

PENGARUH TEMPERATUR CETAKAN TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN PISTON HASIL PENGECORAN MENGGUNAKAN 3D PRINTING

Devi Andriani ¹⁾ ✉, Wahyono Suprpto ¹⁾, Yudy Surya Irawan ¹⁾, Alfeus Sunarso ²⁾

¹⁾Jurusan Teknik Mesin
Universitas Brawijaya
andriani111296@gmail.com
wahyos@ub.ac.id
yudysir@ub.ac.id

²⁾Jurusan Teknik Mesin
Politeknik Negeri Pontianak
sunarso@dosen.polnep.ac.id

Abstract

Motorcycle users in 2019 reached 133,617,012 units in Indonesia. The impact of a large number of motorcycle certainly attracts the interest of the industry to produce two-wheeled automotive vehicles. The piston is part of the engine that functions as a compression barrier in the combustion chamber, the piston material is aluminum alloy. Therefore, research was carried out on making pistons with investment casting methods, physical and mechanical patterns from 3D printers on pistons. This research starts from drawing the piston using CAD (computer-aided design), making a printed pattern from a 3D Printer machine with PLA (polylactide acid) material. The mold pattern is coated with a mixture of gypsum cement and silica powder. The casting process with a pouring temperature of 750°C and a mold temperature of 200 °C, 250 °C, 300 °C, 350 °C, and 400 °C. The results showed the largest grain size at a mold temperature of 400°C. The highest hardness at 200 °C mold temperature is 47.00 HRB and the lowest hardness at 400 °C mold temperature is 40.56 HRB. The higher the temperature of the mold used, the level of porosity of a material will decrease. This is due to the temperature difference when pouring the molten metal and the lower mold temperature. This makes the metal solidification time longer. The higher the mold temperature, the slower the solidification time, the larger the grain structure, and the decreased hardness.

Keywords: Investment Casting, Piston, Mold Temperature, Microstructure, Hardness.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan alat transportasi semakin meningkat sehingga membuat industri otomotif khususnya kendaraan roda dua mengalami peningkatan. Pengguna kendaraan roda dua pada tahun 2019 mencapai 133.617.012 unit di Indonesia ^[1]. Dampak dari meningkatnya jumlah kendaraan roda dua dapat menarik industri pengecoran untuk memproduksi komponen otomotif kendaraan roda dua tersebut. Pencapaian yang meningkat sebuah peluang besar agar mendorong industri pengecoran logam dari material aluminium untuk menghasilkan suatu produk yang berkualitas dengan harga yang murah. Penggunaan roda dua khususnya pada komponen otomotif dalam sebuah mesin yang memiliki energi terikat pada bahan bakar secara cepat diubah menjadi panas dan tekanan selama siklus pembakaran salah satunya piston. *Piston* merupakan sebagian dari bagian bergerak di dalam ruang bakar dan sering mengalami kerusakan pada motor.

Corresponding Author:

✉ **Devi Andriani**

Received on: 2022-01-12

Revised on: 2023-01-24

Accepted on: 2023-01-24

Piston adalah bagian dari engine yang berfungsi sebagai menerima tekanan pembakaran dan meneruskannya ke poros engkol melalui salah satu komponen yang bernama *connecting rod*, kemudian memiliki peran penting dalam penghematan bahan bakar maka material yang cocok digunakan pada *piston* adalah paduan aluminium. Paduan aluminium dibentuk menjadi komponen yang membutuhkan efisiensi tinggi di industri otomotif. Proses pembuatan *piston* dipilih dengan menggunakan pengecoran dikarenakan untuk mendapatkan bagian yang kompleks dari *piston* dan bahan baku dari paduan aluminium sangat cocok menggunakan metode pengecoran. Penelitian ini akan mempermudah teknik pengecoran dengan cara metode *investment casting*. Kelebihan *investment casting* yaitu, mampu menghasilkan komponen permukaan akhir yang baik, akurasi dimensi dan bentuk geometri yang kompleks, berongga dan hampir bersih. Kekurangan dari *investment casting* yaitu, banyak tahapan proses ^[2].

Pengecoran logam tergantung dari beberapa faktor seperti: temperatur tuang, temperatur cetakan, material cetakan dan lain – lain. Temperatur cetakan merupakan salah satu hal yang mempengaruhi proses pembekuan logam (*solidification*) yang sangat mempengaruhi ukuran, bentuk, dan keseragaman butir yang akan terbentuk ^[3]. Temperatur cetakan menghasilkan bentuk produk yang semakin tinggi temperatur cetakan akan menyebabkan semakin halus bentuk permukaan produk yang dihasilkan, ini dikarenakan tidak adanya udara yang terperangkap di dalam cetakan dari pengamatan dan analisa secara visual ^[4].

Berkembangannya teknologi digital, *rapid prototyping* adalah suatu metode yang memproduksi suatu komponen dengan menggunakan data model digital yang telah diproses sedemikian rupa sehingga dapat digunakan pada mesin *rapid prototyping*. Salah satu teknik *rapid prototyping* adalah *Fused Deposition Modelling* (FDM). Metode ini data dari CAD 3 dimensi sebagai input untuk mesin FDM [5]. Salah satu mesin FDM yang digunakan adalah *3D Printer*. *Rapid prototyping* berguna untuk produk yang dibutuhkan terbatas seperti pembuatan prototipe, iterasi desain, dan optimisasi *design* ^[6]. Mesin FDM ini mencetak plastik jenis *Polylactid Acid* (PLA). Parameter pencetakan ini dapat dikontrol pada *software* FDM. Potensi *rapid prototyping* dengan teknik FDM dimanfaatkan untuk membuat pola *investment casting* secara efektif ^[7].

Teknologi digital *prototyping* yaitu, pencetakan 3D printer ini jauh lebih menguntungkan dan telah terbukti memanfaatkan kebebasan desain untuk model coran, dibandingkan dengan proses pembuatan pola yang tradisional. 3D printer tingkat kepresisian bentuk suatu desain cukup memadai. Hal ini untuk mencapai kualitas pengecoran yang baik dengan menggunakan 3D printer dalam desain perakitan cetakan dan ini menunjukkan berkurangnya kecacatan dalam pengecoran. Cetakan 3D Printer lebih unggul dibandingkan dengan cetakan tradisional, akurasi dimensi yang lebih besar dan dapat dicetak langsung dari model CAD ^[8].

Teknologi 3D printer akan lebih mempermudah pengerjaan dan lebih *simple* dibandingkan dengan teknik yang lain, mempermudah dan memperbanyak pembuatan pola. Tingkat kehalusan pembuatan pola piston bisa diatur pada penggunaan alat 3D printer itu sendiri. Proses yang lebih mudah pada saat pembuatan. Temperatur cetakan terlalu tinggi akan terjadi beban tahanan yang besar sehingga coran akan menjadi menyusut untuk diambil tanpa merusak, sifat – sifat mekanik dan pengecoran akhir tidak akan sempurna. Saat temperatur cetakan terlalu rendah, aliran logam akan terhambat sehingga menyebabkan penyusutan, serta pelekatan coran pada cetakan dan inti ^[9].

Penelitian Masy'ari telah membuat membuat prototipe aluminium *cylinder head engine* metode *rapid prototyping* dan *investment casting* ^[10]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pembuatan pola *cylinder head engine* metode *rapid prototyping* dibuat menggunakan mesin 3D printing. Komposisi material cetakan pasir silika, semen *gypsum* dan tanah kaolin

menghasilkan cetakan yang cukup kuat terlihat dari *pre-heating* dan tidak ada retak. Pengaruh material pola cetakan tidak memberikan pengaruh yang lebih terhadap pembuatan cetakan *investment casting*. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya hanya terbatas pada pemeriksaan secara visual. Oleh karena itu, penelitian yang sekarang dilakukan studi yang lebih detail terkait dengan temperatur cetakan terhadap struktur mikro dan kekerasan.

2. METODE DAN BAHAN

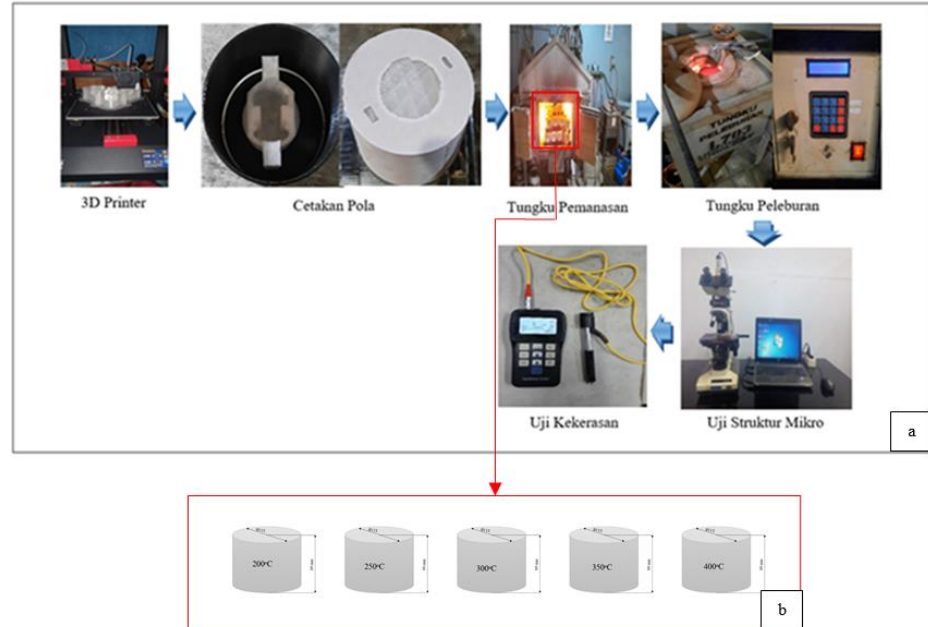
Penelitian ini dilakukan dengan cara eksperimen. Penelitian difokuskan pada pembuatan produk piston dari metode pengecoran *investment casting* untuk mengetahui pengaruh temperatur cetakan dengan menggunakan pola dari 3D printer serta pembuatan cetakan dari *ceramic* (campuran semen *gypsum* dan serbuk silika). Produk hasil coran akan diamati lebih lanjut dengan melakukan pengujian struktur mikro, kekerasan dan porositas yang bertujuan untuk melihat perubahan yang terjadi dari beberapa variasi temperatur cetakan. Parameter yang diamati dalam penelitian ini adalah pengujian struktur mikro, kekerasan brinell dan porositas. Temperatur cetakan pada proses pengecoran piston akan divariasikan dari 200 °C, 250 °C, 300 °C, 350 °C dan 400 °C. Selain itu variabel terkontrol dari penelitian ini ada aluminium skrap (AlSi7Fe0.6), semen *gypsum*, serbuk silika, polylactide acid (PLA), riser, tungku pemanas dan tungku peleburan.

Tahapan pertama pada penelitian ini yaitu, penggambaran pola *piston* dengan menggunakan *Autodesk Inventor 2021* (*Autodesk.com*), yang kemudian disimpan dalam format *.stl*. Format *file .stl* pola *piston* tersebut dibuka dengan aplikasi *Ultimaker Cura* yang *free software* untuk mengatur parameter yang nantinya akan dicetak menggunakan mesin 3D printer. Parameter yang telah ditentukan dalam aplikasi *Ultimaker Cura* yaitu, temperatur *nozle* 210 °C, *infill* 10%, *layer height* 0,1 mm, *wall line count* 2 *layer*, *print speed* 50 mm/s, *fan speed* 100%, *support density* 3%. *File* yang sudah ditentukan parameternya akan di *slice* dan disimpan ke dalam *SD card*. *SD card* tersebut akan dipasang pada mesin 3D printer. 3D printer ini yang berfungsi untuk mencetak pola *piston* dengan menggunakan bahan filamen PLA. 3D printer yang digunakan memiliki merk *Anet*, dilengkapi 1 buah *nozle* ukuran 0,4 mm, dan berukuran 220 mm x 220 mm x 250 mm.

Tahapan kedua yaitu, pembuatan cetakan *ceramic* dari bahan semen *gypsum* dan serbuk silika. Semen *gypsum* dan serbuk silika yang digunakan dalam 1 buah cetakan masing – masing yaitu: 600 gram dan 0,95 gram serta ditambahkan air sebanyak 400 mL. Campuran tersebut dimasukkan ke dalam tempat yang sudah ada pola piston, diamankan hingga mengeras. Kemudian dilanjutkan dengan tahapan ketiga yaitu, proses pelelehan filamen atau disebut dengan proses *investment casting*. Proses ini cetakan yang sudah terisi pola *piston* akan dilelehkan dengan menggunakan tungku pemanas. Tungku pemanas yang digunakan dilengkapi dengan 4 buah kompor, 1 buah tabung beserta gas berukuran 12 kg, *thermocouple type-K*, *pressure gauge* dan selang bertekanan tinggi. Tahapan keempat yaitu, proses peleburan aluminium skrap. Aluminium skrap terlebih dahulu dicairkan dengan menggunakan tungku pelebur induksi I 703 dengan kapasitas 3 kg yang dilengkapi oleh 1 buah kowi dengan kapasitas 1,5 liter, instalasi pengukuran temperatur, tuas, penutup, penjepit, tegangan 220 volt, arus 13 ampere, daya 2860 watt, dan *thermometer type-K* untuk mengukur temperatur cetakan serta pengecoran menggunakan aluminium skrap. Jika sudah mencair maka masuk ke proses penuangan, proses ini aluminium cair di tuangkan ke dalam cetakan yang sudah terbentuk pola *piston*. Penuangan ini dilakukan setelah diketahui temperatur cetakan pada masing – masing variasi yaitu: 200 °C, 250 °C, 300 °C, 350 °C dan 400 °C.

Tahapan kelima yaitu, proses pembongkaran dan pembersihan cetakan *piston*. Pembongkaran cetakan dilakukan untuk mengambil produk yang diperoleh dari proses

pegecoran aluminium skrap tersebut. Selanjutnya tahapan keenam yaitu, proses *finishing*. Proses *finishing* ini dilakukan dengan menggunakan mesin bubut. *Finishing* hanya bagian diameter luar dan permukaan kepala *piston* saja. Dari beberapa tahapan tersebut untuk menunjukkan lebih jelas terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema eksperimen: (a) Prosedur penelitian, (b) Variasi temperatur cetakan

Tahapan ketujuh yaitu, pengujian struktur mikro. Pengujian struktur mikro dilakukan di bagian belahan tengah piston untuk melihat struktur butiran yang terdapat pada masing – masing variasi temperatur cetakan dari produk piston pengecoran aluminium. Pengujian ini menggunakan alat uji yang bernama Olympus BH-2. Sebelum melakukan pengujian, spesimen piston harus melakukan pengetsaan dengan larutan Hydroflourid Acid (HF). Selanjutnya dapat melakukan pengambilan gambar dari pengujian struktur mikro tersebut. Tahapan kedelapan yaitu, pengujian kekerasan. Pengujian kekerasan menggunakan kekerasan brinell (HRB). Pengujian kekerasan di bagian dinding piston bertujuan untuk mengetahui kekerasan yang terdapat pada masing – masing variasi temperatur cetakan pada produk piston. Pada pengujian kekerasan spesimen awalnya dilakukan pemolesan dengan menggunakan ampelas dengan tingkat kehalusan 1200 mesh dan 1500 mesh, kemudian baru dapat melakukan pengujian kekerasan brinell. Berdasarkan dari data pengujian kekerasan, data tersebut akan diolah dengan menggunakan Ms. Excel dan dibuat dalam bentuk grafik. Dari grafik yang sudah diperoleh maka dapat dianalisa dan dapat dibandingkan yang satu dengan yang lainnya.

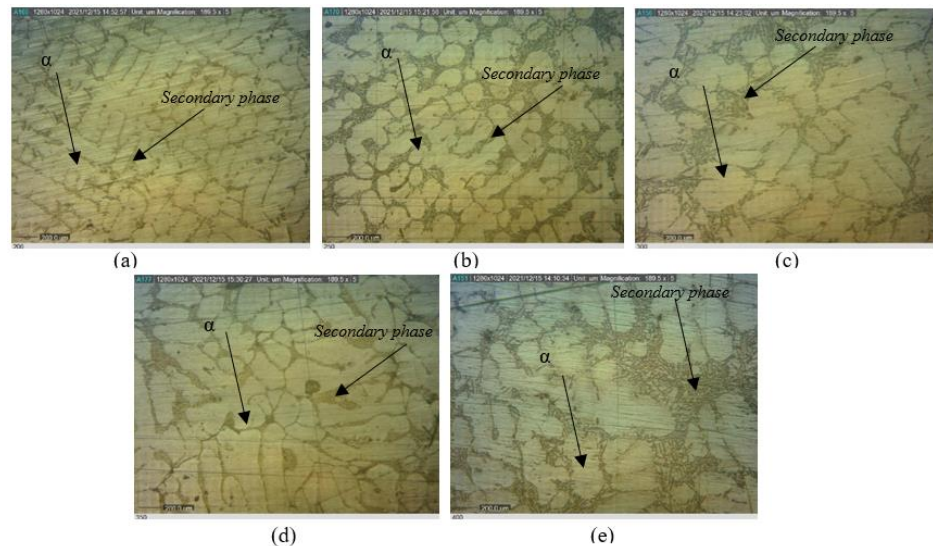
3. HASIL DAN DISKUSI

Berdasarkan data struktur mikro dan kekerasan yang telah didapatkan dari eksperimen hasil yang diperoleh dan dapat dianalisa.

3.1. Pengaruh Temperatur Cetakan Terhadap Struktur Mikro

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari pengamatan gambar struktur mikro dengan pembesaran lensa objektif 200x. Selanjutnya dapat menganalisa data dengan membandingkan variasi temperatur cetakan yang digunakan. Gambar 2 (a), (b), (c), (d) dan

(e), adalah struktur mikro pada spesimen variasi temperatur cetakan. Perubahan temperatur cetakan cukup signifikan pengaruhnya terhadap perubahan ukuran dari fasa aluminium pada temperatur 300 °C terlihat pada Gambar 2 (c). Fasa aluminium pada temperatur cetakan 200 °C, 250 °C lebih kecil dibandingkan dengan fasa aluminium pada temperatur cetakan 300 °C, 350 °C dan 400 °C. Ukuran dari fasa aluminium membesar seiring dengan naiknya temperatur cetakan. Ukuran butir membesar dikarenakan pembekuan lambat dan cetakan yang panas sehingga membuat butiran sulit untuk menyebar dan mengakibatkan butiran membesar.



Gambar 2. Pengamatan struktur mikro pada pembesaran 200x variasi temperatur cetakan: (a) 200 °C, (b) 250 °C, (c) 300 °C, (d) 350 °C dan (e) 400 °C

Perubahan temperatur cetakan juga mempengaruhi perubahan ukuran butir dari secondary phase pada temperatur 200 °C dan 250 °C terlihat pada Gambar 2. Fasa secondary phase lebih kecil dibandingkan dengan fasa secondary phase pada temperatur cetakan 300 °C, 350 °C dan 400 °C. Ukuran dari secondary phase membesar seiring dengan naiknya temperatur cetakan, dimana ukuran fasa paling besar didapatkan pada temperatur cetakan 400 °C. Penelitian tentang pengaruh proses deformasi plastis terhadap struktur mikro dan sifat mekanik komposit AlSi/SiC [11]. Pada penelitian tersebut bahwa meningkatnya temperatur akan menurunkan kekerasan, seperti dari 60 HV untuk 350 °C turun menjadi 54 HV untuk 450 °C. Hal ini dikarenakan temperatur cetakan yang tidak sesuai ketika penuangan temperatur cetakan tersebut sudah turun secara cepat sehingga temperatur lebih rendah. Selain itu, bisa juga disebabkan karena campuran bahan pengikat cetakan ceramic yang tidak sesuai sehingga berpengaruh terhadap butiran struktur pada saat proses solidifikasi.

Dalam penelitian tersebut menerangkan bahwa pada pengamatan struktur mikro yang menunjukkan fasa alpa itu berwarna putih dan *secondary phase* berwarna hitam. Selain itu, dengan meningkatnya temperatur butiran struktur yang diperoleh semakin besar sehingga kekerasan yang terjadi cenderung menurun. Berdasarkan penelitian tersebut bahwa dengan adanya perubahan butiran struktur pada penelitian ini dilihat dengan pengamatan struktur mikro terjadinya perbesaran besaran butir dengan peningkatan temperatur cetakan. Hal ini disebabkan karena cairan aluminium yang bersentuhan langsung dengan cetakan *ceramic* maka terjadi perpindahan panas yang lebih lambat dan adanya laju pendinginan yang lambat, sehingga menghasilkan butiran struktur yang besar. Sedangkan dengan temperatur cetakan yang rendah struktur mikro yang dihasilkan lebih kecil, dikarenakan perpindahan panas yang

terjadi baik dan laju pendinginan yang cepat, sehingga menghasilkan butiran struktur yang besar serta kasar.

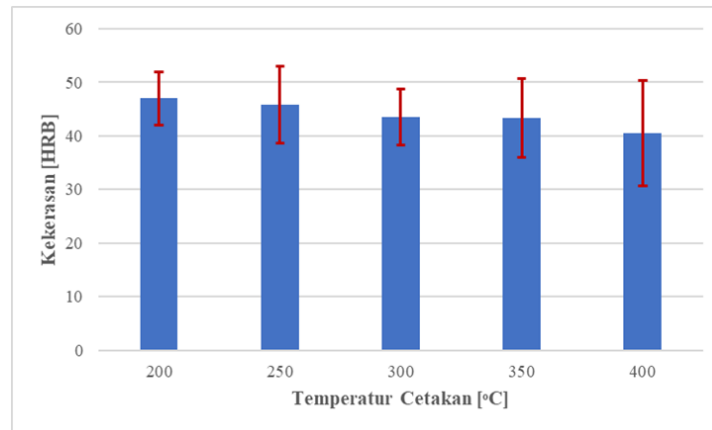
Pengamatan pengaruh temperatur cetakan terhadap struktur mikro menunjukkan terdapat bagian dalam jumlah kecil di daerah fasa alpa dan kecenderungan *secondary phase* berubah menjadi serpihan tebal dan berubah semakin besar (temperatur cetakan 400 °C) terlihat pada Gambar 2. Adanya *secondary phase* diduga mengandung unsur Si dan Fe yg merupakan paduan terbanyak dalam paduan aluminium ini. Kondisi ini disebabkan terjadinya peningkatan waktu pembekuan dan seiring dengan peningkatan temperatur cetakan. Selain itu ada beberapa faktor yang menyebabkan hal ini terjadi diantaranya, pada saat percobaan cetakan kurang kering, sisa lelehan filamen masih tersisa di dalam rongga cetakan, kotoran pada cairan aluminium dan penuangan yang kurang cepat.

Pertumbuhan *secondary phase* pada temperatur cetakan rendah (200 °C dan 250 °C) memiliki waktu pembekuan lebih singkat dan ruang tumbuh yang lebih sempit sehingga struktur silikon yang dihasilkan cenderung berbentuk *globular* (serpihan pendek). Terdapat perubahan temperatur *dies* cukup signifikan pengaruhnya terhadap perubahan ukuran dari *secondary phase* primer temperatur 350 °C dan tekanan 75 bar, *secondary phase* pada temperatur *dies* 350 °C, 250 °C lebih besar dibandingkan dengan *secondary phase* pada temperatur *dies* 300 °C [12]. Ukuran dari *secondary phase* membesar seiring dengan naiknya temperatur *dies* dimana ukuran fasa paling besar didapatkan pada temperatur *dies* 350 °C. Perubahan temperatur *dies* juga mempengaruhi perubahan ukuran dari fasa α +Al pada temperatur 350 °C, fasa α +Al lebih besar dibandingkan dengan fasa α +Al pada temperatur *dies* 250 °C dan 300 °C. Ukuran dari fasa α +Al membesar seiring dengan turunnya temperatur *dies* dimana ukuran fasa paling besar didapatkan pada temperatur *dies* 350 °C.

3.2. Pengaruh Temperatur Cetakan Terhadap Kekerasan

Agar mengetahui hasil data yang diperoleh dari pengujian kekerasan brinell, dilakukan perhitungan rata – rata dan standar devisiasi menggunakan *Ms. Excel*. Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, maka dapat dilihat pada Gambar 3. Dari grafik batang Gambar 3 terlihat bahwa nilai kekerasan tertinggi berada pada temperatur cetakan 200 °C yaitu 47,00 HRB dengan standar devisiasi 5,01 dan nilai kekerasan terendah berada pada temperatur cetakan 400 °C yaitu 40,56 HRB dengan standar devisiasi 9,87. Adanya perubahan temperatur cetakan tidak signifikan, hal ini menunjukkan bahwa perbedaan kekerasan brinell yang terjadi lebih kecil dari pada hasil penyimpangan data yang diperoleh.

Pada penelitian ^[13] meneliti pengaruh fraksi penguat *fly ash* dan temperatur cetakan terhadap sifat kekerasan dan struktur mikro pada MMC yang mengungkapkan bahwa, kekerasan spesimen pada temperatur cetakan 250 °C dengan fraksi aluminium *fly ash* 90% : 10% adalah 62,86 HRB. Kekerasan spesimen pada temperatur cetakan 300 °C dengan fraksi aluminium *fly ash* 90% : 10% adalah 66,28 HRB turun menjadi 66,08 HRB pada temperatur cetakan 350 °C. Dari hasil ini pengaruh struktur mikro sangat signifikan terhadap kekerasan, terlihat struktur silikon semakin kasar yang semakin besar pada temperatur cetakan 350 °C mengakibatkan kekerasan yang rendah. Ini disebabkan juga oleh ikatan kimia yang terbentuk, dimana partikel *fly ash* yang halus mengalami aglomerasi butiran dan tidak terdispersi ke dalam matrik dikarenakan gaya adhesi lebih besar dari gaya kohesi, bentuk partikel *fly ash* butir halus memiliki area batas butir total lebih luas sehingga tidak mampu menahan pergerakan dislokasi dengan baik. Walaupun demikian, pengaruh ukuran butir terhadap sifat mekanis memiliki batasan dimana butir yang terlalu halus (<10 nm) akan menurunkan sifat mekanis.



Gambar 3. Hubungan temperatur cetakan terhadap kekerasan rata-rata dengan standar devisiasi

Dari hasil ini, bahwa pengaruh struktur mikro sangat signifikan pengaruhnya terhadap kekerasan. Terlihat pada Gambar 2 butiran silikon (berwarna hitam) semakin banyak pada temperatur cetakan 400 °C mengakibatkan kekerasan semakin rendah. Kenyataan ini menunjukkan bahwa perubahan temperatur cetakan sangat berpengaruh terhadap kekerasan produk hasil piston. Hal ini disebabkan semakin besar temperatur cetakan maka laju pembekuan akan semakin lambat atau kecil. Sedangkan pada temperatur cetakan 200 °C laju pembekuan lebih cepat karena perbedaan temperatur yang kecil antara permukaan cetakan dengan temperatur tuang. Selain itu, laju pendinginan ^[14] lebih tinggi di dinding tipis daripada di dinding tebal. Oleh karena itu bentuk butiran struktur yang teratur dan dinding tipis lebih baik untuk mendapatkan ukuran butir yang seragam.

Kekerasan dengan metode *investment casting* ini menunjukkan bahwa temperatur cetakan yang tinggi menyebabkan bertambahnya waktu pembekuan dan daerah tumbuh *secondary phase* sehingga pemisahan terlambat secara sempurna *secondary phase* berubah dari bentuk sepihan menjadi globular. Temperatur cetakan mempengaruhi pembentukan struktur mikro yang berpengaruh terhadap nilai kekerasan, peningkatan temperatur cetakan akan mengurangi kekerasan produk piston. Temperatur cetakan ^[15] tinggi menghasilkan kekerasan yang menurun dan sebaliknya. Hal tersebut dilihat dari struktur mikro, semakin tinggi temperatur cetakan maka struktur butiran silikon terbentuk semakin mebesar.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa, semakin tinggi temperatur cetakan yang digunakan maka struktur butiran semakin besar. Hal ini disebabkan laju pendinginan dan fluiditas logam cair akan mempengaruhi struktur mikro (ukuran butir yang terbentuk). Berpengaruh terhadap sifat mekanik material yaitu kekerasan. Kekerasan mengalami penurunan dengan meningkatnya temperatur cetakan dan sebaliknya. Ini terjadi karena adanya perbedaan temperatur saat penuangan logam cair dan temperatur cetakan yang semakin tinggi. Membuat waktu solidifikasi dari logam semakin lama. Waktu solidifikasi yang semakin lambat membuat suatu logam cair akan memiliki waktu yang cukup untuk mendistribusikan secara merata. Disebabkan akan menghasilkan piston yang lebih padat dan memiliki porositas yang sedikit. Na-mun kekerasan lebih rendah, yang terbaik terletak pada temperatur cetakan 200 °C dengan kekerasan sebesar 47,00 HRB serta penyimpangan 5,01. Penyimpangan tersebut disebabkan pembekuan lebih cepat karena perbedaan temperatur yang kecil antara permukaan cetakan dengan temperatur tuang. Oleh karena itu bentuk butiran struktur yang teratur dan dinding tipis lebih baik untuk mendapatkan ukuran butir yang seragam.

PERNYATAAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang, Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Pontianak, Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang dan Laboratorium Pengecoran $\alpha\beta\gamma$ Landungsari Malang yang telah memfasilitasi kegiatan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] INDONESIA, B. P., Perkembangan Jumlah Kendaraan Bermotor Menurut Jenis (Unit). Retrieved from Badan Pusat Statistik: <https://www.bps.go.id/indicator/17/57/1/jumlah-kendaraan-bermotor.html>. Diakses : 2021, September 2.
- [2] KORBER, S., VOLKL, R., & GLATZEL, U., “3D printed polymer positive models for the investment casting of extremely thin-walled single crystals”, *Journal of Materials Processing Tech*, pp.1-8, Feb, 2021.
- [3] SUPRAPTO, W., Teknologi Pengecoran Logam, 1 ed., Malang, UB Press, 2017.
- [4] SUSANTO, P. E., SUHERMAN, H., & IQBAL., Penentuan Temperatur Optimum Pada Pengecoran Investment Casting Dengan Menggunakan Cetakan Tanah Liat. Retrieved from ANZDOC: <https://adoc.pub/penentuan-temperatur-optimum-pada-pengecoran-investment-cast.html>. Diakses : 2021, Desember 17.
- [5] SINGH, R., SINGH, R., DUREJA, S, J., “CAD-CAM assisted investment casting for preparation of dental crowns”, *Journal ELSIVIER*, pp. 223-228, 2020.
- [6] KUMAR, R., MADHU, S., & ARAVINDH, K., “Casting Design And Simulation Of Gating System In Rotary Adaptor Using Procast Software For Defect Minimization”, *Journal ELSEVIER*, pp. 799-805, Nov. 2019.
- [7] THOMAS, A, P., AAHLADA, K, P., KIRAN, S, N., IVVALA, J., “A Review On Transition In The Manufacturing Of Mechanical Components From Conventional Techniques To Rapid Casting Using Rapid Prototyping”, *Journal ELSIVIER*, v. 5, n. 5, pp. 11990-12002, 2018.
- [8] SIVARUPAN, T., MANSORI, M. E., CONIGLIO, N., & DARGUSCH, M., “Effect of Process Parameters on Flexure Strength And Gas Permeability of 3D Printed Sand Mold”, *Journal Of Manufacturing Processes*, 420-437, 2020.
- [9] HARAHAHAP, M. R., & SIREGAR, A. E., Analisa Perpindahan Panas Pada Penuangan Besi CorKelabu FC 200 Pada Cetakan Logam. In: SEMNASTEK UISU, pp. 44-48., 2019.
- [10] MASY'ARI, PRASETIYO, A. D., & KARYADI, E., “Pembuatan prototipe Aluminium cylinder head engine dengan metode *rapid prototyping* dan *investment casting*”, *Journal TURBO*, 142-151, 2021.
- [11] MAZIARZ, W., GREGER, M., DLUGOSZ, P., DUTKIEWICZ, J., WOJCIK, A., ROGAL, U., GLOWINSKA, S. K., HILSER, O., PASTRNAK, M., CIZEK, L., RUSZ, S., “Effect of severe plastic deformation process on microstructure and mechanical properties of AlSi/SiC composite”, *Journal Pre-proof*, January, 2022.
- [12] TAUUVANA, I, A., “Pengaruh Temperatur Tuang, Temperatur Cetakan Dan Tekanan Terhadap Struktur Mikro, Kekerasan Metode *High Die Casting* (HPDC) Paduan Aluminium-Silikon”, *Journal ELEKTRA*, v.5, n.1, pp.7-12, January, 2020.

- [13] ARRAHIM, G. M., SUPRAPTO, W., GAPSARI, F., “Pengaruh Fraksi Penguat *Fly Ash* Dan Temperatur Cetakan Terhadap Sifat Kekerasan Dan Struktur Mikro Pada MMC”, *Journal Rekayasa Mesin*, pp.725-732, October, 2021.
- [14] LI, Y., LIU, J., ZHANG, Q., & HUANG, W., “*Casting defects and microstructure distribution characteristics of aluminum alloy cylinder head with complex structure*”, *Journal ELSEVIER, In Materials Today Communications*, Vol. 27, May 2021.
- [15] KUSNANTO, I., Pengaruh variasi temperatur cetakan terhadap density, porositas, kekerasan dan struktur mikro hasil pengecoran *squeeze aluminium*, Skripsi., Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, 2020.