

Analisis Efek Temperatur *Pouring* Dan Temperatur *Preheat Flask* Terhadap Kekerasan Dan Porositas Perhiasan Cincin Logam Sterling Silver

Mavindra Ramadhani, Rochman Rochiem, dan Vira Yudha Tama
Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
e-mail: mavindra@its.ac.id

Rapid investment casting merupakan teknik produksi yang menggabungkan teknologi manufaktur aditif dan teknologi pengecoran yang memiliki tujuan dapat membuat objek dengan bentuk kompleks dengan biaya produksi yang relatif rendah, serta fleksibilitas dalam membuat bentuk objek berbeda tanpa harus menambah biaya tambahan.. Logam yang populer digunakan dalam industri perhiasan merupakan logam paduan dari jenis perak, emas, atau platinum. Perak digunakan karena sifatnya yang duktil serta sifat permukaan yang sangat mengkilap. Sterling Silver adalah logam paduan dengan minimum unsur 92,5% silver, dan 6-4 % cuprat. Pada penelitian ini logam sterling silver di tuang kedalam flask menggunakan mesin cetakan centrifugal. Flask yang berisi cetakan investasi sebelumnya di bakar di dalam electric furnace serta di pre-heat. Sterling silver di tuang dalam variasi temperatur 950°C, 1000°C, dan 1050°C serta variasi untuk temperatur pre-heat flask adalah 550°C, dan 600°C. Dilakukan pengujian kekerasan, pengujian visual, pengujian metallografi, dan pengujian Archimedes pada sampel hasil pengecoran. Variasi temperatur yang optimal untuk menghasilkan porositas gas terendah adalah temperatur preheat flask 600 °C dengan temperatur pouring 1050 °C memiliki nilai porositas gas 0,55%. Variasi temperatur dengan hasil nilai kekerasan tertinggi adalah temperatur preheat flask 550 °C dengan temperatur pouring 950 °C memiliki nilai kekerasan 138,3 VHN. Variasi jenis cacat paling kecil diamati pada variasi preheat flask dengan dua jenis cacat makro yaitu sandy surface, dan hot tearing.

Kata Kunci—Sterling silver, investment casting, cacat pengecoran, kekerasan, porositas

I. PENDAHULUAN

Investment Casting merupakan salah satu metode pembuatan perhiasan modern yang digunakan secara luas. Dengan metode ini perhiasan dapat diproduksi dengan volume yang cukup signifikan dengan kualitas yang konsisten. *Investment Casting* atau disebut juga dengan *lost wax casting* berkonsep menggunakan pola lilin (*wax*) untuk membuat cetakan cor dengan bahan investasi refraktori, pola lilin ini kemudian di lelehkan meninggalkan rongga di dalam cetakan *investment casting*. Metode manufaktur aditif mulai digunakan dalam proses *investment casting* sebagai pengganti metode konvensional *wax injection*. Metode konvensional *investment casting* memiliki kekurangan dalam segi alat untuk pembuatan pola lilin yang mahal dan waktu produksi yang lama. Dengan kemampuan untuk memproduksi pola lilin secara langsung teknologi aditif dapat menghilangkan kebutuhan alat berat serta memperpendek waktu pembentukan pola lilin. Hal ini menjadi alasan utama

aplikasi dari integrasi metode manufaktur aditif ke dalam *investment casting*. [1][2]

Dalam proses pengecoran terdapat berbagai parameter proses yang mempengaruhi hasil cor suatu logam. Setiap proses parameter akan memiliki tingkat pengaruh yang berbeda. Selain itu proses parameter berbeda dari jenis logam dan metode pengecoran yang digunakan. Temperatur pouring dan temperatur *preheat flask/mould* merupakan salah satu proses parameter yang ada dalam proses *investment casting*. Temperatur pouring, dan *preheat temperatur* memiliki efek terhadap *surface roughness*, dan *porosity* pada *investment casting*. [3] Jörg Fischer-Bühner sudah melakukan studi terhadap temperatur *preheat flask* terhadap perilaku solidifikasi sterling silver namun dalam penelitiannya belum melibatkan variasi temperatur *pouring*. Dari penelitiannya ditemukan adanya perubahan kualitas cincin dari penambahan temperatur *preheat flask* dan perbedaan bentuk geometri yang digunakan. [4] Maka perlu dilakukan juga eksperimentasi kombinasi temperatur *pouring* dan temperatur *preheat flask* untuk mengetahui efeknya terhadap hasil cor logam paduan silver sterling.

Pengecoran adalah proses pemadatan dimana bahan cair dituangkan ke dalam cetakan dan kemudian dibiarkan membeku menjadi bentuk akhir yang diinginkan. Banyak fitur struktural yang pada akhirnya mengontrol properti produk selama pemadatan. Banyak cacat pengecoran, seperti *gas porosity*, dan *shrinkage porosity* merupakan fenomena solidifikasi yang dapat dieliminasi dengan mengontrol proses solidifikasi tersebut. Temperatur *pouring* adalah temperatur dari logam cair saat pertama kali memasuki cetakan. *Superheat* adalah perbedaan antara temperatur *pouring* dan temperatur pembekuan bahan. Waktu dari awal penuangan sampai akhir pemadatan dikenal sebagai *total solidification time*. Solidifikasi adalah proses dua tahap, nukleasi dan pertumbuhan, dan ini penting untuk mengontrol kedua tahap ini. Nukleasi terjadi ketika terbentuk partikel padat stabil dari dalam logam cair. Ketika suatu bahan berada pada suhu di bawah titik lelehnya, keadaan padat memiliki energi yang lebih rendah daripada cairan. Saat solidifikasi terjadi terdapat energi internal yang dilepaskan. Agar nukleasi terjadi, harus ada pengurangan atau pelepasan energi. Akibatnya, nukleasi umumnya dimulai pada suhu tertentu di bawah titik leleh. Tahap kedua dalam proses pemadatan adalah pertumbuhan, yang terjadi sebagai panas diekstraksi dari bahan cair. Arah, laju, dan jenis pertumbuhan dapat dikendalikan dengan cara

di mana panas ini dilepaskan. Solidifikasi terarah, dimana proses pepadatan menyapu secara terus menerus melalui material. Kontrol terjadinya proses ini bisa digunakan untuk memastikan produksi *casting* yang baik. Logam yang masih cair di sisi lain badan cor dapat mengalir ke cetakan untuk terus mengkompensasi penyusutan logam yang terjadi karena perubahan materi dari cair menjadi padat.[5]

II. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini digunakan metode 3D *printing* untuk sebagai metode utama membuat *wax tree investment casting* Objek yang ingin dibuat terlebih dahulu di preparasi oleh perangkat lunak *slicer open source lychee slicer* dari desain 3D menjadi bentuk format data yang dapat dipahami oleh mesin, selain itu objek dapat di beri *support* untuk memudahkan mesin mencetak objek Mesin 3D *printer* yang digunakan adalah *creality LD-002H* dengan menggunakan resin *FH-1200-DLP* Pola cetakan yang sudah di print kemudian di lepaskan dari *print bed* dan dibersihkan dengan *isopropyl*. Setelah itu dilakukan pemotongan *support* dari pola cetakan dan di sinari oven UV selama 15 menit untuk pengerasan lebih lanjut. Dalam proses membuat cetakan investasi digunakan bubuk investasi dengan komposisi 40% *gypsum* dan 60% pasir silika. Bubuk investasi dicampur dengan air menggunakan rasio berat bubuk terhadap volume air 1000g/400ml *Flask* yang digunakan berukuran 3"x 4". Setelah itu *flask* dibiarkan mengalami proses *setting* selama 2 jam. Setelah mengeras *flask* kemudian dipanggang dalam *furnace* mengikuti siklus *Burnout*. Pada saat tahap *preheat* temperatur diubah sesuai dengan nilai yang ingin diuji yaitu 550°C dan 600°C

Metode *centrifuge centrifugal casting* digunakan sebagai metode produksi spesimen. Proses peleburan dan penuangan akan berlangsung di dalam satu mesin. Sebelum dilakukan peleburan diperlukan perhitungan berat logam sterling silver yang dibutuhkan untuk cukup mengisi cetakan. Perhitungan digunakan metode *wax-to-metal ratio* pada persamaan 1

$$M_{cor} = M_{wp} \times \rho_L \tag{1}$$

Dimana M_{cor} massa benda cor (g) M_{wp} adalah massa *wax pattern* (g) dan ρ_L adalah densitas logam (g/cm^3).Setelah didapat berat logam target digunakan *mass balance* untuk mendapatkan berat logam masing masing master alloy AG 108 M dan *fine silver* untuk mendapatkan sterling silver dengan persen unsur yang diinginkan

$$M_{bahan} = \frac{\%Target\ Unsur}{\%Unsur\ pada\ bahan} \times M_{cor} \tag{2}$$

Dimana M_{bahan} adalah massa bahan baku, target unsur adalah target presentasi unsur dalam benda cor, dan unsur pada bahan adalah presentase unsur pada bahan baku Setelah diperhitungkan berat logam bahan yang dibutuhkan didapat rasio *Fine silver:Master alloy* adalah 12,3:1. Bahan yang sudah ditimbang kemudian dimasukkan dalam *crucible centrifuge casting* Gambar 1 menunjukkan desain alat. Alat *centrifuge casting* yang digunakan memiliki kecepatan 275 rpm yang memberikan gaya sebesar 10 G's (10 kali gravitasi normal). *Flask* diambil dari *furnance* dan ditempatkan pada mesin sebelum proses peleburan. Logam dilebur menggunakan gas *torch* propana. Logam dilebur hingga

temperatur 1000°C sesuai dengan *technical sheet* AG108M dan disesuaikan pada temperatur *pouring* yang diinginkan,. Temperatur *pouring* yang digunakan adalah 950°C,1000°C, dan 1050°C Selanjutnya mesin diputar selama 1 menit. *Flask* kemudian dibiarkan mendingin selama 1 menit setelah *pouring* dan kemudian dilepaskan dari mesin. *Flask* dibiarkan mendingin selama 15 menit pada temperatur ruang lalu di *quench* ke dalam air



Gambar 1. Skema Alat *centrifugal casting* bagian *flask* ditunjukkan oleh nomor 1 *crucible* pada nomor 2 dan pemat pada nomor 3.

Gambar benda yang akan di cor dapat dilihat pada Gambar 2. Dari perhitungan didapat diameter *Feed sprue* sebesar 2mm dan *main sprue* sebesar 5mm



Gambar 2. Desain cincin dan bentuk *sprue tree* yang digunakan

Setelah spesimen diproduksi dilakukan pengujian kekerasan *Vickers*, obeservasi visual, pengujian densitas Archimedes, Metalografi, pengujian ICP-OES dan pengujian XRD

III. HASIL

A. Observasi Visual

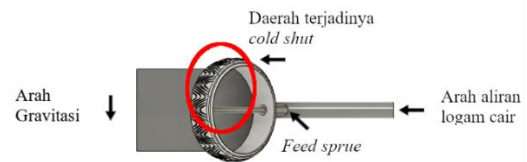
Hasil observasi visual ditemukan 3 jenis *macro defect*. *Sandy surface* merupakan *defect* pada permukaan benda cor yang membentuk permukaan seperti bentuk permukaan pasir. Defek ini khususnya pada *investment casting* terjadi akibat impresi berlebih dari logam metal ke permukaan gipsium atau *investment*[6]. Dalam penelitian ini terjadi akibat gaya dorong *centrifugal casting* yang kuat. Dapat terlihat dalam semua variabel temperatur *pouring* dan *preheat temperatur flask* terdapat jenis defek *sandy surface*, sehingga jenis cacat ini tidak terlibat akibat perubahan variasi temperatur.

Cacat *hot tear* muncul dalam hasil observasi visual pada variasi spesimen CF550-CT950, CF600-CT1000, dan CF600-CT1050. Cacat *hot tears* terlihat sebagai retakan pada badan cincin yang terletak berlawanan arah dari posisi *feed sprue*. *Hot tear* terjadi dikarenakan penyusutan atau *shrinkage* dari

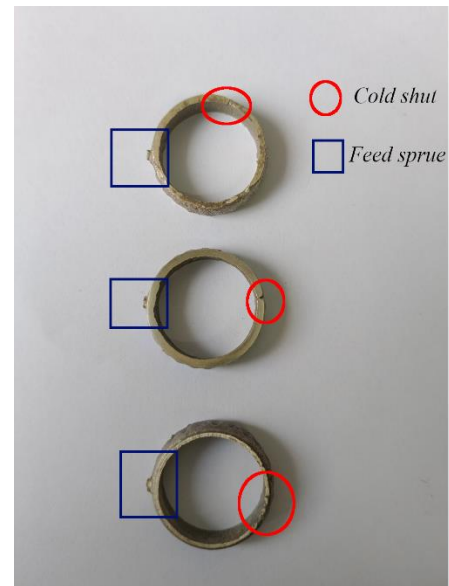
logam pada perubahan fasa dari *liquid* menjadi *solid*, dan impuritas dalam logam paduan yang mengakibatkan segregasi yang menyebabkan *inhomogenitas* karakteristik mekanik[7]. Pada penelitian ini dua penyebab terjadinya *hot tearing* muncul pada kasus yang berbeda. Pada Spesimen CF600-CT1000 dan spesimen CF600-CT1050 terjadi *hot tear* akibat variasi temperatur *pouring*, hal ini ditunjukkan dengan absensi *hot tear* pada spesimen CF600-CT950 dan semakin melebarnya *hot tearing* yang terjadi pada spesimen CF600-CT1050 dari pada CF600-CT1000. Letak dari *hot tear* yaitu pada ujung berlawanan *feed sprue* menunjukkan waktu solidifikasi daerah tersebut jauh lebih lama dari daerah sekitarnya. Ketika daerah sekitar sudah mengalami solidifikasi terlebih dahulu maka suplai logam cair tidak dapat teralirkan menciptakan *shrinkage* pada daerah tersebut. Temperatur *preheat flask* yang menaik dapat memindahkan arah solidifikasi pada tubuh benda *casting*. *Hot tearing* yang terjadi pada kedua spesimen ini tidak hanya terjadi akibat penyusutan logam metal namun diperkuat dengan residual stress dari penyusutan gipsium. Fenomena ini dijelaskan oleh Thanawat Phetrattanarangi et al.[8] bahwa investasi gipsium mengalami ekspansi ketika berada pada temperatur tinggi yang diakibatkan oleh kristal *quartz* di dalam investasi yang mengembang ketika berada pada temperatur tinggi. Ketika logam cair melakukan kontak dengan dinding gipsium terjadi ekspansi termal. Kombinasi dari penyusutan logam dan ekspansi termal gipsium menghasilkan stress pada daerah lokal. *Hot tear* akan lebih mudah terjadi pada temperatur *preheat flask* yang lebih tinggi dan temperatur *pouring* yang tinggi. Untuk spesimen CF550-CT950 terjadi *hot tear* akibat berlebihnya unsur logam yang memiliki titik leleh rendah, dalam penelitian ini adalah unsur *zinc*. Dengan penambahannya elemen *zinc* seperti yang dilakukan oleh Daniele Maggiani et al[7] menunjukkan penambahan kemungkinan terjadinya *hot tearing*.

Pada hasil ICP OES pada Tabel 1 menunjukkan bahwa spesimen CF550-CT950 memiliki konsentrasi *zinc* paling tinggi. Konstraksi *zinc* yang tinggi ini diakibatkan oleh beberapa penyebab. Pada spesimen CF550-CT950 digunakan 50% scrap dari hasil *casting* sebelumnya. Untuk mempersiapkan logam scrap tersebut dilakukan 2 kali remelting untuk menghilangkan *slag* dan pengotor lainnya. Dikarenakan Cu memiliki titik leleh yang lebih tinggi dari Ag dapat diasumsikan lebih banyak Ag yang hilang pada proses melting akibat penguapan dan perlekatan pada dinding *crucible* sehingga konten unsur pada spesimen CF550-CT950 bergeser secara signifikan akibat hilangnya Ag sedangkan *Zinc* yang berlebih diakibatkan oleh melelehnya kembali lapisan *Zinc* Oksida pada permukaan *crucible* dan *slag* akibat peleburan berulang dan bantuan dari *Boric Acid*.

Cacat *cold shut* dari hasil observasi visual terjadi pada spesimen dengan temperatur *preheat* 600°C. berdasarkan letak terjadinya *cold shut* pada pinggiran cincin paling luar dapat diasumsikan bahwa logam yang mengalir pada bagian atas cincin sedikit lebih terlambat dari bagian bawah cincin. Ini dikarenakan *cold shut* terjadi ketika dua aliran logam berbeda bertemu dalam keadaan yang berbeda. Salah satu aliran tersebut sudah mengalami solidifikasi lebih dahulu dari aliran lainnya. Dalam kasus ini perbedaan waktu aliran diakibatkan posisi flask dan pola cetakan di dalamnya. Posisi pola pada flask ketika dicetak dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4 Menunjukkan letak *coldshut* specimen terhadap *feed sprue*



Gambar 3. Posisi Patern dan Letak Cold shut



Gambar 4. Letak Coldshut Pada Spesimen

Dari hal tersebut dapat diasumsikan aliran logam akan mengalir terlebih dahulu memenuhi pola bagian bawah kemudian memenuhi bagian atas, namun bila hal ini terjadi seharusnya kedua variasi temperatur *preheat flask* akan menghasilkan cacat *cold shut*. Efek dari variasi temperatur *preheat flask* berpengaruh pada waktu solidifikasi logam cair. Seperti yang ditunjukkan oleh Fischer-Bühner semakin rendah temperatur *mould* semakin cepat waktu solidifikasi. Pada variasi temperatur *preheat flask* 550°C tidak terlihat munculnya *cold shut* sedangkan pada variasi *preheat flask* 600°C dapat terlihat adanya *cold shut*. Perbedaan temperatur mengakibatkan variasi *preheat flask* 600°C menjadikan waktu solidifikasi menjadi sedikit lebih lama. Waktu solidifikasi yang lebih lama ini mengakibatkan logam cair terpisah dari dua aliran pola akibat gaya gravitasi sebelum berubah menjadi cukup padat untuk melawan gaya gravitasi. Namun waktu solidifikasi yang lebih lama ini belum cukup untuk menunjukkan defek yang cukup besar sehingga cacat *cold shut* pada specimen *preheat flask* 600°C terjadi pada daerah kecil di titik paling tinggi dari pola cetakan

Pada observasi tampak warna dari hasil *casting* dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6. Dari tampak hasil *casting* dapat terlihat perbedaan kontras pada variasi temperatur *preheat flask* 550°C dengan temperatur *preheat flask* 600°C. Perbedaan ini diakibatkan oleh temperatur dekomposisi. Temperatur dekomposisi dapat bervariasi dari tiap jenis produsen bubuk investasi. Pada penelitian kali ini bubuk investasi memiliki temperatur dekomposisi yang tercantum pada detail produk adalah 800°C. Dari penelitian Fischer-Bühner[4] terlihat bahwa permukaan *mold* mengalami lonjakan kenaikan temperatur akibat kontak dengan logam cair mencapai temperatur 840°C. Dapat diasumsikan pada *preheat flask* 550°C gipsium belum mengalami dekomposisi termal ketika bertemu dengan logam

cair. *Calcium oxide* (CaO), *sulfur dioxide* SO₂ dan oksigen menyebabkan oksidasi Cu



Gambar 5. Perbandingan Warna Spesimen *Preheat Flask* 550°C

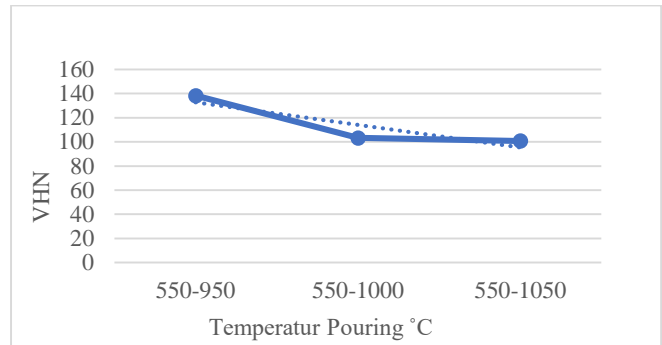


Gambar 6. Perbandingan Warna Spesimen *Preheat Flask* 600°C

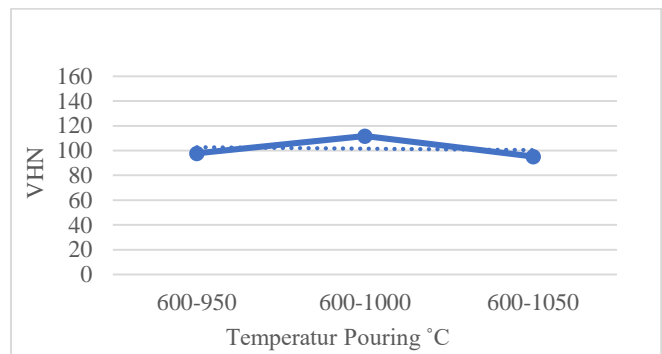
Pada variasi temperatur *preheat flask* 600°C terdapat perbedaan gradien warna hitam dari variasi temperatur *pouring*. Perbedaan warna ini disebabkan oleh lamanya temperatur logam pada temperatur dekomposisi gipsum. Semakin tinggi temperatur *pouring* semakin gelap warna dari hasil *casting* yang menunjukkan penumbuhan lapisan CuO di permukaan *casting*. Temperatur *pouring* yang tinggi membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mendingin akibatnya laju pendinginan logam lebih landai pada daerah temperatur dekomposisi gipsum. Namun muncul kejanggalan pada spesimen CF550-CT1000 dimana spesimen tersebut berwarna gelap diantara spesimen lain pada variasi temperatur *preheat flask* yang sama. Penyebab kejanggalan ini terjadi akibat slag pada waktu proses peleburan logam *silver* di *crucible* tapal kuda. Pada proses pelelehan tersebut terdapat lonjakan pemanasan berlebih menyebabkan lelehan logam mencapai temperatur 1400°C. Pada temperatur tersebut *zinc* menguap sehingga meninggalkan Cu untuk mengalami oksidasi menciptakan slag di atas permukaan logam cair. Saat temperatur menurun kembali ke target 1000°C spesimen di cast dengan membawa slag tersebut, sudah dilakukan upaya *skimming* dan menggunakan flux *boric acid*. *Boric acid* untuk mencegah oksidasi dan melarutkan slag di permukaan logam cair. Kombinasi unsur *zinc* yang sudah menguap dan slag yang tersisa menyebabkan Cu mengalami oksidasi yang lebih besar. Sehingga spesimen tersebut mengalami perubahan warna drastis.

B. Kekerasan Vickers

Spesimen diuji menggunakan kekerasan vickers untuk mengetahui pengaruh variasi temperatur *preheat flask* dan *pouring*. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8



Gambar 7. Grafik Kekerasan Spesimen *preheat flask* 550 °C

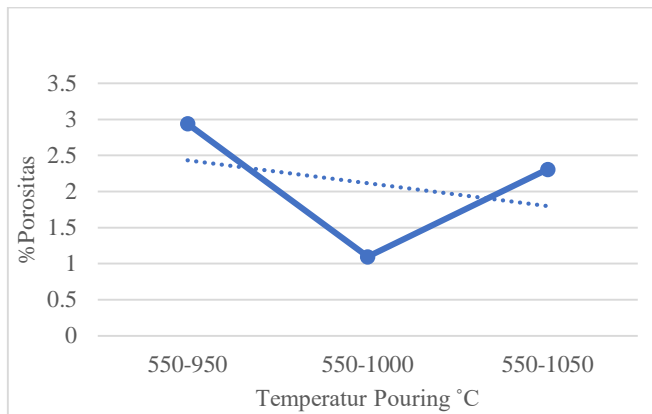


Gambar 8. Grafik Kekerasan Spesimen *preheat flask* 600 °C

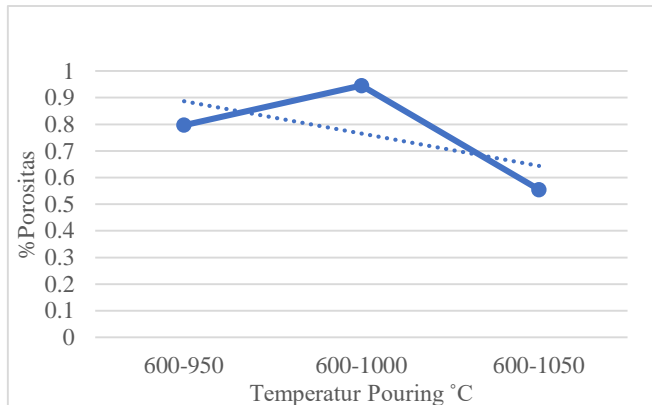
Dari gambar grafik tersebut nilai kekerasan vicker tertinggi untuk temperatur *preheat flask* 550°C adalah 138,3 VHN terdapat pada spesimen dengan temperatur *pouring* 950 °C , sedangkan untuk terendahnya adalah 100,7 VHN pada spesimen dengan temperatur *pouring* 1050°C . Untuk spesimen dengan temperatur *preheat flask* 600°C nilai kekerasan tertinggi adalah 111,66 VHN pada spesimen dengan temperatur *pouring* 1000°C , dan nilai kekerasan terendah adalah 95,2 VHN pada spesimen dengan temperatur *pouring* 1050°C . Kekerasan dari hasil pengecoran sangat berpengaruh terhadap waktu solidifikasi, menurut Nikhil Yadav semakin besar *superheat* pada logam cair semakin panjang waktu solidifikasinya maka semakin tinggi temperatur *pouring* mempengaruhi turunnya nilai kekerasannya[9]. Hal ini dapat dilihat dari garis trend pada grafik Gambar 7 dan 8. Kekerasan mengalami trend penurunan di kedua variasi temperatur *preheat flask*. Perbedaan gradien garis ini dikarenakan oleh Spesimen CF550-CT 950 dimana nilai unsur Cu lebih tinggi dari spesimen lain menyebabkan nilai kekerasan yang lebih tinggi. Semakin tinggi temperatur *pouring* menyebabkan waktu solidifikasi yang makin panjang menyebabkan *grain* pada *casting* semakin *coarse* sehingga nilai kekerasan akan menurun. Kekerasan untuk logam paduan sterling silver

C. Porositas

Spesimen diuji menggunakan *pyknometry* dengan prinsip hukum archimedes untuk mengukur porositas permukaan pada benda cor. hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 9 dan Gambar 10



Gambar 9. Grafik Nilai Porositas Preheat Flask 550°C



Gambar 10. Grafik Nilai Porositas Preheat Flask 600°C

Pengujian ini mengikuti standar ASTM B311-93 dan seperti yang telah dilakukan Taylor untuk benda casting [10]. Dari hasil pengujian porositas archimedes di dapat nilai porositas tertinggi untuk variasi temperatur preheat flask 550°C adalah 2.94% pada temperatur pouring 950°C dan terendah pada 1.09% di temperatur pouring 1000°C. Untuk temperatur preheat flask 600°C nilai porositas tertinggi adalah 0,94% pada temperatur pouring 1000°C dan nilai porositas terendah 0.55% di temperatur pouring 1050°C. Terlihat perbedaan signifikan antara variasi temperatur preheat flask 550°C dengan 600°C. Hal ini dikarenakan sifat dari gipsum investment yang sensitif terhadap temperatur tinggi. Menurut Thanawat Phetrattanaransi dekomposisi CaSO4 terjadi dan menghasilkan kalsium oksida dan gas sulfur dioksida. Penyusutan dari proses dehidrasi ini menciptakan sejumlah besar pori dalam cetakan investasi yang kemudian berpengaruh kuat pada hasil akhir permeabilitas dan sifat mekanik cetakan. Cetakan dengan permeabilitas yang baik (yaitu ukuran pori yang besar) mampu mengevakuasi udara yang terperangkap dan menghasilkan gas sulfur dioksida di seluruh dinding cetakan dan dengan demikian cacat porositas yang lebih sedikit diharapkan dapat diamati pada hasil pengecoran.[8] Semakin tinggi temperatur preheat flask berdampak pada semakin sedikit porositas permukaan yang terjadi. Semakin tinggi temperatur flask menyebabkan quartz di dalam gipsum untuk mengembang dan memperbesar ukuran pori dari gipsum. Namun perlu diketahui ukuran pori yang besar dalam cetakan dapat sangat mengurangi kekuatan mekanik dari cetakan investasi [8]. Kemudian efek dari temperatur pouring juga dapat diamati dari grafik menunjukkan semakin tinggi temperatur dapat menurunkan porositas permukaan. Fenomena ini dapat dikorelasikan dengan waktu solidifikasi

yang semakin panjang memberikan waktu untuk gas keluar dari logam cair.

D. ICP-OES

Pengujian ICP-OES dilakukan pada ke enam sampel dengan tujuan mengetahui fraksi massa unsur Ag,Cu, dan Zn pada produk pengecoran. Hasil uji ICP OES dapat dilihat pada Tabel 1

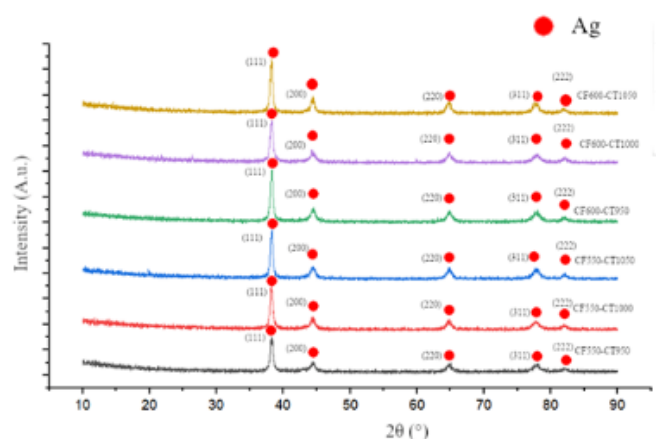
Tabel 1 Fraksi Masa Unsur Produk Pengecoran

Name	Ag %	Cu%	Zn%
550-950	71.253	17.078	1.992
550-1000	80.486	9.802	0.27
550-1050	91.149	7.234	1.191
600-950	91.049	6.259	1.164
600-1000	90.279	6.87	1.231
600-1050	17.929	7.454	0

Dari hasil ICP OES terlihat perbedaan signifikan pada unsur hasil pengecoran CF550-CT950, dan CF550-CT1000. Penjelasan penyebab perbedaan unsur tersebut memiliki dampak pada hasil porduk pengecoran yang terobservasi dan sudah dijelaskan di sub bab sebelumnya. Untuk unsur hasil porduk pengecoran lain terlihat jumlah yang berdekatan dengan target. Dapat dilihat nilai fraksi massa unsur Ag mendekati nilai 92,5%, nilai fraksi Cu mendekati 6,5% , dan nilai fraksi massa Zinc yang agak jauh dari target 1,5%. Dari hasil ICP-OES tersebut dapat diketahui bahwa fraksi massa unsur hasil porduk pengecoran sudah hampir mendekati target kecuali 2 sampel yang menyimpang mengakibatkan hasil yang terobservasi pada pembahasan sebelumnya. Untuk specimen CF600-CT1050 hasil ICP-OES yang didapatkan tidak begitu baik.dengan rendahnya konten Ag dan Zn yang abnormal, dapat diasumsikan bahan kimia yang digunakan HNO₃ sudah tidak baik digunakan menghasilkan hasil digestion yang tidak optimal.

E. XRD

Pengujian XRD dilakukan pada seluruh variasi sampel. Hasil Uji XRD dapat dilihat pada grafik Gambar 11.



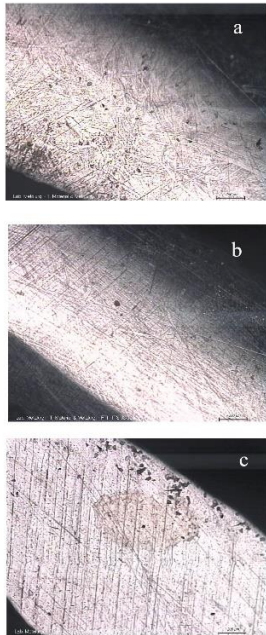
Gambar 11. Grafik Pola XRD

Dari hasil uji XRD ditemukan tidak ada perbedaan bentuk pola. Ditemukan pada ke enam munculnya peak Ag pada 2θ 38.262 dalam daerah (111), kemudian pada 2θ 44.473 dalam daerah (200), 2θ 64.713 daerah (220), 2θ 77.741 daerah (311) dan 2θ 81.910 dalam daerah (222). Pola ini menunjukkan unsur Ag dengan bentuk struktur kristal kubik menurut nomor referensi 01-087-0719. Pada pola hasil XRD ke enam

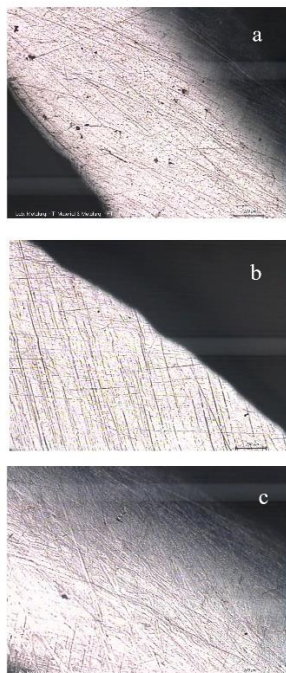
sampel tersebut tidak ditemukan pola *peak* lain, yang signifikan untuk diidentifikasi sebagai unsur pengotor. Dari hasil ini menunjukkan bahwa Ag terbentuk secara dominan dan absennya pengotor yang dapat terbentuk akibat dekomposisi gipsium.

F. Metalografi

Metalografi dilakukan pada semua spesimen dengan cara *grinding* pada salah satu sisi melintang cincin, dipoles menggunakan DIALUX blanc untuk mencapai *mirror finish*, proses etsa tidak dilakukan. Metalografi dilakukan untuk melihat cacat porositas gas, porositas *shrinkage*, inklusi, dan *crack*. Gambar 12 dan Gambar 13 Menunjukkan porositas gas pada daerah di bawah permukaan cincin.



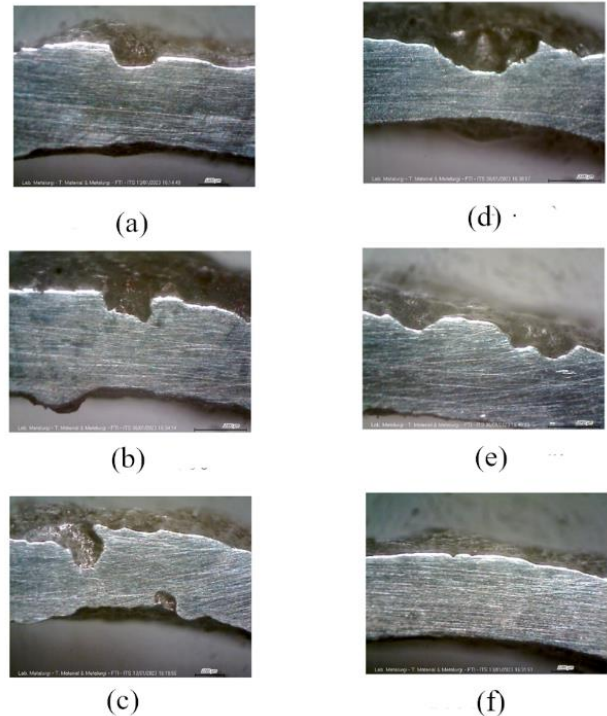
Gambar 12 Spesimen *Preheat Flask* 550°C Pada Mikroskop BX51 Perbesaran 5X (a) CF550-CT950, (b) CF550-CT1000, dan (c) CF550-CT1050



Gambar 13 Spesimen *Preheat Flask* 600°C Pada Mikroskop BX51 Perbesaran 5X (a) CF550-CT950, (b) CF550-CT1000, dan (c) CF550-CT1050

archimedes. Selain itu tampak adanya porositas *shrinkage* atau porositas gas di bagian tengah cincin. Kedua jenis porositas ini dapat saling tumpang tindih seperti yang dijelaskan oleh Fischer-Bühner [4]

Jejak cacat inklusi juga diamati muncul dalam semua variasi sampel tersebar dalam beberapa bagian permukaan cincin seperti pada Gambar 14



Gambar 14 Cacat Inklusi Pada Mikroskop Stereo (a) CF550-CT950, (b) CF550-CT1000, (c) CF550-CT1050, 5X (d) CF550-CT950, (e) CF550-CT1000, dan (f) CF550-CT1050

Cacat inklusi ini dihasilkan oleh *investment* gipsium yang tererosi dan masuk ke dalam bagian logam cair. Bagian gipsium tersebut kemudian mengapung ke permukaan dan meninggalkan impresi ketika hasil produk pengecoran dibersihkan menggunakan *ultrasonic cleaning*. Penyebab bagian dari gipsium dapat tererosi dikarenakan beberapa faktor seperti kekuatan mekanik gipsium yang lemah, aliran turbulen yang kuat, dan bentuk dari *sprue tree*. Untuk faktor bentuk *sprue tree* sudah dilakukan pencegahan untuk menghindari penggunaan bentuk dengan sudut tajam pada *main sprue* dan *feedsprue* sehingga faktor berikutnya adalah aliran turbulen dan kekuatan gipsium. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya kekuatan gipsium dapat berkurang dikala adanya penambahan temperatur, namun dari hasil observasi mikroskop stereo jejak inklusi dapat terlihat pada semua variasi temperatur *preheat flask* dan temperatur *pouring* sehingga variasi temperatur *preheat flask* tidak menjadi pengaruh pada jenis cacat ini. Aliran turbulen kemudian menjadi penyebab utama dari inklusi, aliran turbulen yang kuat terjadi akibat gaya berlebih pada proses *centrifugal casting*. Dimana disebutkan pada buku yang ditulis oleh Dieter Ott sering terjadi untuk perhiasan yang dicetak menggunakan metode *centrifugal casting* dibanding dengan metode *static vacuum casting*. Sehingga cacat inklusi ini dapat dikatakan tidak dipengaruhi dari variasi temperatur yang diberikan

Dari gambar tersebut dapat terlihat korelasi antara intensitas poros gas dan hasil porositas permukaan

G. Keterkaitan Hasil Pengujian

Hasil pengujian densitas *Archimedes* dapat dikorelasikan dari intensitas porositas gas yang dapat diamati. Porositas gas yang tampak pada hasil metalografi semakin berkurang dengan menurunnya nilai porositas densitas *Archimedes*. Hasil observasi pengujian ICP-OES memiliki korelasi dengan pengujian XRD. Fasa Ag terlihat dominan pada *peak* yang termatai sesuai hasil pengujian ICP-OES menunjukkan fraksi masa Ag yang tinggi. Hasil ICP-OES juga berkorelasi dengan hasil pengamatan visual. Dari pengamatan visual terdapat hasil burnt mark yang berbeda pada specimen CF550-CT1000 akibat kurangnya unsur *Zinc* sebagai *deoxidizer* seperti yang ditunjukkan pada hasil ICP-OES. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa pada specimen CF550-CT950 memiliki kekerasan yang jauh lebih tinggi dari specimen lain. Hasil kekerasan tinggi ini memiliki efek dengan timbulnya retakan pada permukaan cincin yang menunjukkan sifat cincin yang *brittle*. Hasil kekerasan yang mencolok dapat dicocokkan dengan hasil ICP-OES yang menunjukkan fraksi Ag yang rendah dan fraksi Cu yang jauh lebih tinggi. Dari variasi penambahan temperatur *preheat flask* didapat penurunan porositas gas akibatkan permabilitas gipsum meningkat. Permabilitas meningkat akibat dekomposisi termal gipsum menyebabkan benda *casting* berwarna lebih gelap

IV. KESIMPULAN

Dari hasil dan analisis data yang telah dilakukan dapat diambil sebuah kesimpulan adalah sebagai berikut:

1. Porositas pada cincin dipengaruhi oleh temperatur *preheat flask* dan temperatur *pouring*. Nilai porositas tertinggi adalah 2,94% pada specimen dengan temperatur *preheat flask* 550°C, dan temperatur *pouring* 950°C. Nilai porositas terendah adalah 0,55% pada temperatur *preheat flask* 600°C dan temperatur *pouring* 1050°C. Cacat makro yang timbul lebih banyak diamati pada temperatur *preheat flask* 600°C dengan munculnya *cold shut*, *hot tearing*, dan *sandy surface*. Untuk temperatur *preheat flask* 550°C hanya teramati *sandy surface* dan *hot tearing*
2. Nilai kekerasan pada cincin dipengaruhi oleh naiknya temperatur *pouring*. Untuk specimen dengan temperatur *preheat flask* 550°C nilai kekerasan tertinggi adalah 138,3 VHN pada temperatur *pouring* 950°C, dan nilai kekerasan terendah adalah 100,7 VHN pada temperatur *pouring* 1050°C. Untuk specimen dengan temperatur *preheat flask* 600°C nilai kekerasan tertinggi adalah 111,66 VHN pada temperatur *pouring* 1000°C dan nilai kekerasan terendah pada 95,2 VHN pada temperatur *pouring* 1050°C.

Pembuatan cincin dengan metode *investment casting* merupakan metode yang tepat karena dengan satu kali proses, didapatkan banyak cincin. Namun, tantangan yang harus dihindari pada metode *investment casting* adalah *porosity*. *Porosity* merupakan salah satu *casting defect* yang menyebabkan nilai *mechanical properties* tidak sesuai harapan. Oleh karena itu, perlu adanya *Non-Destructive Test* (NDT) untuk mengetahui kualitas dari produk hasil cor. Apabila dengan NDT tidak ditemukan *porosity*, maka produk coran tersebut layak untuk pengujian selanjutnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Armasco Engineering dan khayra yang telah memberikan penulis kesempatan, dukungan untuk melakukan riset dan bimbingan selama proses pengerjaan riset topik. Penulis juga bertrimakasih kepada keluarga dan Departemen Teknik Material dan Metalurgi atas dukungan dan bimbingan selama pengerjaan penelitian dan studi

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jiayi Wang, Santosh Reddy Sama, Paul C. Lynch, and Guha Manogharan, "Design and Topology Optimization of 3D-Printed Wax Patterns for Rapid Investment Casting," *Procedia Manuf.*, vol. 34, pp. 683–694, 2019.
- [2] Valerio Faccenda, *Handbook on Investment Casting the Lost Wax Casting Process for Carat Gold Jewellery Manufacture*. London: World Gold Council, 2003.
- [3] N. Yadav, V. Chak, Y. Gupta, and D. S. Sodha, "Investigating the Effect of Different Process Parameters on Defects in A713 Aluminium Alloy Castings Produced by Investment Casting Process," *International Journal of Engineering Technology Science and Research*, vol. 5, no. 4, pp. 929–934, 2018.
- [4] Dr. Jörg Fischer-Bühner, "Computer Simulation of Jewelry Investment Casting: What Can We Expect?," in *Santa Fe Symposium*, Sep. 2006, pp. 193–216.
- [5] J. T. Black and Ronald A. Kohser, *Materials And Processes In Manufacturing*, vol. 11. Danvers: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [6] D. Ott, *Handbook On Casting And Other Defects In Gold Jewellery Manufacture*. London: World Gold Council, 1997.
- [7] Daniele Maggiani, Silvano Bortolamei, Alessandro Zocca, Mauro Di Siro, and David Frizzo, "Evaluation of Hot Tearing in 925% Silver Alloys," in *The Santa Fe Symposium*, May 2009, pp. 246–270.
- [8] Thanawat Phetrattanarangi *et al.*, "The behavior of gipsum-bonded investment in the gold jewelry casting process," *Boonrat Lohwongwatana*, Feb. 2017.
- [9] N. Yadav, "Effect Of Process Variables On The Quality Of Investment Castings Produced By Using Expandable Polystyrene Pattern," Dissertation, Indian Institute Of Technology Roorkee, Roorkee, 2011.
- [10] R. P. Taylor, S. T. McClain, and J. T. Berry, "Uncertainty analysis of metal-casting porosity measurements using Archimedes' principle," *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 11, no. 4, pp. 247–257, 2017.