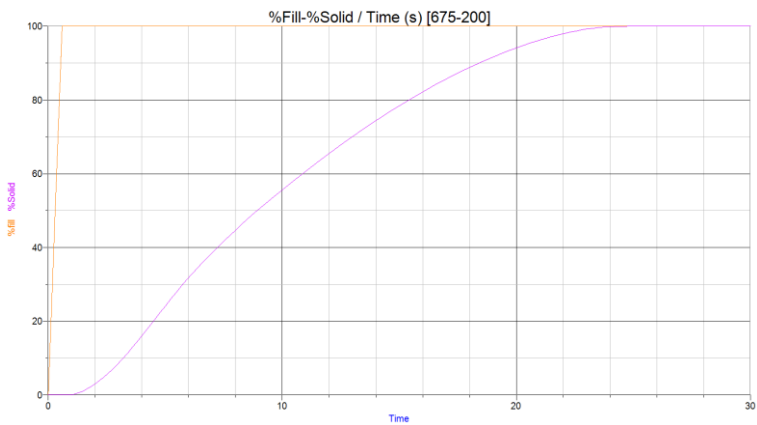
**Gambar 133.** *Solidification time* dalam empat *pattern per mold* pada variasi 775°C – 400°C.

#### 4. Grafik %Fil-%Solid / Time(s)

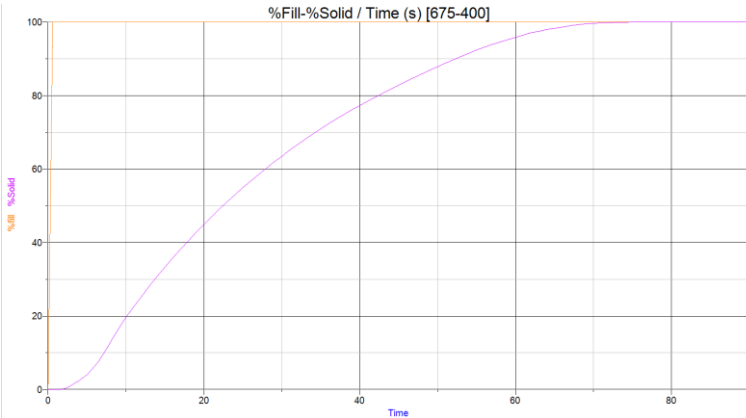
##### a. Satu pattern per mold



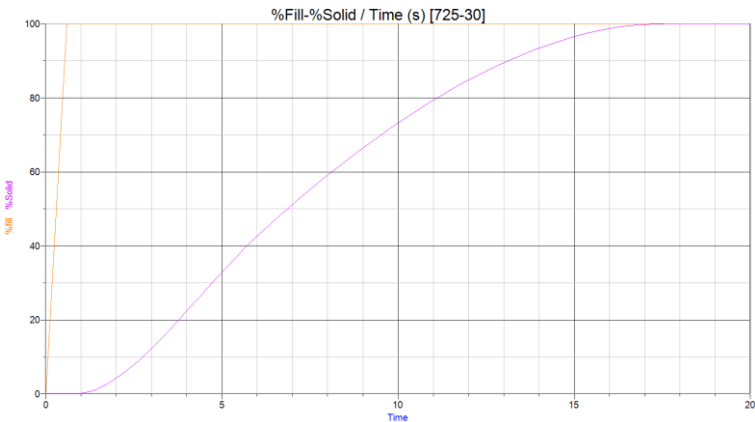
**Gambar 134.** %Fill-%solid / time dalam satu *pattern per mold* pada variasi 675°C – 30°C.



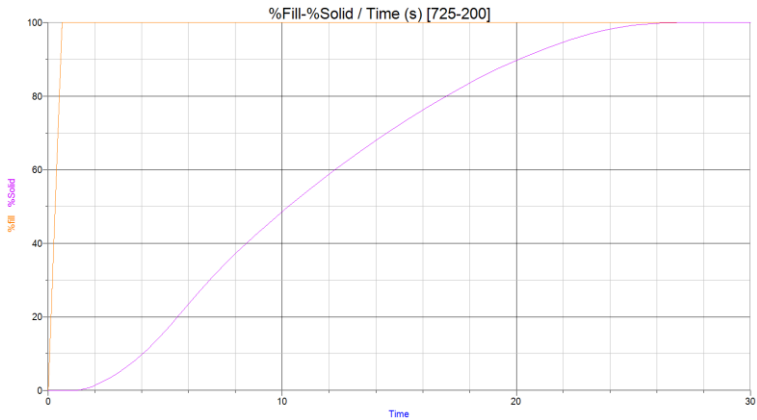
**Gambar 135.** %Fill-%solid / time dalam satu *pattern per mold* pada variasi 675°C – 200°C.



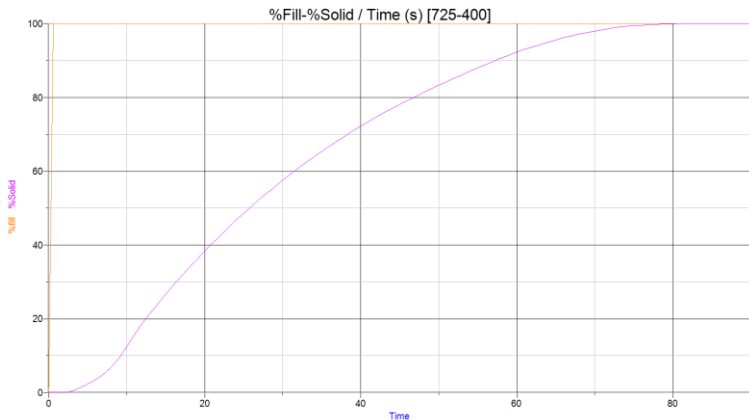
**Gambar 136.** %Fill-%solid / time dalam satu *pattern per mold* pada variasi 675°C – 400°C.



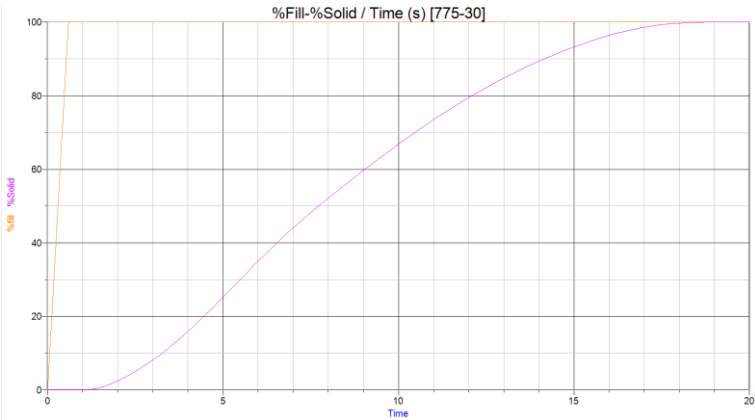
**Gambar 137.** %Fill-%solid / time dalam satu *pattern per mold* pada variasi 725°C – 30°C.



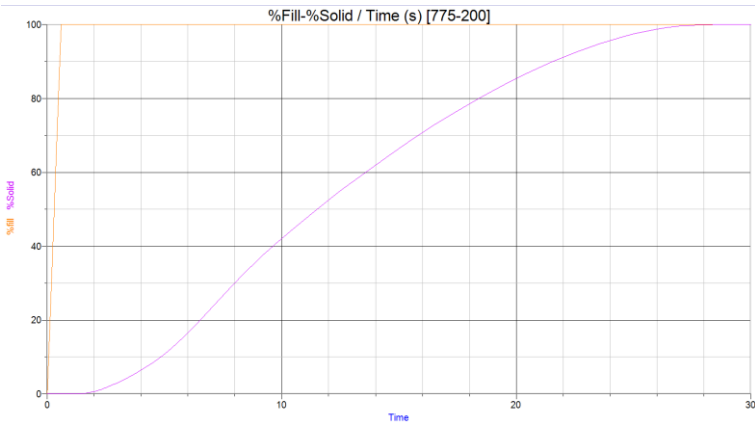
**Gambar 138.** %Fill-%solid / time dalam satu *pattern per mold* pada variasi 725°C – 200°C.



**Gambar 139.** %Fill-%solid / time dalam satu *pattern per mold* pada variasi 725°C – 400°C.

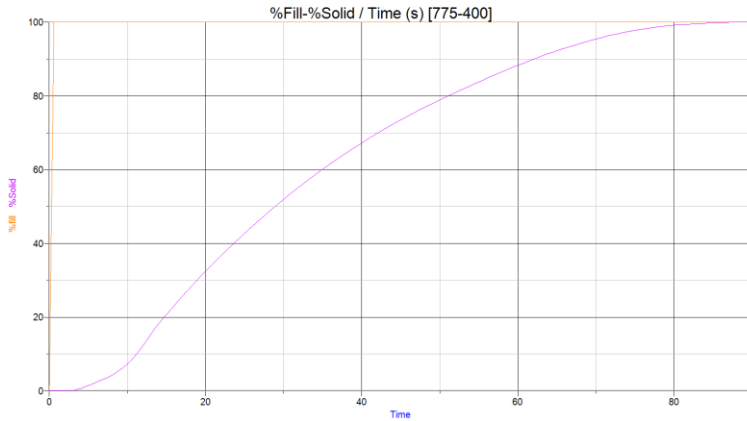


**Gambar 140.** %Fill-%solid / time dalam satu *pattern per mold* pada variasi 775°C – 30°C.



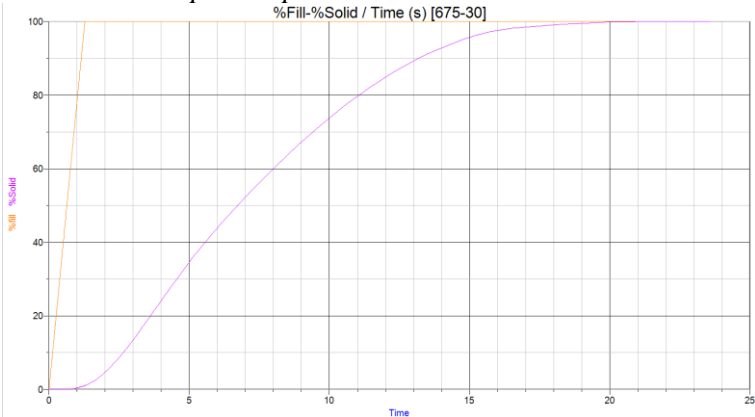
**Gambar 141.** %Fill-%solid / time dalam satu *pattern per mold* pada variasi 775°C – 200°C.



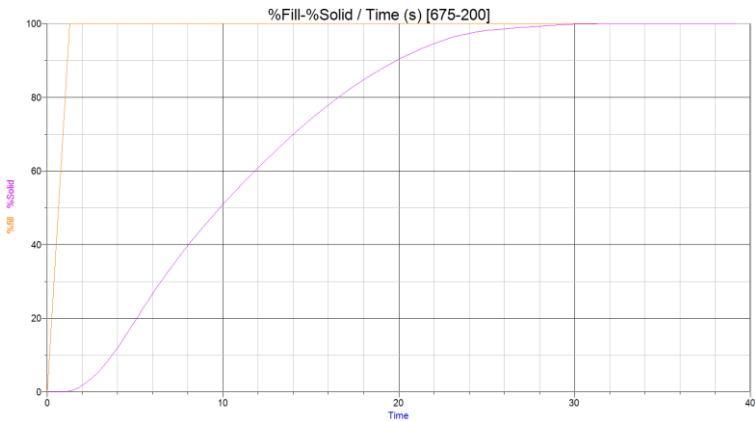


**Gambar 142.** %Fill-%solid / time dalam satu *pattern per mold* pada variasi 775°C – 400°C.

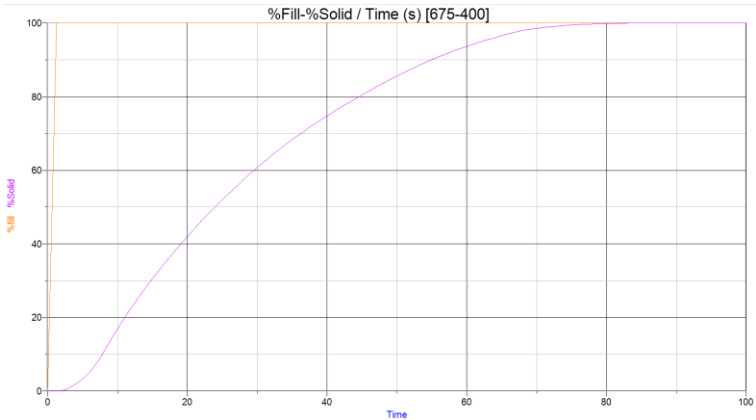
*b. Dua pattern per mold*



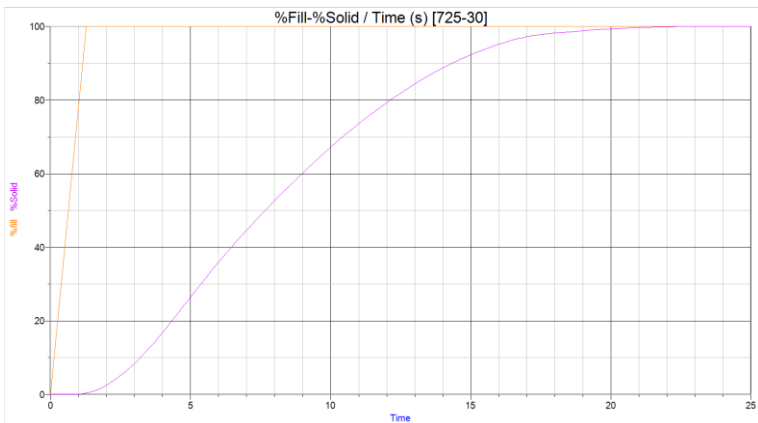
**Gambar 143.** %Fill-%solid / time dalam dua *pattern per mold* pada variasi 675°C – 30°C.



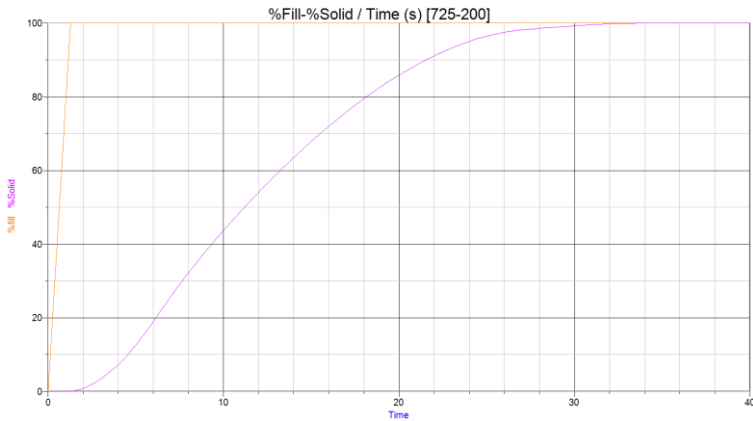
**Gambar 144.** %Fill-%solid / time dalam dua *pattern per mold* pada variasi 675°C – 200°C.



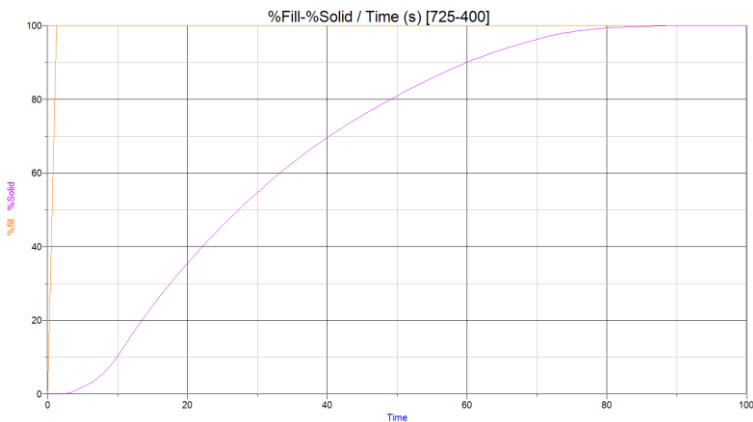
**Gambar 145.** %Fill-%solid / time dalam dua *pattern per mold* pada variasi 675°C – 400°C.



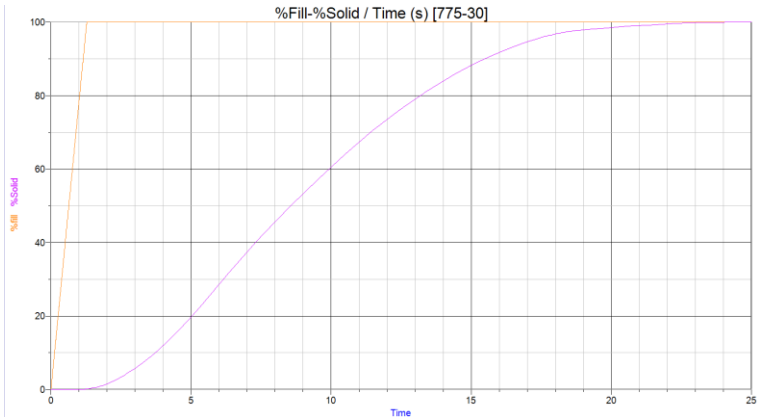
**Gambar 146.** %Fill-%solid / time dalam dua *pattern per mold* pada variasi 725°C – 30°C.



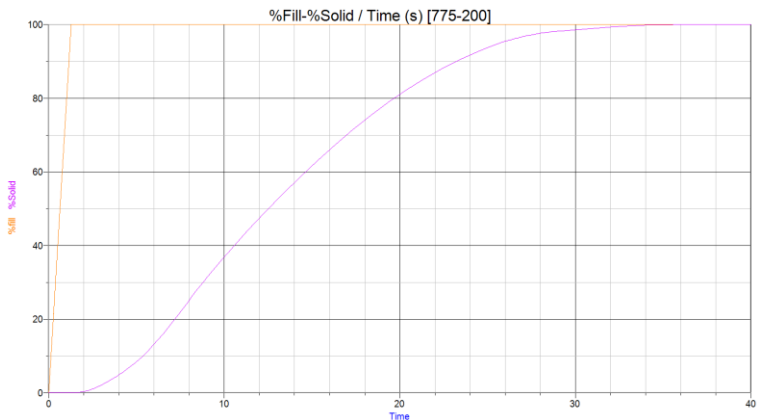
**Gambar 147.** %Fill-%solid / time dalam dua *pattern per mold* pada variasi 725°C – 200°C.



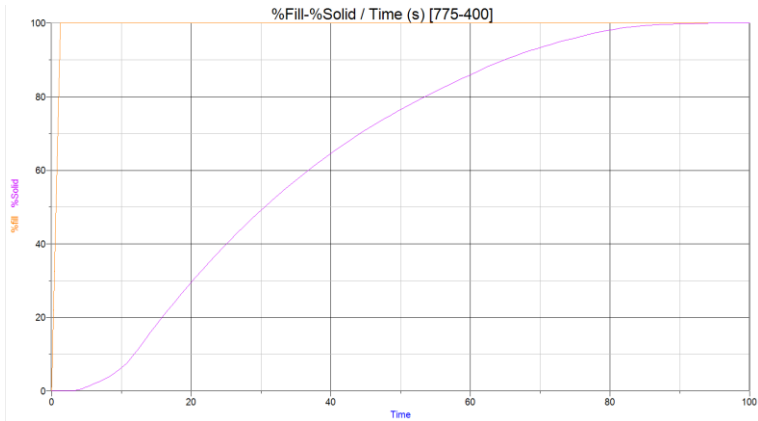
**Gambar 148.** %Fill-%solid / time dalam dua *pattern per mold* pada variasi 725°C – 400°C.



**Gambar 149.** %Fill-%solid / time dalam dua *pattern per mold* pada variasi 775°C – 30°C.

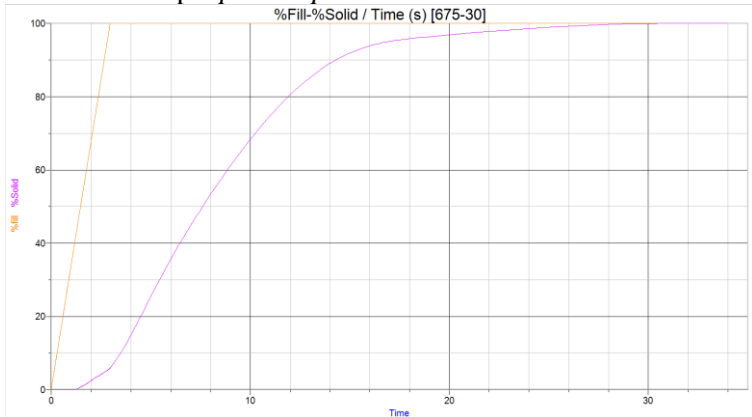


**Gambar 150.** %Fill-%solid / time dalam dua *pattern per mold* pada variasi 775°C – 200°C.

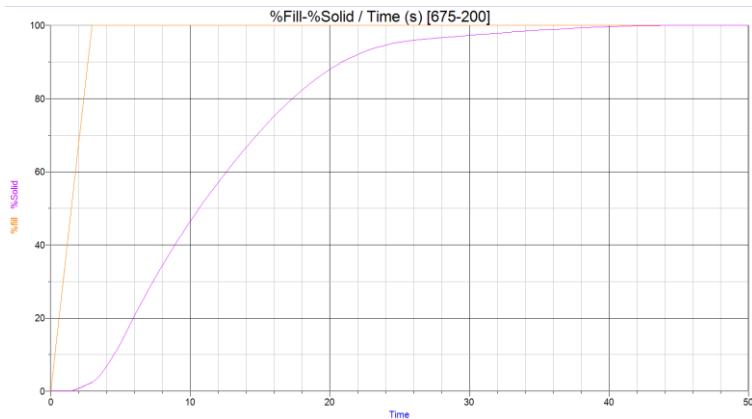


**Gambar 151.** %Fill-%solid / time dalam dua *pattern per mold* pada variasi 775°C – 400°C.

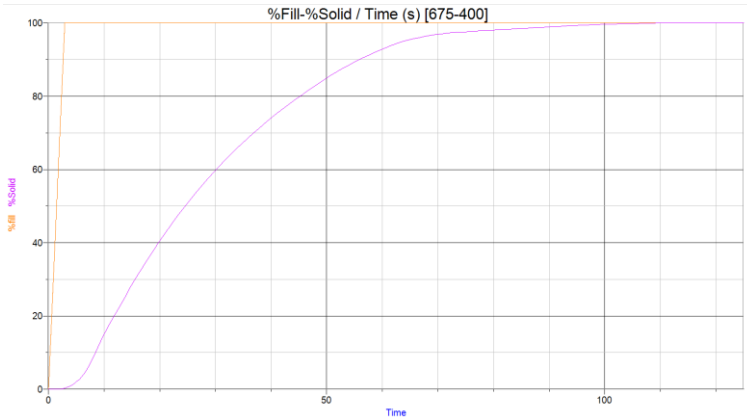
c. Empat *pattern per mold*



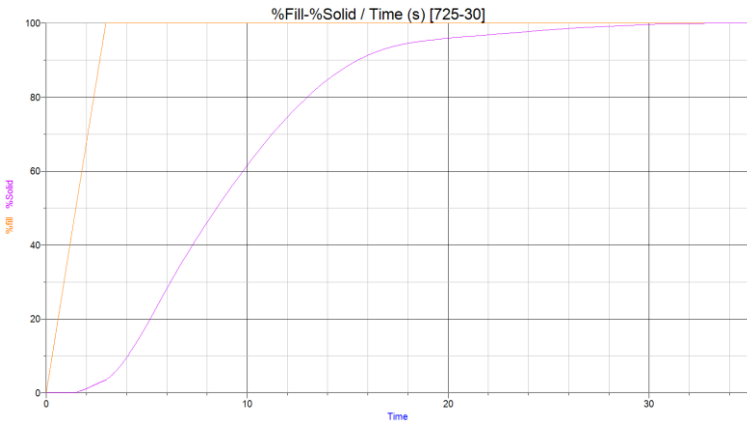
**Gambar 152.** % *Fill-%solid* / *time* dalam empat *pattern per mold* pada variasi 675°C – 30°C.



**Gambar 153.** % *Fill-%solid* / *time* dalam empat *pattern per mold* pada variasi 675°C – 200°C.

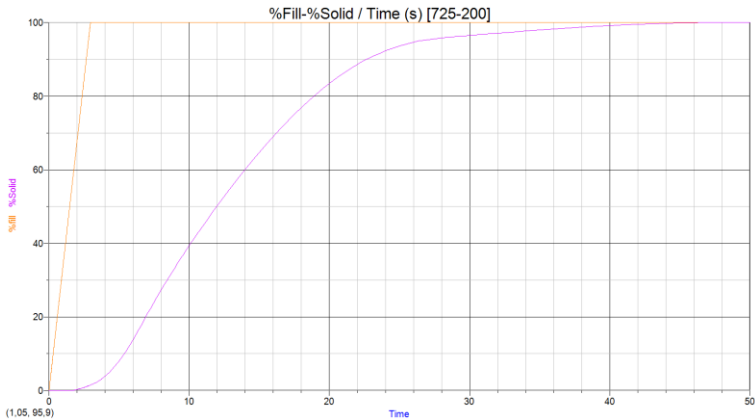


**Gambar 154.** %Fill-%solid / time dalam empat *pattern per mold* pada variasi 675°C – 400°C.

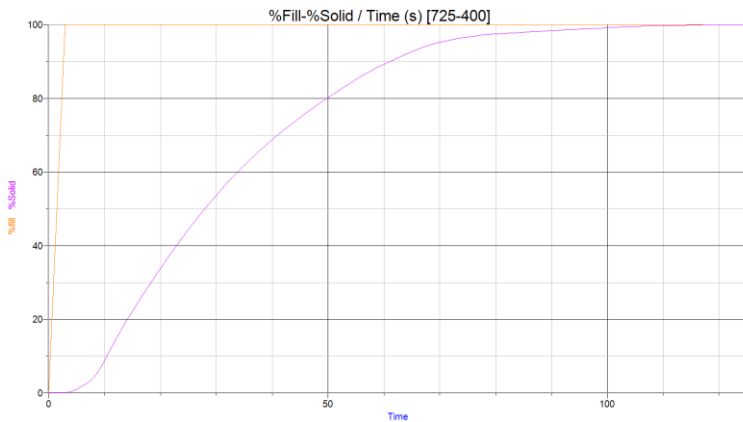


**Gambar 155.** %Fill-%solid / time dalam empat *pattern per mold* pada variasi 725°C – 30°C.

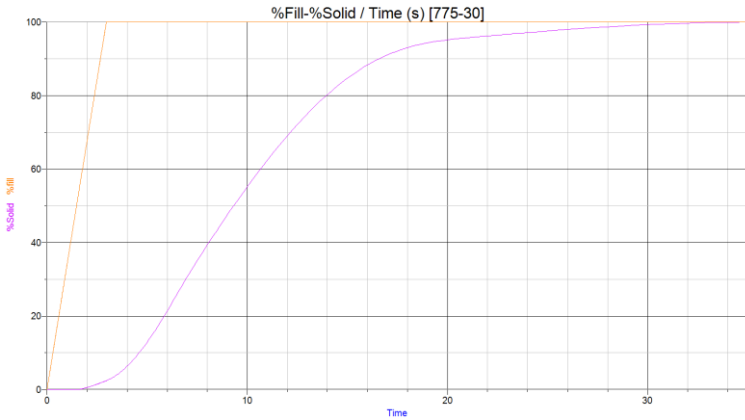




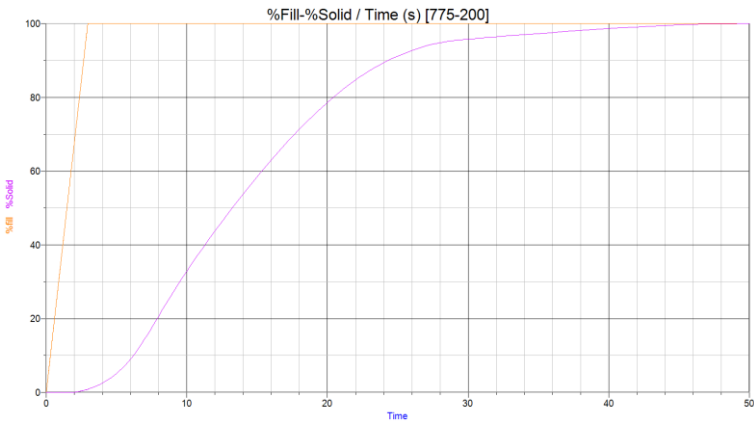
**Gambar 156.** *% Fill-%solid / time* dalam empat *pattern per mold* pada variasi 725°C – 200°C.



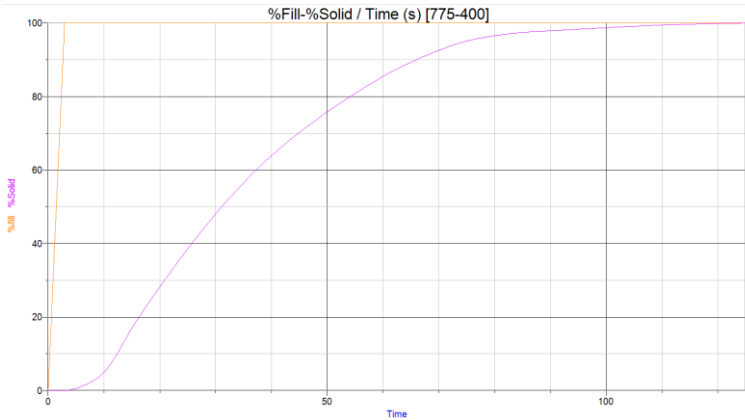
**Gambar 157.** *% Fill-%solid / time* dalam empat *pattern per mold* pada variasi 725°C – 400°C.



**Gambar 158.** %Fill-%solid / time dalam empat pattern per mold pada variasi 775°C – 30°C.



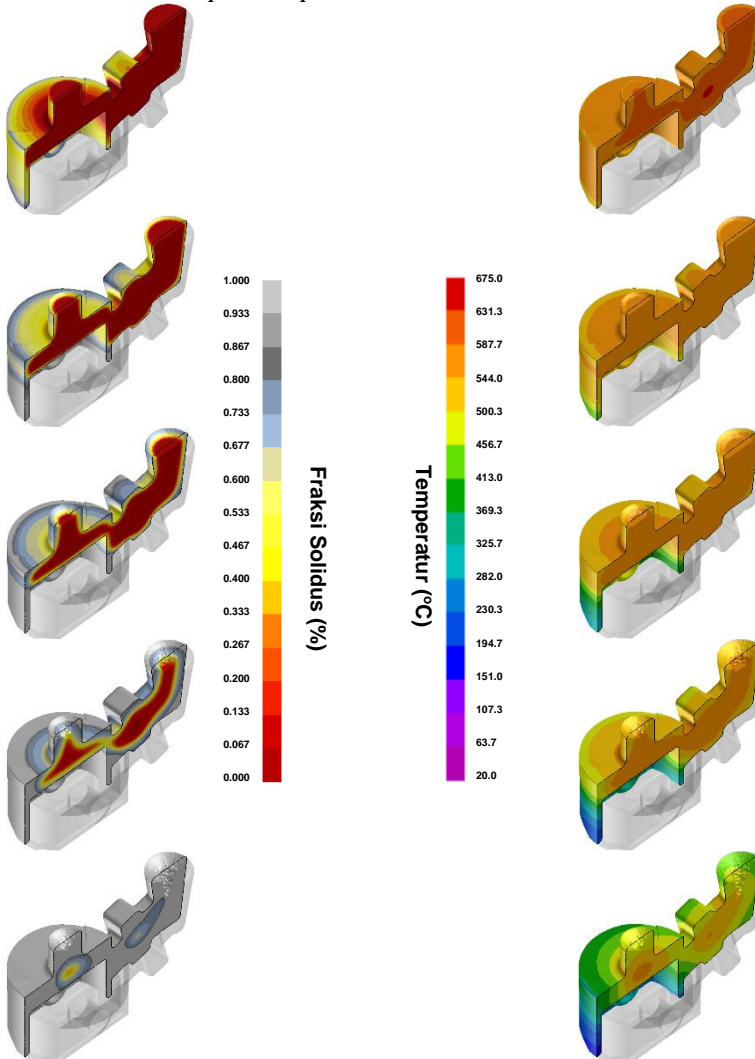
**Gambar 159.** %Fill-%solid / time dalam empat pattern per mold pada variasi 775°C – 200°C.



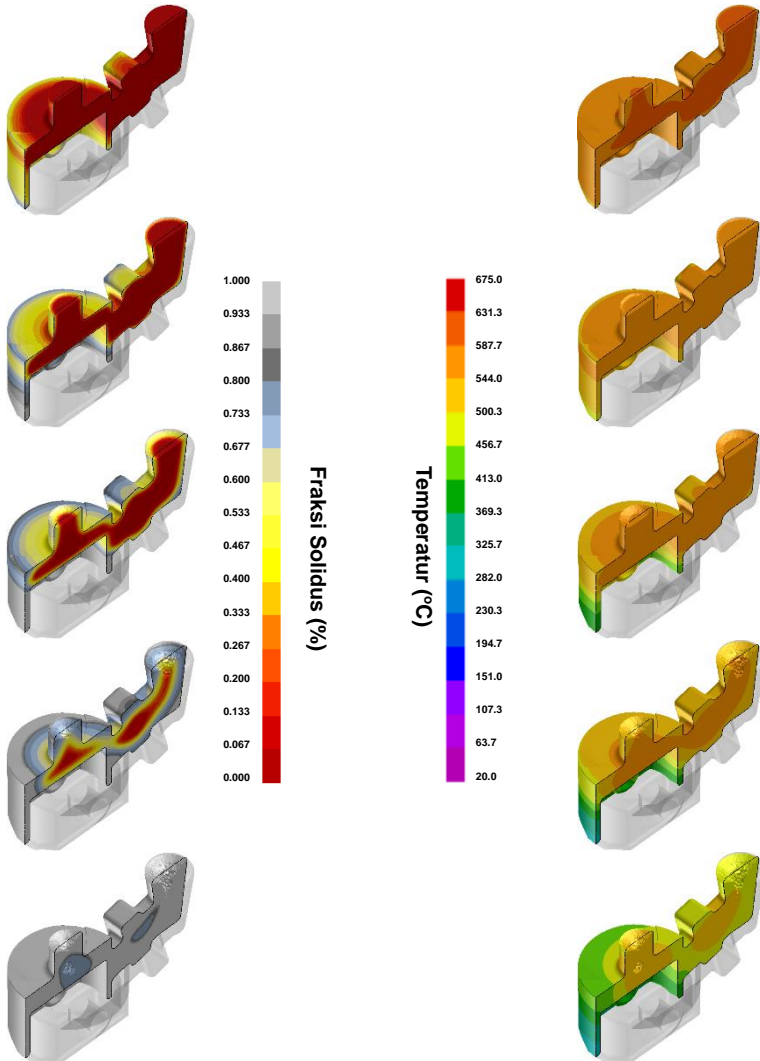
**Gambar 160.** % Fill-%solid / time dalam empat pattern per mold pada variasi 775°C – 400°C.

## 5. Fraksi Solidus dan Distribusi Temperatur

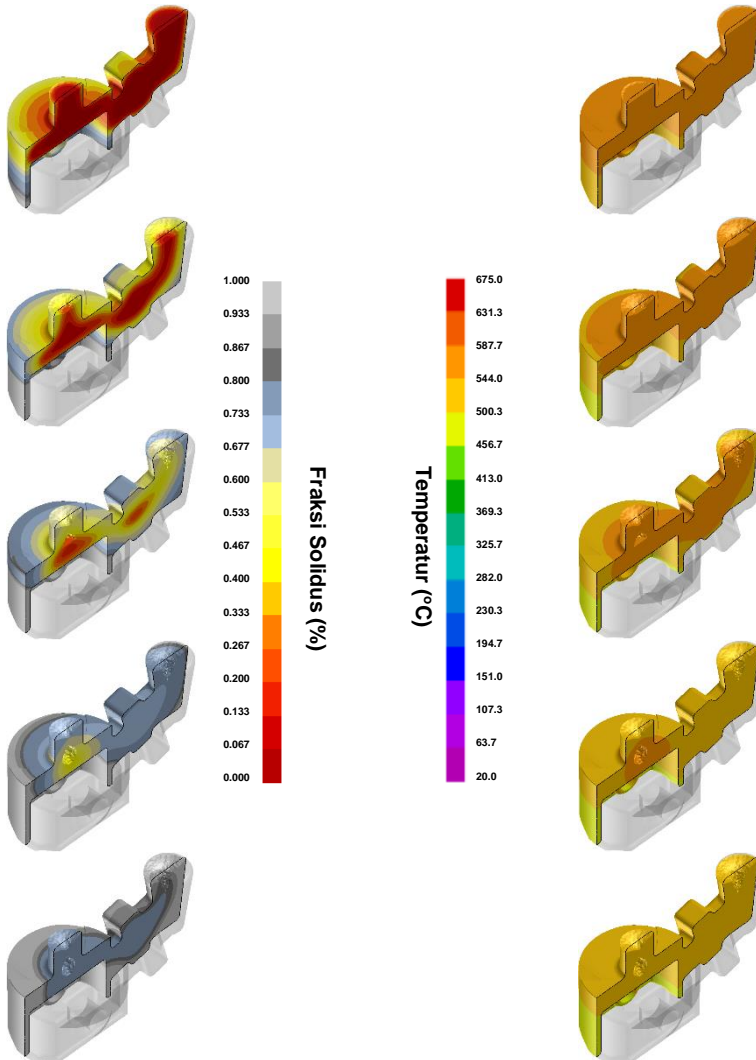
### a. Satu *pattern* per *mold*



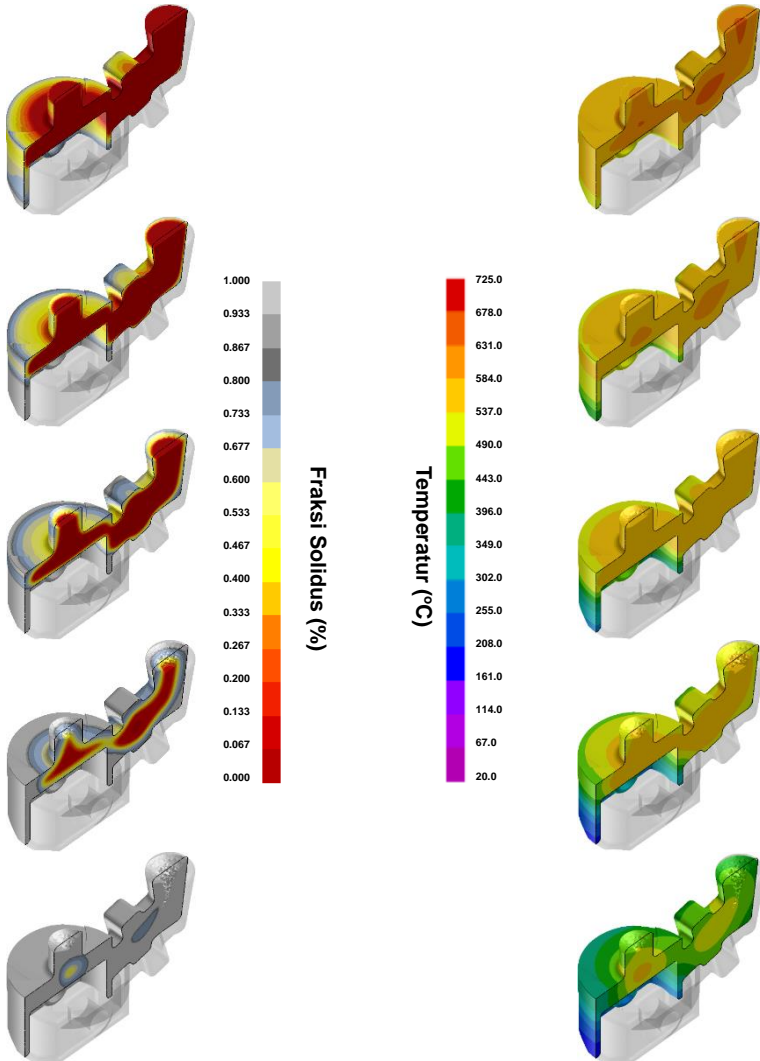
**Gambar 161.** Fraksi solidus dan temperatur dalam satu *pattern* per *mold* pada variasi 675°C – 30°C.



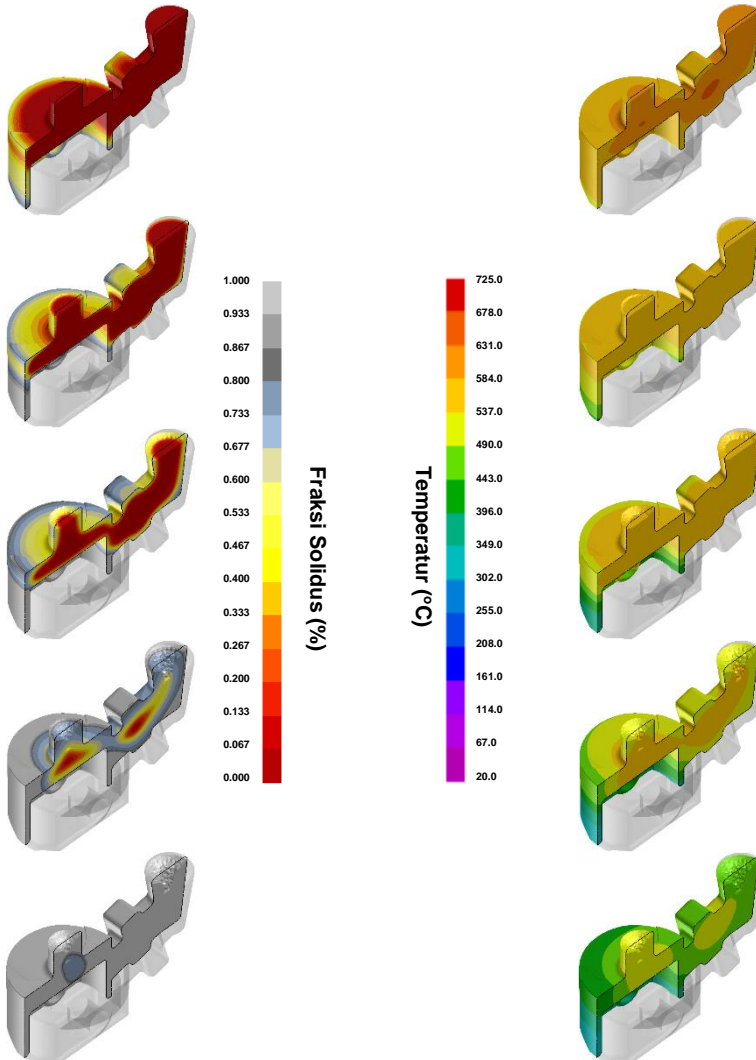
**Gambar 162.** Fraksi solidus dan temperatur dalam satu *pattern per mold* pada variasi 675°C – 200°C.



**Gambar 163.** Fraksi solidus dan temperatur dalam satu *pattern* per mold pada variasi 675°C – 400°C.

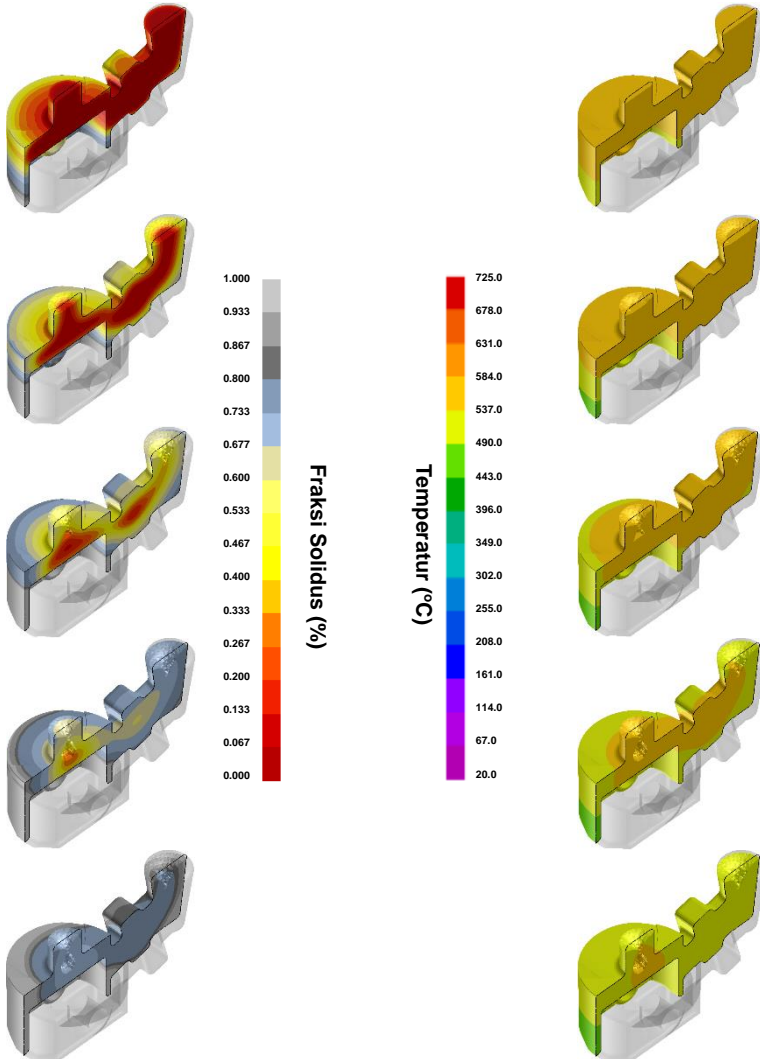


**Gambar 164.** Fraksi solidus dan temperatur dalam satu *pattern per mold* pada variasi 725°C – 30°C.

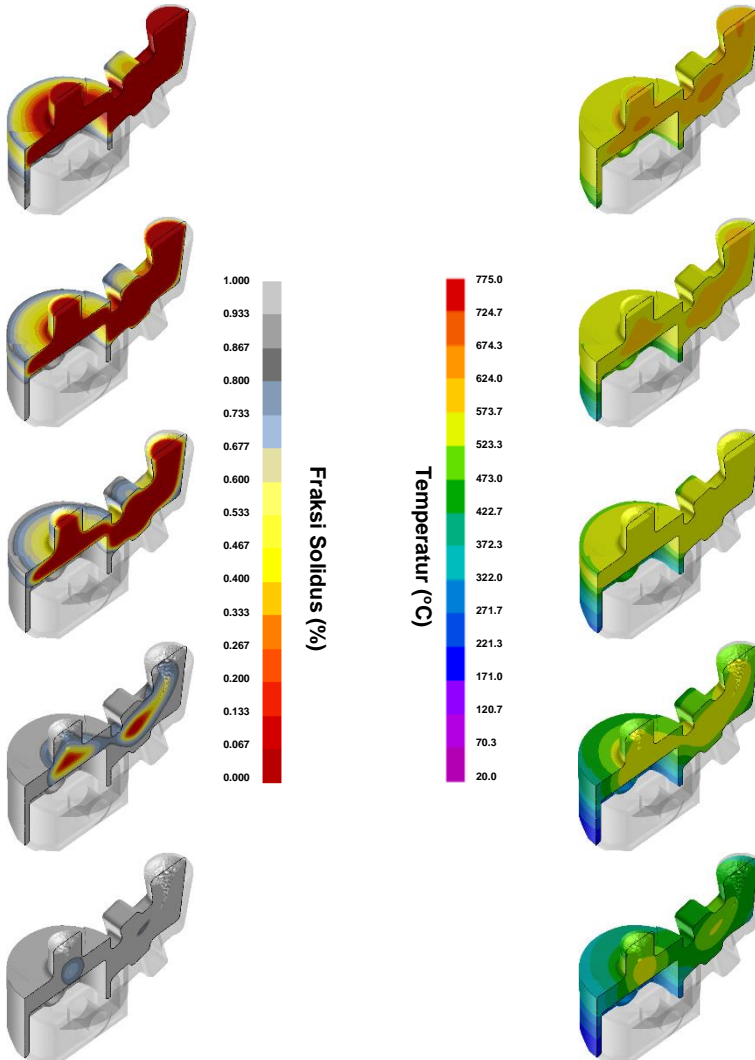


**Gambar 165.** Fraksi solidus dan temperatur dalam satu *pattern* per mold pada variasi 725°C – 200°C.

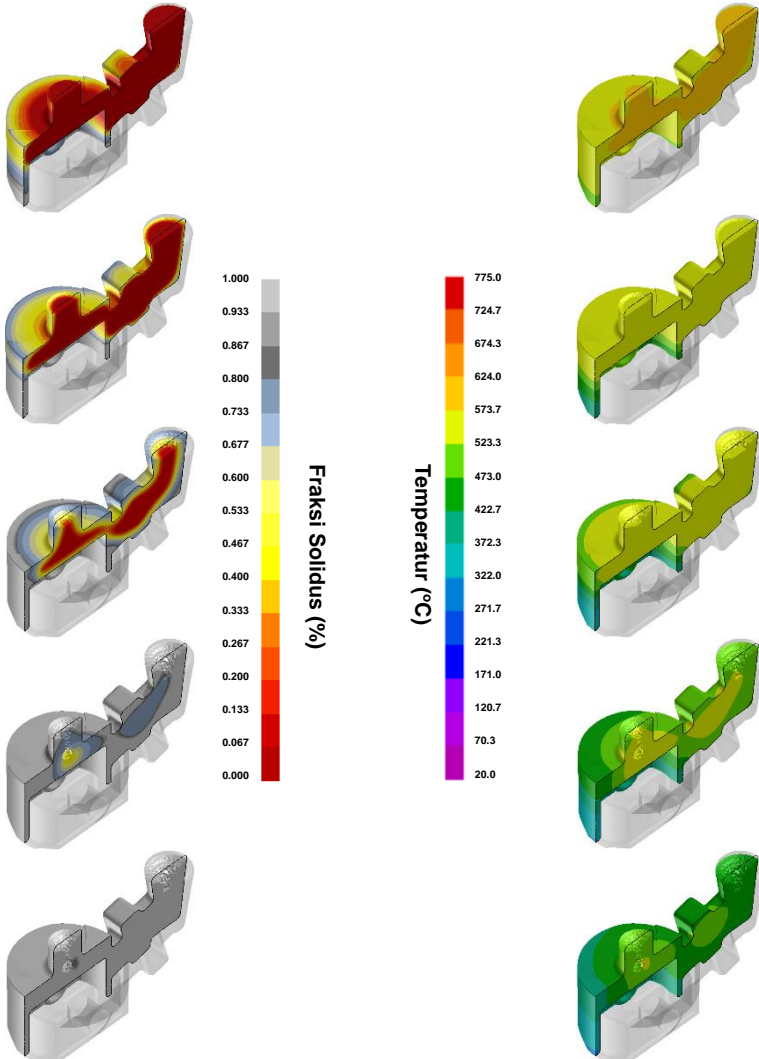




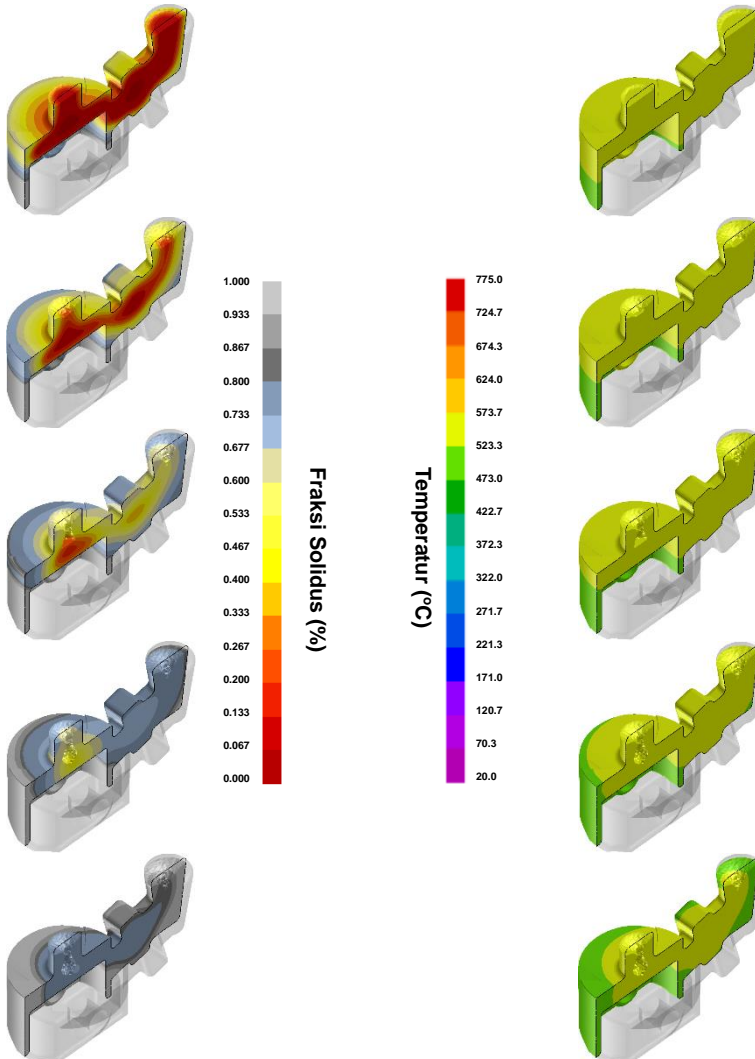
**Gambar 166.** Fraksi solidus dan temperatur dalam satu *pattern per mold* pada variasi 725°C – 400°C.



**Gambar 167.** Fraksi solidus dan temperatur dalam satu *pattern per mold* pada variasi 775°C – 30°C.

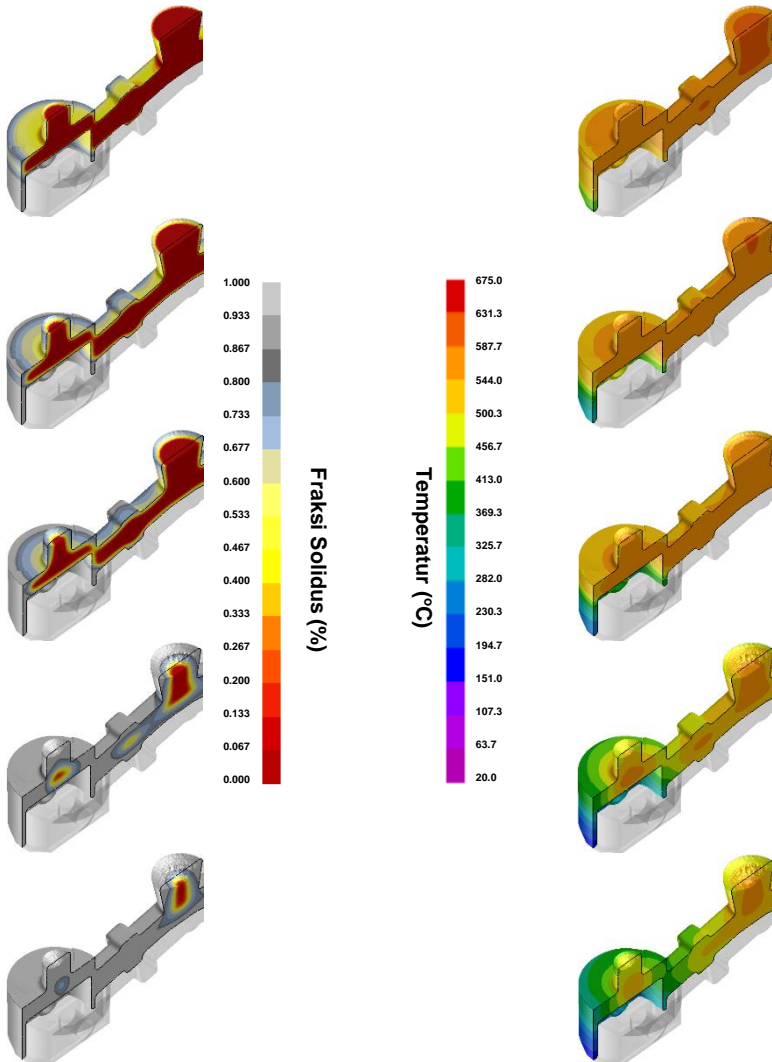


**Gambar 168.** Fraksi solidus dan temperatur dalam satu *pattern per mold* pada variasi 775°C – 200°C.

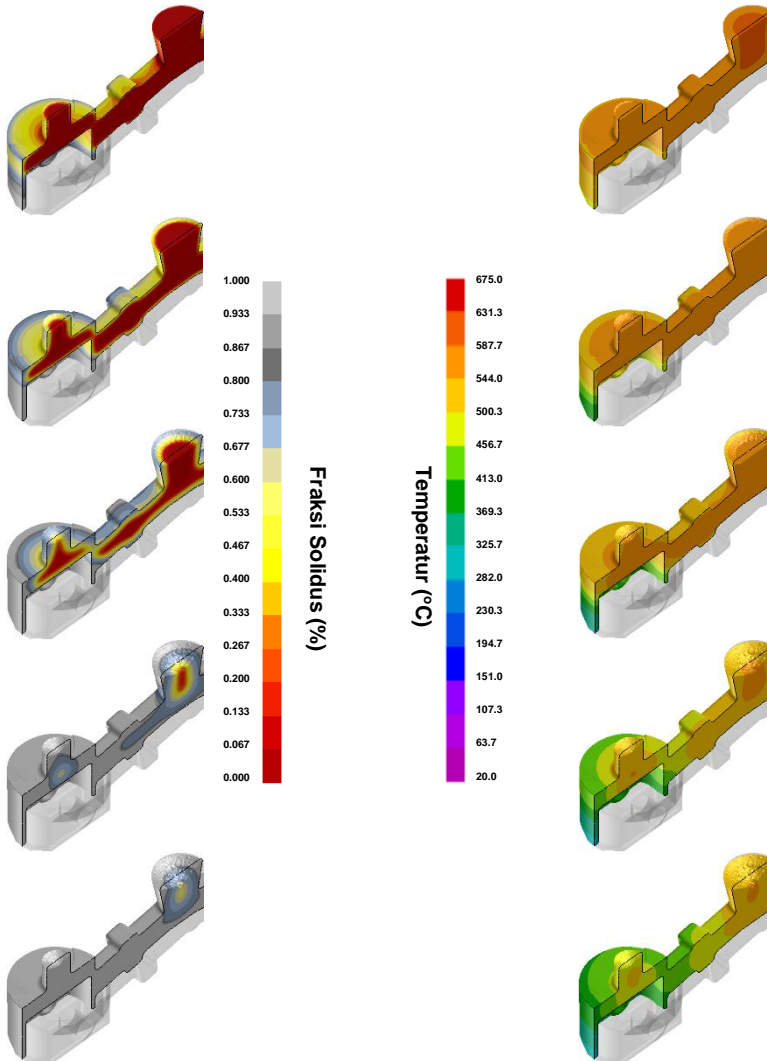


**Gambar 169.** Fraksi solidus dan temperatur dalam satu *pattern* per mold pada variasi 775°C – 400°C.

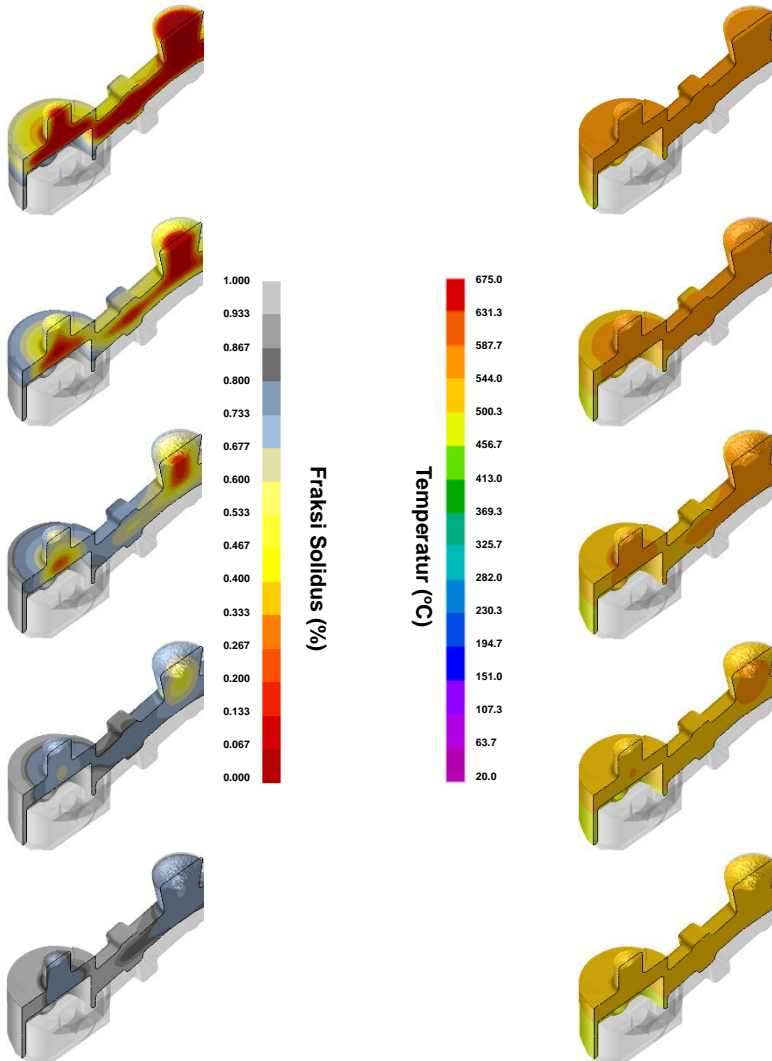
*b. Dua pattern per mold*



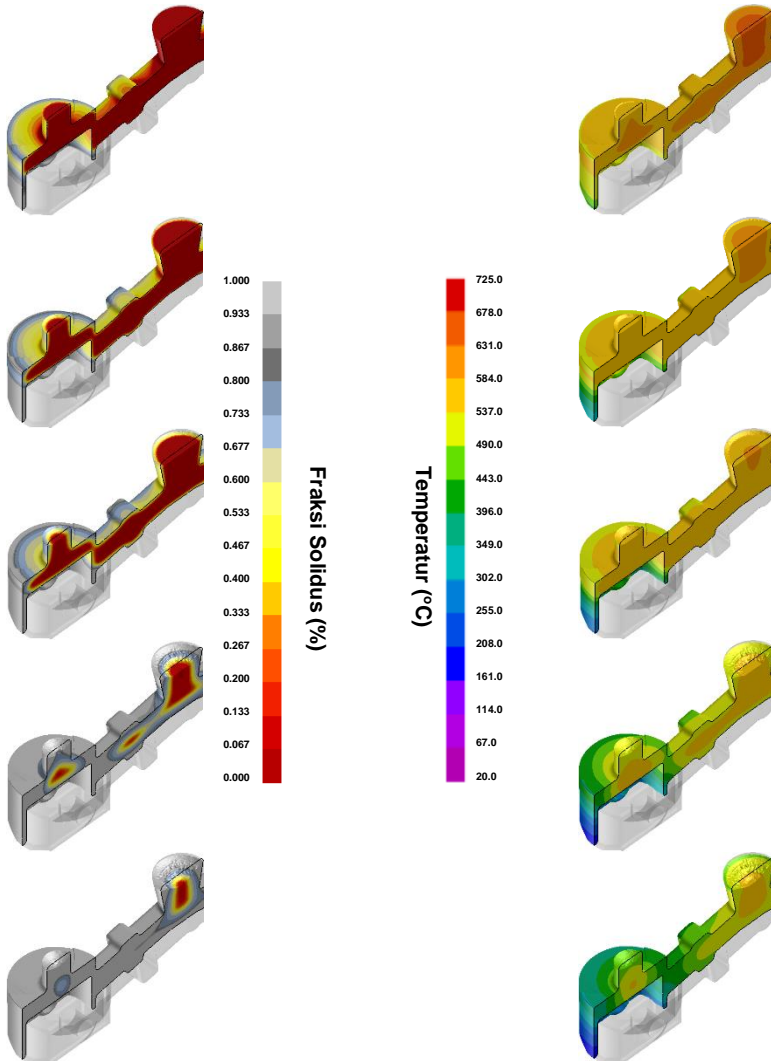
**Gambar 170.** Fraksi solidus dan temperatur dalam dua *pattern per mold* pada variasi 675°C – 30°C.



**Gambar 171.** Fraksi solidus dan temperatur dalam dua *pattern per mold* pada variasi 675°C – 200°C.

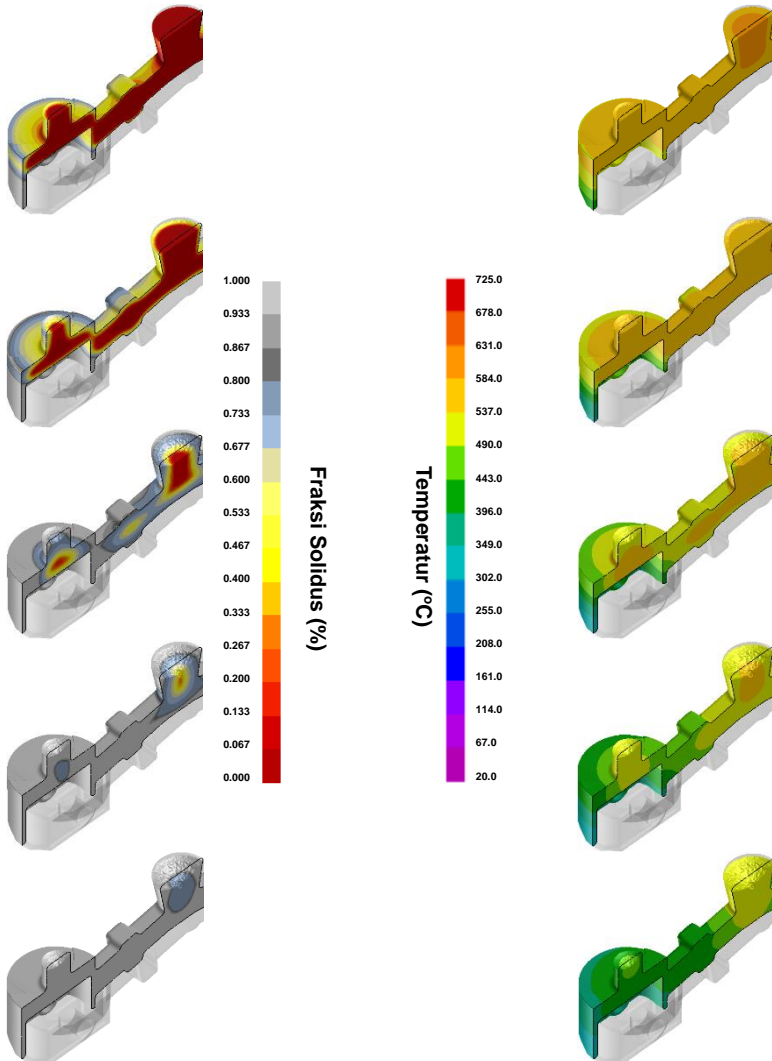


**Gambar 172.** Fraksi solidus dan temperatur dalam dua *pattern* per mold pada variasi 675°C – 400°C.

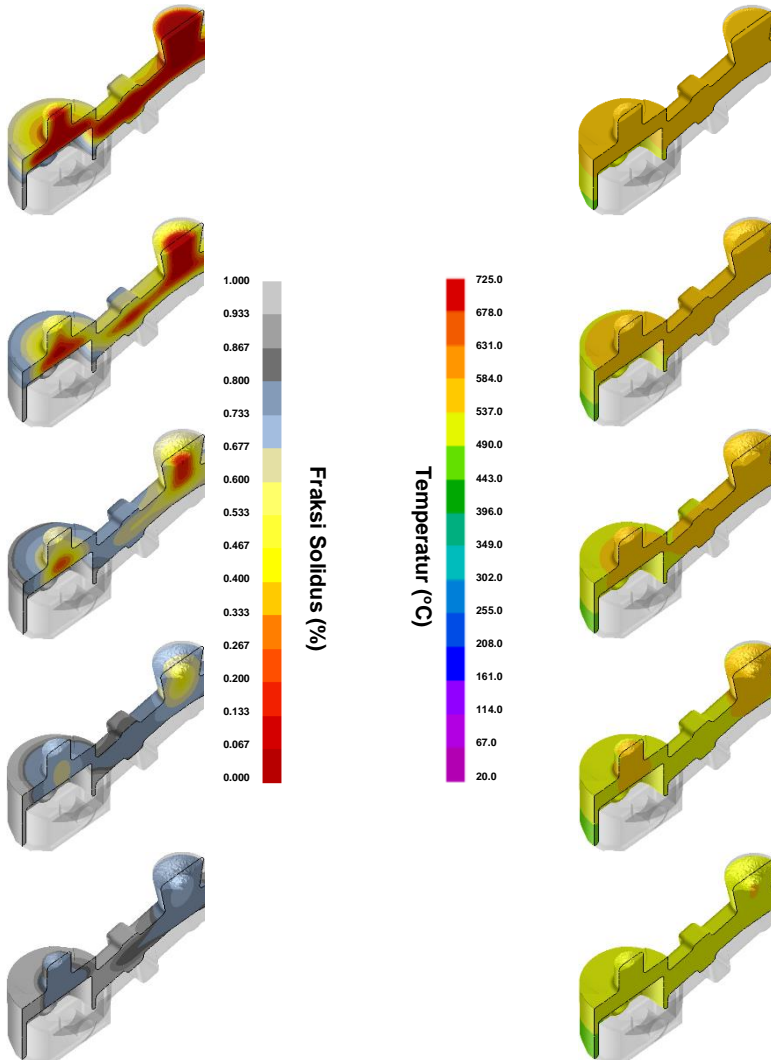


**Gambar 173.** Fraksi solidus dan temperatur dalam dua *pattern* per mold pada variasi 725°C – 30°C.

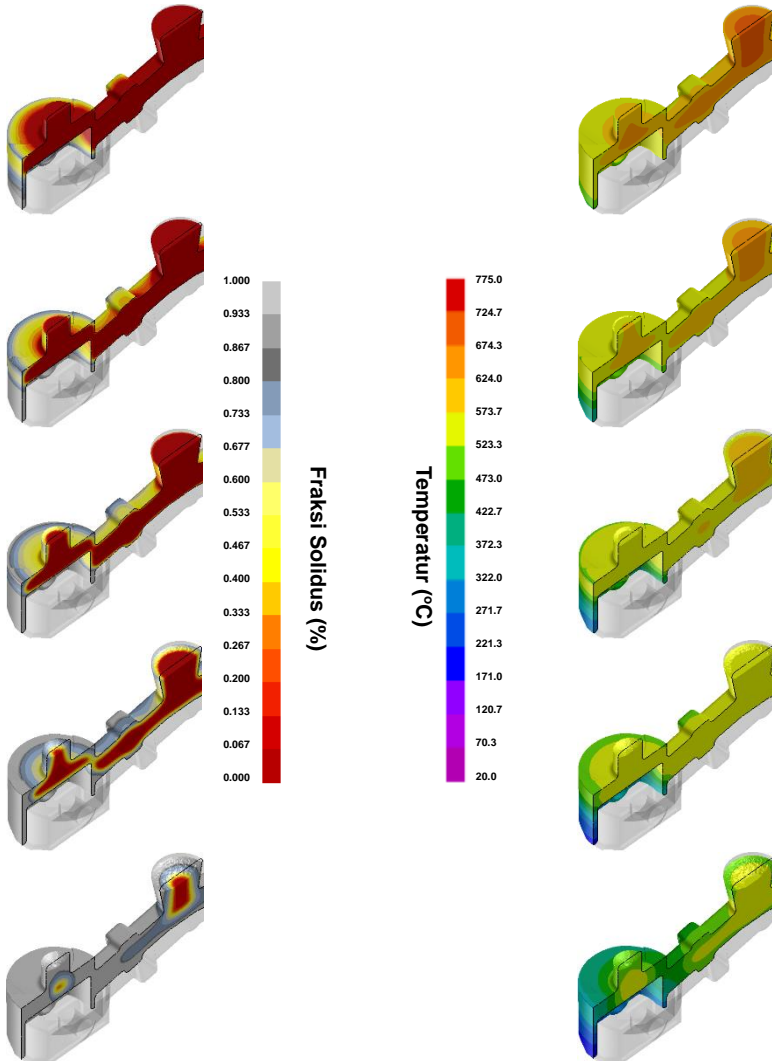




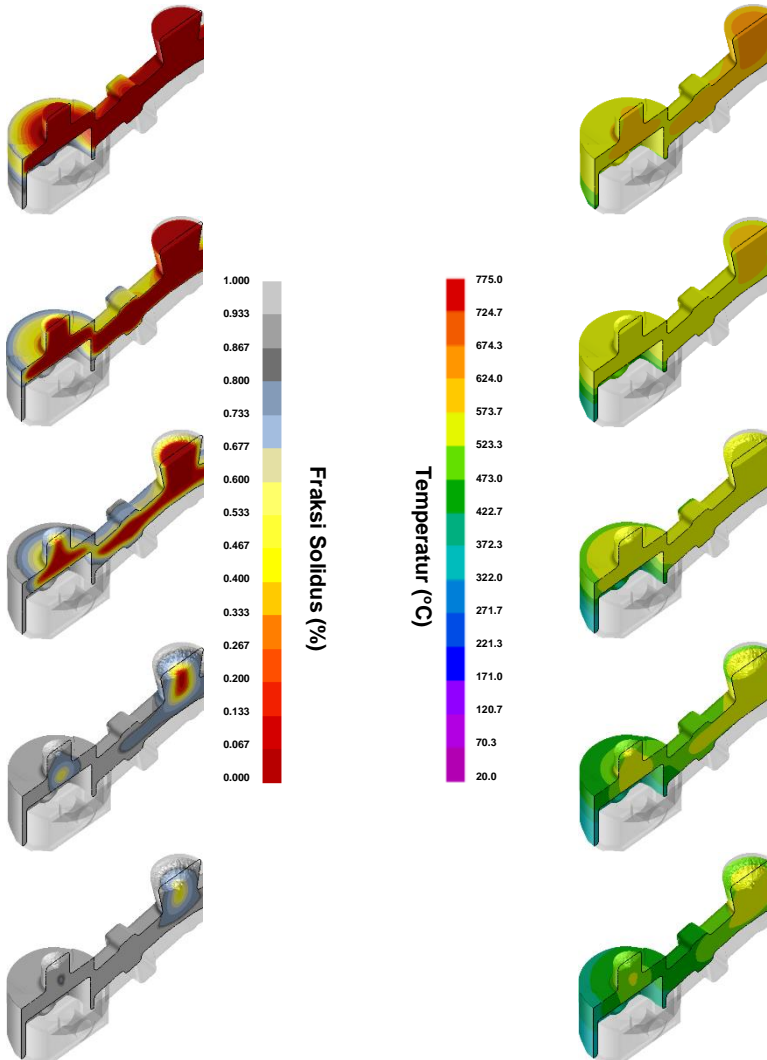
**Gambar 174.** Fraksi solidus dan temperatur dalam dua *pattern per mold* pada variasi 725°C – 200°C.



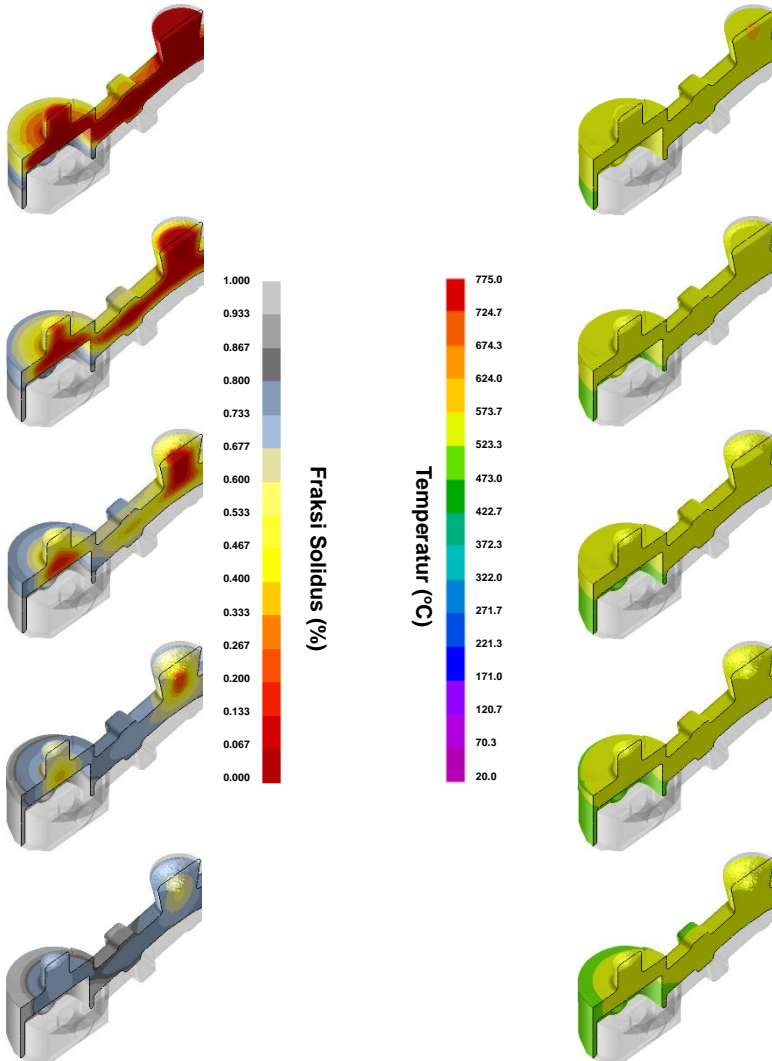
**Gambar 175.** Fraksi solidus dan temperatur dalam dua *pattern* per mold pada variasi 725°C – 400°C.



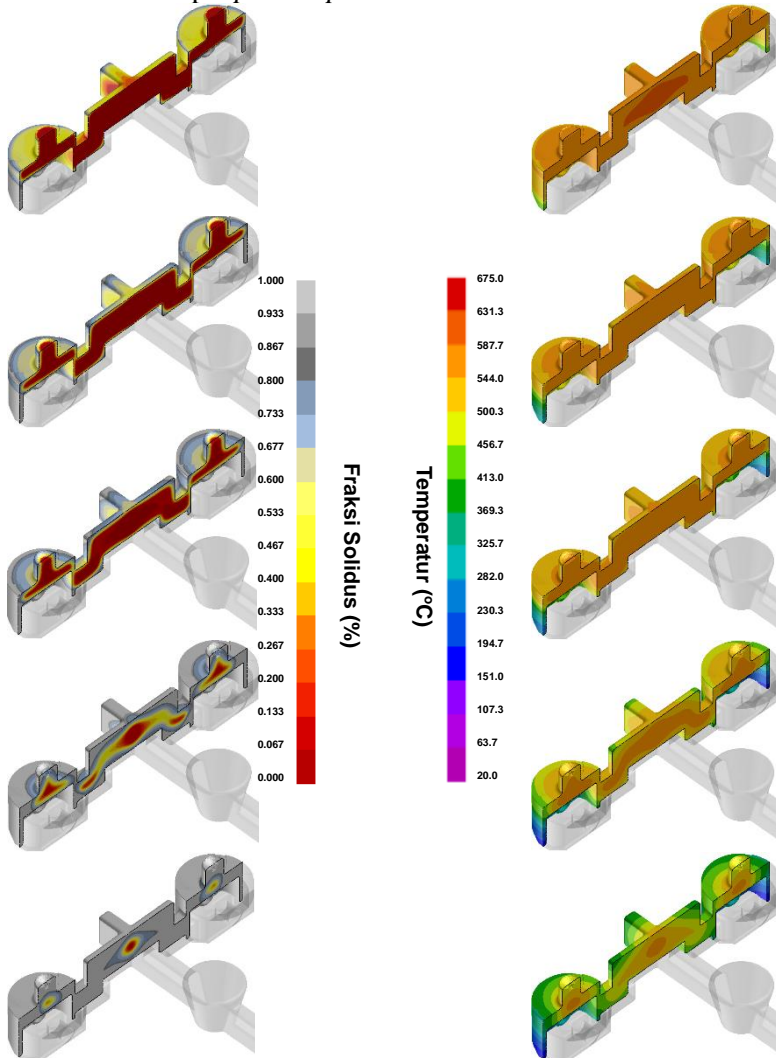
**Gambar 176.** Fraksi solidus dan temperatur dalam dua *pattern* per mold pada variasi 775°C – 30°C.



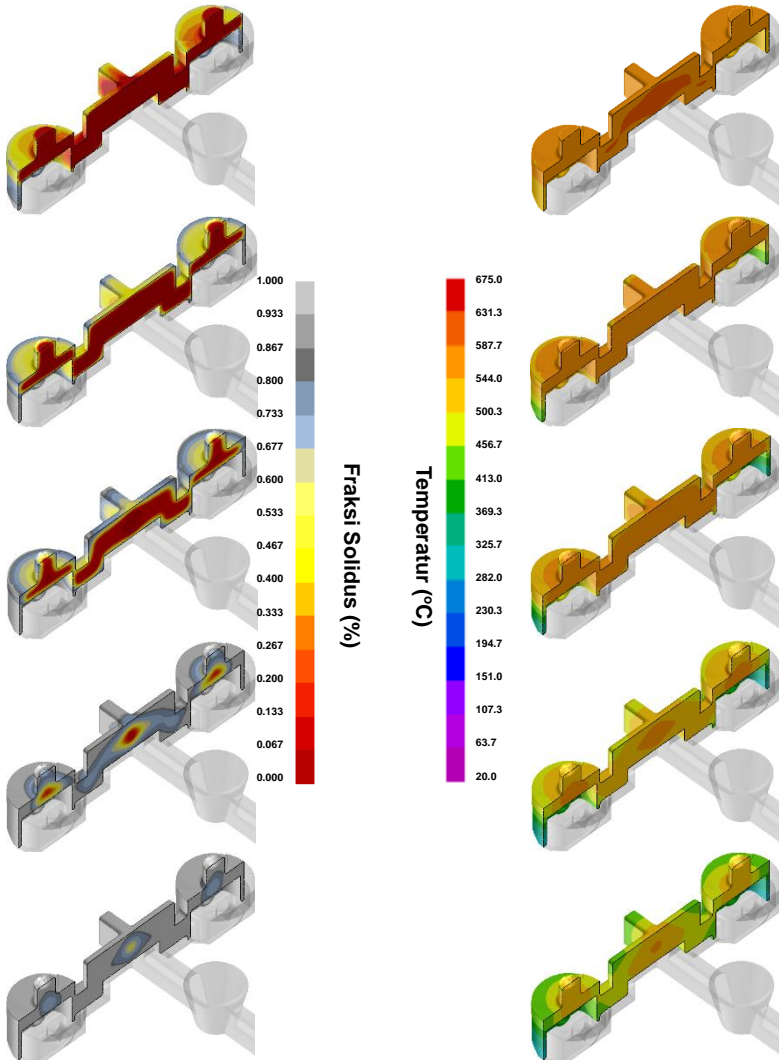
**Gambar 177.** Fraksi solidus dan temperatur dalam dua *pattern per mold* pada variasi 775°C – 200°C.



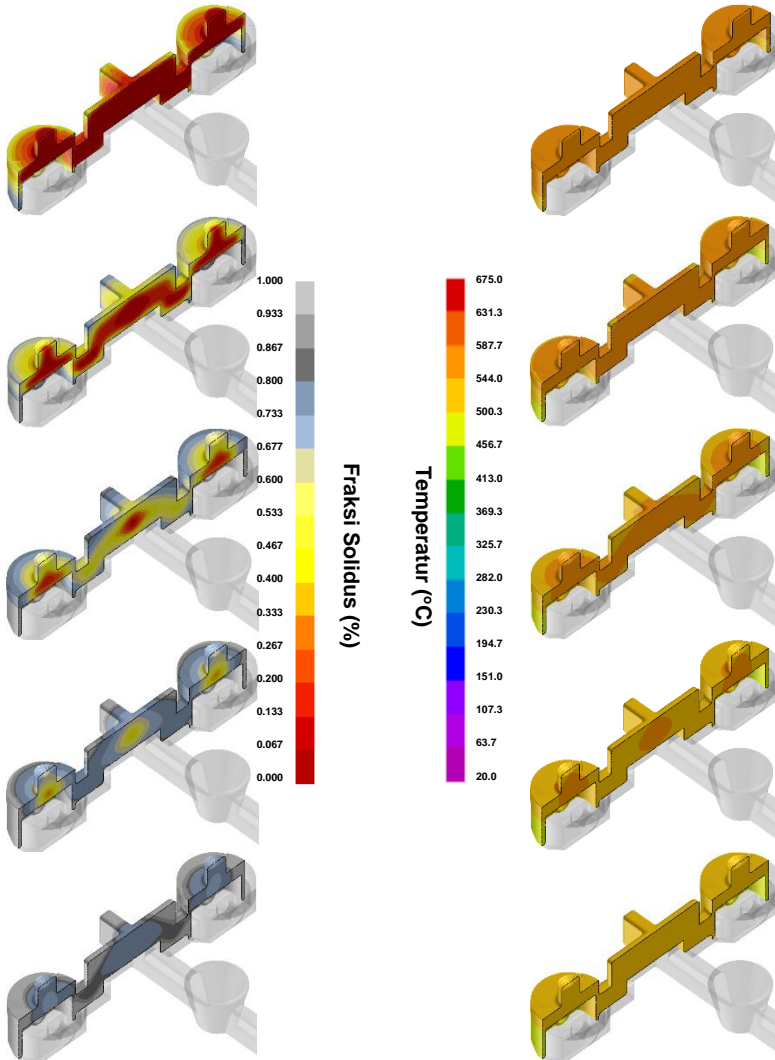
**Gambar 178.** Fraksi solidus dan temperatur dalam dua *pattern* *per mold* pada variasi 775°C – 400°C.

*c. Empat pattern per mold*

**Gambar 179.** Fraksi solidus dan temperatur dalam empat *pattern* per mold pada variasi 675°C – 30°C.

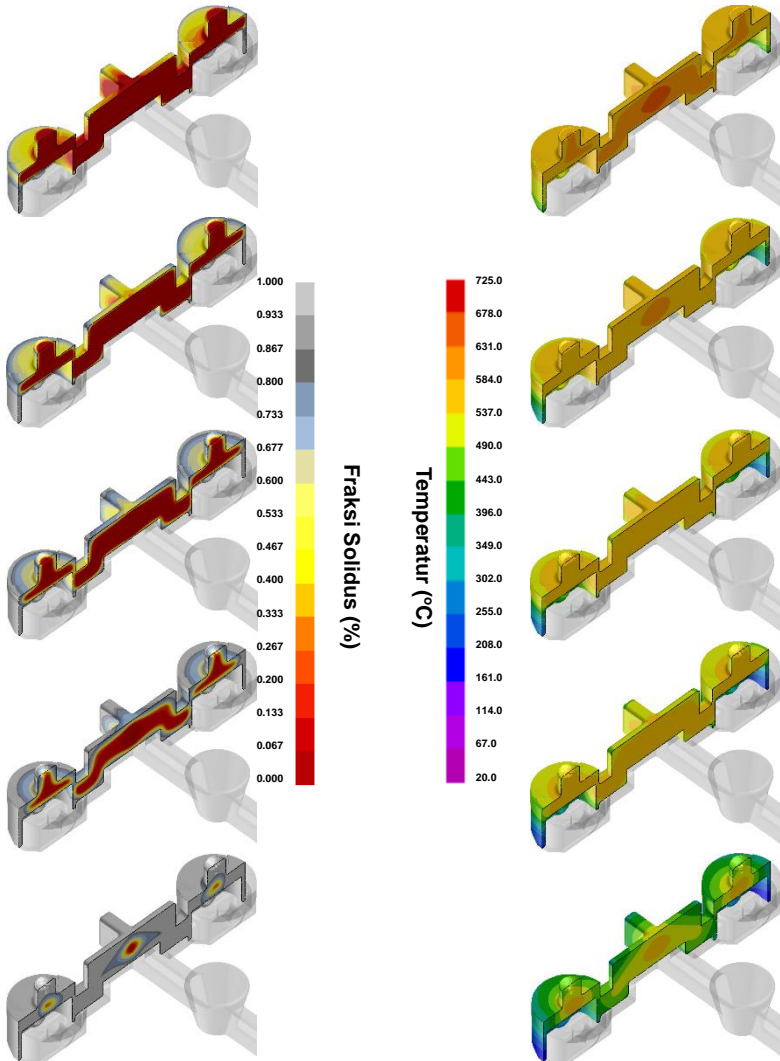


**Gambar 180.** Fraksi solidus dan temperatur dalam empat *pattern per mold* pada variasi 675°C – 200°C.

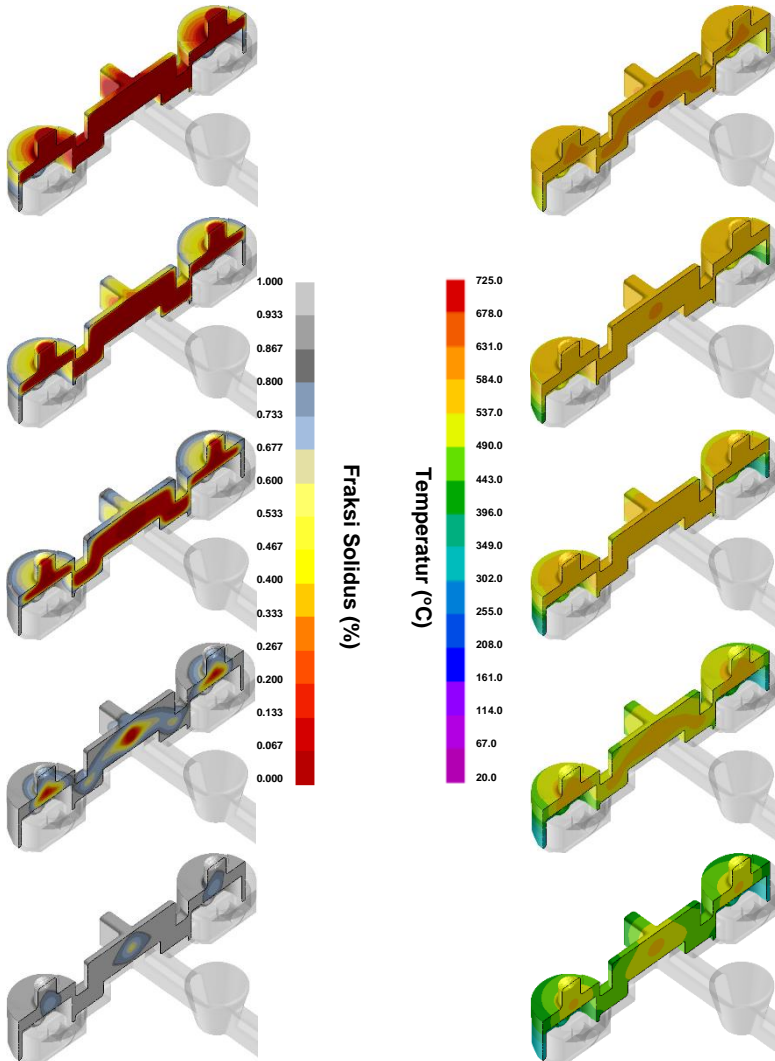


**Gambar 181.** Fraksi solidus dan temperatur dalam empat *pattern* per mold pada variasi 675°C – 400°C.

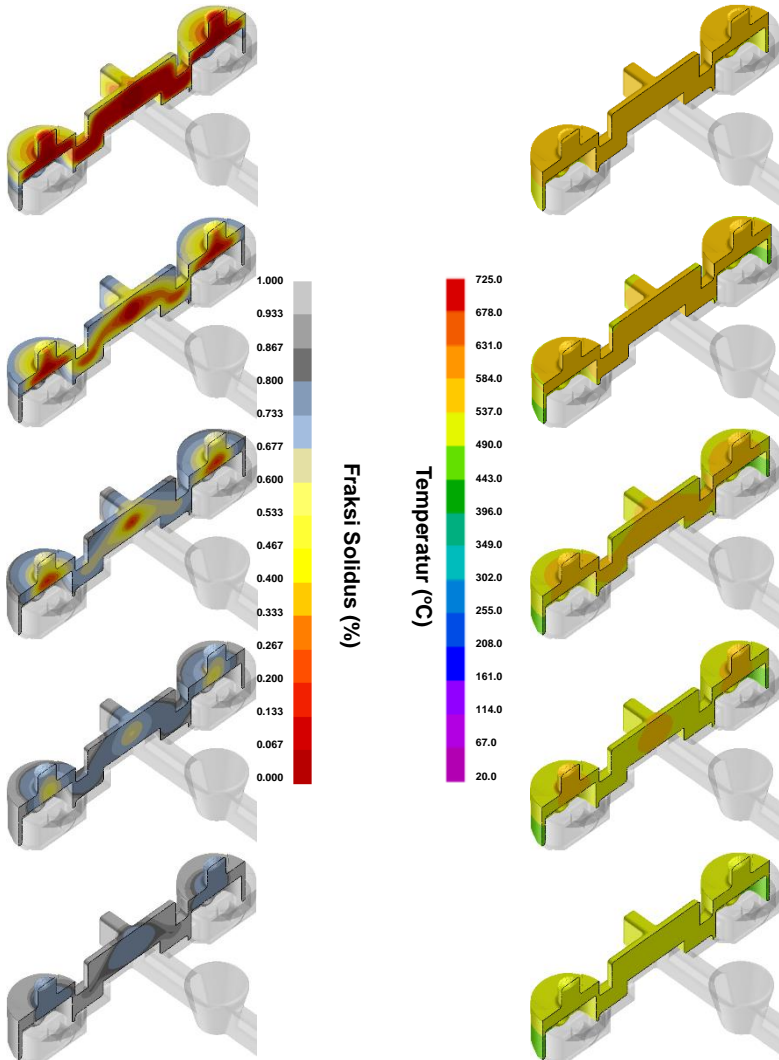




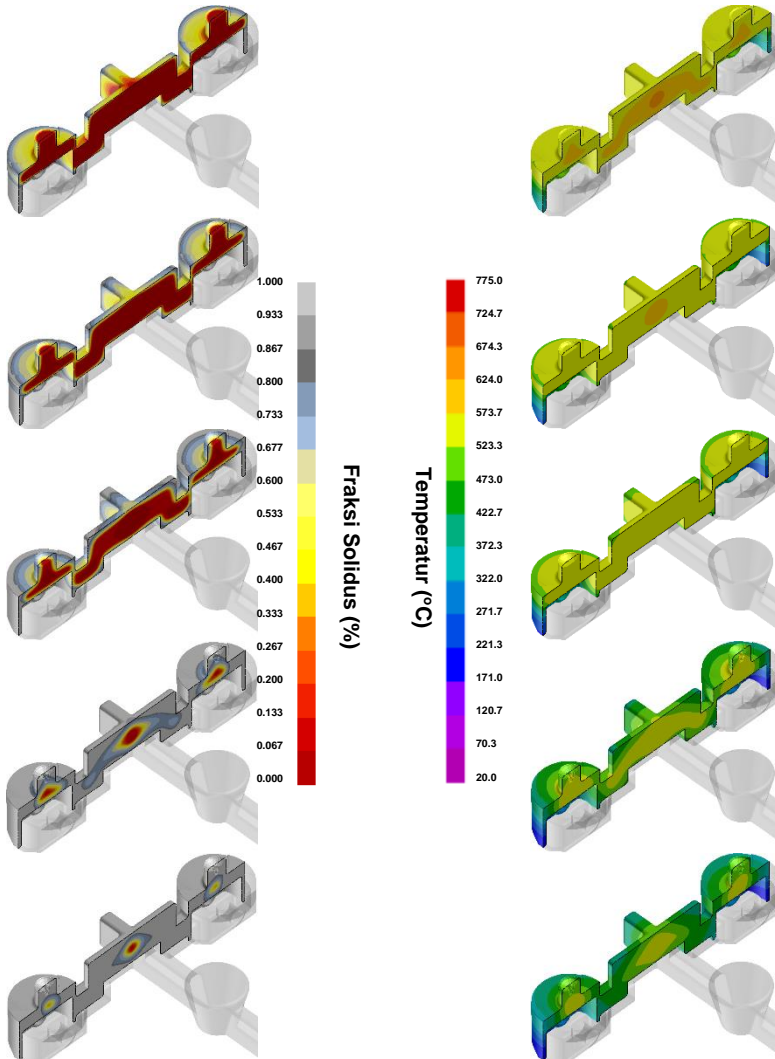
**Gambar 182.** Fraksi solidus dan temperatur dalam empat *pattern per mold* pada variasi 725°C – 30°C.



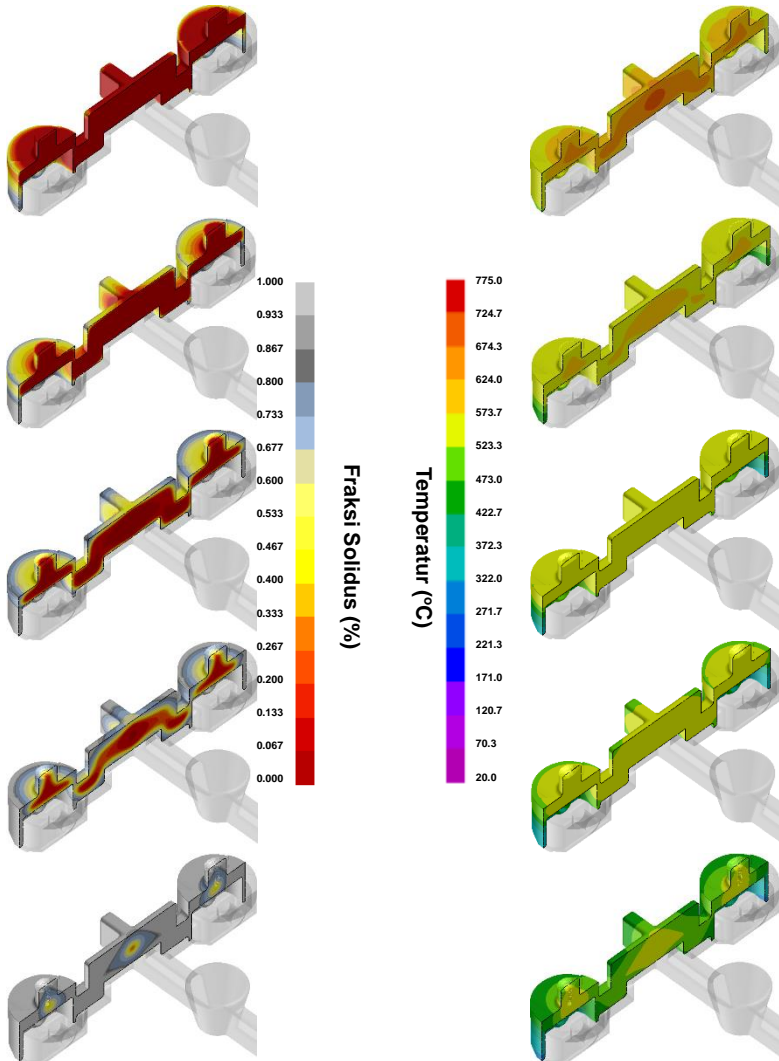
**Gambar 183.** Fraksi solidus dan temperatur dalam empat *pattern* per mold pada variasi 725°C – 200°C.



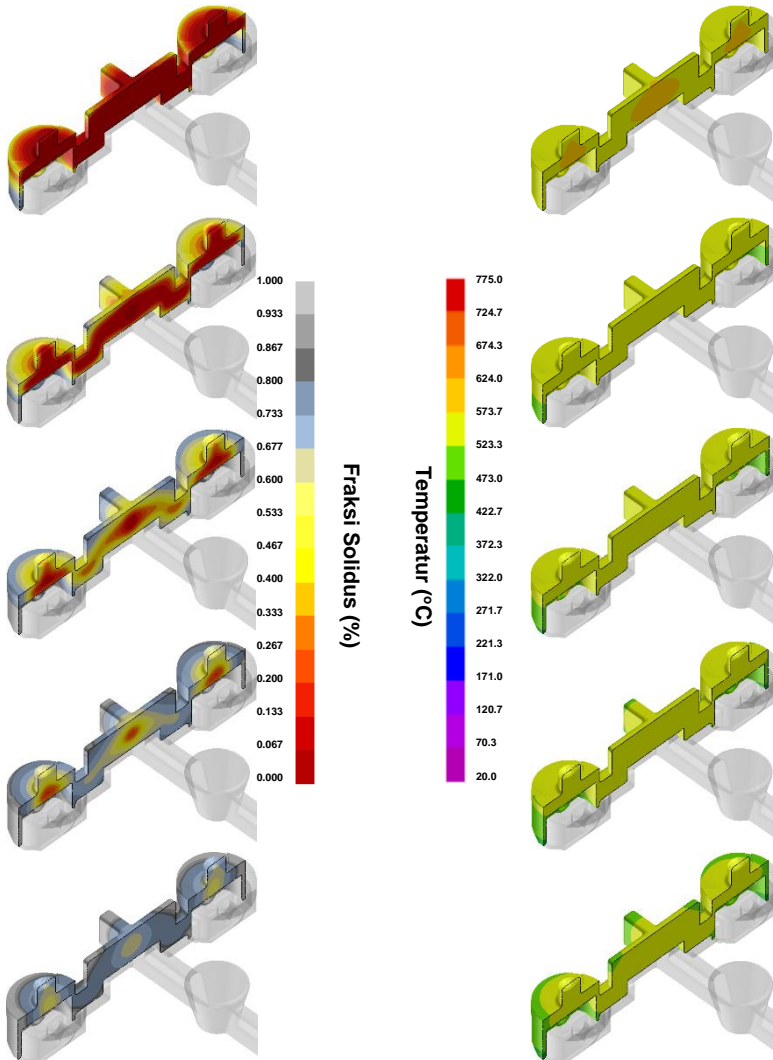
**Gambar 184.** Fraksi solidus dan temperatur dalam empat *pattern per mold* pada variasi 725°C – 400°C.



**Gambar 185.** Fraksi solidus dan temperatur dalam empat *pattern per mold* pada variasi 775°C – 30°C.



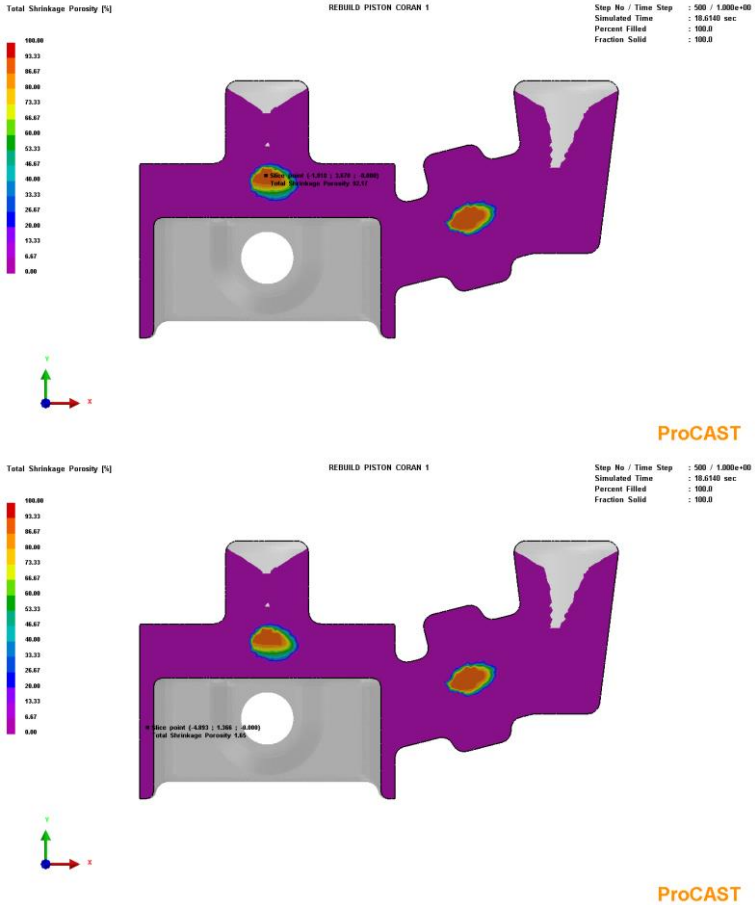
**Gambar 186.** Fraksi solidus dan temperatur dalam empat *pattern per mold* pada variasi 775°C – 200°C.



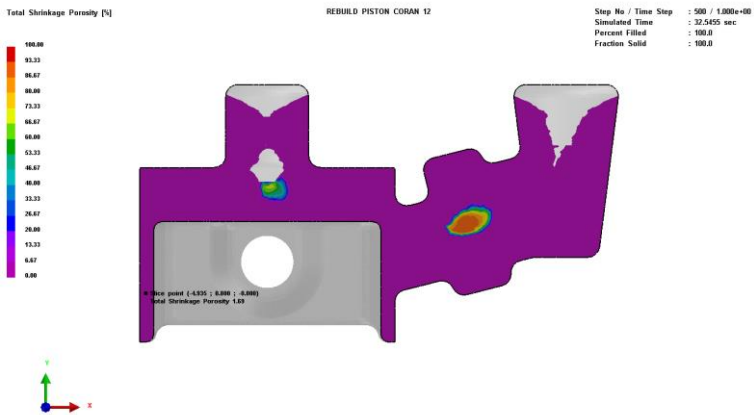
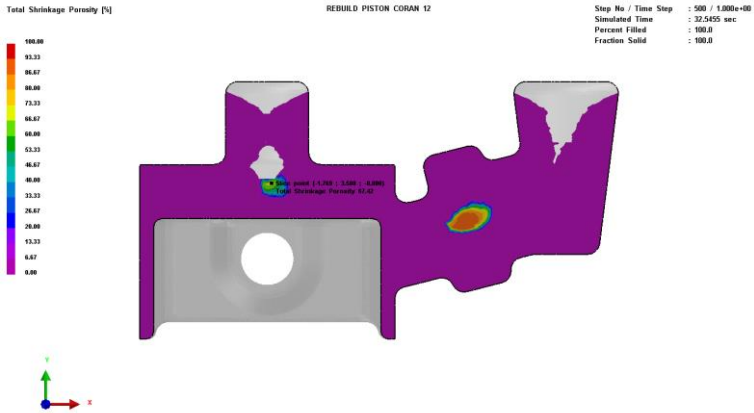
**Gambar 187.** Fraksi solidus dan temperatur dalam empat *pattern per mold* pada variasi 775°C – 400°C.

## 6. Shrinkage Porosity

### a. Satu pattern per mold

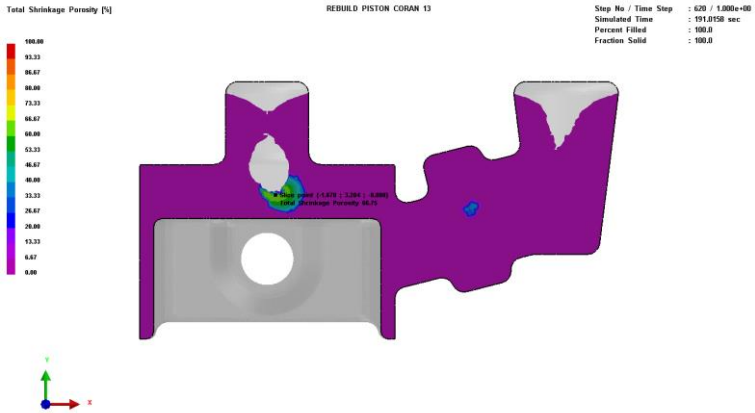


**Gambar 188.** Shrinkage porosity dalam satu pattern per mold pada variasi 675°C – 30°C.

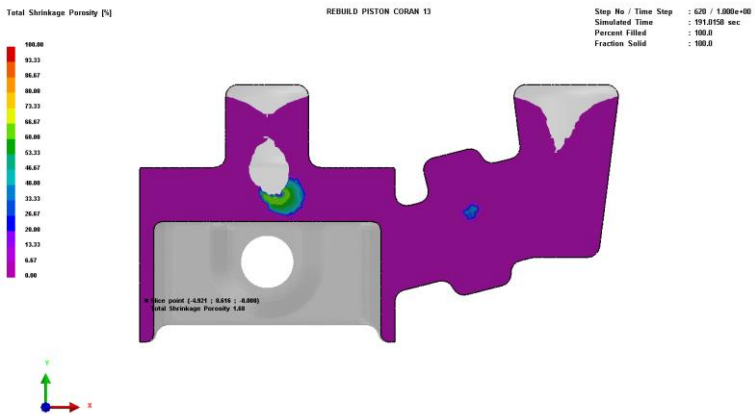


**Gambar 189.** *Shrinkage porosity* dalam satu *pattern per mold* pada variasi  $675^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ .



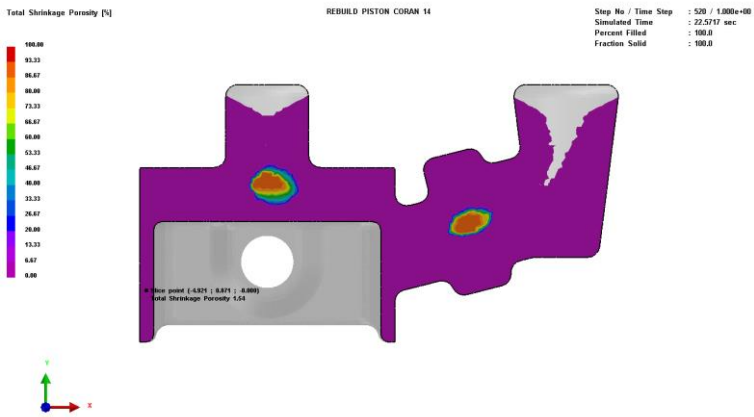
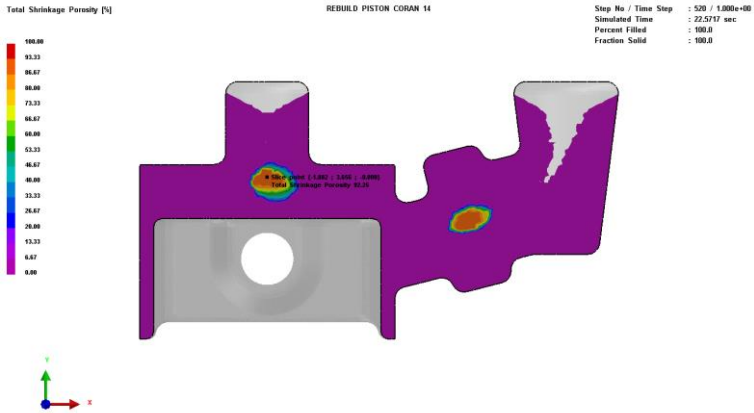


ProCAST

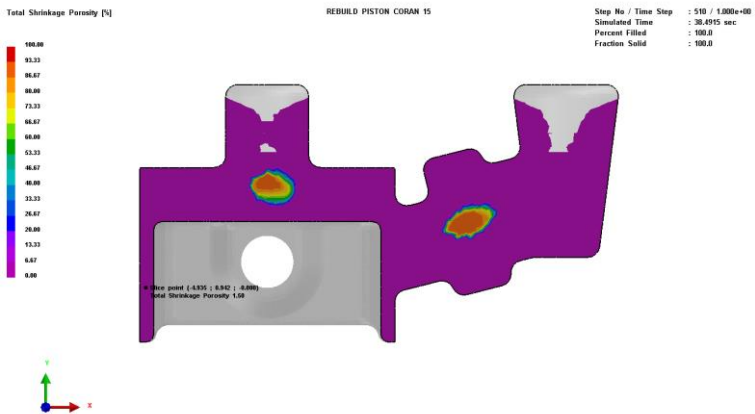
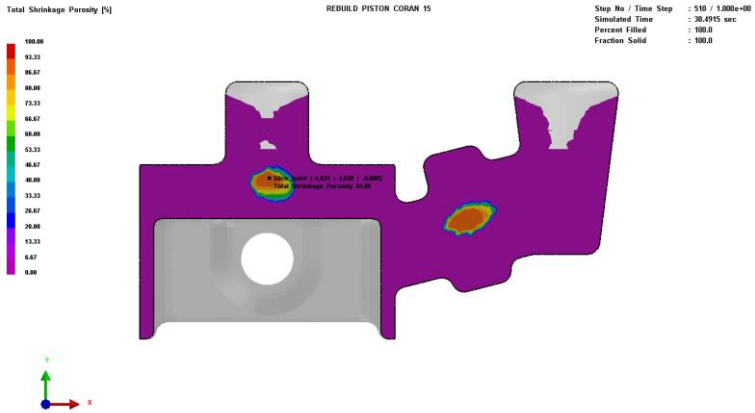


ProCAST

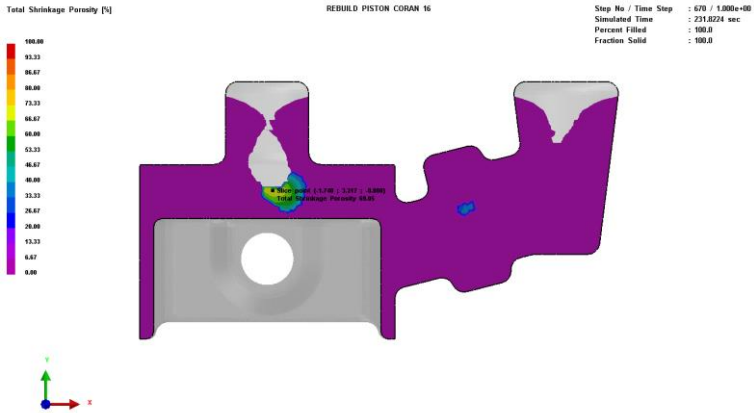
**Gambar 190.** *Shrinkage porosity* dalam satu pattern per mold pada variasi 675°C – 400°C.



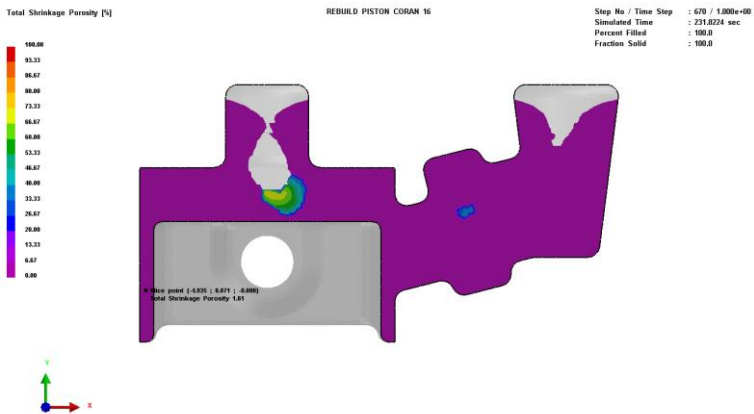
**Gambar 191.** *Shrinkage porosity* dalam satu *pattern per mold* pada variasi 725°C – 30°C.



**Gambar 192.** *Shrinkage porosity* dalam satu pattern per mold pada variasi 725°C – 200°C.

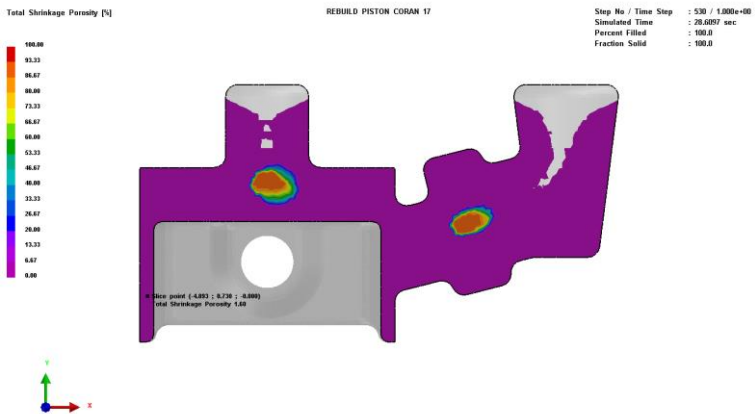
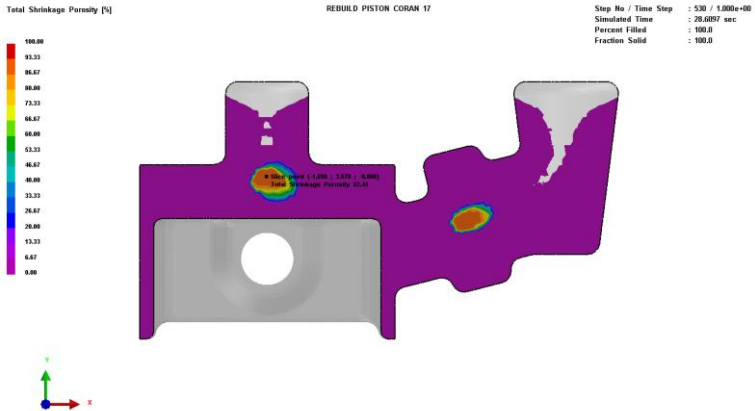


ProCAST

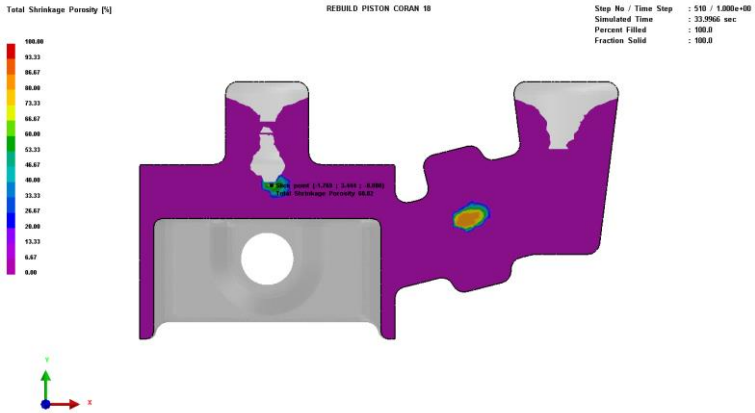


ProCAST

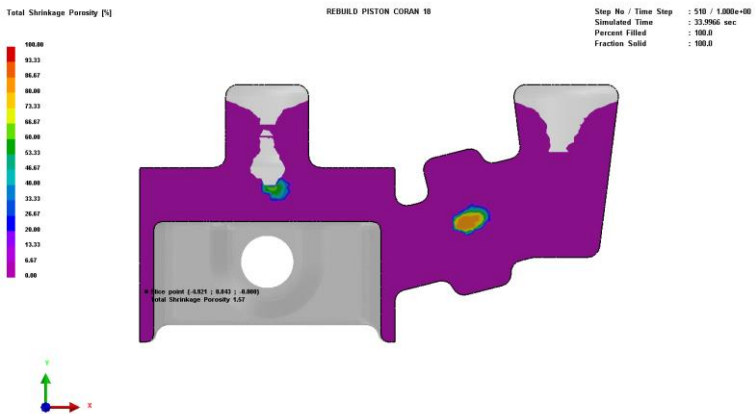
**Gambar 193.** *Shrinkage porosity* dalam satu *pattern per mold* pada variasi  $725^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$ .



**Gambar 194.** *Shrinkage porosity* dalam satu pattern per mold pada variasi 775°C – 30°C.

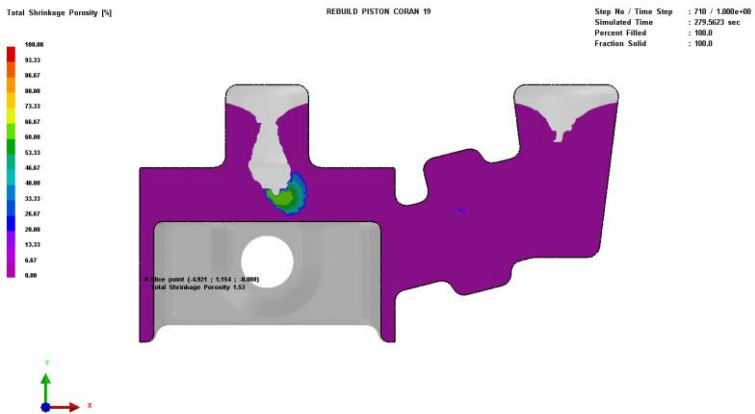
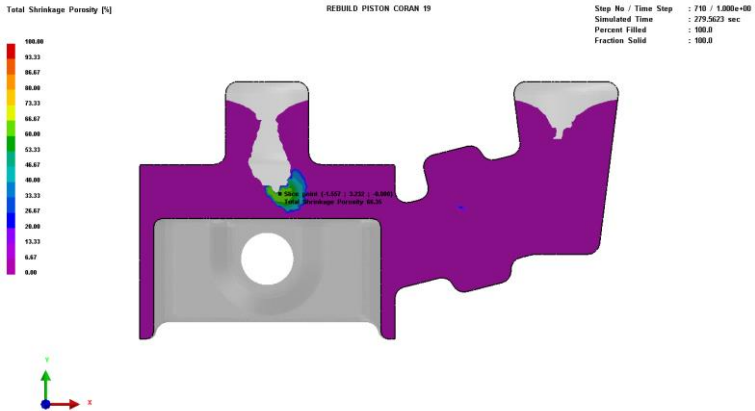


ProCAST



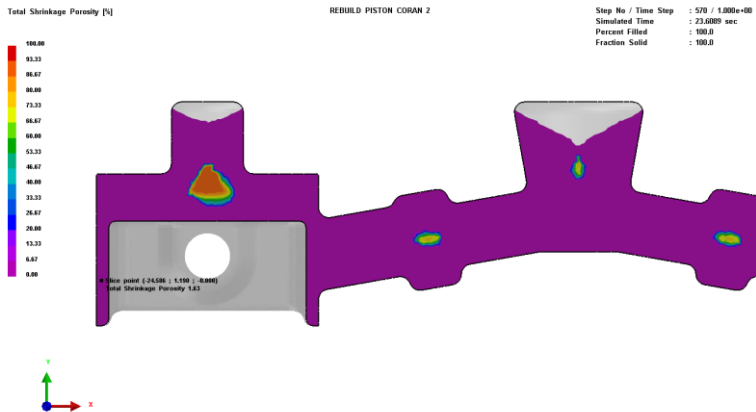
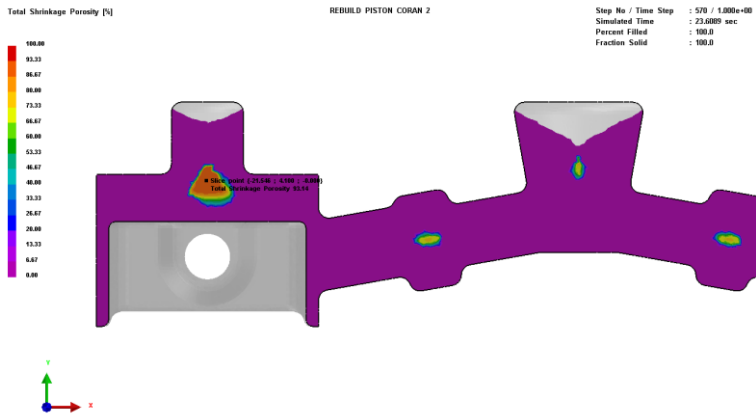
ProCAST

**Gambar 195.** *Shrinkage porosity* dalam satu *pattern per mold* pada variasi  $775^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ .



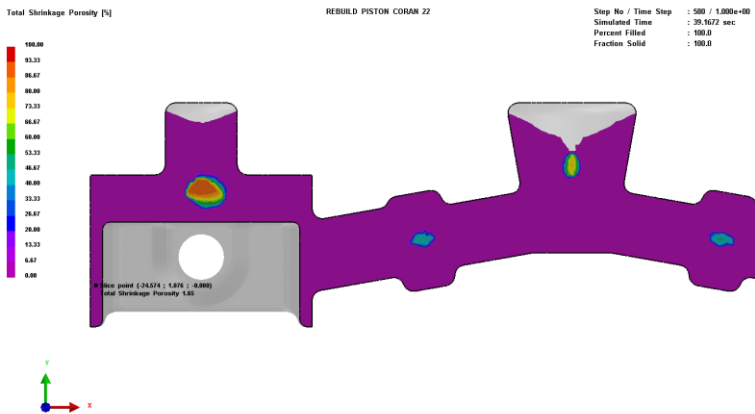
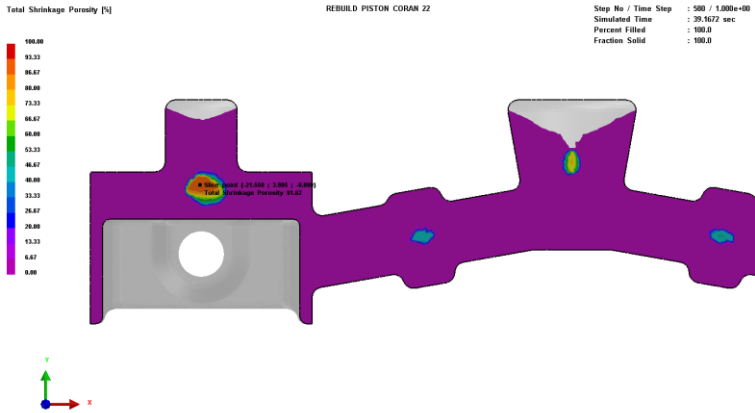
**Gambar 196.** *Shrinkage porosity* dalam satu pattern per mold pada variasi 775°C – 400°C.

*b. Dua pattern per mold*

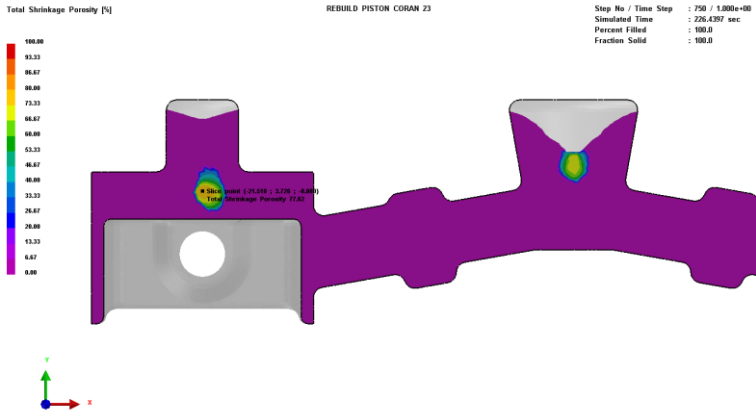


**Gambar 197.** *Shrinkage porosity* dalam dua *pattern per mold* pada variasi  $675^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ .

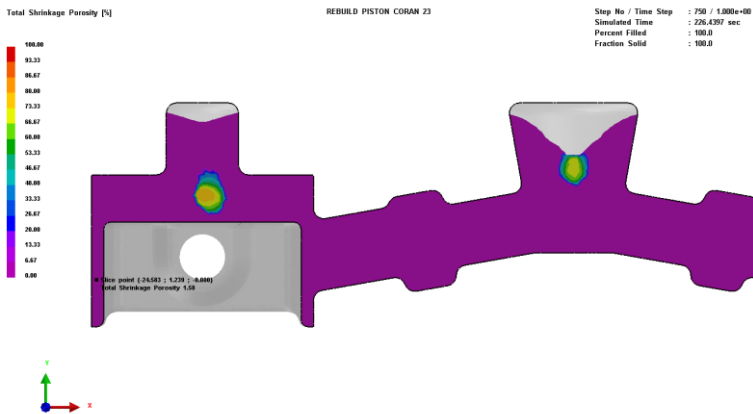




**Gambar 198.** *Shrinkage porosity* dalam dua *pattern per mold* pada variasi  $675^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ .

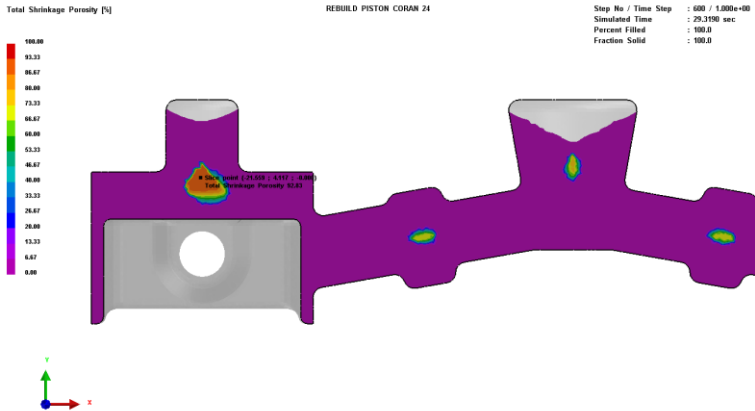


ProCAST

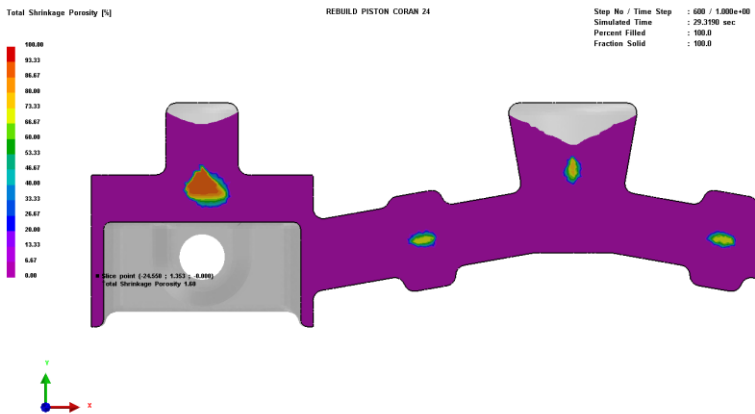


ProCAST

**Gambar 199.** *Shrinkage porosity* dalam dua *pattern per mold* pada variasi  $675^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$ .

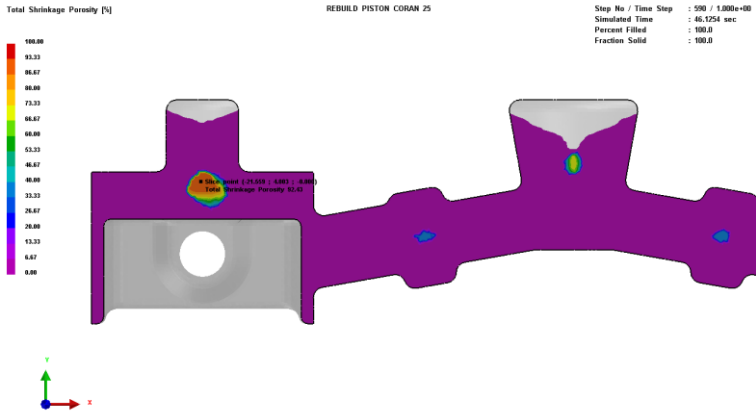


ProCAST

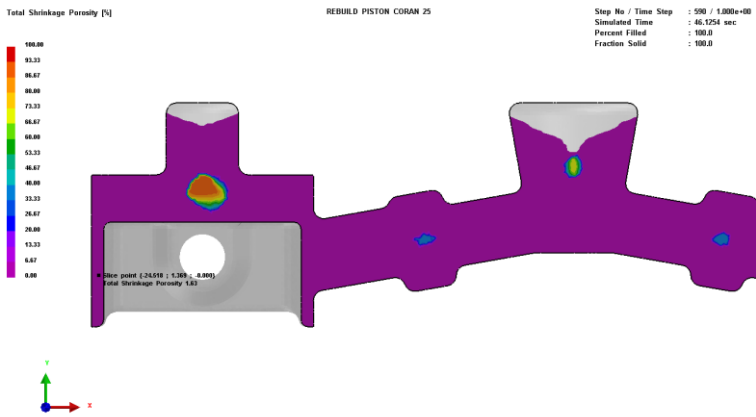


ProCAST

**Gambar 200.** *Shrinkage porosity* dalam dua *pattern per mold* pada variasi  $725^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ .

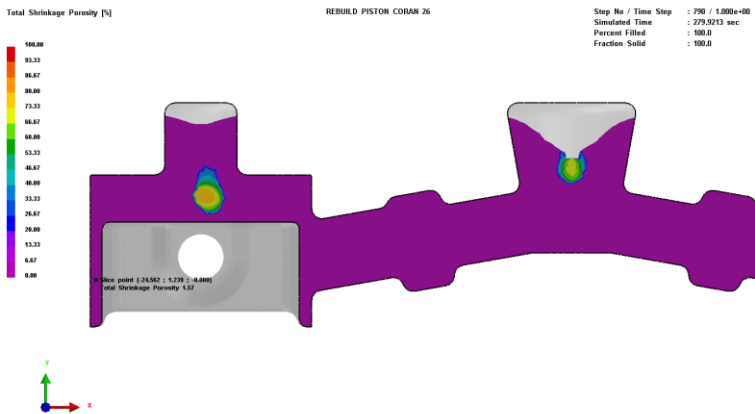
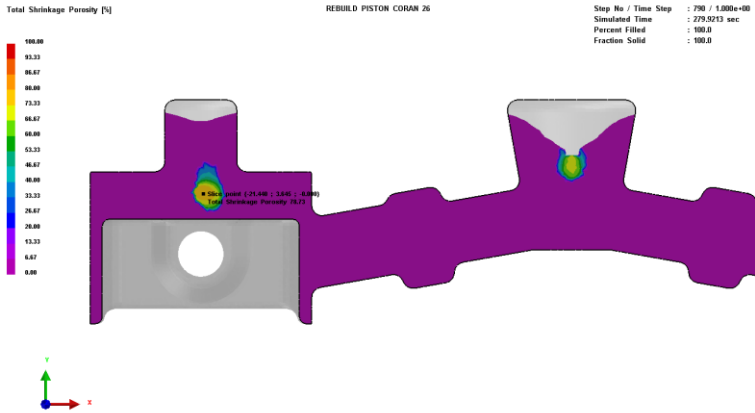


ProCAST

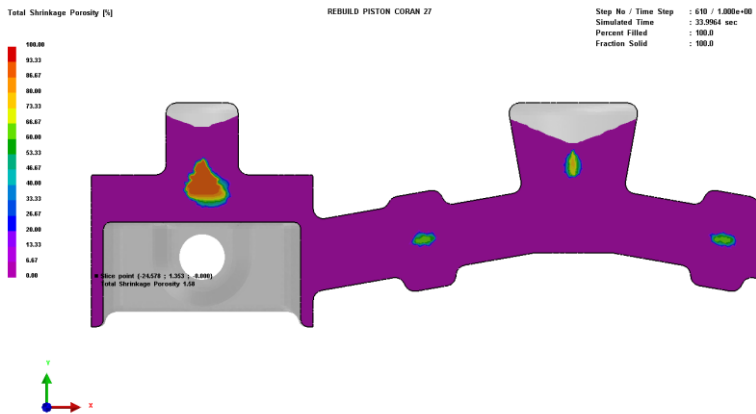
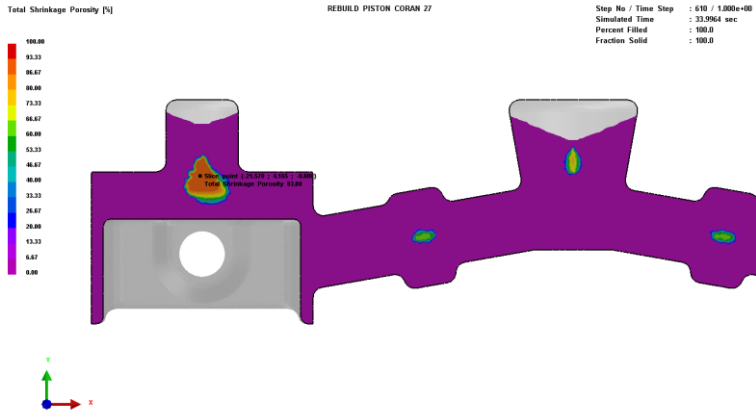


ProCAST

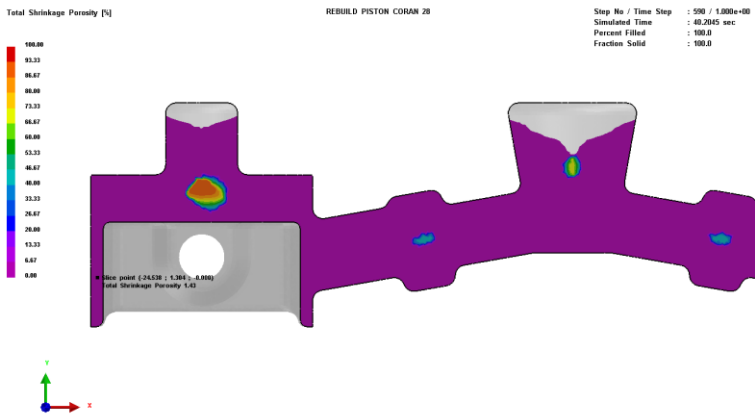
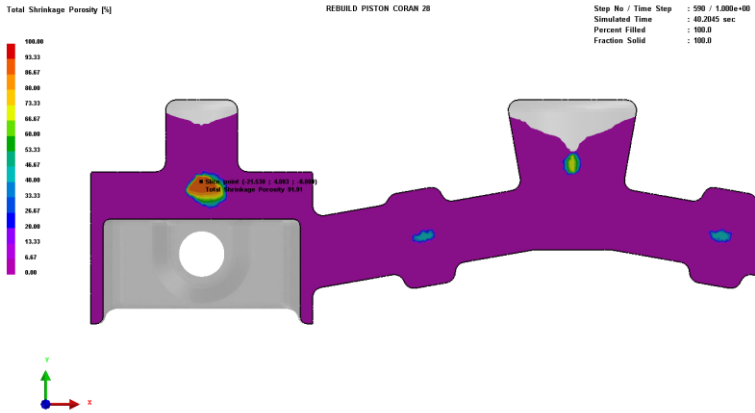
**Gambar 201.** *Shrinkage porosity* dalam dua *pattern per mold* pada variasi 725°C – 200°C.



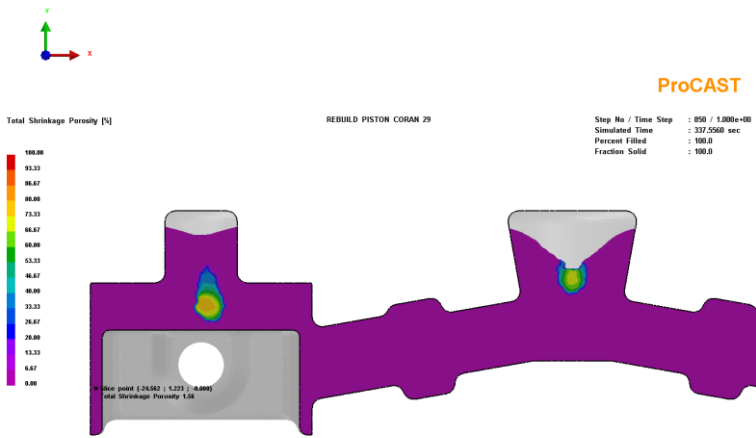
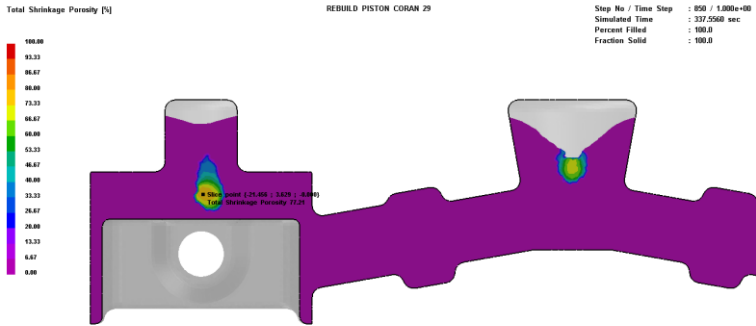
**Gambar 202.** *Shrinkage porosity* dalam dua *pattern per mold* pada variasi 725°C – 400°C.



**Gambar 203.** *Shrinkage porosity* dalam dua *pattern per mold* pada variasi 775°C – 30°C.



**Gambar 204.** *Shrinkage porosity* dalam dua *pattern per mold* pada variasi 775°C – 200°C.



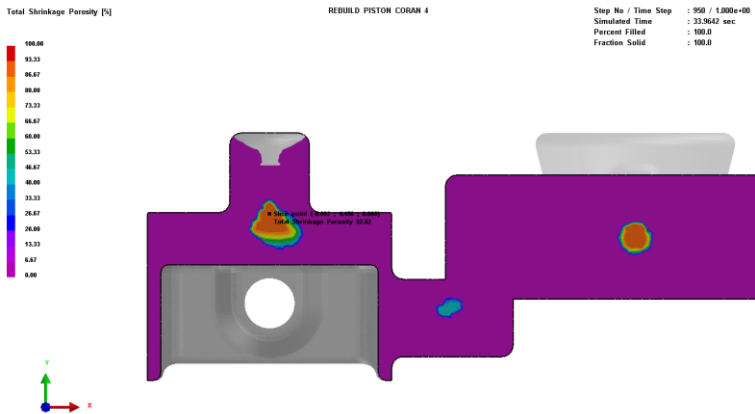
ProCAST

ProCAST

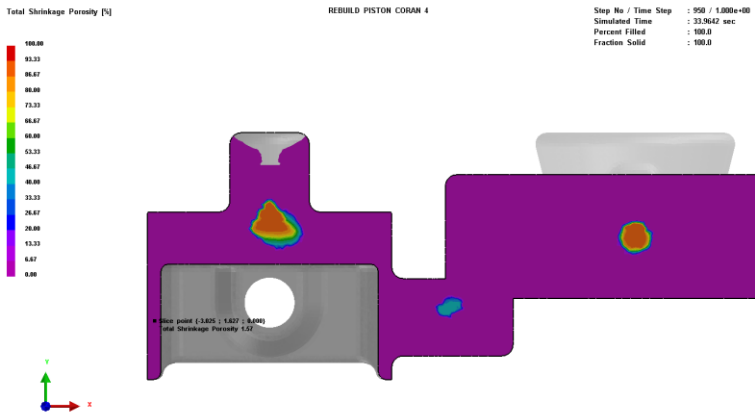
**Gambar 205.** *Shrinkage porosity* dalam dua *pattern per mold* pada variasi 775°C – 400°C.



c. Empat pattern per mold

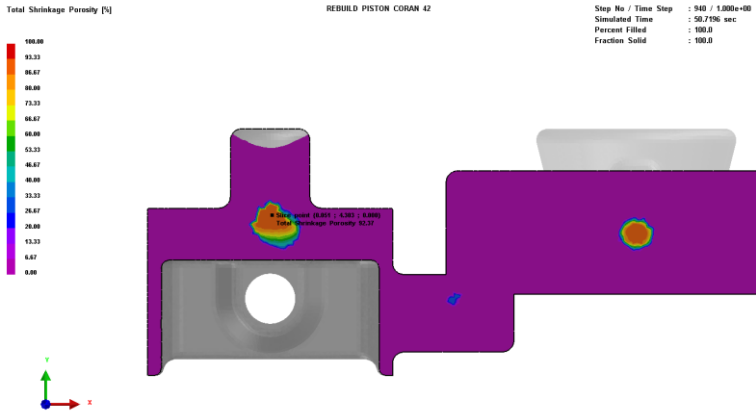


ProCAST

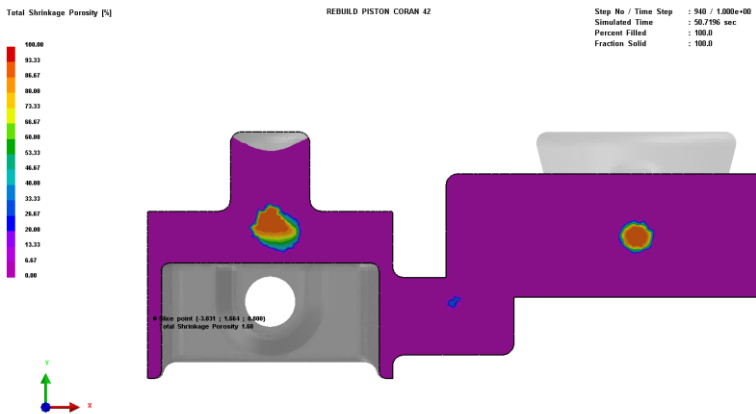


ProCAST

**Gambar 206.** *Shrinkage porosity* dalam empat pattern per mold pada variasi 675°C – 30°C.

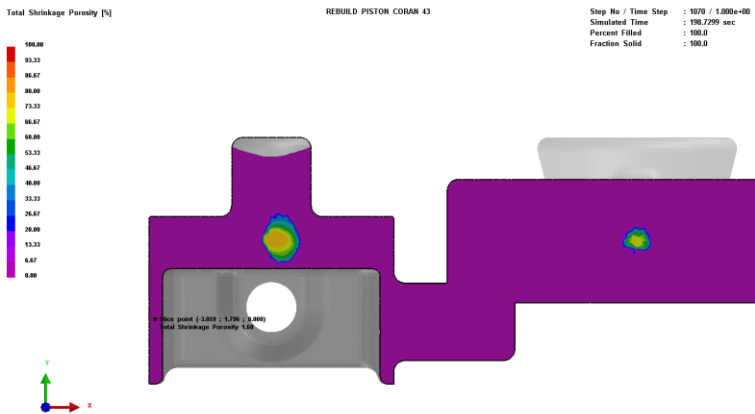
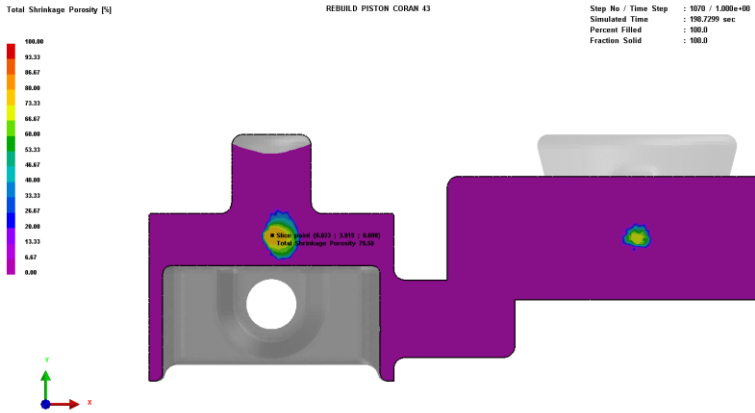


ProCAST

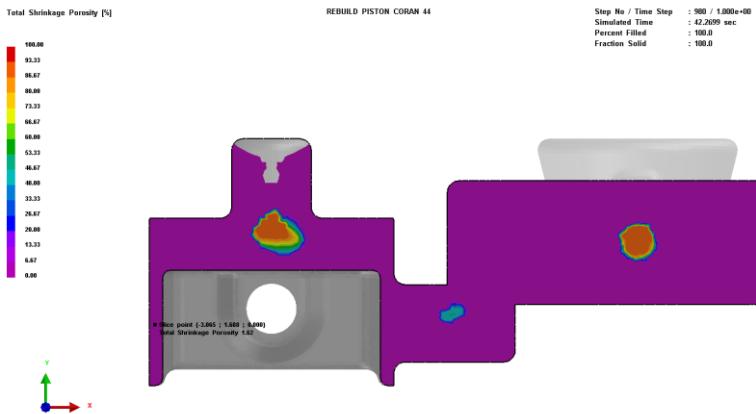
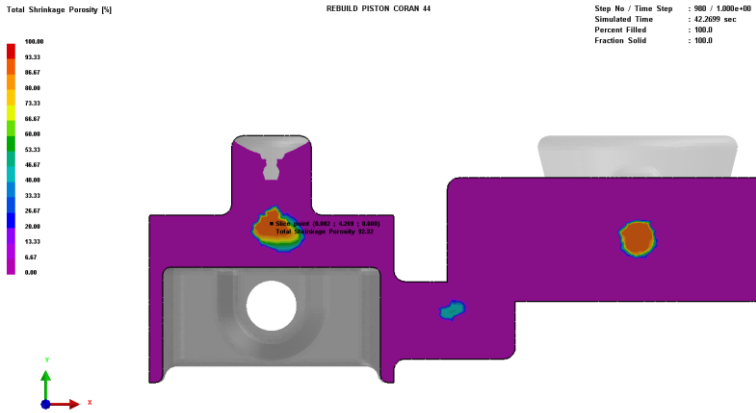


ProCAST

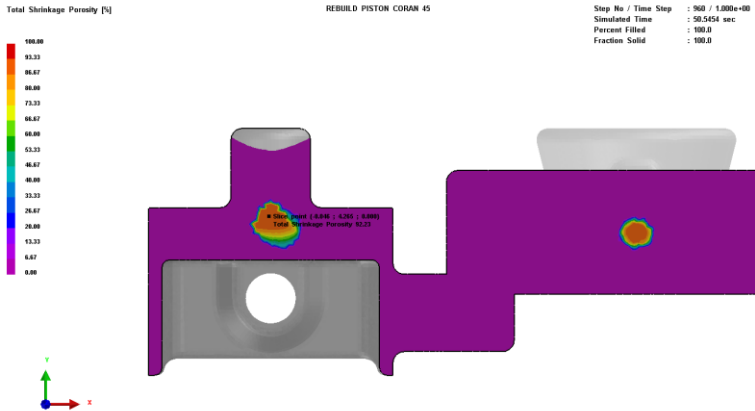
**Gambar 207.** *Shrinkage porosity* dalam empat *pattern per mold* pada variasi  $675^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ .



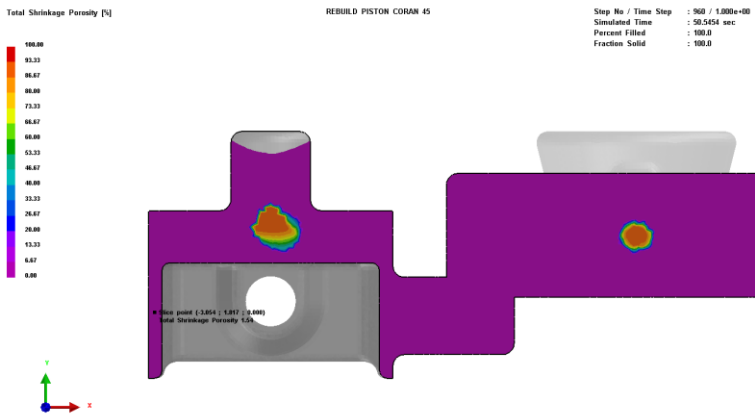
**Gambar 208.** *Shrinkage porosity* dalam empat pattern per mold pada variasi 675°C – 400°C.



**Gambar 209.** *Shrinkage porosity* dalam empat *pattern per mold* pada variasi 725°C – 30°C.

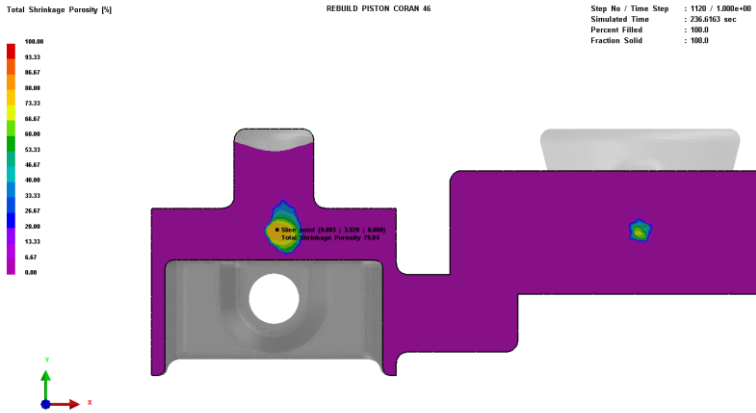


ProCAST

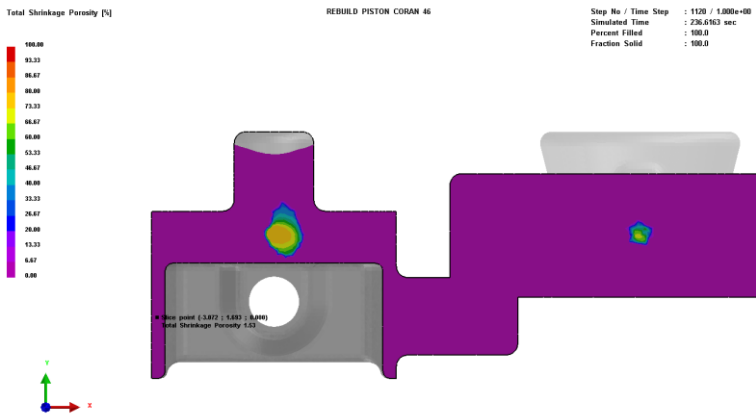


ProCAST

**Gambar 210.** *Shrinkage porosity* dalam empat *pattern per mold* pada variasi  $725^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ .

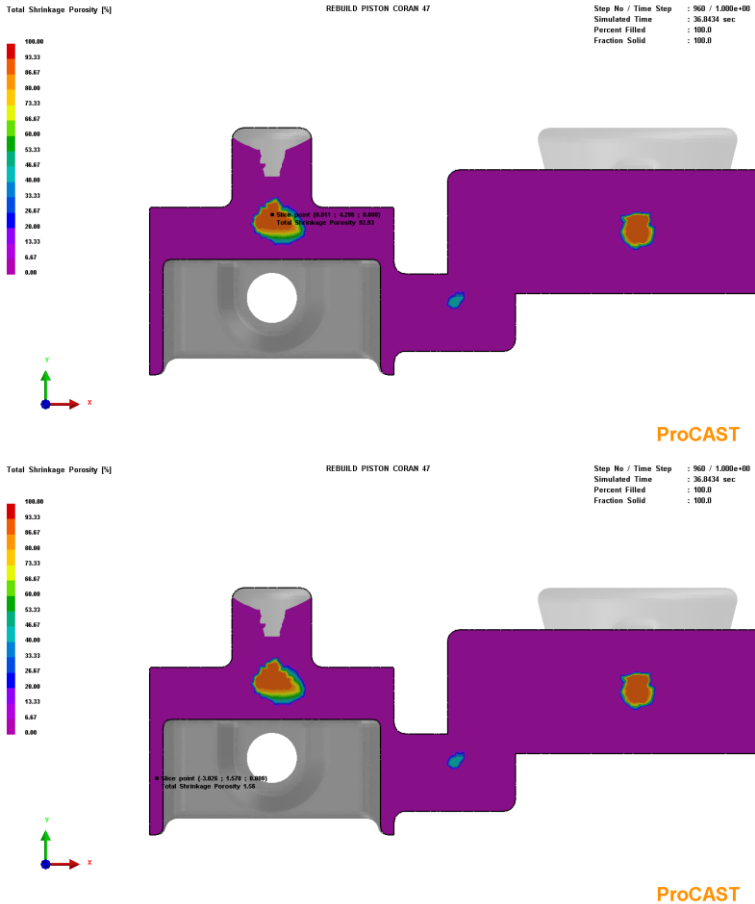


ProCAST

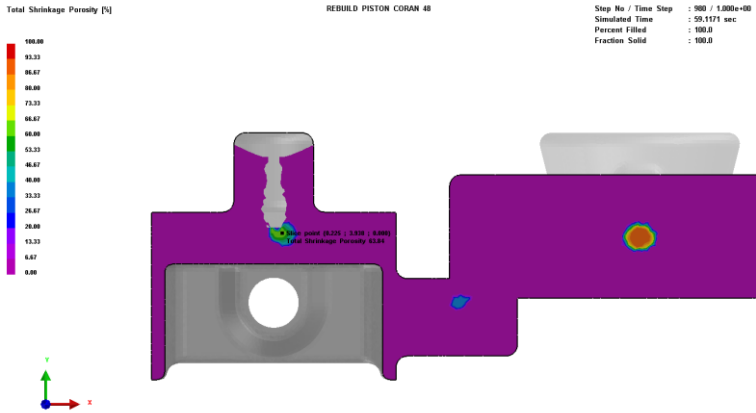


ProCAST

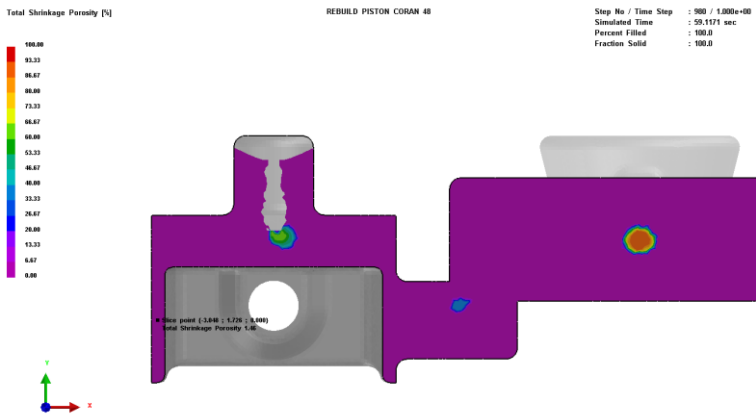
**Gambar 211.** *Shrinkage porosity* dalam empat *pattern per mold* pada variasi 725°C – 400°C.



**Gambar 212.** *Shrinkage porosity* dalam empat pattern per mold pada variasi 775°C – 30°C.



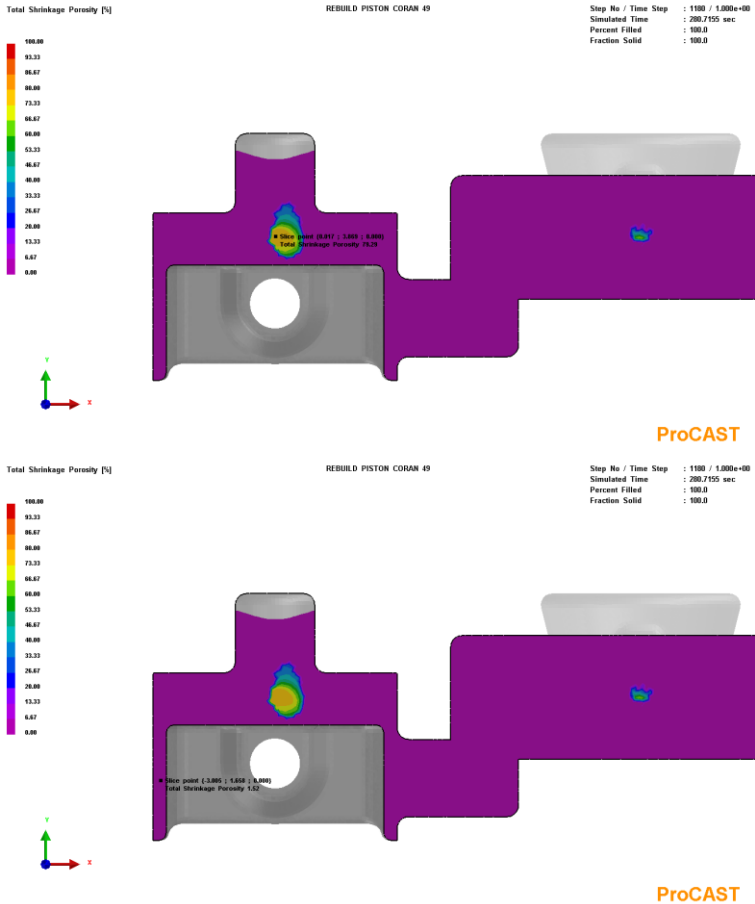
ProCAST



ProCAST

**Gambar 213.** *Shrinkage porosity* dalam empat *pattern per mold* pada variasi 775°C – 200°C.

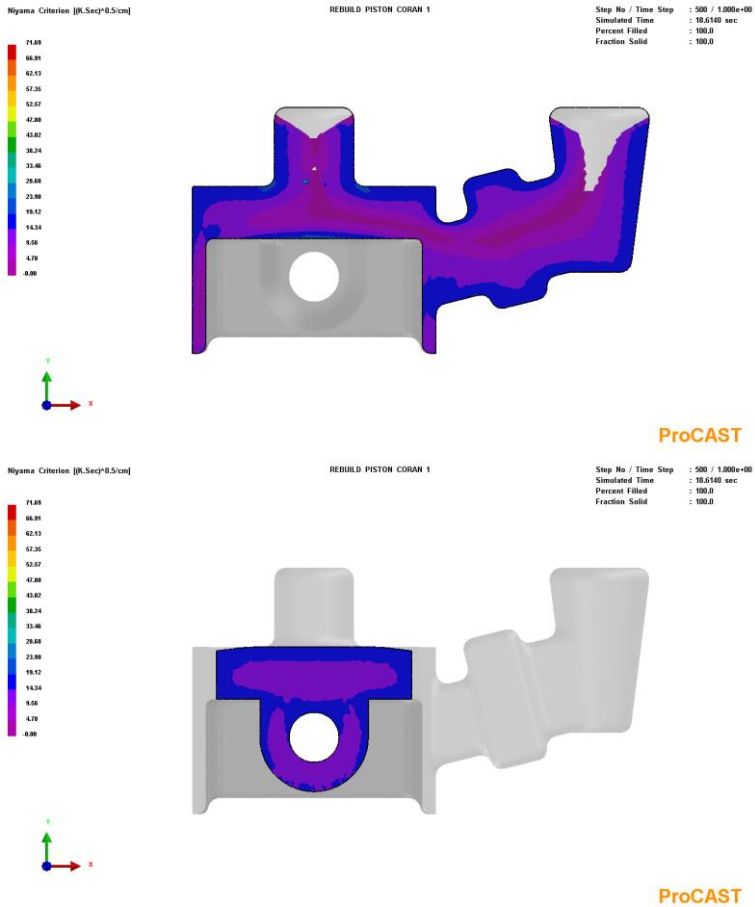




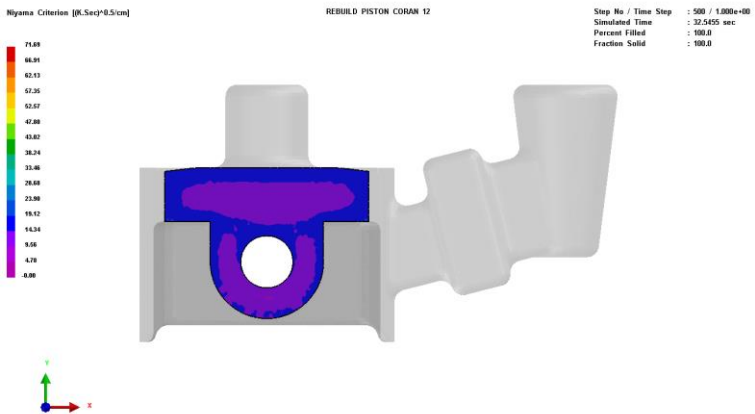
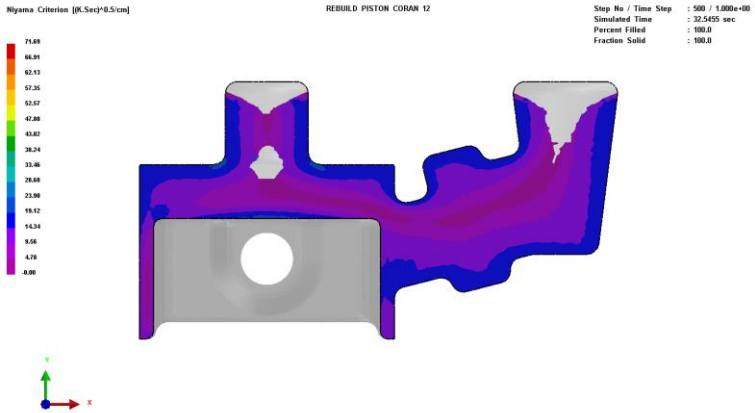
**Gambar 214.** *Shrinkage porosity* dalam empat pattern per mold pada variasi 775°C – 400°C.

## 7. Niyama Criterion

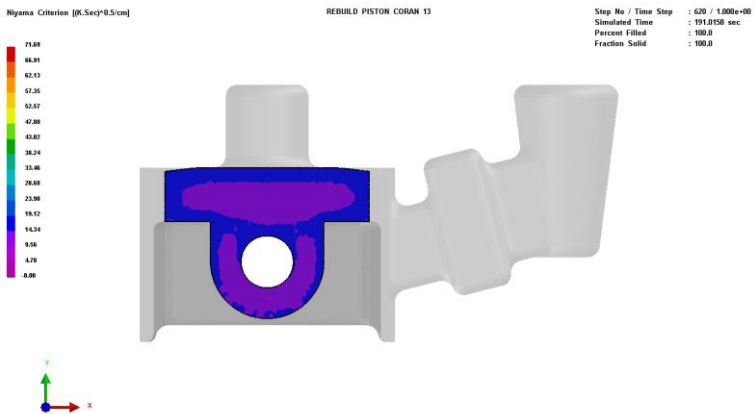
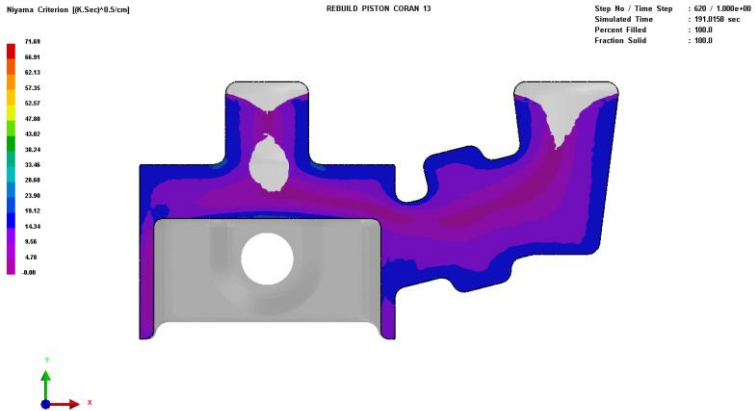
### a. Satu pattern per mold



**Gambar 215.** Niyama criterion dalam satu pattern per mold pada variasi 675°C – 30°C.

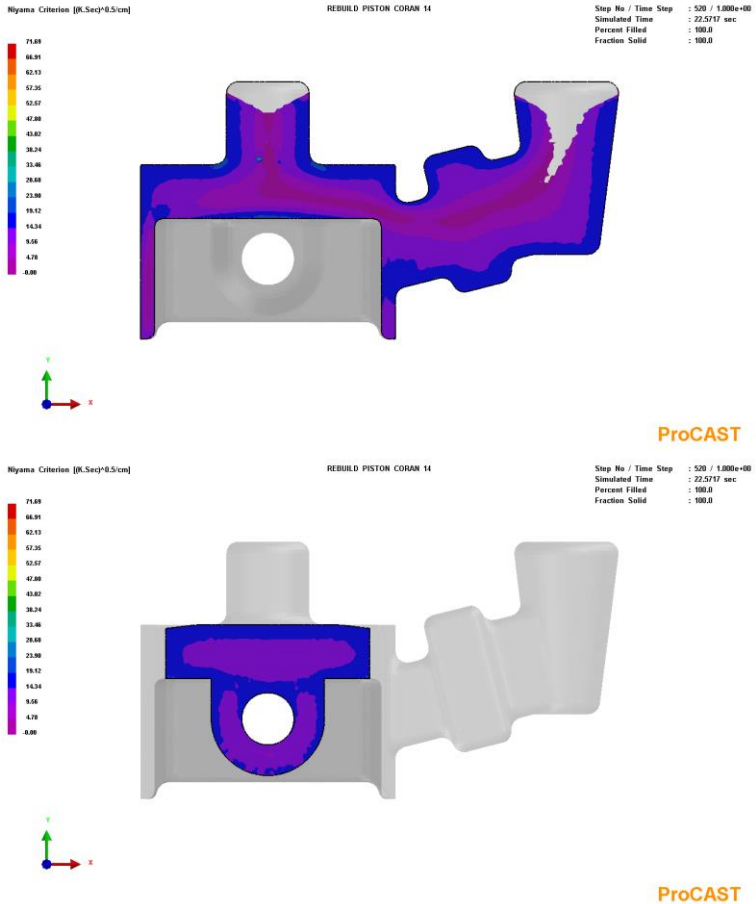


**Gambar 216.** *Niyama criterion* dalam satu *pattern per mold* pada variasi  $675^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ .

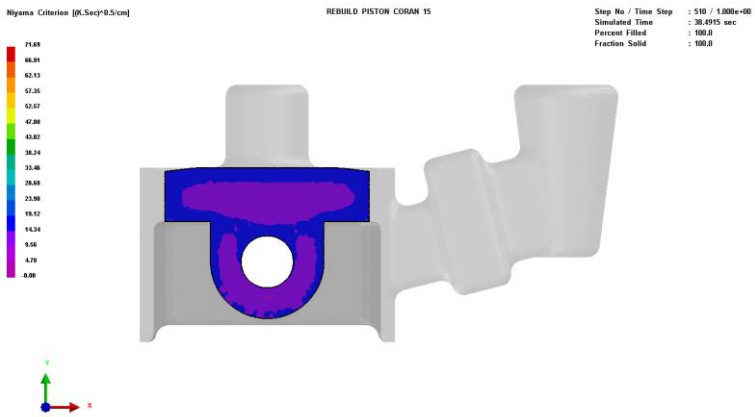
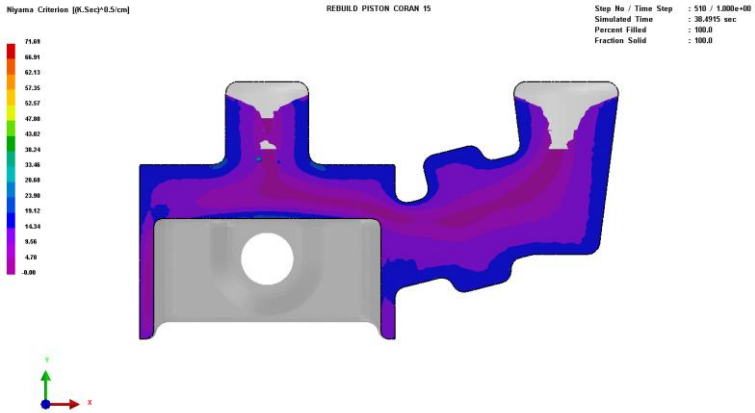


ProCAST

**Gambar 217.** Niyama criterion dalam satu pattern per mold pada variasi 675°C – 400°C.



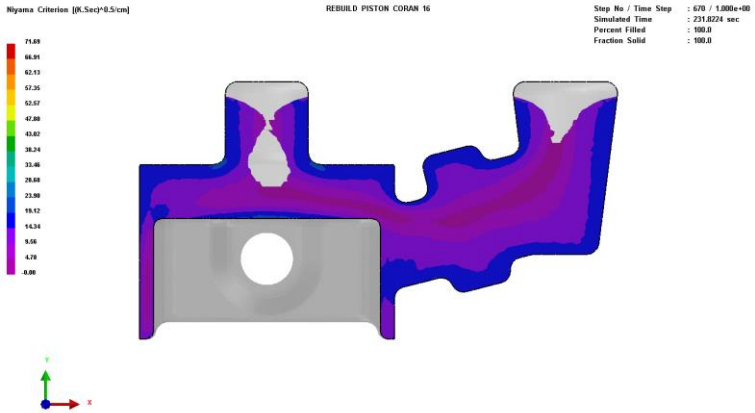
**Gambar 218.** *Niyama criterion* dalam satu *pattern per mold* pada variasi  $725^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ .



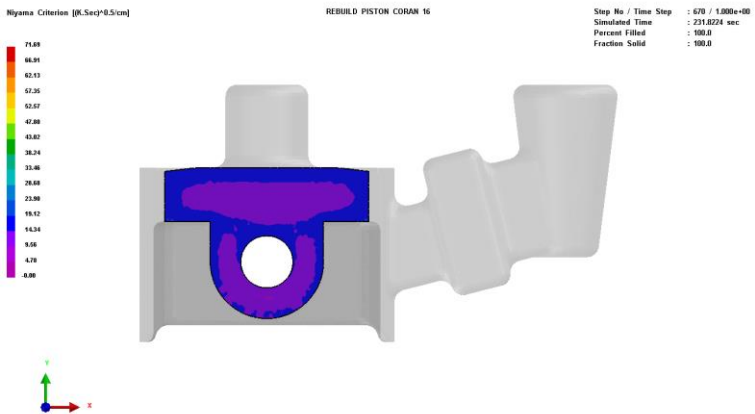
ProCAST

ProCAST

**Gambar 219.** Niyama criterion dalam satu pattern per mold pada variasi 725°C – 200°C.

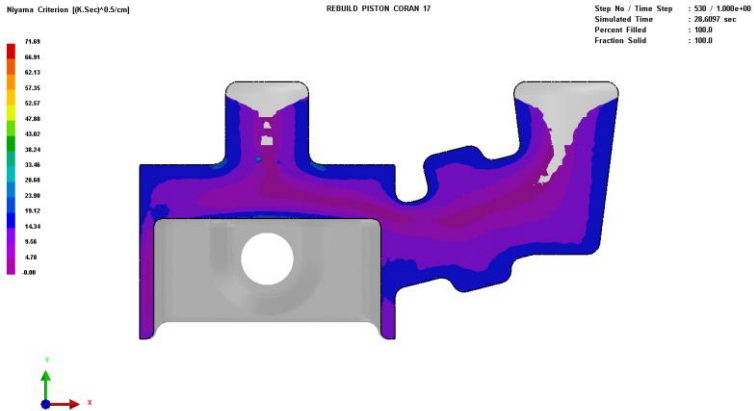


ProCAST

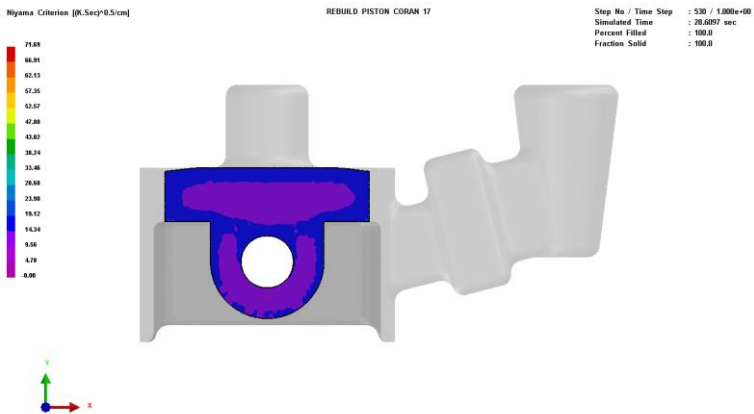


ProCAST

**Gambar 220.** *Niyama criterion* dalam satu *pattern per mold* pada variasi 725°C – 400°C.



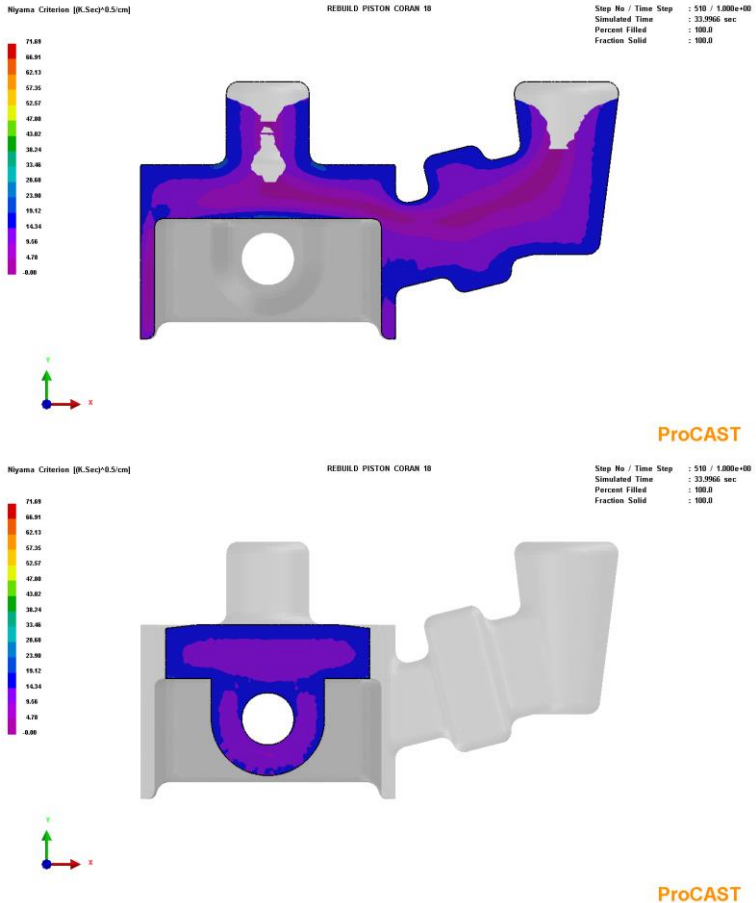
ProCAST



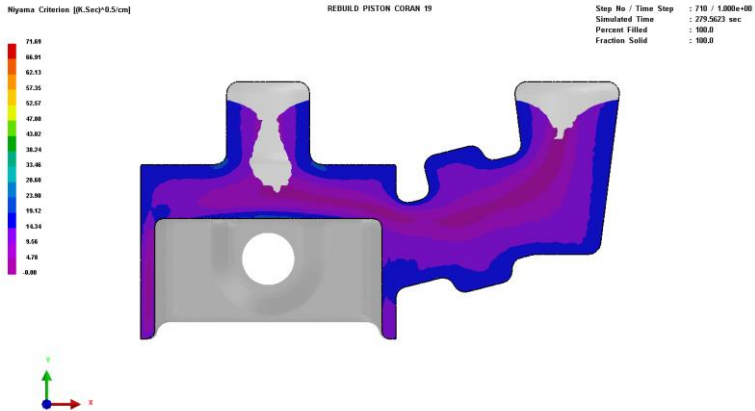
ProCAST

**Gambar 221.** Niyama criterion dalam satu pattern per mold pada variasi 775°C – 30°C.

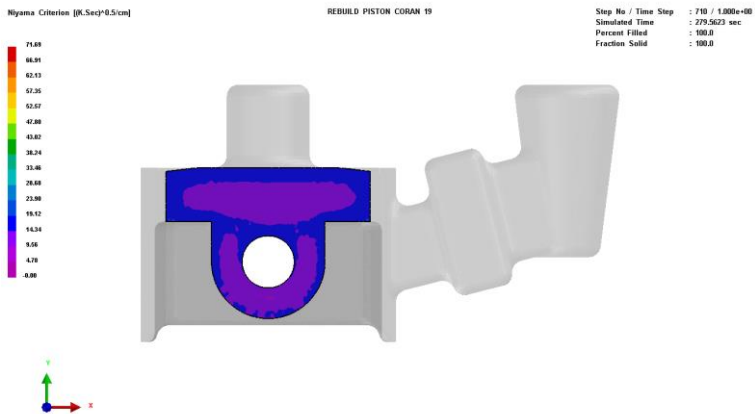




**Gambar 222.** Niyama criterion dalam satu pattern per mold pada variasi 775°C – 200°C.



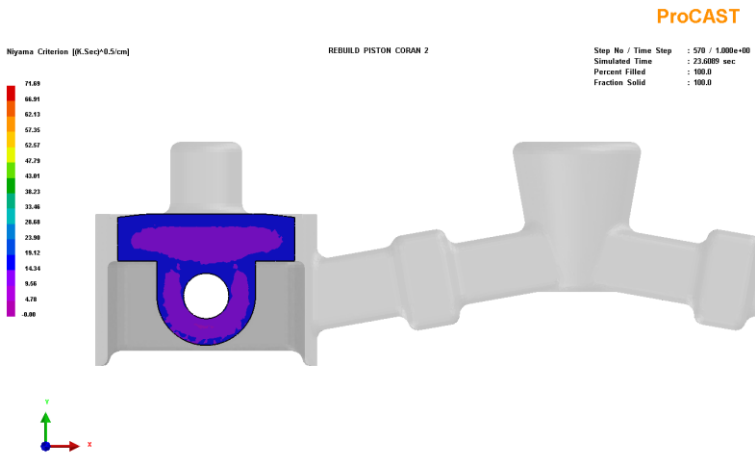
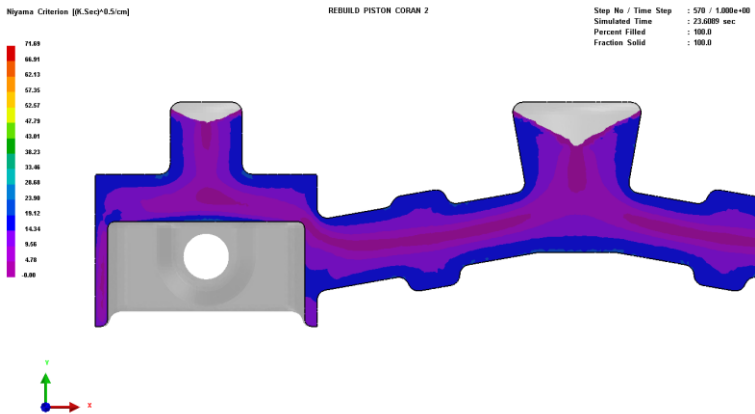
ProCAST



ProCAST

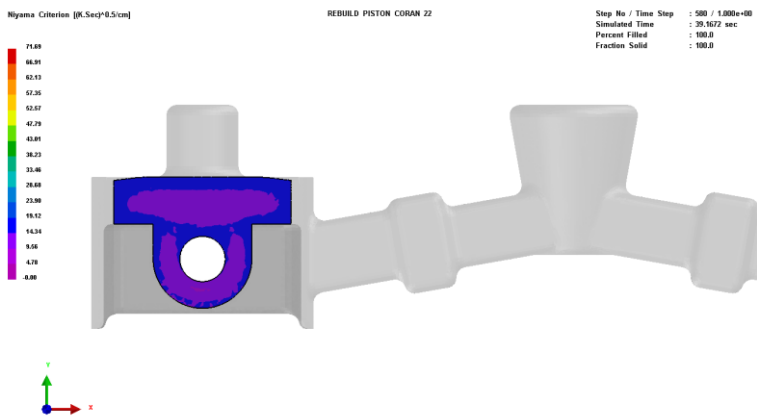
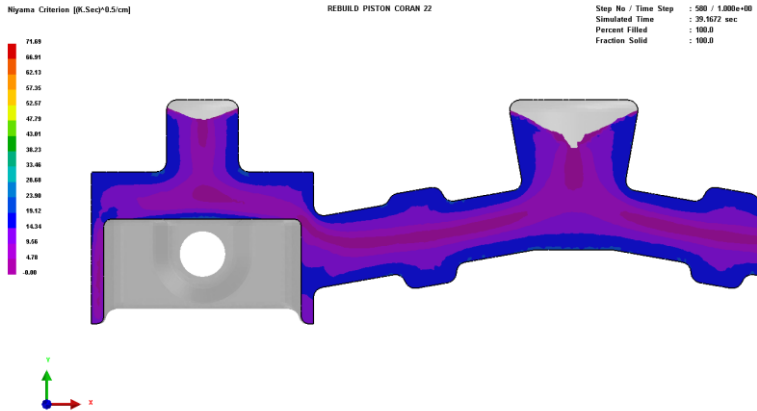
**Gambar 223.** Niyama criterion dalam satu pattern per mold pada variasi 775°C – 400°C.

*b. Dua pattern per mold*



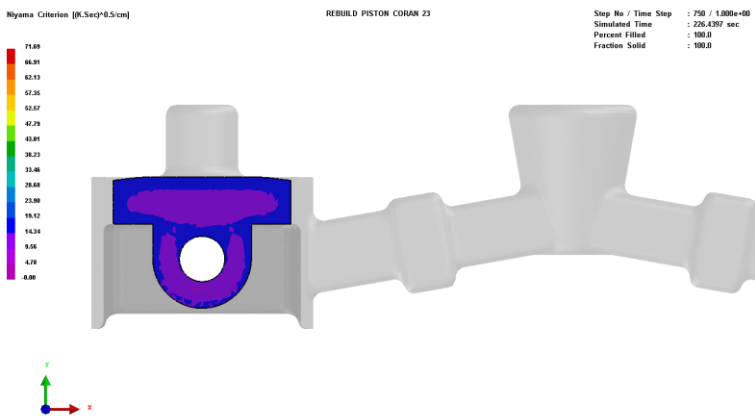
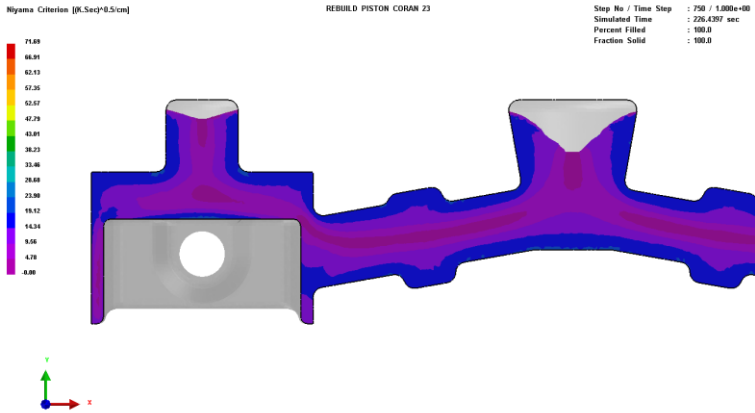
ProCAST

**Gambar 224.** Niyama criterion dalam dua *pattern per mold* pada variasi 675°C – 30°C.



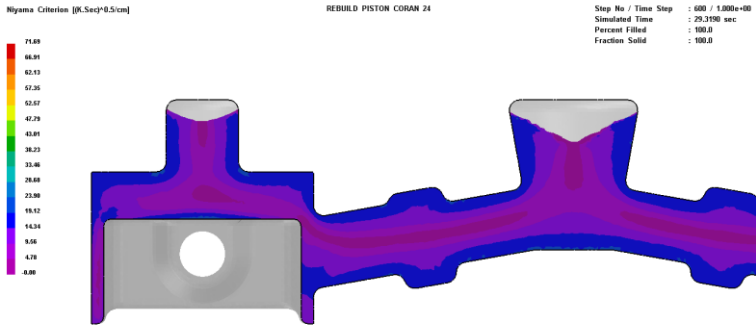
ProCAST

**Gambar 225.** Niyama criterion dalam dua pattern per mold pada variasi 675°C – 200°C.

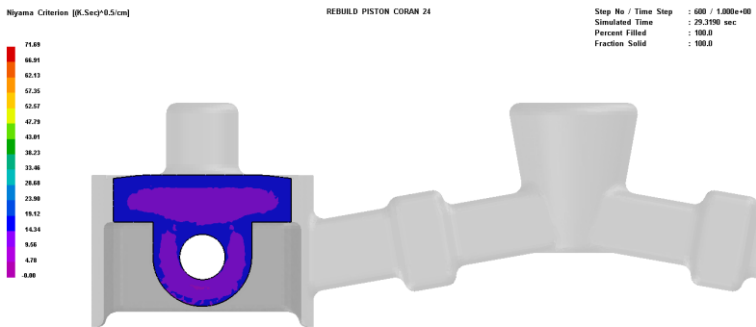


ProCAST

**Gambar 226.** Niyama criterion dalam dua *pattern per mold* pada variasi 675°C – 400°C.

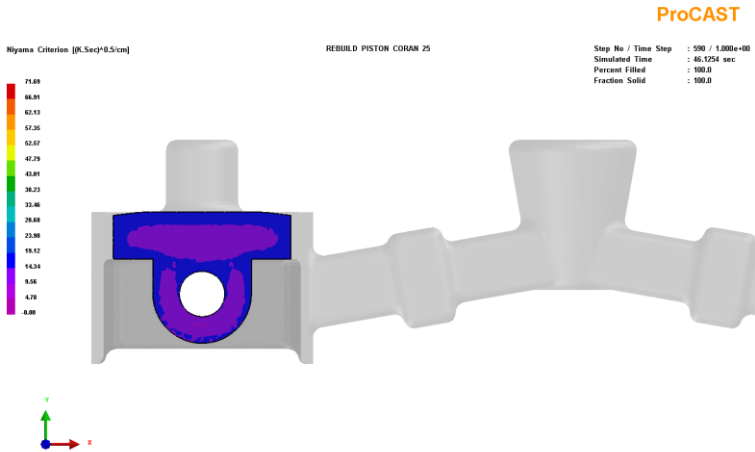
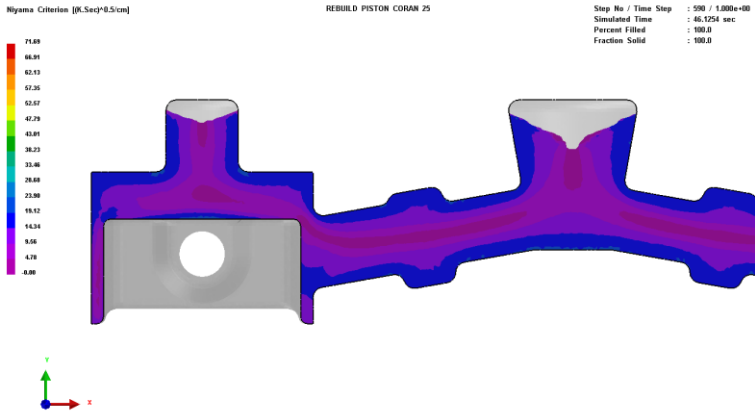


ProCAST

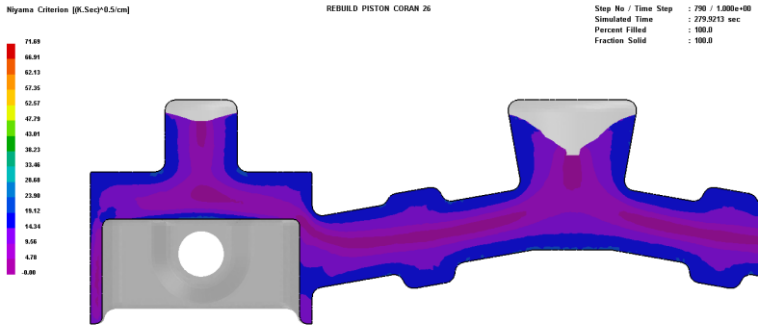


ProCAST

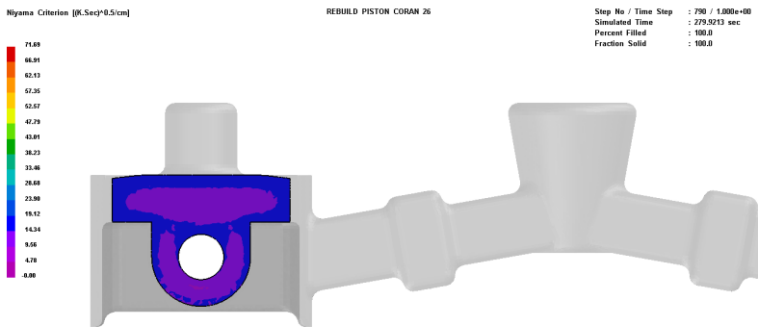
**Gambar 227.** Niyama criterion dalam dua pattern per mold pada variasi 725°C – 30°C.



**Gambar 228.** Niyama criterion dalam dua *pattern per mold* pada variasi 725°C – 200°C.



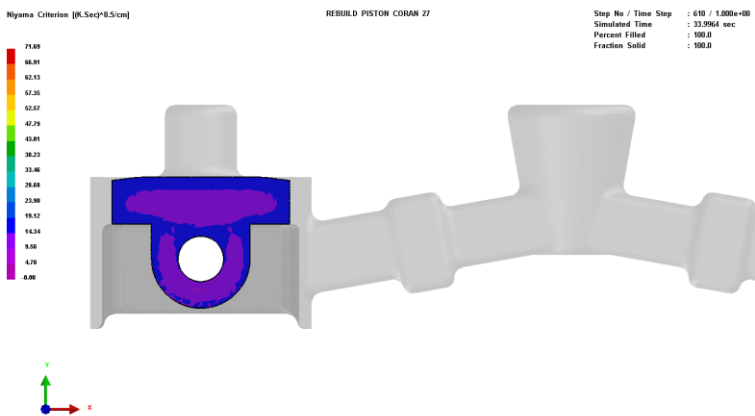
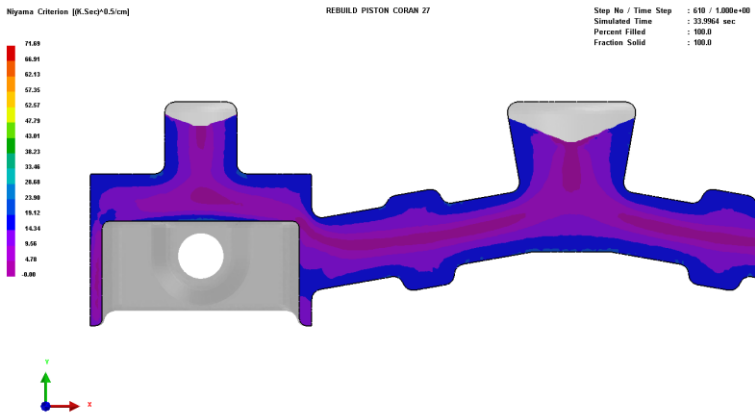
ProCAST



ProCAST

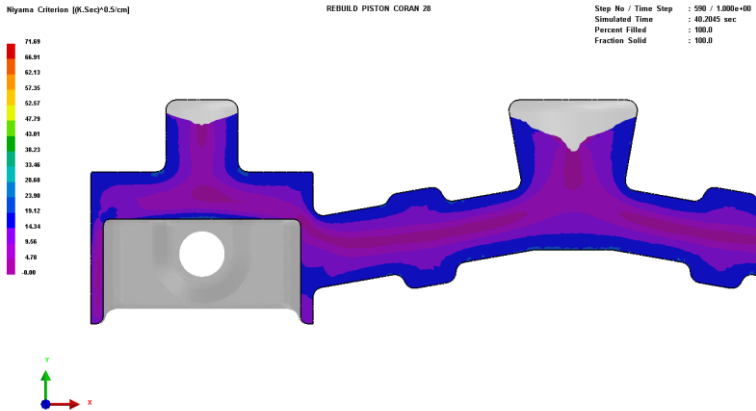
**Gambar 229.** Niyama criterion dalam dua pattern per mold pada variasi 725°C – 400°C.



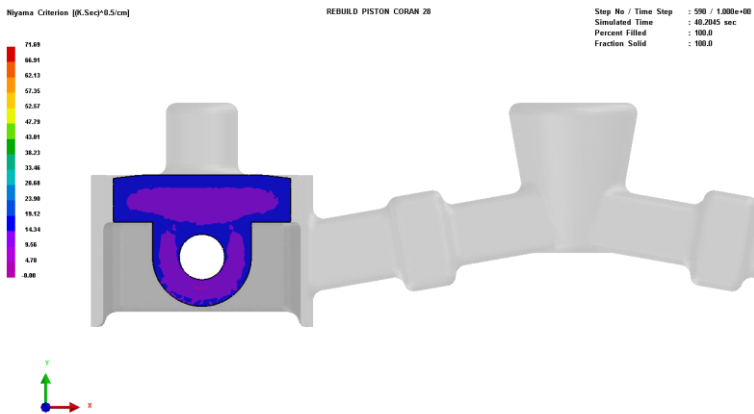


ProCAST

**Gambar 230.** Niyama criterion dalam dua *pattern per mold* pada variasi  $775^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ .

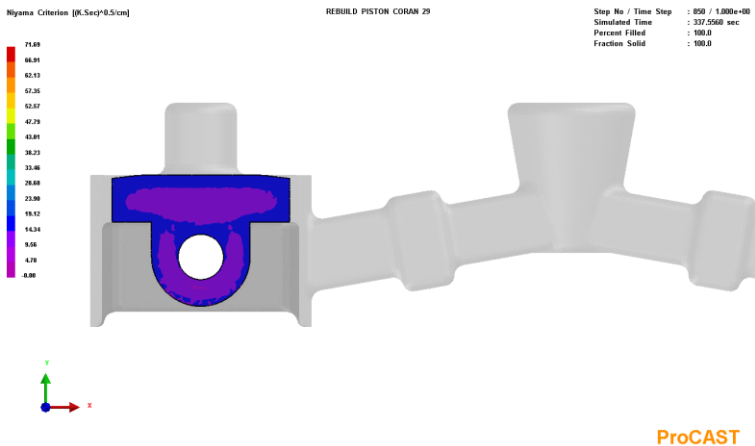
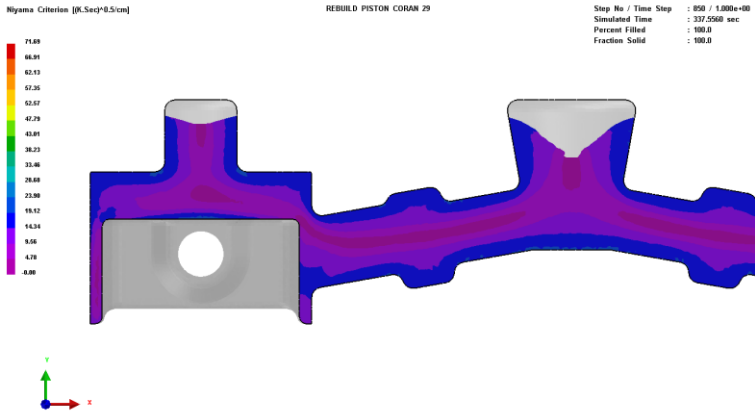


ProCAST



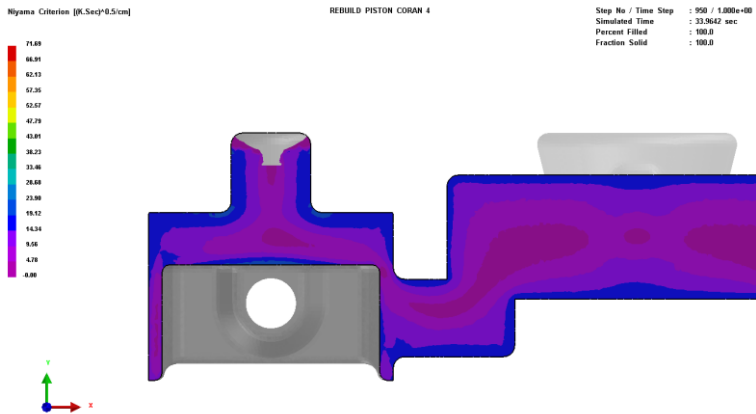
ProCAST

**Gambar 231.** Niyama criterion dalam dua pattern per mold pada variasi 775°C – 200°C.

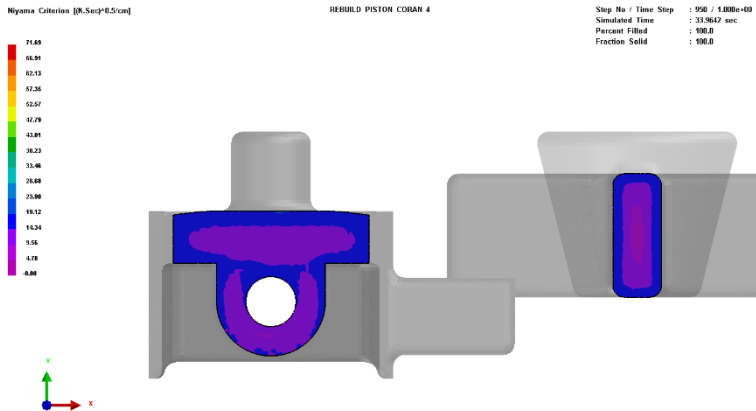


**Gambar 232.** Niyama criterion dalam dua *pattern per mold* pada variasi 775°C – 400°C.

c. Empat *pattern per mold*

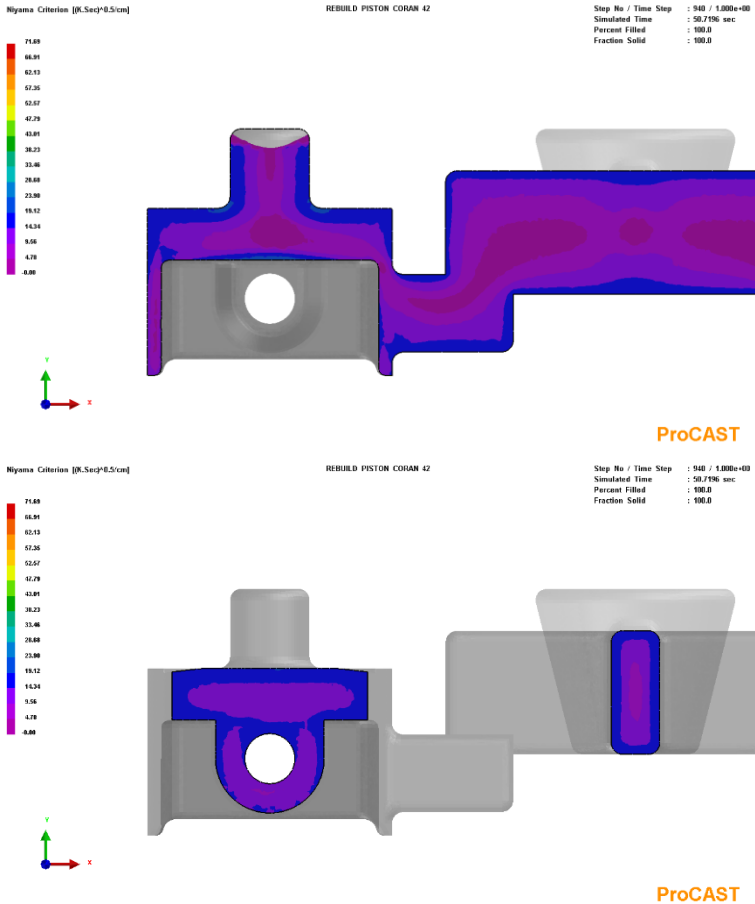


ProCAST

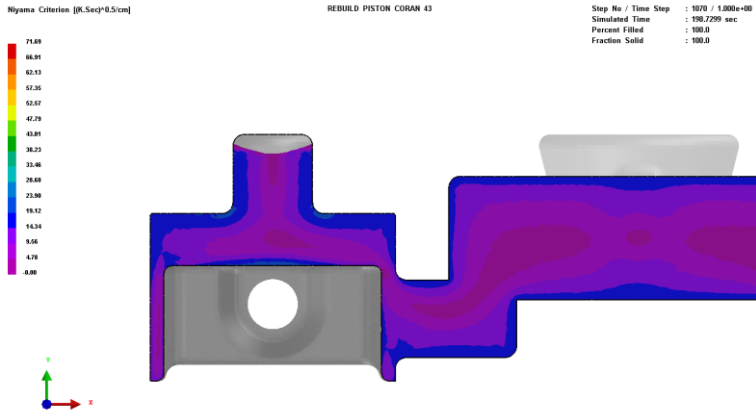


ProCAST

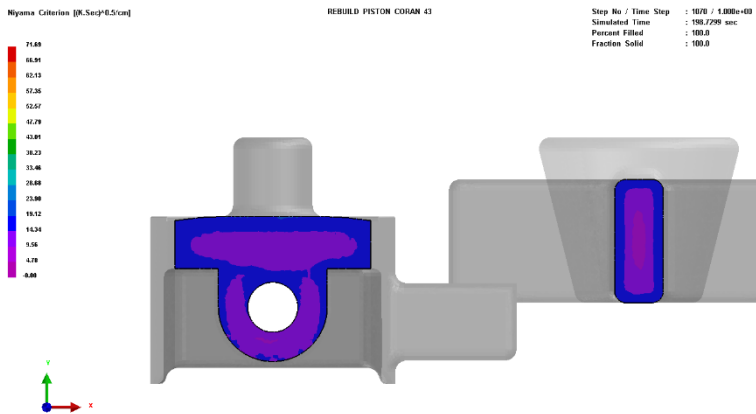
**Gambar 233.** Niyama criterion dalam empat *pattern per mold* pada variasi 675°C – 30°C.



**Gambar 234.** *Niyama criterion* dalam empat pattern per mold pada variasi 675°C – 200°C.

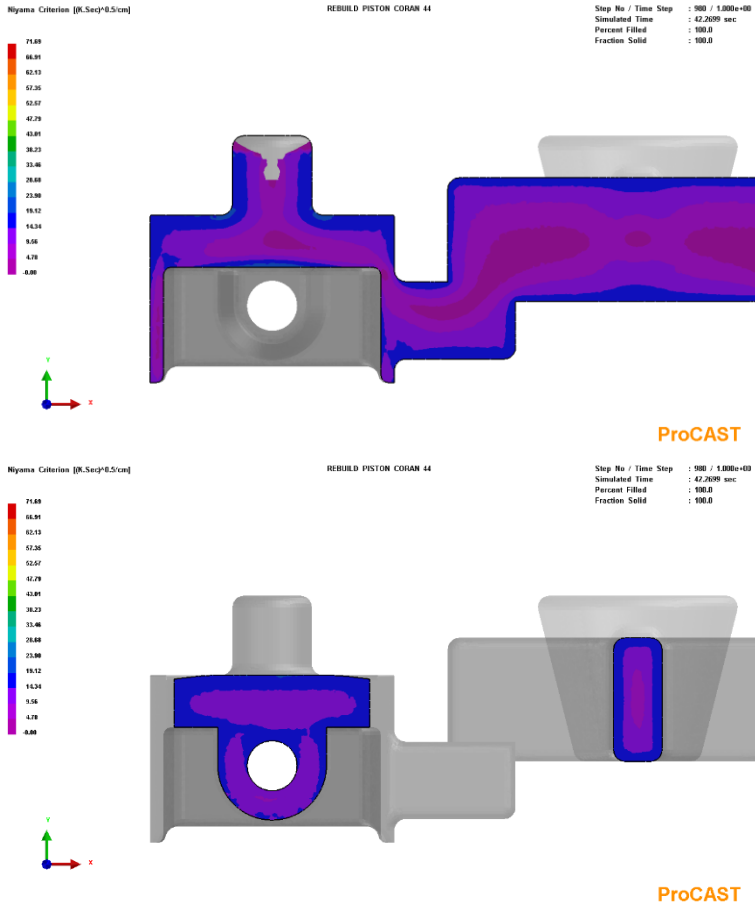


ProCAST

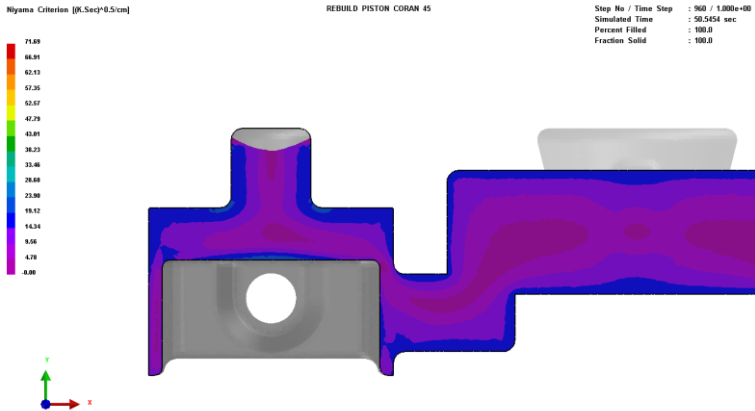


ProCAST

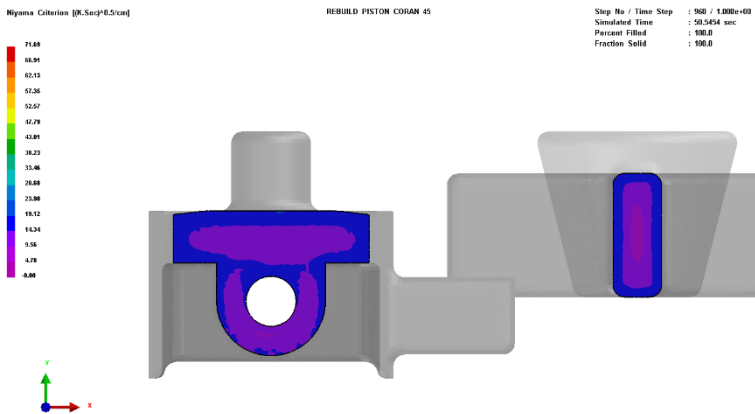
**Gambar 235.** Niyama criterion dalam empat pattern per mold pada variasi  $675^{\circ}\text{C} - 400^{\circ}\text{C}$ .



**Gambar 236.** Niyama criterion dalam empat pattern per mold pada variasi 725°C – 30°C.



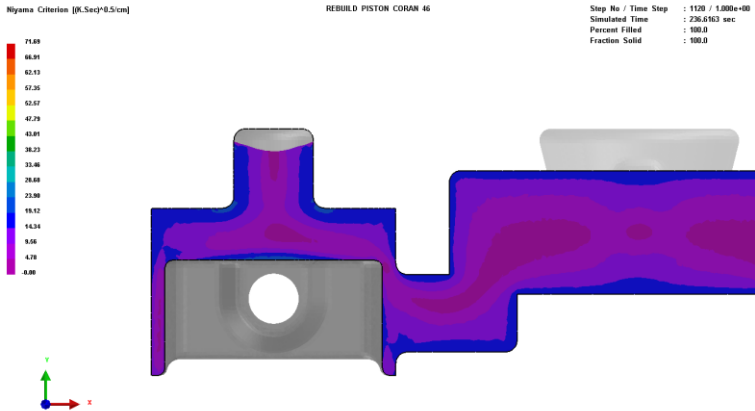
ProCAST



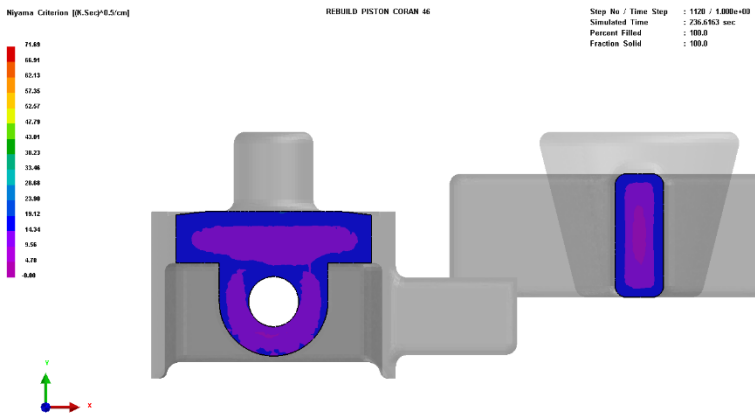
ProCAST

**Gambar 237.** Niyama criterion dalam empat pattern per mold pada variasi 725°C – 200°C.



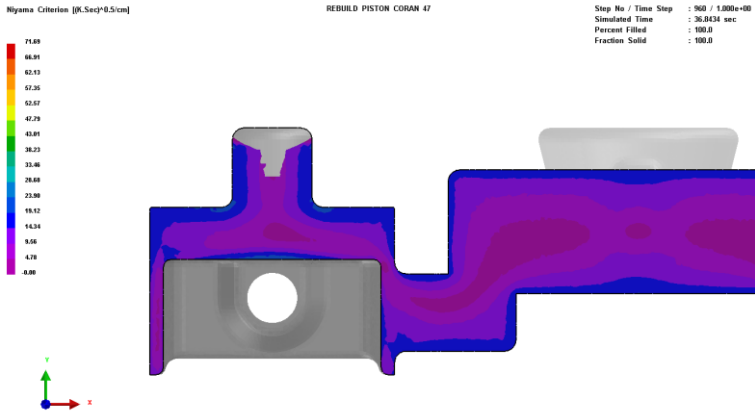


ProCAST

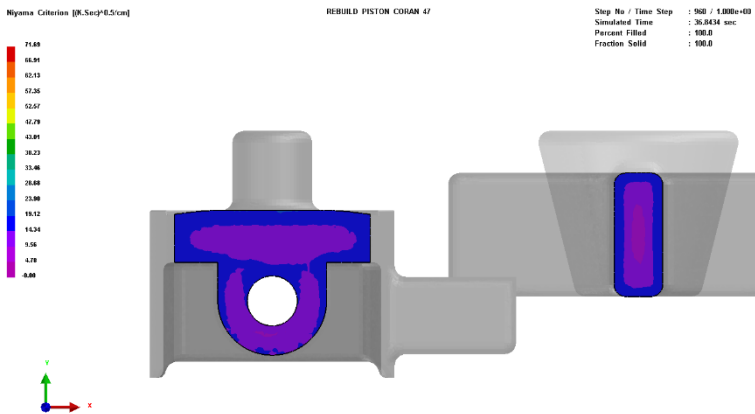


ProCAST

**Gambar 238.** *Niyama criterion* dalam empat pattern per mold pada variasi 725°C – 400°C.

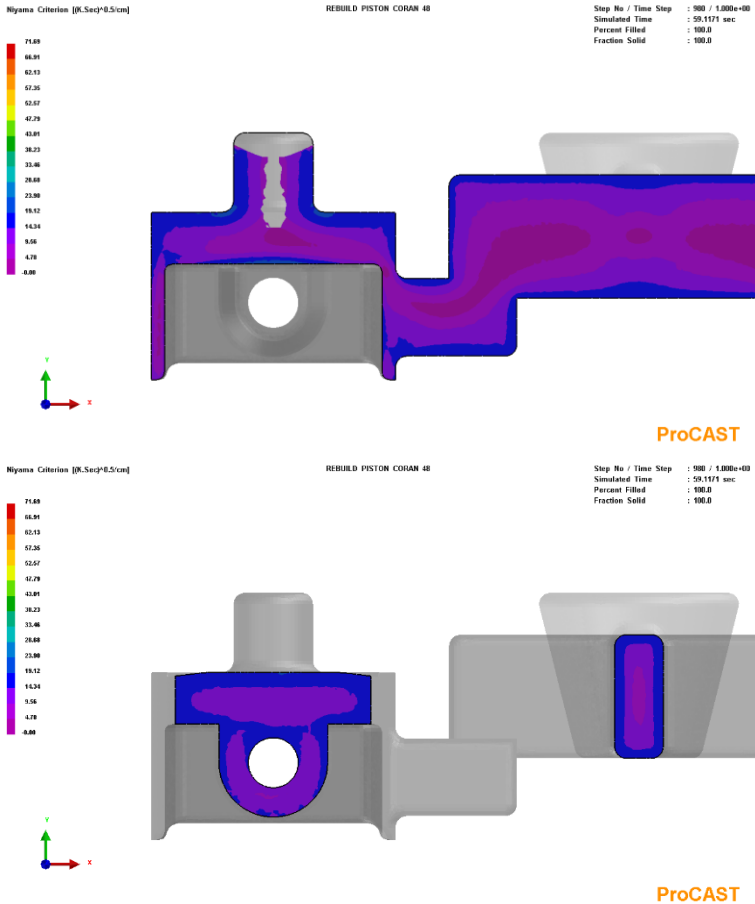


ProCAST

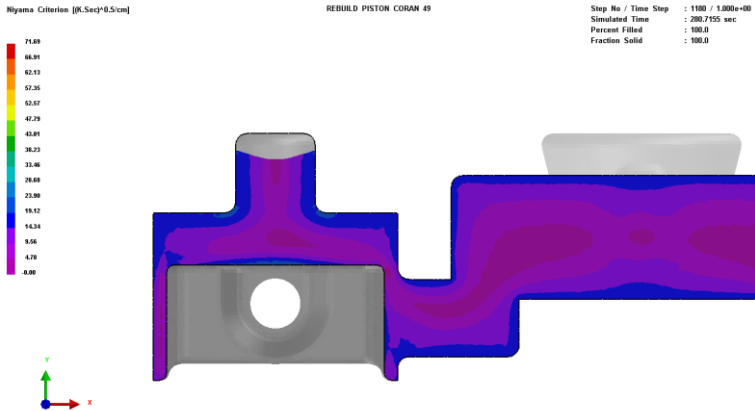


ProCAST

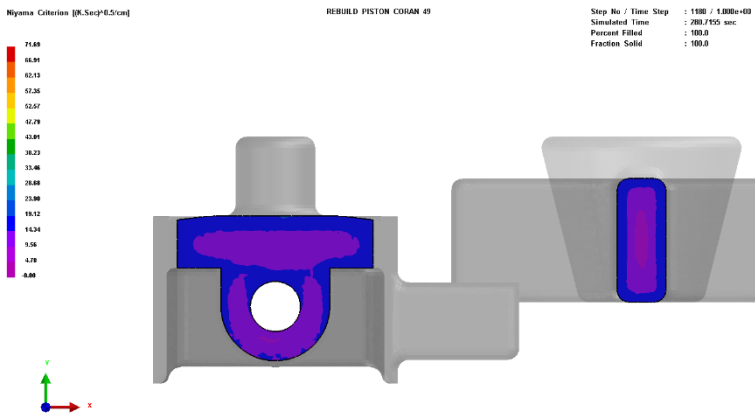
**Gambar 239.** Niyama criterion dalam empat pattern per mold pada variasi 775°C – 30°C.



**Gambar 240.** *Niyama criterion* dalam empat pattern per mold pada variasi 775°C – 200°C.



ProCAST



ProCAST

**Gambar 241.** Niyama criterion dalam empat pattern per mold pada variasi 775°C – 400°C.

## BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Mar'i Muchammad, lahir di Pekalongan, Jawa Tengah, 14 November 1997. Penulis merupakan putra keempat dari empat bersaudara dari pasangan Achmad Derun dan Indayah. Penulis telah menempuh pendidikan formal di Sekolah Dasar Negeri Benda 04, SMP Negeri 2 Pekalongan, dan SMA Negeri 1 Pekalongan. Selanjutnya, pada tahun 2016 penulis memulai studi pendidikan sarjana di Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Selama proses Pendidikan, penulis aktif dalam organisasi Lembaga Dakwah Jurusan Ash-haabul Kahfi sebagai Staff Humas di tahun pertama dan Kepala Departemen Event di tahun keduanya. Selain itu, penulis juga aktif dalam kegiatan riset dan kompetisi. Penulis sempat bergabung selama dua tahun dalam divisi *Body and Frame* ITS Team Sapungin. Di tahun ketiga, penulis sempat menimba ilmu selama satu bulan di Ciheras, Kabupaten Tasikmalaya, tepatnya di Research Site PT. Lentera Bumi Nusantara sebagai kewajiban melaksanakan Kerja Praktik. Penulis mengakiri masa studi S1-nya dengan mengambil bidang Metalurgi Manufaktur, khususnya pada Teknologi Pengecoran. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email [mmuchammad2021@gmail.com](mailto:mmuchammad2021@gmail.com).

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*