

ANALISIS SIMULASI TOLERANSI SUSUT DAN *INTERLOCK MOULD* PADA CACAT PENGECORAN *GLOBE VALVE*

Yegar Sahaduta Airlangga

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: yegar.22039@mhs.unesa.ac.id

Hanna Zakiyya

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: hannazakiyya@unesa.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan toleransi susut dan penerapan sistem *interlock mould* terhadap karakteristik cacat pengecoran pada pembuatan *globe valve* berukuran dua inci menggunakan material *brass* dan *bronze*. Penelitian ini merupakan penelitian simulasi numerik dengan validasi eksperimen terbatas, dilaksanakan melalui pemodelan *core*, *cavity*, sistem saluran, dan *riser* menggunakan perangkat lunak pemodelan tiga dimensi, kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak simulasi pengecoran berbasis metode elemen hingga. Empat skenario rancangan *mould* disimulasikan secara komparatif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai *fill time* pada keempat skenario hampir seragam (selisih $\pm 0,35\%$), sedangkan waktu pembekuan *Brass* tercatat 58–66% lebih cepat dibandingkan *Bronze* akibat perbedaan konduktivitas termal. Penambahan toleransi susut terbukti memberikan kontribusi paling signifikan dalam memperbaiki akurasi dimensi produk akhir, meski turut meningkatkan *shrinkage porosity* sebesar 4,99% pada *Bronze* dan 7,19% pada *Brass*, sementara sistem *interlock* lebih berperan sebagai fitur pendukung keandalan perakitan cetakan secara fisik dibandingkan sebagai faktor numerik dalam perhitungan simulasi. Validasi eksperimen menghasilkan selisih berat antara model CAD dan produk aktual hanya 0,03%, mengonfirmasi tingkat kesesuaian yang tinggi antara prediksi simulasi dan kondisi pengecoran aktual. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa optimasi toleransi susut yang dipadukan dengan sistem *interlock mould* dapat dijadikan dasar perancangan untuk menekan risiko cacat pengecoran serta meningkatkan kesiapan produk menuju tahap permesinan pada industri pengecoran *valve* berbasis *resin sand casting*.

Kata Kunci: *Globe valve*, *Interlock Mould*, Toleransi Susut

Abstract

This study analyzed the effects of shrinkage allowance and a mould interlock system on casting defect characteristics in manufacturing a two-inch globe valve using brass and bronze alloys. A numerical simulation approach with limited experimental validation was employed by modeling the core, cavity, gating system, and riser in three-dimensional CAD software and analyzing the casting process using finite element simulation. Four mould design scenarios were evaluated comparatively. The results showed that fill time remained nearly identical across all scenarios ($\pm 0.35\%$), indicating that shrinkage allowance had little effect on mould filling. Brass solidified 58–66% faster than Bronze due to its higher thermal conductivity. Shrinkage allowance significantly improved dimensional accuracy but increased shrinkage porosity by 4.99% in Bronze and 7.19% in Brass. The mould interlock system primarily enhanced physical assembly reliability rather than influencing numerical simulation results. Experimental validation showed only a 0.03% weight discrepancy between the CAD model and the actual casting, confirming high agreement between simulation and production. These findings demonstrate that combining shrinkage allowance with a mould interlock system provides an effective basis for reducing casting defects and improving machining readiness in resin sand casting of globe valves.

Keywords: *Globe valve*, *Mould Interlock*, *Shrinkage Allowance*

PENDAHULUAN

Produksi *globe valve* melalui metode *resin sand casting* menuntut ketepatan dimensi, keseragaman ketebalan dinding, serta integritas internal benda cor karena komponen ini berfungsi sebagai pengatur aliran fluida pada sistem perpipaan. Dalam praktik industri, proses ini masih menghadapi tiga kendala utama yang saling berkaitan, yaitu penyimpangan ukuran akibat kontraksi material, penyimpangan posisi *core* terhadap *cavity*, serta risiko kekeliruan perakitan *mould* pada geometri produk yang cenderung simetris kondisi yang berpotensi memicu ketebalan dinding tidak merata, bagian *undersize*, hingga beban kerja tambahan untuk perbaikan dan pemeriksaan ulang. Persoalan tersebut mencerminkan adanya

kesenjangan antara rancangan *mould* secara geometris dan respons aktual material selama tahap pengisian, pendinginan, dan pembekuan, mengingat penggunaan *core* berbahan pasir resin berpotensi menimbulkan rongga internal dengan kompleksitas tertentu pada hasil cor.

Lebih jauh, kekeliruan pada tahap perancangan *mould* dapat memicu rangkaian cacat berupa penyusutan, distorsi bentuk, penyimpangan ukuran, hingga kebocoran berupa lubang jarum, terutama pada produk berdimensi besar atau dengan ketebalan dinding yang tidak seragam. Logam cair mengalami penyusutan sepanjang fase cair, pembekuan, hingga padat, sehingga tanpa kompensasi toleransi susut yang memadai, ukuran akhir benda cor cenderung lebih kecil daripada rancangan awal. Sebaran temperatur yang tidak merata dan arah pembekuan yang kurang terarah juga

dapat memunculkan titik panas (*hotspot*) pemicu *shrinkage porosity*, sementara pergeseran posisi *core* terhadap *cavity* memperbesar peluang terjadinya perbedaan ketebalan dinding maupun distorsi saluran fluida (Mahomed, 2021). Atas dasar itu, penerapan sistem *interlock mould* seperti kaki pengunci dan cincin pelurus menjadi fitur rancangan penting untuk menjaga keselarasan posisi *core-cavity* selama perakitan *mould* dan penuangan logam cair.

Penetapan toleransi susut dan rancangan sistem *interlock* di lapangan masih banyak bertumpu pada pengalaman produksi serta evaluasi pasca proses, sehingga indikasi cacat baru terdeteksi setelah pengecoran selesai dan berpotensi menimbulkan pengulangan proses, tambahan waktu, serta biaya *rework* yang tidak sedikit. Kondisi ini menegaskan perlunya pendekatan prediktif untuk menilai kelayakan rancangan *mould* sebelum diterapkan pada produksi aktual. Simulasi pengecoran berbasis komputer hadir sebagai solusi untuk memprediksi perilaku logam cair mencakup pengisian *mould*, sebaran temperatur, durasi pembekuan, letak *hotspot*, kecenderungan *shrinkage porosity*, hingga penyimpangan geometri secara virtual, dan telah terbukti mampu meningkatkan mutu produk, menekan cacat, serta mempersingkat waktu dan biaya produksi (Kuyumcu & Haktanir, 2023; Manoj & Banwait, 2020a). Perkembangan simulasi numerik berbasis elemen hingga turut memperluas kemampuan prediksi fenomena aliran, termal, dan mekanis secara lebih menyeluruh, sedangkan pengendalian mutu dan perancangan sistem pengecoran yang tepat menjadi faktor krusial dalam menekan cacat sekaligus meningkatkan produktivitas (Chelladurai dkk., 2021; Oguntuyi dkk., 2023).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilandasi oleh empat persoalan pokok yang saling terkait: (1) cacat penyusutan akibat parameter kompensasi susut yang belum optimal; (2) ketergantungan pada metode konvensional atau *trial and error* yang menyebabkan kegagalan produk baru terdeteksi pasca pengecoran, sehingga diperlukan simulasi prediktif yang memadukan analisis *fluid* dan *thermal*; (3) potensi kegagalan perakitan berupa *mismatch* akibat kelalaian manusia, yang menuntut sistem pengunci pada desain cetakan; serta (4) minimnya kajian komparatif atas karakteristik fisik, rentang pembekuan, dan konduktivitas termal antara *Brass C46400* dan *Bronze C89844*, khususnya terkait dampaknya terhadap *shrinkage porosity* di area *riser* (Bekele dkk., 2022). Kesenjangan ini menunjukkan bahwa optimasi rancangan *mould* perlu ditinjau tidak hanya dari aspek geometris, tetapi juga respons material terhadap fenomena termal dan mekanis selama pembekuan.

Merujuk pada rumusan persoalan tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik *fluid behavior* (distribusi aliran dan *fill time*), *thermal behavior* (pembekuan dan porositas berbasis *database* material aktual hasil uji spektrometri), serta *mechanical behavior* (korelasi fenomena termal dengan *displacement* dan deviasi dimensi) pada rancangan *mould globe valve*, sekaligus menguji efektivitas sistem *interlock* dalam mereduksi *mismatch* dan memvalidasi akurasi simulasi *ProCAST* melalui pendekatan eksperimental (Chen dkk., 2022b). Secara teoretis, penelitian ini diharapkan

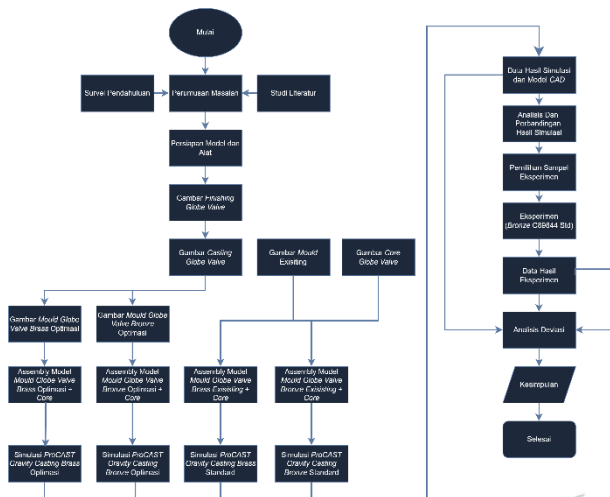
memperkaya referensi keilmuan perancangan *mould* dan penerapan simulasi numerik berbasis *ProCAST* pada industri *valve*; secara praktis, penelitian ini menyajikan alternatif solusi optimasi sistem *interlock* dan toleransi susut untuk material *brass* dan *bronze* guna meningkatkan efisiensi produksi serta mutu produk, sekaligus menjadi rujukan pengembangan penelitian perancangan *mould* berbasis simulasi numerik di masa mendatang.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian simulasi numerik dengan validasi eksperimen terbatas, yang dilaksanakan melalui pemodelan dan simulasi proses pengecoran *resin sand casting* berbasis *Finite Element Method (FEM)* menggunakan perangkat lunak *ProCAST*. Tahap simulasi dilaksanakan pada lingkungan kerja akademik dan komputasi, sedangkan tahap validasi eksperimen terbatas dilaksanakan di PT. *Ever Age Valves Metals* melalui satu kali proses pengecoran aktual *globe valve* berbahan *bronze C89844* menggunakan *mould* standar perusahaan, dengan rentang pelaksanaan penelitian selama empat bulan mulai Februari hingga Juni.

Sampel penelitian berupa *globe valve* berukuran 2 inci dengan dua variasi material, yaitu *Brass C46400 mod* dan *Bronze C89844 mod* yang komposisinya mengacu pada hasil uji spektrometri di industri, dipadukan dengan dua variasi rancangan *mould*, yaitu *mould* standar dan *mould* optimasi dengan penambahan *shrinkage allowance* sebesar 1,012 untuk *brass* dan 1,008 untuk *bronze* serta penerapan sistem *interlock* berupa kaki cetakan dan cincin pelurus, sehingga tersusun empat skenario penelitian. Variabel terikat meliputi volume dan sebaran *shrinkage porosity*, *core shift*, *filling time*, serta keseragaman ketebalan dinding, sedangkan variabel bebas berupa variasi desain *mould* dan jenis material, dengan variabel kontrol berupa konfigurasi sistem saluran, geometri *core*, temperatur dan waktu penuangan, ukuran elemen *mesh*, serta parameter kondisi batas yang diseragamkan pada seluruh skenario mengikuti kaidah penelitian kuantitatif komparatif (Sugiyono, 2022).

Prosedur penelitian diawali dengan studi literatur dan observasi lapangan pada proses produksi *globe valve*, dilanjutkan pemodelan geometri dua dimensi menggunakan *AutoCAD* serta pemodelan tiga dimensi menggunakan *SolidWorks*. Model tersebut kemudian diimpor ke dalam *ProCAST* untuk tahap *meshing*, penetapan sifat termofisika material, penentuan kondisi batas (*boundary condition*), *interface heat transfer coefficient*, serta parameter proses penuangan sesuai kondisi aktual industri, mengingat kemampuan *coupling* analisis termal dan aliran fluida pada perangkat lunak berbasis FEM memungkinkan deteksi dini potensi cacat pengecoran sebelum uji coba fisik dilakukan (Chen dkk., 2022a).



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Simulasi dijalankan pada empat skenario dengan parameter proses yang identik agar perbedaan hasil semata-mata dipengaruhi oleh variasi rancangan *mould*. Data yang dihimpun disusun mengikuti urutan karakteristik yang dianalisis pada bagian hasil, yaitu karakteristik *fluid behavior* berupa *filling time* dan *last filling region*; karakteristik *thermal behavior* berupa *solidification time*, lokasi *hotspot*, dan *shrinkage porosity*; serta karakteristik *mechanical behavior* berupa *displacement* dan deviasi dimensi pasca simulasi.

Tahap validasi eksperimen dilakukan pada sampel *mould bronze* standar sebagai *baseline* representatif karena kemiripannya dengan kondisi cetakan aktual di industri. Pengukuran dimensi produk dilakukan menggunakan *vernier caliper* dengan tingkat ketelitian 0,02 mm, pengukuran ketebalan dinding menggunakan *thickness gauge* dengan tingkat ketelitian 0,05 mm, dan pengukuran massa menggunakan timbangan digital dengan tingkat 0,1 gram, kemudian hasilnya dibandingkan terhadap massa dan dimensi teoretis model CAD.

Seluruh data simulasi dan eksperimen dianalisis menggunakan teknik deskriptif kuantitatif komparatif, yaitu disajikan dalam bentuk tabel, grafik, serta gambar kontur simulasi untuk membandingkan kecenderungan hasil antar skenario tanpa pengujian statistik inferensial. Hasil perbandingan tersebut diinterpretasikan berdasarkan teori pembekuan, perpindahan panas, dan aliran logam cair guna menentukan rancangan *mould* yang paling efektif dalam menekan *shrinkage porosity*, menjaga keseragaman ketebalan dinding, dan meningkatkan akurasi dimensi produk *globe valve*. Dengan alur tersebut, capaian setiap tahapan metode secara konsisten diarahkan untuk menjawab rumusan masalah penelitian sekaligus menyediakan dasar argumentasi kuantitatif bagi pembahasan hasil pada bagian berikutnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil simulasi numerik *ProCAST* serta validasi eksperimen terbatas rancangan *mould globe valve* 2 inci pada *Brass C46400 mod* dan *Bronze C89844 mod* melalui empat skenario kombinasi *mould* standar-optimal, disusun mengikuti unsur *scientific*

merit: fenomena (*what*), mekanisme (*why*), implikasi (*what else*). Uji independensi *mesh* dilakukan lebih dahulu pada skenario paling kompleks hingga hasil stabil (Patil & Jeyakarthykayan, 2018), disajikan pada Tabel 1.

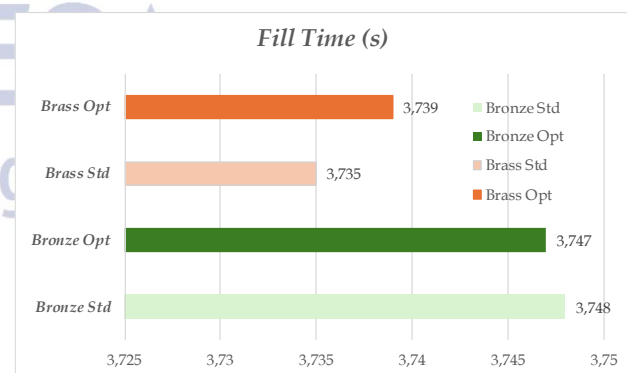
Tabel 1. Hasil Uji Independensi *Mesh*

Ukuran Elemen (mm)	Elemen 2D (<i>tri mesh</i>)	Elemen Volume (<i>tetra mesh</i>)	<i>Solidification Time</i> (s)	<i>Fill time</i> (s)	<i>Displacement</i> (cm)	<i>Shrinkage Porosity</i> (%)
2 mm	211.874	5.612.472	148,93	3,729	0,0425	35,83
3 mm	94.526	1.734.927	147,72	3,747	0,0436	30,92
4 mm	52.228	735.966	143,90	3,739	0,0444	26,12
5 mm	34.854	425.900	137,94	3,765	0,0422	23,39

Perubahan *fill time* antara *mesh* 2 mm dan 3 mm hanya 0,48%, sedangkan *total displacement* berubah 0,26%, sehingga *mesh* 3 mm dipilih karena memberikan keseimbangan optimal antara akurasi dan efisiensi komputasi. Konfigurasi ini diterapkan konsisten pada seluruh skenario untuk menjaga keterbandingan hasil.

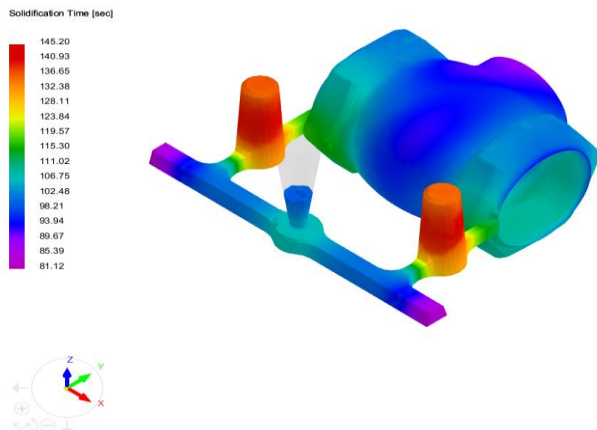
Karakteristik *Fluid Behavior*: Waktu Pengisian dan Pola Aliran

Analisis *fluid behavior* menjawab pengaruh variasi desain *mould* terhadap *fill time* dan *last filling region*. Keempat skenario menunjukkan nilai *fill time* pada rentang 3,735–3,748 detik, dengan selisih antar-skenario hanya sekitar 0,35%, mengindikasikan bahwa perubahan volume *cavity* akibat toleransi susut masih berada dalam kapasitas sistem saluran, sehingga debit aliran logam cair tetap terjaga. Temuan ini konsisten dengan pandangan bahwa waktu pengisian lebih ditentukan oleh desain *gating system*, tekanan hidrostatik, dan laju penuangan dibandingkan perubahan kecil pada dimensi *cavity* atau jenis material (Campbell, 2015).

Gambar 2. Grafik Rekapitulasi *Fill Time*

Untuk memperkuat bukti visual atas temuan tersebut, kontur *solidification time* hasil simulasi *ProCAST* pada kedua material sebagaimana divisualisasikan melalui gradasi warna dari fase cair (merah) menuju fase padat penuh (biru) menunjukkan bahwa zona yang mengalami *last filling* pada badan *valve* tengah juga menjadi zona dengan durasi pembekuan terlama pada kedua material,

ditandai dengan warna kontur yang bertahan pada rentang temperatur *mushy zone* paling lama dibandingkan area lain.



Gambar 3. Kontur Solidification Time

Kesesuaian spasial antara *last filling region* dan zona *solidification time* tertinggi ini membuktikan secara visual bahwa area yang terisi paling akhir juga mengalami retensi panas paling lama, sehingga rentan menjadi lokasi akumulasi cacat penyusutan apabila tidak diimbangi sistem *riser* yang memadai (Ravi, 2005). Pola kontur pada *Bronze* menunjukkan gradasi warna yang lebih landai dan area *mushy zone* yang lebih luas dibandingkan *Brass*, mencerminkan rentang pembekuan *Bronze* yang jauh lebih lebar.

Tidak ditemukan indikasi *misrun*, *cold shut*, atau turbulensi berlebih pada seluruh skenario, menegaskan bahwa desain sistem saluran mampu menghasilkan aliran logam stabil hingga rongga cetakan terisi penuh sebelum pembekuan awal terjadi. Implikasi praktisnya, pengembangan rancangan lanjutan tidak perlu difokuskan pada modifikasi sistem saluran, melainkan pada optimasi aspek termal seperti pengendalian pembekuan dan desain *riser*.

Karakteristik Thermal Behavior: Analisis Komparatif Brass dan Bronze

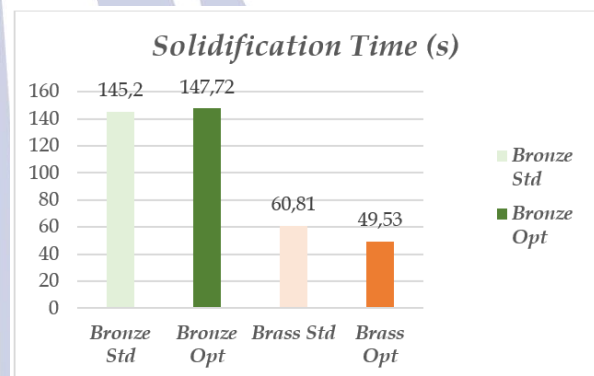
Subbab ini membandingkan laju pembekuan, lokasi *hotspot*, dan volume *shrinkage porosity* antara *Brass* C46400 dan *Bronze* C89844, sebagaimana dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi Parameter Simulasi Empat Skenario Mould

Parameter Simulasi	Bronze Standar	Bronze Optimal	Brass Standar	Brass Optimal
Fill time (s)	3,748	3,747	3,735	3,739
Solidification time (s)	145,20	147,72	60,81	49,53
Porosity (%)	29,43	30,90	24,35	26,10
Hotspot (s)	42,57	42,68	37,64	37,82
Displacement (mm)	0,418	0,436	1,066	1,024

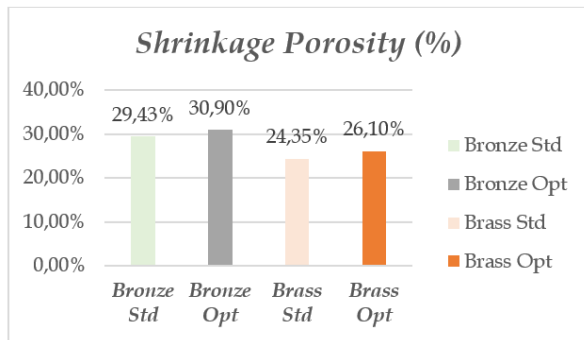
Waktu pembekuan *Brass* jauh lebih singkat dibandingkan *Bronze* sekitar 58–66% lebih cepat karena *Brass* memiliki rentang pembekuan sempit (888–899°C) dan konduktivitas termal lebih tinggi ($\pm 116 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) (ASTM International, 2020), sedangkan *Bronze* memiliki rentang pembekuan lebih lebar (853–1010°C) dan konduktivitas termal lebih rendah ($\pm 80,9 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) (ASTM International, 2008).

Pada *Bronze*, penambahan toleransi susut memperpanjang *solidification time* sebesar 1,74% (dari 145,20 s menjadi 147,72 s), sejalan dengan bertambahnya volume logam cair yang harus membeku. Sebaliknya, pada *brass* penambahan toleransi susut justru mempersingkat *solidification time* sebesar 18,55% (dari 60,81 s menjadi 49,53 s), mengindikasikan bahwa pada material dengan konduktivitas termal tinggi, perubahan rasio luas permukaan terhadap volume akibat pembesaran skala geometri lebih dominan memengaruhi laju pelepasan panas dibandingkan penambahan volume logam itu sendiri.



Gambar 4. Grafik Rekapitulasi Solidification Time

Pada seluruh skenario, lokasi *hotspot* tetap terkonsentrasi pada bagian yang terhubung langsung dengan *riser* dengan durasi *hotspot* yang relatif stabil, hanya bergeser 0,26% pada *Bronze* dan 0,48% pada *Brass* antara varian standar dan optimasi menandakan bahwa desain sistem saluran dan *riser* telah berhasil mengarahkan pola pembekuan terarah (*directional solidification*) sehingga area modulus pembekuan besar menjadi lokasi potensial cacat penyusutan, bukan pada bagian fungsional produk (Ravi, 2005). Secara mekanistik, pertumbuhan dendrit pada tahap akhir pembekuan memutus jalur pasokan logam cair menuju bagian yang membeku paling akhir, sehingga terbentuk mikro porositas terlokalisasi.



Gambar 5. Grafik Rekapitulasi Shrinkage

Nilai *shrinkage porosity* meningkat pada kedua material setelah penambahan toleransi susut: pada *Bronze* meningkat 4,99% (dari 29,43% menjadi 30,90%), sedangkan pada *Brass* meningkat lebih tajam yaitu 7,19% (dari 24,35% menjadi 26,10%). Peningkatan ini mengindikasikan bahwa perluasan geometri akibat faktor skala menambah kebutuhan *feeding* selama pembekuan, sementara kapasitas sistem *riser* belum disesuaikan secara proporsional rongga porositas membesar sejalan dengan bertambahnya volume material yang harus disuplai *riser*, namun peningkatan volume *riser* tidak dilakukan secara setara. Meskipun demikian, seluruh porositas tetap terkonsentrasi pada *riser* dan sebagian sistem saluran, tidak berpindah ke area fungsional seperti dinding *body valve* atau *seat*. Implikasinya, optimasi berikutnya idealnya tidak hanya berfokus pada faktor skala dimensi, melainkan juga penyesuaian proporsi volume *riser* terhadap volume produk.

Karakteristik Mechanical Behavior: Displacement dan Akurasi Dimensi

Subbab ini membahas pengaruh fenomena termal dan kontraksi material terhadap *displacement* serta deviasi dimensi. Tabel 3 menyajikan perbandingan dimensi antara *mould* standar dan optimasi.

Tabel 3. Komparasi Dimensi Rancangan Mould

Lokasi Pengukuran	Mould Standar	Mould Optimasi Bronze (1,008)	Mould Optimasi Brass (1,012)
Hex Valve	69,2 mm	69,75 mm	70,03 mm
Neck Valve	ø51 mm	ø51,41 mm	ø51,61 mm
Panjang Valve	102 mm	102,82 mm	103,22 mm
Lambung Valve	77,6 mm	78,22 mm	78,53 mm

Dimensi *cavity* pada *mould* optimasi diperbesar proporsional sesuai faktor skala masing-masing material. Nilai *displacement* tertinggi terjadi pada *brass*, yaitu 1,066 mm (standar) menurun 3,94% menjadi 1,024 mm (optimasi), sedangkan *bronze* menunjukkan nilai jauh lebih rendah, yaitu 0,418 mm meningkat 4,31% menjadi 0,436 mm. Perbedaan ini dipengaruhi koefisien muai termal *brass* yang lebih tinggi ($\pm 20,4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) dibandingkan *bronze* ($\pm 17,3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), serta perbedaan modulus

elastisitas (± 103 GPa pada *Brass* dan ± 90 GPa pada *bronze*).

Displacement maksimum pada kedua material umumnya terjadi pada sistem saluran, sedangkan deformasi pada *body valve* relatif kecil dan merata, sehingga perubahan dominan pada produk bersifat penyusutan dimensi menyeluruh (*dimensional shrinkage*) dibandingkan distorsi bentuk. Tabel 4 menyajikan deviasi dimensi model pasca simulasi terhadap target ukuran rancangan.

Tabel 4. Deviasi Dimensi Model Pasca Simulasi terhadap Target Ukuran

Variasi Mould	Hex (69,2 mm)	Neck (51 mm)	Panjang (101 mm)	Tinggi (82,4 mm)
Brass Standar	-0,42	-0,41	-0,99	-0,83
Bronze Standar	-0,15	-0,21	-0,33	-0,24
Brass Optimasi	0,27	0,17	0,42	0,03
Bronze Optimasi	0,40	0,19	0,57	0,38

Mengacu pada toleransi dimensi linear untuk rentang ukuran nominal 30–120 mm sebesar $\pm 0,3$ mm sesuai standar kelas menengah (*medium*) pada ISO 2768-1 (International Organization for Standardization, 1989), Tabel 4 memperlihatkan bahwa *mould brass* standar mengalami deviasi negatif terbesar akibat belum adanya kompensasi susut, sedangkan *mould bronze* standar menunjukkan deviasi lebih kecil meski dimensi panjang *valve* tetap sedikit melampaui batas toleransi. Setelah penambahan toleransi susut, deviasi pada kedua material bergeser dari negatif menuju positif, namun kompensasi tersebut belum merata karena dimensi panjang *valve* pada kedua material optimasi masih berada di luar batas toleransi. Pola ini menunjukkan adanya perilaku anisotropik pada respons kontraksi-ekspansi dimensi, yaitu penyimpangan yang tidak seragam antar-arah sumbu geometri.

Deviasi pada arah dimensi memanjang (sejajar sumbu aliran logam menuju *riser*, yakni arah pembekuan terarah) secara konsisten lebih besar dibandingkan deviasi pada arah radial seperti *hex* dan *neck* (tegak lurus arah aliran utama). Hal ini terjadi karena arah memanjang bertepatan dengan arah gradien termal dominan menuju *riser*, sehingga mengalami kontraksi volumetrik kumulatif yang lebih besar akibat pasokan logam cair tambahan (*feeding*) yang harus menempuh jarak alir lebih panjang sebelum pembekuan tuntas. Sebaliknya, arah radial memiliki jalur pembekuan yang lebih pendek dan simetris terhadap sumbu *core*, sehingga kontraksinya lebih terkendali. Dengan demikian, faktor skala kompensasi susut yang digunakan saat ini yang bersifat isotropik atau seragam ke segala arah perlu dikalibrasi ulang secara anisotropik, yaitu dengan faktor skala berbeda untuk arah memanjang (searah pembekuan terarah) dibandingkan arah radial, disesuaikan

pula dengan ketebalan lokal dan karakteristik kontraksi spesifik masing-masing material.

Efektivitas Sistem *Interlock Mould*

Subbab ini menjawab efektivitas sistem pengunci (*interlock system*) dalam mempermudah ketelitian perakitan serta menyelaraskan posisi *core* terhadap *cavity*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa fitur *interlock* kaki pengunci dan cincin pelurus tidak memberikan perubahan numerik signifikan terhadap parameter fluiditas, termal, maupun deformasi, karena asumsi simulasi mendefinisikan *mould* sebagai komponen kaku (*rigid body*), sehingga interaksi mekanis antara *core* dan *cavity* belum sepenuhnya terepresentasikan. Meskipun demikian, secara konseptual fitur geometris ini tetap berperan penting menjaga orientasi dan dukungan posisi *core* terhadap *cavity*, karena ketidaktepatan geometri, orientasi, maupun dukungan pada *core* terbukti menjadi salah satu penyebab utama *core shift* pada proses pengecoran (Manoj & Banwait, 2020b). Dengan demikian, fungsi mekanis nyata *interlock* lebih relevan dinilai sebagai fitur keandalan manufaktur aktual untuk mencegah *mismatch* di lapangan dibandingkan sebagai parameter numerik simulasi, dan tetap layak dipertahankan sebagai standar rancangan sebagai kontrol fisik terhadap *human error* selama perakitan cetakan.

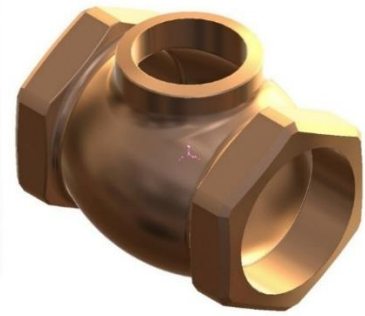
Validasi Eksperimen terhadap Hasil Simulasi

Subbab ini menjawab tingkat kesesuaian antara hasil simulasi *ProCAST* dan hasil pengecoran eksperimental secara visual dan dimensi, dilakukan pada skenario *mould bronze* standar karena deviasi dimensinya paling mendekati kondisi cetakan aktual di industri.



Gambar 6. Hasil Pengecoran *Globe valve* 2 Inchi

Pengamatan visual (Gambar 6) tidak menemukan indikasi *shrinkage* maupun *core shift* pada permukaan luar produk, sehingga evaluasi lanjutan dilakukan melalui pengukuran berat dan dimensi. Nilai massa teoretis diverifikasi lebih dahulu melalui fitur *mass properties* pada perangkat lunak CAD sebelum produk hasil pengecoran aktual ditimbang secara fisik.



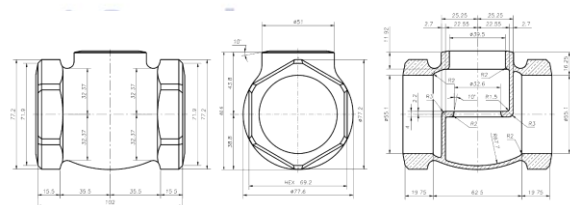
Gambar 7. Pengukuran Berat Benda Cor Menggunakan *SolidWorks*

Nilai massa teoretis sebesar 1.114,70 gram yang diperoleh melalui perhitungan volume model tiga dimensi terhadap densitas material *bronze* C89844 pada Gambar 6 selanjutnya dijadikan acuan pembanding utama pada tahap validasi berat (Campbell, 2015). Data hasil penimbangan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Data Berat Benda Coran *Globe valve Bronze*

Parameter	Nilai
Density	8,58 g/cm ³
Volume	129.918,32 mm ³
Massa Teoretis	1.114,70 gram
Massa Aktual	1.115,00 gram

Selisih antara massa aktual dan massa teoretis hanya 0,30 gram, atau setara eror validasi sebesar 0,03% nilai yang sangat kecil dan menunjukkan tingkat kesesuaian sangat tinggi antara model CAD dan produk hasil pengecoran aktual pada skala makro. Namun, ketika densitas aktual hasil spektrometri digunakan sebagai acuan, terdapat selisih eror sekitar 1,13% yang berpotensi mengindikasikan keberadaan mikro porositas, mengingat pembuktiannya umumnya memerlukan pemeriksaan lanjutan berupa radiografi atau metalografi (Lupulescu dkk., 2016). Sebelum data hasil ukur ditampilkan, perlu ditinjau lebih dahulu gambar teknik produk yang memuat titik-titik kritis acuan pemeriksaan.



Gambar 8. Dimensi Produk *Casting*

Rujukan titik ukur pada Gambar 8 memastikan verifikasi difokuskan pada bagian fungsional *valve* yang paling menentukan kesesuaian rakitan dan performa penyambungan pipa (Surdia & Chijiwa, 1980), sebagaimana dirangkum pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan Dimensi Aktual dan Target pada Titik Kritis Produk Hasil Eksperimen

Titik Ukur	Target (mm)	Aktual (mm)	Selisih (mm)	Persentase Penyimpangan
Bidang Hex Body Valve	69,2	69,2	0,0	0,00%
Neck Valve	51,0	50,9	0,1	0,20%
Lubang Topi (Bonnet)	39,5	39,2	0,3	0,76%
Lubang Ulir Valve	55,1	54,8	0,3	0,54%

Seluruh titik ukur berbentuk lubang atau rongga mengalami penyusutan dimensi akibat kontraksi logam selama pembekuan, dengan selisih terbesar (0,76%) pada diameter lubang topi valve, sejalan dengan kecenderungan umum bahwa fitur internal lebih rentan menyusut dibandingkan fitur eksternal karena ruang muainya dibatasi oleh keberadaan *core* pasir di sekitarnya (Ravi, 2005).



Gambar 9. Pengukuran Potongan Body Valve

Gambar 9 menunjukkan hasil pengukuran ketebalan dinding pada penampang *body valve* menggunakan *thickness gauge*, yaitu 3,40 mm pada sisi kiri dan 3,35 mm pada sisi kanan, selisih hanya 0,05 mm konsisten dengan hasil simulasi *displacement* pada area lambung valve yang menunjukkan deformasi serupa, sehingga mengindikasikan posisi *core* tetap stabil selama perakitan dan penuangan tanpa pergeseran signifikan. Secara keseluruhan, hasil validasi eksperimen membuktikan bahwa pendekatan simulasi berbasis *FEM* menggunakan *ProCAST* mampu memprediksi perilaku pengisian, pembekuan, dan deformasi geometri dengan tingkat akurasi tinggi untuk kebutuhan evaluasi rancangan *mould* pada skala makro, sekalipun keterbatasan tetap ada dalam menangkap fenomena mikro porositas secara langsung.

Secara ringkas, penambahan toleransi susut memberikan kontribusi paling signifikan terhadap akurasi dimensi produk, karakteristik termal material menjadi faktor dominan penentu laju pembekuan dan lokasi *hotspot*, sistem *interlock* lebih berperan sebagai fitur keandalan manufaktur lapangan dibandingkan faktor numerik simulasi, dan validasi eksperimen (error berat 0,03%) mengonfirmasi akurasi model pada skala makro. Temuan ini menegaskan bahwa optimasi rancangan *mould* pada produk *globe valve* berbasis *resin sand casting* perlu dipandang sebagai persoalan multiaspek, sehingga strategi ke depan idealnya mengintegrasikan faktor skala dimensi yang dikalibrasi secara anisotropik, proporsi sistem saluran-riser, serta keselarasan *core-cavity* secara menyeluruh.

Simpulan

Penelitian ini menegaskan bahwa variasi rancangan *mould*, baik melalui penambahan toleransi susut maupun penerapan sistem *interlock*, memberikan pengaruh yang berbeda-beda terhadap tiap aspek perilaku pengecoran *globe valve* berbasis *resin sand casting*. Pada aspek *fluid behavior*, konfigurasi sistem saluran yang dipertahankan seragam terbukti mampu menghasilkan pola pengisian rongga cetak yang lancar dan menyeluruh tanpa indikasi cacat aliran, sehingga variasi toleransi susut maupun jenis material tidak mengubah kestabilan proses pengisian. Pada aspek *thermal behavior*, perbedaan karakteristik intrinsik antara paduan *brass* dan *bronze*, terutama rentang pembekuan dan konduktivitas termal, terbukti menjadi faktor dominan yang menentukan laju pendinginan serta lokasi penumpukan panas, sementara mekanisme pengarahan pembekuan menuju sistem penambah tetap efektif menekan cacat porositas penyusutan pada kedua material.

Pada aspek *mechanical behavior*, fenomena kontraksi termal selama pendinginan terbukti sebagai penyebab utama deviasi geometri produk, dan penerapan faktor kompensasi susut berhasil mendekatkan akurasi dimensi akhir terhadap ukuran rancangan, sedangkan sistem *interlock* lebih berperan sebagai fitur keandalan perakitan fisik dibandingkan faktor yang berpengaruh terhadap perhitungan numerik simulasi akibat asumsi kekakuan cetakan. Selanjutnya, hasil validasi eksperimen membuktikan bahwa pendekatan simulasi berbasis elemen hingga mampu memprediksi perilaku pengisian, pembekuan, dan perubahan dimensi dengan tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap kondisi pengecoran aktual di industri, meskipun keterbatasan tetap ditemukan dalam mengungkap fenomena mikro porositas secara langsung. Dengan demikian, optimasi rancangan *mould* pada produksi *globe valve* perlu dipandang sebagai persoalan multiaspek yang mengintegrasikan faktor skala dimensi, karakteristik termal material, serta fitur keselarasan *core* dan *cavity* secara menyeluruh agar target akurasi dimensi dapat tercapai tanpa mengorbankan kualitas internal maupun efisiensi proses produksi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada dosen pembimbing atas bimbingan dan arahan yang diberikan sepanjang proses penelitian, kepada pihak PT. *Ever Age Valves Metals* atas kesempatan pelaksanaan validasi eksperimen, serta kepada keluarga dan rekan sejawat atas dukungan moral yang diberikan sehingga laporan tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM International. (2008). Designation: B 584-08a Standard Specification for Copper Alloy Sand Castings for General Applications 1.
- ASTM International. (2020). Standard Specification for Naval Brass Rod, Bar, and Shapes (ASTM B21/B21M-20).
- Bekele, B. T., Bhaskaran, J., Dufera Tolcha, S., & Gelaw, M. (2022). Simulation and experimental analysis of re-design the faulty position of the riser to minimize shrinkage porosity defect in sand cast sprocket gear. *Materials Today: Proceedings*, 59, 598–604.
- Campbell, J. (2015). Complete casting handbook: metal casting processes, metallurgy, techniques and design. Dalam Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01548-1>
- Chelladurai, C., Mohan, N. S., Hariharashayee, D., Manikandan, S., & Sivaperumal, P. (2021). Analyzing the casting defects in small scale casting industry. *Materials Today: Proceedings*, 37, 386–394.
- Chen, Z., Li, Y., Zhao, F., Li, S., & Zhang, J. (2022a). Progress in numerical simulation of casting process. *Measurement and Control*, 55(5–6), 257–264.
- Chen, Z., Li, Y., Zhao, F., Li, S., & Zhang, J. (2022b). Progress in numerical simulation of casting process. *International Journal of Measurement and Control*. <https://doi.org/10.1177/00202940221102656>
- International Organization for Standardization. (1989). ISO 2768-1: General tolerances — Part 1: Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications. ISO.
- Kuyumcu, A. M., & Haktanir, Y. (2023). Design and optimization of runner and gating systems, in high-pressure casting and sand casting, for an aluminum alloy valve cover. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 12(4), 154–164. <https://doi.org/10.18245/ijaet.1200972>
- Lupulescu, A., Henry, S., Marken, K., & Lampman, S. (2016). Science of Casting and Solidification: ASM Handbook Contributions—Honoring Professor Doru Michael Stefanescu. Dalam L. Nastac, B. Liu, H. Fredriksson, J. Lacaze, C.-P. Hong, A. V Catalina, A. Buhrig-Polaczek, C. Monroe, A. S. Sabau, R. E. L. Ruxanda, A. Luo, S. Sen, & A. Diószegi (Ed.), Springer International Publishing (hlm. 3–8).
- Mahomed, N. (2021). Shrinkage Porosity in Steel Sand Castings: Formation, Classification and Inspection. Dalam *Casting Processes and Modelling of Metallic Materials*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94392>
- Manoj, K., & Banwait, S. S. (2020a). Defect Analysis and Process Parameter Optimisation in Sand Casting. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(6), 390–395. <https://doi.org/10.35940/ijeat.F1533.089620>
- Manoj, K., & Banwait, S. S. (2020b). Defect Analysis and Process Parameter Optimisation in Sand Casting. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 9(9), 2249–8958. <https://doi.org/10.35940/ijeat.F1533.089620>
- Oguntuyi, S. D., Nyembwe, K., Shongwe, M. B., & Mojisola, T. (2023). Challenges and recent progress on the application of rapid sand casting for part production: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(3–4), 891–906.
- Patil, H., & Jeyakarhikeyan, P. V. (2018). Mesh convergence study and estimation of discretization error of hub in clutch disc with integration of ANSYS. *IOP conference series: materials science and engineering*, 402(1), 12065.
- Ravi, B. (2005). Metal Casting: Computer-Aided Design And Analysis. Dalam PHI Learning.
- Sugiyono, P. (2022). Metodologi penelitian kuantitatif kualitatif dan R&D. Alfabeta, Bandung, 62, 70.
- Surdia, T., & Chijjiwa, K. (1980). Teknik pengecoran logam. Dalam PT. Pradnya Paramita (hlm. 284).