

Analisa Cacat yang Terjadi pada Proses Pembuatan Roda Gigi Lurus Melalui Proses Pengecoran Besi Cor Nodular yang Menggunakan Chill

Justino M. Salsinha¹, Rusnaldy¹, P. Paryanto¹, Natalino Fonseca D. S. Guterres^{1,2*} dan Achmad Widodo¹

¹Department of Mechanical Engineering, Diponegoro University
Jl. Prof. Soedharto Street, Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

²Department of Mechanical Engineering, Dili Institute of Technology

Rua de Ai-Meti Laran Street, Dili - Timor Leste

*E-mail: natalinofonseca81@gmail.com

Abstract

Gear surface hardening by using chill in the casting method is very unique in the gear manufacturing process because it shortens the stages of gear manufacturing. The problem that needs attention is the occurrence of defects in the tooth profile after the gears are cast. Porosity defects and shrinkage or expansion defects often occur in the final solidification step in nodular cast iron materials. The use of chill is a fast cooling rate on the surface between the cast and molded material. However, it is easy for air bubbles to occur in the process of forming spheroidal graphite at the end of the solidification step. The purpose of this study was to analyze shrinkage or expansion defects and porosity defects that occur on the tooth profile surface. Casting uses an electric furnace at a temperature of 1400oC and an open mold using silica sand. Before the pouring step, the chill will be heated at a temperature of 700oC. Dimensional change defects are detected by measuring the dimensions of the tooth profile. While the porosity defects were tested by radiography to determine the cavities in the chilled area, then the percentage value of porosity used the pycnometric method and the Archimedes principle. Shrinkage defects in the tooth thickness area are on average 0.2mm (0.04%), while porosity defects in chilled areas are cavities in the surface area of the tooth profile having the highest porosity value reaching 0.108wt.% because it is influenced by Cooling speed too high.

Keywords: Spur gear, Chill, Nodular cast iron, Shrinkage defect, Porosity defect. Abstrak

Abstrak

Pengerasan permukaan roda gigi menggunakan chill dalam metode pengecoran sangat unik pada proses manufaktur roda gigi karena mempersingkat tahapan pembuatan roda gigi. Tetapi hal yang perlu diperhatikan adalah terjadinya cacat pada profil gigi setelah roda gigi dicor. Sering terjadi cacat porositas dan cacat penyusutan atau ekspansi pada langkah akhir pembekuan pada material besi cor nodular. Penggunaan chill sebagai laju pendinginan cepat dipermukaan antara material cor dan cetakan, akan tetapi mudah terjadi gelembung-gelembung udara pada proses pembentukan sferoidal grafit di saat langkah akhir pembekuan. Tujuan penelitian ini untuk menganalisa cacat penyusutan atau ekspansi dan cacat porositas yang terjadi pada permukaan profil gigi. Pengecoran menggunakan tungku listrik pada temperatur 1400°C dan cetakan terbuka menggunakan pasir silika. Sebelum langkah penuangan maka chill akan dipanaskan pada temperature 700°C. Cacat perubahan dimensi dideteksi dengan cara pengukuran dimensi profil gigi. Sedangkan cacat porositas diuji dengan radiografi untuk mengetahui rongga-rongga di daerah yang dilapisi chill, selanjutnya nilai persentasi porositas menggunakan metode piknometri dan prinsip archimedes. Cacat perubahan dimensi di daerah tebal gigi rata-rata mengalami -0,024mm (0,322%), sedangkan cacat porositas di daerah yang dilapisi chill adalah terdapat rongga-rongga di daerah permukaan profil gigi memiliki nilai porositas tertinggi mencapai 0,108wt.% karena dipengaruhi oleh kecepatan pendinginan terlalu tinggi.

Kata kunci: Roda Gigi Lurus, Chill, Besi Cor Nodular, Cacat Shrinkage, Cacat Porositas

1. Pendahuluan

Sistem manufaktur roda gigi meliputi permesinan dan ada juga menggunakan proses pengecoran, tergantung material yang digunakan [1]. Salah satu proses pembuatan roda gigi lurus dengan material besi cor adalah menggunakan sistem pengecoran, metode pengecoran roda gigi sebagai langkah awal produksi roda gigi untuk membentuk profil gigi kemudian selanjutnya dengan *finishing* dan proses grinding, blasting dan lain-lain [2]. Faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas roda gigi adalah terjadinya kesalahan-kesalahan pada saat proses pengecoran, proses permesinan dan juga pemilihan material [3]. Material yang telah banyak digunakan untuk pembuatan roda gigi adalah baja karbon dan baja paduan seperti AISI 1040, AISI 1060, AISI 4140, dan AISI 4340. Baja ini dapat digunakan untuk pembuatan roda gigi dengan cara permesinan [4, 1].

Selain material baja, besi cor juga sangat cocok digunakan untuk pembuatan roda gigi. Salah satu besi cor yang banyak dipakai adalah besi cor nodular karena mempunyai kelebihan seperti meredam getaran, ketangguhannya tinggi,

kekerasan tinggi dan prosesnya singkat [1]. Besi cor nodular adalah besi cor yang memiliki grafit berbentuk bulat, oleh karena itu besi cor nodular mempunyai keuletan sangat tinggi jika dibandingkan dengan besi cor kelabu, besi cor putih dan besi cor lainnya [5]. Tetapi ada juga kelemahan yang perlu diperhatikan ketika melakukan pengecoran, sering terjadi cacat penyusutan atau ekspansi dan cacat porositas.

Pengerasan permukaan adalah langkah penting dalam pembuatan roda gigi untuk meningkatkan kekerasan tinggi di lapisan permukaan profil gigi sehingga tahan terhadap gesekan yang tinggi pada saat roda gigi beroperasi [6-7]. Salah satu metode yang sangat singkat untuk pengerasan permukaan material besi cor nodular pada saat pengecoran adalah menggunakan *chill* [8], banyak penelitian telah menggunakan *chill* untuk mengeraskan permukaan spesimen yang dicor meskipun mereka belum menerapkan ke komponen-komponen mesin seperti roda gigi [9-10].

Chill adalah material atau komponen dengan konduktivitas termal tinggi yang digunakan untuk mempercepat laju pendinginan di dalam cetakan. *Chill* biasanya digunakan pada sistem pengecoran untuk pengerasan permukaan produk dengan menggunakan material besi cor [11]. Salah satu faktor penyebab dalam metode pengecoran adalah cacat penyusutan atau ekspansi dan cacat porositas yaitu di daerah permukaan antara dinding cetakan dan benda cor.

Ada dua macam cacat volumetri seperti penyusutan dan ekspansi yang terjadi pada proses pengecoran. Cacat porositas berupa porositas kaviti, porositas seperti gelembung berpori. Hasil penelitian dari [12] menjelaskan bahwa cacat-cacat yang sering terjadi pada permukaan spesimen cor dengan metode *chilled casting* adalah terjadi penyusutan dan terjadi juga porositas yang memiliki rongga skala kecil terbentuk pada batas butiran yang disebut interdendritik [13]. Terjadinya cacat porositas akan mempengaruhi nilai tegangan tarik dan tegangan impak [14].

Berdasarkan penjelasan Li dkk bahwa cacat porositas terbentuk pada material cor dapat dipengaruhi oleh komposisi kimia yang terkandung di dalam material [15]. Hal yang sama dengan penelitian dari K. Allafi dan A. Ahmadi [16]. Faktor lain adalah temperatur penuangan dan temperatur pembekuan yang tidak merata atau tidak beraturan maka akan menimbulkan cacat *cavity* di dalam specimen cor [17]. Penelitian yang dilakukan oleh Kim dkk menjelaskan bahwa pori-pori di dalam gas nukleasi yang terjadi pada cairan material cor akan meningkatkan volume cacat porositas [12].

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan tentang penggunaan *chill* untuk pengerasan permukaan spesimen cor sehingga nilai kekerasan sangat tinggi dan ketebalan kekerasan sangat tipis tetapi belum dinyatakan terjadi cacat pada permukaan yang dikeraskan. Dengan demikian penulis mencoba menganalisis cacat pada volumetri seperti penyusutan atau ekspansi dan cacat porositas pada permukaan profil gigi setelah roda gigi dilakukan pengecoran menggunakan *chill* untuk pengerasan permukaan.

2. Material dan metodologi

2.1. Material dan Proses Pengecoran Roda Gigi

Material dan peralatan penelitian akan disiapkan berdasarkan tujuan dan parameter penelitian yang telah ditentukan. Material yang digunakan untuk peleburan adalah baja skrap dan besi skrap, selanjutnya diproses melalui *Mg-treatment* sesuai penelitian yang telah dilakukan oleh A. Boutorabi dkk [18] untuk mendapatkan struktur sferoidal grafit berdasarkan rekomendasi panduan standar ASTM A536 [19] yaitu mengenai spesifikasi besi cor nodular yang diperuntukkan pembuatan roda gigi. Kapasitas *crucible* yang digunakan adalah 20kg dan dilebur menggunakan tungku listrik dengan tipe *Shang Li electric machinery* pada temperatur 1400°C. Proses operasi tungku listrik melalui menaikkan temperatur peleburan material besi cor nodular secara bertahap yang dimulai dari temperatur 400°C, ditahan selama 5 menit kemudian dinaikkan lagi ke temperatur 800°C dan ditahan selama 15 menit. Selanjutnya dinaik lagi hingga ke temperatur yang ditargetkan.

Material *chill* yang digunakan untuk pengerasan permukaan roda gigi adalah pelat baja tahan karat (*stainless steel*) dengan cara melapisi permukaan cetakan. tipe pelat baja tahan karat ini adalah austenitik *stainless steel* SS 304 seperti yang telah digunakan oleh penelitian terdahulu [9-10]. Ketebalan variasi pelat *chill* yang dipergunakan untuk masing-masing sampel roda gigi dapat dicantumkan dalam Tabel 1 dan komposisi kimia dari material *chill* dapat dilihat dalam Tabel 2.

Tabel 1. Parameter penelitian tentang *chill* dan sampel roda gigi yang akan diproduksi

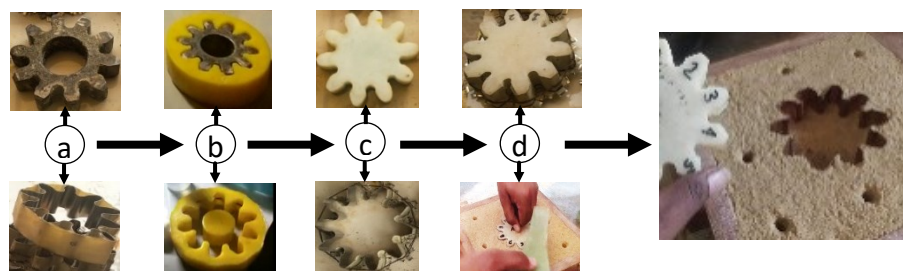
Code sampel roda gigi	Tebal <i>chill</i> (SS 304 pelat) (mm)	Ketebalan gigi (<i>tooth thickness</i>) (mm)
G1 (Acuan)	-	16,01
G2	0,2	15,85
B3	0,4	15,88
B4	0,6	15,24

Tabel 2. Komposisi kimia pelat austenitik *stainless steel* SS 304 untuk pembuatan *chill* sesuai standar ASTM [21]

Kandungan unsur	C	Si	Mn	Ni	Cr	Fe
wt.%	0,05	0,27	1,37	4,91	19,34	72,78

Setelah mengetahui material utama untuk pengecoran roda gigi dan *chill* maka selanjutnya mempersiapkan pola roda gigi dan cetakan terbuka yang terbuat dari pasir silika. Material yang digunakan untuk membuat cetakan adalah lempengan kayu untuk membuat bingkai kotak untuk cetakan pasir silika, komposisi pasir yang digunakan adalah campuran silika SiO₂ (silika dioksida) 89%, bentonit 7,5%, dan air 3,5%, sedangkan jenis resin yang digunakan adalah alkaline *phenolic*, yaitu bahan perekat. Seperti yang telah dipakai pada penelitian terdahulu [9].

Jumlah pola roda gigi yang dibuat adalah 4 buah yang telah diberi kode dan kegunaannya masing-masing seperti dilihat dalam Tabel 1. Pola roda gigi seperti G2, G3 dan G4 akan digunakan untuk pembentukan lubang di dalam cetakan pasir selanjutnya untuk pengecoran roda gigi yang berjalan dengan tahapan pengerasan permukaan menggunakan *chill*. Akan tetapi pola roda gigi G1 adalah hanya digunakan sebagai pola awal. Pola awal roda gigi ini sebagai data pembanding untuk dimensi setelah roda gigi dilakukan proses pengecoran, selain itu pola awal sebagai fungsi untuk mencetak pola G2, G3 dan G4. Tiga pola ini (G2, G3, G4) akan berbeda dimensi terutama dimensi pada daerah tebal gigi (*tooth thickness*) seperti dilihat dalam Tabel 1. Material untuk pola acuan (G1) adalah baja karbon rendah yang dibuat dengan mesin *hobbing* untuk pembentukan profil gigi. Pola roda gigi G2, G3 dan G4 adalah menggunakan material resin+katalisnya dan di campur dengan *silicone rubber* untuk mencetak bentuk roda gigi lurus. Pola roda gigi dan perakitan pelat penambah terhadap pola (Gambar 1a) hingga dipasang untuk pembuatan cetakan resin (Gambar 1b) dan membuat pola G2, G3 dan G4 (Gambar 1c). Langkah selanjutnya adalah pola yang telah jadi akan dipasang dengan *chill* (Gambar 1d) sehingga diletakan ke dalam cetakan pasir dapat ditunjukkan pada Gambar 1e. Selanjutnya langkah pengambilan sampel yang telah cor untuk dilanjutkan dengan proses permesinan (bubut) untuk memotong ketebalan roda gigi sesuai yang dengan spesifikasi roda gigi.

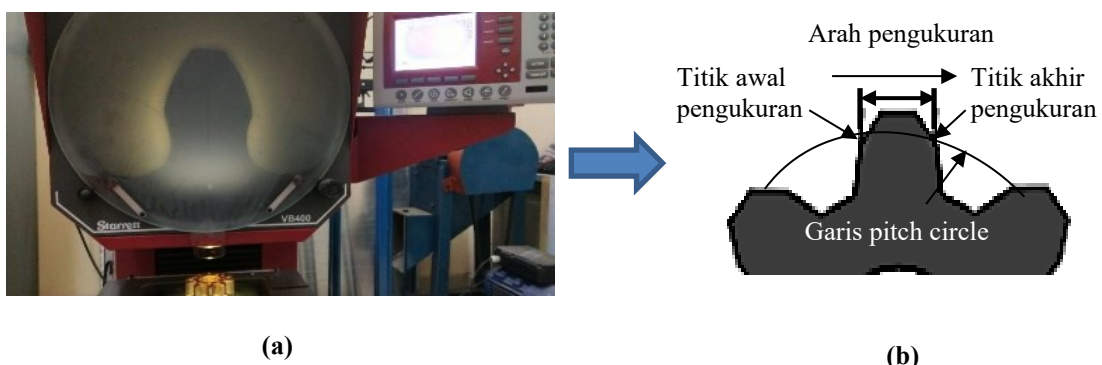


Gambar 1. Diagram skematik proses pembuatan pola dan *chill* (a) pola roda gigi acuan dan pelat penambah dimensi (b) pengecoran cetakan roda gigi dari *silicone rubber* (c) Pola roda gigi yang telah dibuat dan pelat *chill* (d) perakitan *chill* terhadap pola roda gigi (e) pembentukan lubang bekas pola pada cetakan pasir silika.

Nomenklatur roda gigi yang dibuat dalam penelitian ini adalah Modul (m) = 8, Jumlah gigi (z) = 10, Tebal roda gigi (f) = 25mm, Diameter poros atau lubang tengah (r) = 40mm, Sudut tekan ($^\circ$) 25°, Diameter lingkaran kepala (D_o) = 96mm, Diameter lingkaran kaki (b) = 60mm, Tinggi gigi (h_i) = 18mm dan Tebal gigi (t) = 16mm.

2.2. Inspeksi dan Pengujian Roda Gigi

Inspeksi roda gigi pada penelitian ini adalah setelah roda gigi dilakukan pengerasan permukaan menggunakan *chill*. Pengukuran dimensi dilakukan untuk mengetahui cacat penyusutan atau ekspansi pada profile gigi akibat distorsi volumetrik setelah pengecoran. Dengan demikian pengukuran dimensi menggunakan alat ukur profil proyektor *Starrett VB400* dilengkapi dengan *Quadra-Chek 200* sebagai fungsi deteksi nilai hasil pengukuran secara digital seperti dilihat pada Gambar 2a dan dapat diukur di daerah titik kontak pada tebal gigi (*tooth thickness*) seperti dilihat pada Gambar 2b. Pentingnya tebal gigi adalah mempengaruhi perubahan titik kontak awal dan titik kontak akhir di flank gigi. Perubahan tebal gigi ini juga akan mempengaruhi dimensi di daerah addendum dan dedendum [20]. Selanjutnya hasil pengukuran akan diolah di Ms Excel kemudian di analisa melalui grafik.



Gambar 2. Diagram skematik proses pengecoran roda gigi menggunakan *chill*

2.3. Pengujian Radiografi

Pada pengujian radiografi menggunakan metode non destruktif menggunakan alat *X-ray computed tomography (CT)* scan ini paling efisien untuk keperluan kontrol kualitas dari produk-produk pengecoran [21-22]. Peralatan medis ini dalam bidang metalurgi digunakan secara cepat dan akurat untuk mendeteksi porositas, penyusutan dan *inclusion* pada spesimen dicor seperti yang dilakukan dalam penelitian terkait [23]. Pengujian radiografi dilakukan terhadap 3 sampel (G2, G3 dan G4) setelah dicor dan hasil cacat akan saling dibandingkan karena tiga spesimen roda gigi menggunakan ketebalan *chill* yang berbeda. Penggunaan tebal pelat *chill* 0.2mm terhadap sampel roda gigi G2, tebal *chill* 0,4mm dipakai pada spesimen roda gigi G3, dan tebal *chill* 0,6mm dipakai pada spesimen roda gigi G4. Tujuan dari pengujian radiografi ini untuk mendeteksi posisi pembentukan cacat porositas di daerah-daerah roda gigi yang mengalami lubang rongga akibat gelembung-gelembung udara yang terjadi pada saat langkah pembekuan.

2.4. Pengujian Cacat Porositas dan Densitas

Pengujian ini menggunakan metode destruktif, spesimen roda gigi akan dipotong dalam bentuk persegi empat di daerah-daerah yang mengalami rongga-rongga dan pori-pori berdasarkan hasil uji radiografi dan juga didaerah flank gigi. Dimensi sampel uji adalah 3x3x3mm. Selanjutnya sampel dilanjutkan dengan pengujian densitas untuk mengetahui volume cacat porositas (%). Volume cacat porositas akan menggunakan metode piknometri dengan perhitungan prinsip Archimedes untuk mengetahui nilai presentasi porositas yang terjadi di daerah profil gigi seperti yang telah digunakan oleh penelitian terkait Taylor dkk [24] dan penelitiannya D. Tyagita dan Irawan [25]. Setelah hasil diketahui maka nilai persentasi dibandingkan dengan uji densitas melalui *apparent density* dan *true density* dan memperhitungkan dengan persamaan 1.

$$\%P = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_{th}}\right) \times 100\% \quad \dots\dots\dots (1)$$

Dimana, %P adalah nilai persentasi porositas (%), ρ_s adalah *apparent density* (g/cm³) dan ρ_{th} adalah nilai *True density* (g/cm³). Selanjutnya hasil perhitungan akan ditampilkan dalam tabel dan di analisa pada grafik.

3. Hasil dan pembahasan

Hasil pengecoran roda gigi dapat ditampilkan pada Gambar 3 sedangkan produk roda gigi hasil pengecoran dapat dilihat pada Gambar 3d. Ada 3 (tiga) spesimen roda gigi yang dicetak adalah menggunakan tebal *chill* yang berbeda untuk mengeraskan permukaan profil gigi. Data-data hasil uji roda gigi yang dapat dibahas dalam bab ini seperti data hasil cacat perubahan dimensi setelah dicor, data hasil uji radiografi dan data hasil pengujian cacat porositas.



Gambar 3. Proses pembuatan roda gigi (a) pengecoran roda gigi (b) pembersihan sampel roda gigi bebas dari ikatan pasir (c) pemotongan ketebalan roda gigi (bubut) (d) sampel roda gigi yang telah jadi

3.1 Hasil Pengujian Cacat Shrinkage (Perubahan Dimensi)

Pengujian hasil pengukuran dimensi dilakukan untuk mengetahui nilai tebalnya cacat penyusutan atau ekspansi yang terjadi pada profil roda gigi terutama di tebal gigi (*tooth thickness*). Data hasil pengukuran dimensi roda gigi dapat ditampilkan dengan cara membandingkan antara roda gigi acuan (G1) dan produk pengecoran roda gigi G2, G3 dan G4 yang setelah di cor.

Selanjutnya pembahasan dilakukan untuk setiap gigi yang sedang mengalami penyusutan atau ekspansi. Dari kondisi menyusut dan ekspansi tersebut akan dapat mengetahui seberapa cacat perubahan dimensi yang terjadi pada roda gigi setelah roda gigi dilakukan pengerasan permukaan menggunakan *chill*. Gigi-gigi yang dipilih sebagai perwakilan data adalah gigi nomor 1, gigi nomor 2, gigi nomor 5, gigi nomor 6, gigi nomor 9 dan gigi nomor 10. Gigi-gigi dari roda gigi akan diberi simbol dengan T, maka T1, T2, T5, T6, T9 dan T10.

Tabel 3 Dimensi pola roda gigi setelah daerah tebal gigi (*tooth thickness*) dilakukan pengukuran.

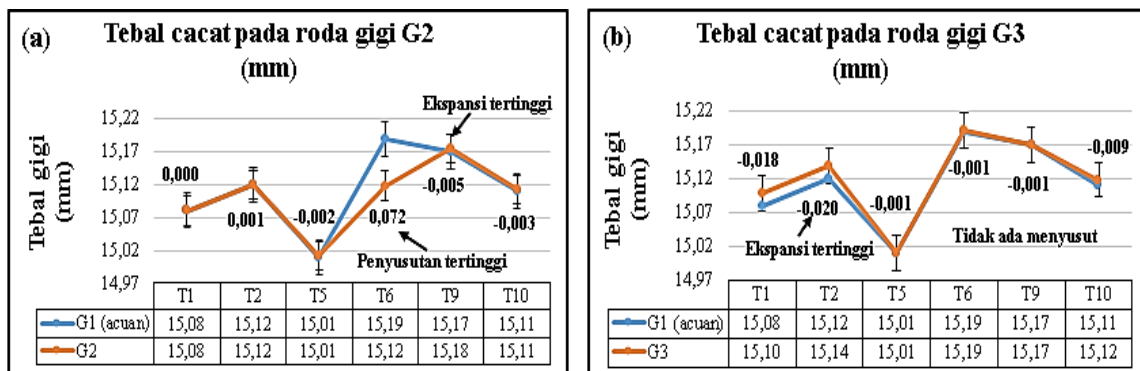
Dimensi pola roda gigi							
G1 (Pola acuan)		G2		G3		G4	
Nomor gigi	Tebal gigi (mm)	Tebal gigi (mm)	Pelat penambah	Tebal gigi (mm)	Pelat penambah	Tebal gigi (mm)	Pelat penambah
T1	15,080	15,100		15,130		15,180	
T2	15,120	15,140		15,170		15,220	
T5	15,010	15,030		15,060		15,110	
T6	15,190	15,210	0,02mm	15,240	0,05mm	15,290	0,10mm
T9	15,170	15,190		15,220		15,270	
T10	15,110	15,130		15,160		15,210	
Std. Dev.	0,059	0,059		0,059		0,059	

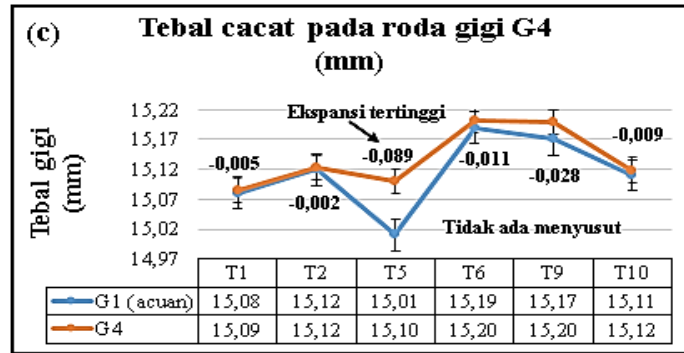
Untuk mengetahui nilai cacat ekspansi akan dibedakan dengan kode negatif (-) pada hasil numerik dalam Tabel 4. Yang artinya angka yang disertai negatif (-) adalah roda gigi mengalami cacat ekspansi, untuk angka yang disertai tanda positif (tidak tertulis) yaitu roda gigi mengalami penyusutan.

Tabel 4 Dimensi daerah tebal gigi (*tooth thickness*) setelah roda gigi dicor dan dilakukan pengukuran

Dimensi untuk sampel roda gigi setelah dicor									
Nomor gigi	Tebal gigi (mm)	G2		G3			G4		
		Tebal chill	Tebal cacat (mm)	Tebal gigi (mm)	Tebal chill	Tebal cacat (mm)	Tebal gigi (mm)	Tebal chill	Tebal cacat (mm)
T1	15,080		0,000	15,098		-0,018	15,085		-0,005
T2	15,119		0,001	15,140		-0,020	15,122		-0,002
T5	15,012		-0,002	15,011		-0,001	15,099		-0,089
T6	15,118	0,2mm	0,072	15,191	0,4mm	-0,001	15,201	0,6mm	-0,011
T9	15,175		-0,005	15,171		-0,001	15,198		-0,028
T10	15,113		-0,003	15,119		-0,009	15,119		-0,009
Std. Dev.	0,054			0,064			0,050		
Nilai ketebalan rata-rata cacat/terdistorsi		0,010mm		-0,008mm		-0,024mm			

Dari Tabel 3 tercantum dimensi untuk pola roda gigi awal yaitu pola roda gigi acuan (G1), dengan demikian nilai pola acuan akan dibandingkan dengan nilai perubahan dimensi setelah roda gigi dilakukan pengecoran yang ditampilkan dalam Tabel 4. Selanjutnya hasil perbandingan untuk setiap sampel roda gigi (G2, G3 dan G4) akan ditampilkan dalam grafik pada Gambar 4.





Gambar 4. Hasil pengukuran nilai cacat setelah sampel roda gigi dilakukan pengecoran (a) tebal cacat pada sampel roda gigi G2 (b) tebal cacat pada sampel roda gigi G3 (c) tebal cacat pada sampel roda gigi G4

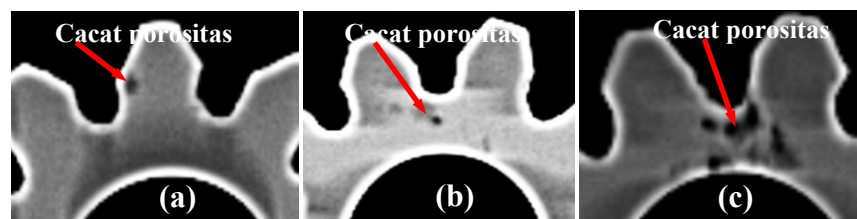
Gambar 4a menampilkan hasil cacat yang terjadi pada sampel roda gigi G2 yang menggunakan tebal *chill* 0,2mm. Sebagian besar daerah tebal gigi (*tooth thickness*) mengalami penyusutan tetapi ada beberapa gigi juga sedang mengalami cacat ekspansi. Nilai cacat tertinggi atau disebut perubahan dimensi tertinggi yang terjadi pada daerah tebal gigi untuk sampel roda gigi G2 adalah 0,072mm mengalami penyusutan atau penurunan dimensi pada daerah tebal gigi. Sedangkan cacat yang mengalami ekspansi yang tertinggi adalah -0,005mm. Cacat rata-rata dari semua gigi-gigi yang mengalami perubahan dimensi adalah 0,010mm (0,160%). Dilihat dari hasil rata-rata dari cacat penyusutan atau ekspansi bahwa dengan menggunakan tebal pelat penambah yang fungsinya untuk mencegah cacat penyusutan dan ekspansi pada proses pengecoran maka nilai rata-rata cacat ini masih termasuk kategori aman jika dibandingkan dengan nilai standar cacat porositas untuk sistem pengecoran besi cor nodular adalah 0,7%, yang dijelaskan dalam ASM Handbook Vol. 1 [13].

Gambar 4b menampilkan hasil inspeksi cacat untuk sampel roda gigi G3 yang menggunakan tebal *chill* 0,4mm bahwa jenis cacat yang terjadi di daerah tebal gigi (*tooth thickness*) rata-rata mengalami cacat ekspansi yang artinya di daerah-gigi-gigi mengalami penambahan dimensi di tebal gigi. Nilai ekspansi tertinggi adalah 0,02mm dan nilai ekspansi terendah adalah 0,001mm. Selain itu nilai cacat rata-rata di daerah tebal gigi pada sampel roda gigi G3 adalah -0,008mm (0,126%). Hasil cacat ekspansi pada sampel roda gigi G3 ini nilainya lebih kecil dari pada nilai cacat rata-rata pada sampel roda gigi G2. Dikarenakan pada pola modifikasi yang menggunakan resin dan silikon *rubber* seperti dilihat pada Gambar 1b adalah menggunakan tebal pelat penambah 0,05mm, sehingga dapat mencegah terjadinya cacat penyusutan pada daerah yang dilapisi *chill* yaitu daerah tebal gigi (*tooth thickness*).

Selanjutnya analisis untuk hasil sampel roda gigi G4 setelah dilakukan pengecoran yang ditampilkan pada Gambar 4c. rata-rata bentuk cacat yang terjadi pada permukaan tebal gigi mengalami cacat ekspansi akan tetapi tidak ditemukan cacat penyusutan pada daerah yang dilapisi *chill*. nilai cacat ekspansi tertinggi ditemukan pada gigi-gigi yang terpilih adalah -0,089mm dan nilai cacat ekspansi terendah adalah -0,002mm, dengan demikian nilai cacat rata-rata untuk sampel roda gigi G4 adalah -0,024mm. Sampel roda gigi G4 mengalami cacat ekspansi lebih tebal dari pada sampel roda gigi yang lain karena penggunaan pelat penambah pada pola adalah 0,10mm sehingga penambahan dimensi pada pola roda gigi dari material resin lebih besar dan dapat mencegah terjadinya cacat penyusutan pada tebal gigi pada saat roda gigi dicor.

3.2 Hasil Pengujian Radiografi

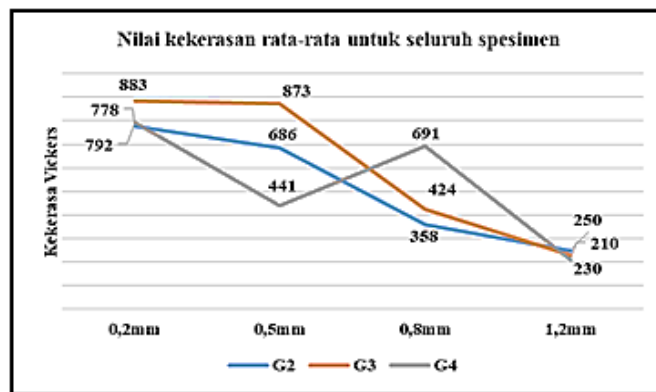
Hasil uji radiografi dapat ditunjukkan pada Gambar 5 bahwa pada sampel roda gigi G2 terbentuknya lubang pori di daerah-daerah yang di lapisi *chill* yaitu daerah flank gigi tetapi di daerah tengah tidak terjadi lubang pori. Porositas terbentuk pada sampel roda gigi G3 adalah terbentuk di daerah akar gigi dan porositas terbentuk pada sampel roda gigi G4 adalah sangat banyak terbentuk di daerah akar gigi. Terjadinya lubang yang berskala kecil maupun skala besar tersebut disebabkan adanya gelembung-gelembung udara pada saat pembentukan sel-sel interdendritik pada saat langkah akhir pembekuan material cor [26-27].



Gambar 5 Cacat porositas (lubang pori-pori) pada profil roda gigi setelah dilakukan CT-scan (a) pembentukan porositas pada sampel roda gigi G2 (b) pembentukan porositas pada sampel roda gigi G3 (c) pembentukan porositas pada sampel roda gigi G4.

3.3 Hasil Pengujian Kekerasan Microvickers

Hasil nilai kekerasan *vickers* ini diambil pada tahap setelah proses pengecoran. Data hasil nilai kekerasan *vickers* akan dibanding antara penggunaan *chill* yang lebih tebal dan penggunaan *chill* yang lebih tipis. Diperlukan perbandingan karena ketebalan *chill* sangat mempengaruhi nilai kekerasan pada saat laju pendinginan tinggi akan menciptakan struktur matriks sementi dan struktur fasa martensit mengelilingi grafit nodul seperti yang dijelaskan oleh penelitian terkait [10]. Pada hasil pengujian kekerasan di permukaan sampel roda gigi G2, G3 dan G4 di lihat pada Tabel 5 bahwa sampel roda gigi G2 yang menggunakan *chill* yang lebih tipis maka di daerah permukaan nilai kekerasan rata-rata mencapai 792HV tetapi daerah tengah terjadi kekerasannya menurun 200-300HV dapat dilihat dalam grafik pada Gambar 6. Sampel G3 dan G4 menggunakan *chill* lebih tebal maka nilai kekerasan dipermukaan lebih tinggi rata-rata mencapai 778-883HV. Hal ini dikarenakan menggunakan *chill* yang lebih tebal maka laju pendinginan sangat tinggi. Hal yang sama dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Guterres dkk [10] bahwa mereka tidak menggunakan proses *preheating* terhadap pelat *chill* maka hasil yang ditemukan adalah menggunakan *chill* yang lebih tipis menghasilkan nilai kekerasan sangat tinggi yaitu mencapai 900HV. Dengan demikian menggunakan proses *preheating* akan mempengaruhi nilai kekerasan di permukaan, karena distribusi pancaran api menghambat laju pendinginan cepat di permukaan yang dilapisi *chill* seperti yang dijelaskan dari penelitian terkait [9].



Gambar 6 Grafik nilai kekerasan rata-rata untuk seluruh spesimen G2,G3 dan G4.

3.4 Hasil Pengujian Cacat Porositas

Data hasil besarnya nilai porositas berdasarkan analisa densitas. Densitas (ρ) merupakan perbandingan antara massa bahan dengan volume bahan yang sedang diuji. Pengujian densitas untuk sampel roda gigi ini dilakukan untuk mengukur massa dengan menggunakan timbang dan dilanjutkan dengan mengukur volume berdasarkan pertambahan volume air pada gelas ukur ketika di masukan sampel uji. Dengan demikian ada sembilan sampel yaitu 3 sampel diambil dari sampel roda gigi G2, tiga sampel lagi diambil dari sampel roda gigi G3 dan tiga sampel lainnya diambil dari sampel roda gigi G4. Selanjutnya dari masing-masing sampel tersebut dapat diukur dan nilainya dijumlahkan untuk mengambil nilai rata-rata sehingga digunakan sebagai pembahasan dan analisa data. Dari beberapa sampel ini akan di uji untuk membandingkan antara roda gigi yang menggunakan tebal *chill* yang lebih besar dan tebal *chill* yang lebih kecil dengan alasan bahwa ketebalan *chill* sangat berpengaruh kepada cacat-cacat yang terjadi di daerah yang dilapisi *chill* yaitu daerah tebal gigi (*tooth thickness*).

Hasil pengujian cacat porositas pada flank gigi untuk roda gigi G2 yang ditampilkan dalam Tabel 5 bahwa nilai presentasi untuk masing-masing spesimen akan dihitung dengan metode yang sama. Sebelumnya terlebih dahulu menentukan nilai true density dan apparent density dan data perhitungan menggunakan metode sesuai dengan standar ASTM E-252 [29].

Sampel G2 menggunakan tebal pelat *chill* 0.2mm dan menggunakan suhu *preheating* 700°C. Hal tersebut menunjukkan bahwa porositas yang terjadi di permukaan rata-rata sebesar 7,833wt.%. Nilai tersebut dihitung dan dapat dilihat pada Tabel 5. Bahwa *macro porosity* tidak terlalu banyak dan juga terdapat pori-pori yaitu mikro porositas. Cacat porositas sedikit terbentuk karena laju pendinginan lambat karena penggunaan *preheating* sebelum penuangan. Perhitungan menggunakan metode sesuai dengan standar ASTM E-252 [28].

Hasil perhitungan presentase cacat porositas untuk roda gigi berdasarkan perhitungan *apparent density* untuk sampel roda gigi G2, G3 dan G4 maka *true density* menggunakan persamaan 1 dan berdasarkan prinsip *Archimedes* sehingga bisa mengetahui nilai persentasi porositas di daerah yang dilapisi *chill* yaitu daerah permukaan flank gigi.

Tabel 6 menampilkan hasil nilai total rata-rata untuk nilai *apparent density* dibagi dengan nilai total *true density*, maka akan diketahui hasil akhir porositas yang terbentuk di permukaan flank gigi.

Tabel 5 Hasil perhitungan *true density*.

Unsur	1/Densitas (M3/Mg)	Persentase Berat (Wt.%)	1/Densitas X Persentase Berat (Wt.%)
C	0,44	3,89	1,721
Mn	0,14	0,45	0,062
Si	0,43	1,90	0,819
Cr	0,14	0,04	0,006
Ni	0,11	0,17	0,019
Mo	0,10	0,07	0,007
Cu	0,11	0,15	0,017
P	0,55	0,03	0,016
S	0,48	0,00	0,001
Ce	0,12	0,15	0,018
Mg	0,57	0,06	0,034
Fe	0,13	93,088	11,828
Total			12,766
			100
			7,833

Dengan demikian porositas yang terbentuk di permukaan sampel roda gigi G2 adalah rata-rata mencapai 0.088wt.%. Sedangkan cacat porositas yang terbentuk di daerah permukaan flank gigi untuk sampel roda gigi G3 adalah rata-rata 0.075wt.%. Selanjutnya di permukaan flank gigi untuk sampel roda gigi G4, cacat porositas yang terbentuk mencapai 0.108wt.%. Dilihat dari beberapa sampel yang telah menggunakan ketebalan *chill* yang berbeda seperti ditampilkan di dalam Tabel 6 bahwa semakin tebal *chill* digunakan untuk melapisi permukaan dengan tujuan mengeraskan permukaan roda gigi pada proses pengecoran akan semakin tinggi juga laju pendinginan cepat dipermukaan sehingga menghasilkan kekerasan tinggi tetapi cacat porositas bertumbuh semakin banyak jika di bandingkan dengan sampel yang menggunakan tebal *chill* yang lebih tipis pada permukaan flank gigi. Cacat porositas terbentuk karena dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti laju pendinginan cepat, desain riser tidak baik dan juga temperatur penuangan sangat rendah maka terjadi pertumbuhan struktur dendritik lebih lambat sehingga timbul lubang pori di antara celah sel struktur matrix pada material padat seperti yang dijelaskan oleh penelitian Lekakh dan Hrebec [29]. Penyebab lain adalah laju pendinginan di antara material cor dan cetakan terlalu tinggi dapat dijelaskan dari J. Beddoes dan M. J. Bibby [30].

Tabel 6 Total nilai perhitungan persentase porositas (%) untuk sampel roda gigi

Sampel	<i>Pth</i> (cm ³)	<i>Ps</i> (g/cm ³)	Hasil	1-Hasil	porositas (wt.%)
G2	7,83	7,142	0,912	0,088	0,088
G3	7,83	7,242	0,925	0,075	0,075
G4	7,83	9,689	0,892	0,108	0,108

4. Kesimpulan

Proses pembuatan roda gigi lurus dengan material besi cor nodular menggunakan *chill* untuk mengeraskan permukaan profil gigi yang sejalan dengan proses pengecoran. Akan tetapi cacat porositas dan cacat penyusutan adalah hal penting untuk di analisa. Maka berdasarkan hasil yang telah didapat sehingga penulis mengambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengerasan permukaan menggunakan *chill* menghasilkan nilai kekerasan tinggi yaitu mencapai 883HV.
2. Terjadi cacat porositas di permukaan profil gigi yang dilapisi *chill* mencapai 7,613%, karena dipengaruhi oleh laju pendinginan yang sangat tinggi. Semakin tebal *chill* yang digunakan maka laju pendinginannya pun tinggi tetapi cacat porositas akan semakin banyak.
3. Perubahan dimensi pada daerah tebal gigi adalah semua profil gigi rata-rata mengalami ekspansi dengan nilai perubahan dimensi adalah -0,024mm setelah roda gigi dilakukan proses pengecoran. Nilai perubahan dimensi tertinggi adalah mencapai -0,089mm adalah mengalami ekspansi.
4. Dengan menggunakan pelat penambah untuk mencegah terjadinya cacat penyusutan pada profil gigi, maka nilai cacat penyusutan tertinggi adalah 0,072mm yang terjadi pada sampel roda gigi G2 yang menggunakan tebal pelat penambah 0,02mm.

5. Dilihat dari hasil perbandingan antara *chill* yang lebih tebal dan *chill* yang lebih tipis maka diketahui penyebab terjadinya cacat porositas dan cacat penyusutan di daerah permukaan, sehingga disimpulkan bahwa laju pendinginan yang sangat tinggi akan menyebabkan banyaknya lubang pori-pori atau disebut porositas di permukaan yang dilapisi *chill*.

Ucapan terima kasih

Penulis sangat berterima kasih kepada pihak yang membantu dalam penyelesaian proses pengecoran di Politeknik Manufaktur Ceper-Klaten, Laboratorium inspeksi roda gigi di PT ATMI IGI Center Surakarta dan Laboratorium pengujian Badang Pelatihan TC-UNDIP Tembalang, Semarang.

Daftar Pustaka

- [1] Davis, J. R., *Gear Material, Properties, and Manufacture*. United State of America: ASM International, 2005. P 12-14.
- [2] Concli, F., Austempered Ductile Iron (ADI) for gears: Contact and bending fatigue behavior. *Procedia Struct. Integr.*, vol. 8., 2018. pp. 14–23.
- [3] Nisbett, B., *Mechanical Engineering: Shigley's Mechanical Engineering Design*. 8th Edition. United State of America: A Division of The Mc Graw Hill Companies, 2006. p 28-56
- [4] Gupta, K dkk., *Advanced Gear Manufacturing and Finishing (Classical and Modern Processes)*. London-United Kingdom: Elsevier Ltd, 2017. p 127-128.
- [5] Pongsak, C and Srichandr P., Continuously cast ductile iron : Processing , structures , and properties, *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 211, no. 8. 2011. pp. 1372–1378.
- [6] Meneghetti, G., Terrin A., dan Giacometti, S., A twin disc test rig for contact fatigue characterization of gear materials, *Procedia Struct. Integr.*, vol. 2, 2016. pp. 3185–3193.
- [7] Karpuschewski, B., Toefke, M., Beutner, M., and Spintig, W. Surface integrity aspects of milled large hardened gears, *Procedia CIRP*, vol. 13, 2014. pp. 37–42.
- [8] Qian, M dkk., Surface hardening of ductile cast iron using stainless steel,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 208, no. 1, 1996. pp. 88–92.
- [9] Guterres, N. F. D. S dkk., Investigate Temperature Preheating on the Chill Plate to Identify Surface Characteristic on the Ductile Iron by Sand Casting, *Int. J. Eng. Mater. Manuf.*, Vol. 6, no. 3, 2021. pp. 141–151.
- [10] Guterres, N. F. D. S dkk., The effect of chills thickness to microstructure and surface hardness layer on specimen ductile cast iron, in *the 4Th International Conference on Materials and Metallurgical Engineering and Technology (Icommet) 2020*, vol. 2384, no. 2021. p. 040004.
- [11] John, C., *A New Metallurgy of Cast Metals, Castings*, Second Edi. Oxford: Butterworth-Heineann, 2003 p 239-279.
- [12] Kim, S. dkk., Prediction of shrinkage defects in iron castings using a microporosity model., *Mater. Sci. Forum*, vol. 925 MSF, 2018. pp. 411–418.
- [13] Allen C. M dan Boardman B., *ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*, 10th Eediti. United State of America: ASM Handbook, Volume 1, 2005 p 25-48.
- [14] Benedetti, M., Fontanari, V dan Lusuardi, D., Effect of graphite morphology on the fatigue and fracture resistance of ferritic ductile cast iron, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 206, 2019. pp. 427–441.
- [15] Li, Z dkk., Characterization on the formation of porosity and tensile properties prediction in die casting Mg alloys, *J. Magnes. Alloy.*, 2021.
- [16] Khalil-Allafi, J. dan Amin-Ahmadi, B., Effect of Mold Hardness on Microstructure and Contraction Porosity in Ductile Cast Iron, *J. Iron Steel Res. Int.*, vol. 18, no. 4, 2011. pp. 44-47,67.
- [17] Hurst, S., *METAL CASTING Appropriate technology in the small foundry*. London-UK: Intermediate Technology Publications Ltd, 1996.
- [18] Alabbasian, F., Boutorabi, S. M. A dan Kheirandish, S., Effect of inoculation and casting modulus on the microstructure and mechanical properties of ductile Ni-resist cast iron, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 651, 2016. pp. 467–473.
- [19] ASTM A 536, *Standard Specification for Ductile Iron Casting*, no. Reapproved. 2004.
- [20] Atraszkiewicz, R dkk , High pressure gas quenching: Distortion analysis in gears after heat treatment,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 558, 2012. pp. 550–557.
- [21] Pollee, C dkk., An industrial radiography exposure device based on measurement of transmitted gamma-ray intensity, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 611, no. 1. 2015
- [22] Takemoto, Y., Mizumoto, M. Mizumoto, dan Kinno, K., Internal Porosity Defects in Ductile Cast Irons,” *Int. J. Met.*, vol. 15, no. 3, 2021. pp. 916–929.
- [23] Rebuffel, V., Sood, S dan Keynes, M., Defect Detection Method in Digital Radiography for Porosity in Magnesium Castings, *Ecmdt*, 2006. pp. 1–10.
- [24] Taylor, R. P., McClain, S. T dan Berry, J. T., Uncertainty analysis of metal-casting porosity measurements using Archimedes' principle, *Int. J. Cast Met. Res.*, vol. 11, no. 4, 1999. pp. 247–257.

- [25] D. A. T. dan Irawan, A., Porosity and Microstructure Analysis in Aluminum Waste Pieces, *First Int. Conf. Food Agric.*, vol. 253–172, 2018. pp. 565–571.
- [26] ASM International Handbook Committee, *Metals Handbook. Casting, Vol. 15*, 1988. p 593-630.
- [27] ASM International Handbook Committee, *ASM Metals Handbook, Metallography and Microstructure*, vol. Vol. 9. United State of America: ASM International, 2004. p 47-72.
- [28] ASTM E 252, *E252 6(2013) Standard Test Method for Thickness of Foil, Thin Sheet, and Film by Mass Measurement.*, Vol. 06, no. Reapproved. 2013.
- [29] Lekakh, S. N. dan Hrebec, B., Solidification kinetics of graphite nodules in cast iron and shrinkage porosity, *Int. J. Met.*, Vol. 10, no. 4, 2016. pp. 389–400.
- [30] Beddoes, J. Beddoes dan Bibby, M. J., *Principles of Metal Manufacturing Processes*. Canada: Elsevier, 2003.