

HUBUNGAN NILAI CE DENGAN LAPISAN KULIT THIN WALL DUCTILE IRON

by Muhammad Fadhlan FTI

Submission date: 03-Apr-2024 09:40AM (UTC+0700)

Submission ID: 2338486598

File name: M._Fadhlan_TRISAKTI_Jakarta_53_sd_62.pdf (1M)

Word count: 3714

Character count: 21488

HUBUNGAN NILAI CE DENGAN LAPISAN KULIT *THIN WALL DUCTILE IRON*

¹ M. Fadhlán^{1,*}, RD. Sulamet-Ariobimo², Yoska Oktaviano³

Mechanical Engineering Department, Faculty of Industrial Technology, Universitas Trisakti, Jakarta 11440

e-mail: ¹m.fadhlán@trisakti.ac.id, ²riantiariobimo@trisakti.ac.id, ³yoska@trisakti.ac.id

*Korespondensi: m.fadhlán@trisakti.ac.id

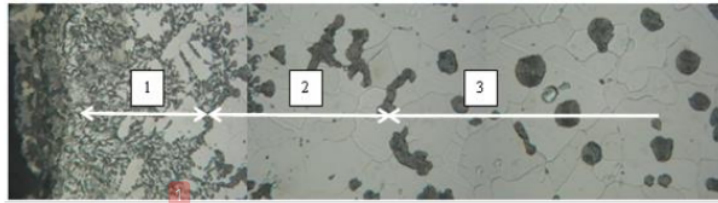
Abstract: The formation of skin effects in nodular cast iron produced using sand molds is a general problem. Since it can be cleaned during the machining process along with gating system removal. Skin effects become a problem when they form in nodular cast iron thin wall castings. In thin-wall castings, the skin effect becomes a problem because the cleaning process is difficult to perform. Therefore, a mechanism is needed to avoid the formation of skin effects in nodular cast iron thin wall castings. This work is carried out to see the effects of carbon equivalent (CE) as one of the important parameters during the casting process to the formation of skin effects, especially when the cast object produced is a component. Molten metals with different CE values are used to make thin wall ductile iron connecting rod components. Microstructure observations were carried out both in the I-beam and end-rod areas. Then the results obtained are compared with the previous research regarding the skin effects formed in thin-wall ductile iron plates. The result obtained is that the skin effects detected in thin-wall ductile iron connecting rods with different types of patterns and thicknesses from that formed on the plate.

Keywords: CE, Plate, Thin wall components, TWDI, Skin Effects.

PENDAHULUAN

Penggunaan komponen dinding tipis dalam komponen otomotif selain membantu penghematan penggunaan bahan bakar juga akan membantu mengurangi polusi udara. Tetapi penipisan yang dilakukan ini juga harus tetap memastikan bahwa komponen yang ditipiskan tersebut tetap memiliki karakteristik yang sama dengan kondisi awal. Berkaitan dengan karakteristik yang akan terbentuk, maka hal yang harus diperhatikan adalah kondisi logam cair. Ketika membicarakan kondisi logam cair, maka hal utama yang perlu diperhatikan dalam pengecoran besi tuang nodular (*ductile iron* – FCD) selain komposisi kimia adalah *carbon equivalent* (CE). CE adalah simplifikasi yang dilakukan untuk mengetahui efek dari komposisi kimia terhadap jenis besi tuang yang terbentuk.

Ketika teknologi dinding tipis diterapkan pada FCD untuk menghasilkan komponen ringan maka selain CE, perlu juga diperhatikan terbentuknya lapisan kulit pada struktur mikro. Lapisan kulit biasa terbentuk pada pengecoran besi tuang nodular yang menggunakan cetakan pasir. Pada pengecoran umum, lapisan kulit ini akan dibersihkan saat benda cor mengalami proses pembersihan dari pasir cetakan dengan menggunakan proses *shot blasting* maupun ketika dilakukan proses permesinan untuk memisahkan antara benda dengan sistem saluran tuangnya. Pembersihan ini perlu dilakukan mengingat hasil penelitian yang dilakukan oleh Goodrich dan Lobenhofer [1] menunjukkan bahwa keberadaan lapisan kulit ini mengurangi nilai tegangan tarik maksimum (UTS) dan elongasi. Sementara Dix dkk. [2] menemukan bahwa TWDI yang bersih dari lapisan kulit memiliki sifat mekanis yang setara bahkan lebih tinggi dari besi tuang nodular (FCD). Demikian juga hasil yang diperoleh Boonmee dkk. [3]. Hasil penelitian Boonmee menunjukkan bahwa rasio kekuatan tarik antara kondisi benda uji yang memiliki lapisan kulit dengan yang lapisan kulitnya dibersihkan untuk TWDI adalah 0,93. Sementara untuk rasio ketahanan leleh antara kondisi benda uji yang memiliki lapisan kulit dengan yang lapisan kulitnya dibersihkan adalah 0,687 untuk tekanan rata-rata 250 MPa dan 0,650 untuk tekanan rata-rata 300 MPa [4] untuk dan keterkaitan antara lapisan kulit, nodularitas dan ketahanan leleh adalah semakin tipis lapisan kulit, nodularitas akan meningkat dan faktor rasio ketahanan leleh akan menurun [5].



Gambar 1. Struktur Mikro Plat Dinding Tipis Besi Tuang Nodular (*Thin Wall Ductile Iron*). Daerah 1 adalah lapisan kulit (*skin effect*), Daerah 2 adalah daerah transisi dan Daerah 3 adalah bagian inti

Lapisan kulit yang dikenal juga sebagai *flake graphite rim anomaly* [6] atau *skin effect* [7] adalah lapisan yang terbentuk dari grafit serpih atau vermicular pada bagian tepi dari benda cor yang bersentuhan langsung dengan pasir cetakan seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Tingginya tingkat kesulitan proses permesinan untuk membersihkan lapisan kulit pada TWDI disebabkan karena tipisnya benda dan perbedaan ketebalan lapisan kulit yang terbentuk.

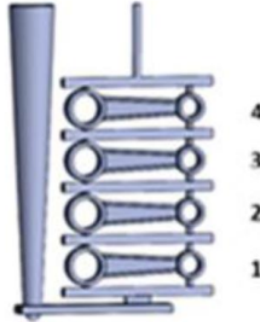
Aufderheiden dkk. menyatakan bahwa istilah Lapisan Kulit (*skin effect*) pertama kali digunakan oleh Reisener [7], [8] di tahun 1962 untuk menjelaskan lapisan yang terbentuk pada permukaan hasil coran besi tuang kelabu sebagai akibat berkurangnya jumlah karbon pada lapisan tersebut. *Skin effect* ini juga dikenal dengan sebutan lapisan *flake graphite rim anomaly* karena berkurangnya jumlah grafit yang terbentuk akibat terjadinya dekarburisasi [8] dan degradasi bentuk grafit [6]. *Skin effect* merupakan bagian dari lapisan kulit pengecoran (*casting skin*). Stefanescu dkk. [9] membagi *casting skin* menjadi 2 bagian, yaitu lapisan di permukaan (*surface*) dan lapisan di bawah permukaan (*subsurface*). *Skin effect* adalah lapisan kulit di bawah permukaan (*subsurface casting skin*).

Goodrich [10] menjelaskan bahwa *skin effect* terbentuk karena adanya kontaminasi sulfur pada pasir cetakan. Sementara Ruxanda dkk. [6] menyimpulkan bahwa *skin effect* terbentuk karena terjadinya oksidasi dari magnesium. Aufderheiden dkk [7] menyatakan bahwa faktor utama dalam pembentukan *skin effect* adalah kecepatan pendinginan. Boonmee dkk [11], [12] menyampaikan beberapa mekanisme untuk pembentukan *skin effect*. Mekanisme pertama adalah berkurangnya jumlah grafit karena karbon dalam logam cair bereaksi dengan uap air dan oksigen yang ada dalam pasir. Mekanisme ini sering ditemui pada cetakan yang terbuat dari *green sand* dan mengakibatkan terbentuknya lapisan kulit feritik. Mekanisme lain terkait berkurangnya jumlah grafit adalah terbentuknya lapisan austenit karena kinetika solidifikasi. Mekanisme ini khususnya menjelaskan terjadinya lapisan kulit pada pengecoran dengan cetakan baja. Pembentukan austenit dapat dipicu oleh besarnya derajat *undercooling* sehingga jumlah austenit meningkat sementara jumlah grafit berkurang. Pada mekanisme ini, karbon ekuivalen (CE) mempengaruhi Kondisi ini menyebabkan berkurangnya jumlah grafit. Ketika derajat *undercooling* meningkat dan/atau CE berkurang maka jumlah austenit primer akan meningkat. Ketebalan lapisan kulit akan berkurang jika CE meningkat mendekati daerah *coupled zone*. Selain CE, inokulasi dan konduktivitas termal juga mempunyai peran penting dalam mekanisme ini. Selain mekanisme diatas, Boonmee dkk. juga menjelaskan bahwa selain berkurangnya jumlah karbon, lapisan kulit juga terjadi karena berkurangnya jumlah magnesium. Pengurangan ini terjadi karena magnesium bereaksi dengan sulfur (S) dan oksigen (O) membentuk Mg-S dan Mg-O. Sulamet-Ariobimo dan Soedarsono [13] menyimpulkan bahwa komposisi jumlah magnesium dan kecepatan pendinginan adalah faktor utama dalam pembentukan *skin effect*.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh CE terhadap lapisan kulit yang dibentuknya pada komponen batang piston (*connecting rod*).

METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian dilakukan proses pengecoran batang piston dengan model pengecoran seperti terlihat pada Gambar 2. Proses pengecoran dengan menggunakan 5 jenis logam cair yang berbeda nomor tuangannya (*batch*). Cetakan yang digunakan adalah cetakan pasir furan yang menggunakan sulfurik katalisator. Komposisi kimia dari setiap logam cair diambil untuk proses pengujian komposisi kimia dengan menggunakan spektrometer dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 2. Desain Pengecoran Komponen Stang Piston [14]

Setelah logam cair tersolidifikasi secara sempurna dalam cetakan, lalu dilakukan proses pembongkaran dan pembersihan pasir cetak dengan menggunakan proses *sand blasting* seperti terlihat pada Gambar 3. Proses dilanjutkan dengan melakukan pengamatan makro untuk melihat kondisi dari batang piston. Proses pengamatan makro dilanjutkan dengan proses pengamatan mikro untuk melihat struktur mikro yang dihasilkan. Proses pengamatan mikro dilakukan baik tanpa etsa maupun dengan menggunakan etsa. Cairan etsa yang digunakan adalah Nitral 2%.



(a)



(b)

Gambar 3. Hasil Pengecoran Sebelum (a) dan Sesudah (b) Proses Pembersihan

Adapun hasil dari pengamatan struktur mikro tersebut disampaikan oleh Gambar 5.

Tabel 1. Komposisi Kimia Logam Cair

KODE	CE	Unsur Kimia - %									
		C	Si	Mn	Cu	Cr	Ni	Mg	P	S	Mo
Std-1	4,4 - 4,6	3,6-3,8	1,8-2,8	0,15-1,00	0,015-1,00	0,03-0,07	0,05-0,2	0,03-0,06	< 0,03	< 0,02	0,01-0,10
Std-2	-	3,5-3,9	2,4-2,8	0,3-0,5	≤ 0,15	≤ 0,15	≤ 0,15	≥ 0,03	≤ 0,03	≤ 0,02	-
S-1	4,37	3,67	2,68	0,44	0,27	0,03	0,01	0,05	0,01	0,02	0,01
S-2	4,47	3,62	2,54	0,42	0,23	0,09	0,007	0,04	0,02	0,02	-
S-3	4,47	3,62	2,54	0,42	0,23	0,09	0,007	0,04	0,02	0,02	-
S-4	4,61	4,02	1,77	0,45	0,20	-	0,05	0,03	-	0,02	-
S-5	4,70	3,81	2,65	0,40	0,19	0,05	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01

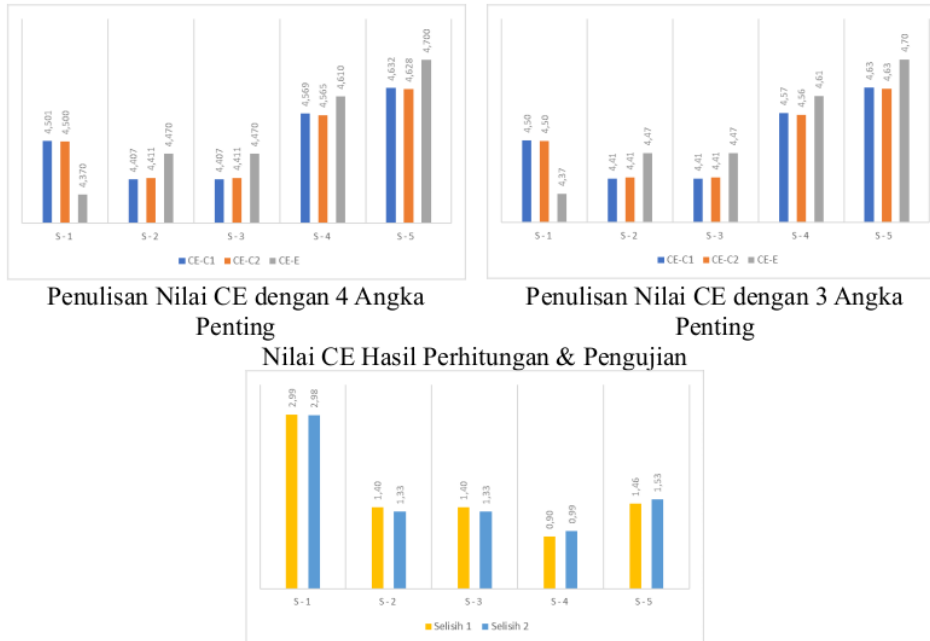
PEMBAHASAN

Merujuk pada standar komposisi kimia yang diberikan oleh ASTM (Std-1), Tabel 1, maka terlihat S-4 dan S-5 mempunyai kadar karbon yang tidak memenuhi persyaratan. Kadar karbon (C) S-4 melebihi standar maksimum yang diijinkan sebesar 6% dan S-5 sebesar 0,3%. Sementara itu, untuk kadar silikon (Si), ditemukan bahwa S-4 kekurangan sebanyak 2%. Kandungan mangan (Mn) semuanya masuk dalam standar. Sementara untuk kadar magnesium (Mg), semuanya berada pada batas yang diberikan. Pada kadar krom (Cr) ditemukan adanya penyimpangan pada S-2 dan S-3 sebesar 29% lebih tinggi dari batas maksimum. Sementara S-4 kekurangan 100% dari batas minimal. Pada kadar nikel (Ni) ditemukan bahwa untuk semua tuangan kecuali S-4, tidak memenuhi standar. Kadar nikel pada S-1 dan S-5 adalah 80% lebih rendah dari standar minimal dan S-2 dan S-3 adalah 86%. Kadar fosfor (P) dan sulfur (S) semuanya memenuhi standar yang diberikan. Kadar molybdenum (Mo), kadar pada S-2, S-3 dan S-4 sebesar 100% dari batas minimal. Sementara untuk kadar tembaga, semuanya sesuai dengan standar yang diberikan.

Sementara ketika merujuk pada standar komposisi kimia yang ditentukan oleh Pabrik Pembuat (Std-2), Tabel 1, maka hanya kadar karbon pada S-4 yang melebihi standar maksimum yang diijinkan sebesar 3%. Terkait kadar silikon, ditemukan juga bahwa S-4 kekurangan sebanyak 29%. Terkait kadar mangan, semua sampel memenuhi standar. Pada kadar Magnesium, krom dan nikel dan semua sudah sesuai dengan standar yang diberikan. Sementara kadar nikel ditemukan bahwa untuk semua tuangan kecuali S-4, tidak memenuhi standar. Demikian juga untuk kadar fosfor dan sulfur. Kadar molybdenum tidak diberikan standar sehingga tidak dapat dianalisa kadar yang ada. Sementara itu untuk kadar tembaga, kadar tembaga pada logam cair semuanya tidak memenuhi standar, dengan penyimpangan paling kecil dari nilai maksimum adalah 27% untuk S-5 dan paling besar 80% untuk S1. Penyimpangan dari nilai maksimal untuk S-2 dan S-3 adalah 53% dan S-4 adalah 33%.

Karbon adalah unsur yang memegang peranan penting dalam proses pembentukan grafit, nodularitas dan pembentukan matriks ferritis. Terkait proses pengecoran, karbon memiliki peran penting terkait nilai CE, *fluidity* dan cacat pada proses pengecoran. Melihat pada hasil pengujian komposisi kimia yang secara umum memenuhi standar yang diberikan maka grafit nodular akan terbentuk dengan matriks ferritis. Kemungkinan akan terjadi flotasi grafit pada S-4. Selain peran pentingnya pada CE, silikon juga berperan mendukung karbon dalam pembentukan grafit dengan mengontrol pembentukan karbida. Selain itu silikon juga berperan dalam pembentukan matriks ferritis. Hasil analisa komposisi kimia menunjukkan bahwa sampel S-4 terjadi kekurangan silikon. Jika dibandingkan terhadap standar pabrik (Std-2) maka terlihat hampir 29%; sementara terhadap standar ASTM (Std-1) masih dibawah 10%. Melihat hal ini maka keberhasilan pembentukan grafit dan matriks merujuk kepada nilai CE. Sementara terkait mangan, walaupun semua sampel memenuhi standar tetapi terlihat bahwa nilai mangan S4 adalah yang paling tinggi. Mangan memiliki fungsi terbalik dari silikon. Mangan adalah unsur pembentuk karbida. Keberadaan mangan yang cukup tinggi walaupun dalam batas standar dengan silikon yang kurang dari standar kemungkinan akan terjadi gangguan pada pembentukan grafit dan matriks. Seperti halnya dengan kadar mangan, semua sampel memiliki kadar magnesium yang ada dalam standar. Walaupun demikian, ditemukan pula, bahwa kadar magnesium pada sampel S-4 adalah yang terendah. Magnesium memiliki fungsi sebagai agen pembulat grafit. Dengan kondisi yang dimiliki oleh S-4, maka kemungkinan grafit nodul yang terbentuk tidak akan sempurna. Terkait fosfor dan sulfur semuanya masuk dalam standar sehingga tidak dikhawatirkan akan terbentuk karbida mengingat fosfor dan sulfur adalah pembentuk karbida. Kandungan krom pada sampel S-2 dan S-3 melebihi batas maksimum yang diijinkan oleh standar ASTM tetapi berada dibawah standar pabrik. Krom adalah unsur kuat pembentukan karbida. Dengan hasil ini maka ada kemungkinan terbentuknya karbida pada S-2 dan S-3. Semua sampel memiliki

kadar nikel di bawah standar pabrik tetapi ketika merujuk pada standar ASTM, semua kadar nikel-nya berada dibawah batas minimum kecuali untuk S-4. Nikel berperan dalam memperkuat matrik feritis. Tembaga adalah unsur yang berperan dalam pembentukan matrik perlitis. Hasil pengujian komposisi kimia terkait tembaga menunjukkan bahwa menurut standar ASTM semuanya masih dalam batas, tetapi tidak demikian halnya dengan standar pabrik. Kadar tembaga pada setiap sampel cenderung sama kecuali pada sampel S-5. Pengaruh yang ditimbulkan akan terlihat pada matriks yang terbentuk.



Selisih Nilai CE Hasil Perhitungan dengan Pengujian

Gambar 4. Nilai *Carbon Equivalen* (CE)

Nilai CE-C1 dihitung dengan menggunakan rumus $CE = \%C + 0,31\%Si$ [13]

Nilai CE-C2 dihitung dengan menggunakan rumus $CE = \%C + 0,31\%Si + 0,33\%P - 0,027\%Mn + 0,4\%S$ [13]

Nilai *carbon equivalent* (CE) diperoleh melalui perhitungan dan pengujian seperti disampaikan pada Gambar 4. Hasil perhitungan dengan menggunakan rumus yang lebih lengkap tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dengan selisih 0,01 sampai 0,09%. Dengan mengikuti kebiasaan menyampaikan nilai CE dengan format 2 angka setelah koma maka tidak ditemukan perbedaan seperti terlihat pada Gambar 4. Ketika dibandingkan nilai CE hasil perhitungan dengan pengukuran terlihat perbedaan paling besar adalah 2,9%. Perbedaan ini terjadi pada S-1 dengan kondisi nilai CE hasil pengukuran lebih kecil dibandingkan dengan hasil perhitungan. Sehingga walaupun terdapat perbedaan tetapi perbedaan itu tidak cukup signifikan sehingga memberikan hasil yang berbeda. Perbedaan nilai CE ini terjadi antara lain karena pembulatan yang dilakukan pada saat perhitungan dan perbedaan ketelitian alat yang digunakan. Selanjutnya nilai CE yang digunakan adalah nilai CE hasil pengujian. Berdasarkan nilai CE hasil pengujian terlihat bahwa nilai CE yang diperoleh adalah 4,4 sampai 4,7. Dengan nilai CE seperti ini, maka dapat dikatakan bahwa nilai CE sesuai dengan standar yang diberikan kecuali untuk S-5 dengan nilai CE 4,7. S-5 dengan nilai CE 4,7 ini 2% lebih tinggi dari batas maksimal yang disampaikan Martinez

[15]. Tetapi secara umum nilai CE 4,7 masih dapat diterima. Jika melebihi nilai CE 4,7, maka dikhawatirkan terjadinya flotasi grafit.

Semua nilai CE dari tuangan yang dihasilkan memiliki nilai di atas 4,3. Hal ini berarti semua FCD yang dihasilkan adalah FCD jenis *hypereutectic*. Merujuk kepada hasil penelitian Stefanescu [16] dan Boonmee [12] maka kecenderungan pembentukan lapisan kulit pada FCD jenis *hypereutectic* adalah rendah karena kecenderungan hasil proses solidifikasi adalah secara keseluruhan diperoleh austenit/grafit penuh atau austenit/grafit dengan struktur eutektik. Hasil ini ditentukan oleh derajat *undercooling* yang terjadi. Penelitian Boonmee [12] menunjukkan bahwa kenaikan nilai CE akan mengurangi lapisan kulit yang terbentuk. Hasil pengecoran untuk semua tuangan dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Produk Cor yang dihasilkan

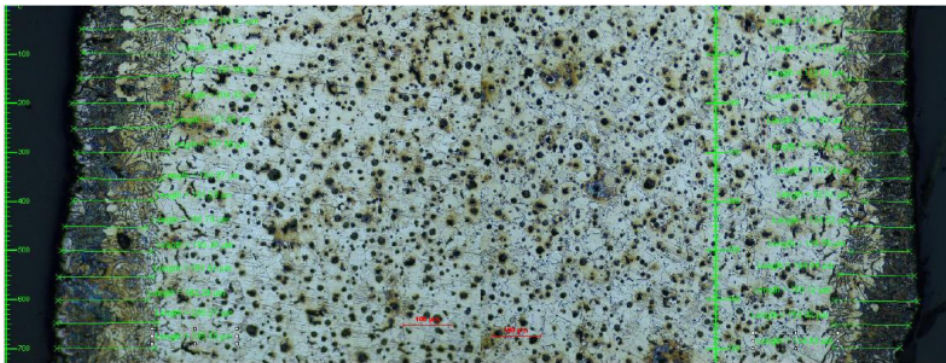
Hasil pengecoran dari kelima proses penuangan dapat di lihat pada Gambar 5. Pada gambar ini terlihat bahwa secara pengamatan makro, semua tuangan menghasilkan produk cor dengan kondisi tanpa cacat. Hasil pengamat struktur mikro yang ditunjukkan oleh Gambar 6, memperlihatkan ada beberapa gabungan jenis struktur mikro yang terbentuk. Hal ini terjadi karena adanya perbedaan ketebalan yang cukup signifikan antara ketebalan bagian *rod* dengan *I-beam*. Selain itu, merujuk pada desain pengecoran vertikal yang digunakan seperti disampaikan pada Gambar 2, maka terdapat pula perbedaan kecepatan solidifikasi diantara komponen tersebut. Secara umum struktur mikro yang terbentuk adalah grafit nodular dengan matriks gabungan perlit dengan ferit, grafit nodular dengan matrik perlit, dan grafit nodular dengan karbida. Seperti sudah disampaikan sebelumnya bahwa semua nilai CE yang digunakan pada penelitian ini berada di atas 4,3, sehingga jenis FCD yang dihasilkan adalah hipereutektik. Semua struktur mikro yang terbentuk mengikuti pola dari FCD jenis hipereutektik yang menurut Stefanescu [13] akan menghasilkan austenit/grafit penuh atau austenit/grafit dengan struktur eutektik.

POSISI	NILAI CE				
	S-1 (4,37)	S-2 (4,47 – P1)	S-3 (4,47 – P2)	S-4 (4,61)	S-5 (4,70)
<i>I-Beam</i>					

Gambar 6. Foto Struktur Mikro Komponen Dinding Tipis Batang Piston
Daerah analisa meliputi *I-beam* yang mengalami penipisan dan *End-rod* dengan ketebalan normal

POSISI	NILAI CE				
	S-1 (4,37)	S-2 (4,47 – P1)	S-3 (4,47 – P2)	S-4 (4,61)	S-5 (4,70)
<i>I-Beam</i>					
<i>End-Rod</i>					

Lanjutan Gambar 6. Foto Struktur Mikro Komponen Dinding Tipis Batang Piston Daerah analisa meliputi *I-beam* yang mengalami penipisan dan *End-rod* dengan ketebalan normal



Gambar 7. Kondisi Lapisan Kulit Sampel Plat TWDI

Lapisan kulit, seperti terlihat pada Gambar 6, ditemukan tetapi tidak terbentuk pada seluruh bagian tepi seperti yang terjadi pada penelitian sebelumnya dengan produk cor adalah plat, seperti disampaikan pada Gambar 7 dan hasil penelitian Sulamet-Ariobimo & Soedarsono [13]. Lapisan kulit terbentuk, Gambar 6, mayoritas pada bagian *I-beam*. Ketika dilakukan analisa berdasarkan nilai CE, maka lapisan kulit terlihat timbul pada daerah *I-beam* yang memiliki nilai CE 4,37 (S-1) dan 4,47 (S-2). Nilai CE untuk S-2 dan S-3 adalah 4,47; tetapi pada S-3 tidak terlihat terbentuknya lapisan kulit. Berkaitan dengan temuan ini maka perlu dilakukan kajian yang lebih mendalam terkait dengan parameter pembentukan lapisan kulit. Ketika dilakukan analisa lebih lanjut pada S-4 dan S-5 tidak terlihat adanya lapisan kulit. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Boonmee [12].

Berkaitan dengan kondisi S-2 dan S-3, Gambar 6, pengamatan lebih lanjut menemukan adanya perbedaan struktur mikro yang terbentuk walaupun memiliki nilai CE yang sama. Struktur karbida terbentuk pada bagian *I-beam* dari kedua sampel. Terbentuknya karbida ini adalah sebagai akibat kadar krom yang tinggi, yaitu 0,09%. Kadar ini melebihi batas maksimum yang diijinkan oleh ASTM tetapi masih dalam batasan standar pabrik. Krom adalah promotor kuat dalam pembentukan karbida. Pada daerah *I-beam* sampel S-3 semua struktur mikro yang terbentuk adalah grafit nodul dengan karbida. Tetapi kondisi ini berbeda untuk sampel S-2. Pada sampel S-2 ada daerah *I-beam* dengan struktur mikro grafit nodular dalam matriks gabungan ferit-perlit. Analisa yang dilakukan terhadap daerah *End-Rod* memberikan hasil yang berbeda. Hasil analisa struktur mikro pada daerah *End-Rod* menunjukkan adanya kesamaan struktur mikro yang terbentuk pada sampel S-2 dengan S-3.

SIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah ketebalan lapisan kulit yang terbentuk dipengaruhi kadar CE. Semakin tinggi kadar CE maka lapisan kulit yang terbentuk semakin tipis.

Selain itu terlihat pula bahwa lapisan kulit yang terbentuk pada komponen batang piston berbeda dengan yang terbentuk pada pelat. Lapisan kulit untuk komponen batang piston hanya ditemukan pada daerah *I-beam*, sementara pada pelat ditemukan pada seluruh bagian. Hal lain adalah pada batang piston, nilai CE yang sama membentuk pola struktur mikro yang berbeda termasuk lapisan kulit yang terbentuk.

Beberapa temuan baru ini mendorong untuk dilakukannya kajian lebih mendalam tentang parameter pembentuk struktur mikro, khususnya lapisan kulit.

APRESIASI

Para penulis menyampaikan apresiasi yang sebesar-besarnya kepada Universitas Trisakti untuk dana penelitian yang diberikan, PT Geteka Founindo untuk ijin penggunaan

sarana dan prasarana *foundry* dan Laboratorium Metalurgi Fisik Jurusan Teknik Mesin Universitas Trisakti untuk fasilitas pengamatan struktur mikro.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. M. Goodrich and R. W. Lobenhofer, "Effect of cooling rate on ductile iron mechanical properties," in *Transactions of the American Foundry Society and the One Hundred Sixth Annual Casting Congress*, 2002, pp. 1003–1032.
- [2] L. P. Dix, R. Ruxanda, J. Torrance, M. Fukumoto, and D. M. Stefanescu, "Static mechanical properties of ferritic and pearlitic lightweight ductile iron castings," *AFS Transactions*, vol. 111, pp. 1149–1164, 2003.
- [3] S. Boonmee and D. M. Ștefănescu, "The mechanism of formation of casting skin in CG iron and its effect on tensile properties," *Key Eng Mater*, vol. 457, pp. 11–16, 2011.
- [4] S. Boonmee, M. K. Moran, and D. M. Stefanescu, "On the effect of the casting skin on the fatigue properties of CG iron," *AFS Transactions*, vol. 119, pp. 421–430, 2011.
- [5] S. Boonmee and D. M. Stefanescu, "The Effect of Nodularity and Surface Condition on the Fatigue Properties of CG Iron," *AFS Trans*, vol. 119, pp. 205–2016, 2012.
- [6] R. Ruxanda, D. Stefanescu, and T. S. Piwonka, "Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Castings," in *Transactions of the American Foundry Society*, vol. 110, 2002, pp. 1131–1147.
- [7] R. C. Aufderheide, R. E. Showman, and M. A. Hysell, "05-043 Controlling the "Skin Effect" on Thin-Wall Ductile Iron Castings," *Transactions-American Foundrymens Society*, vol. 113, p. 567, 2005.
- [8] S. Boonmee and D. Stefanescu, "On the mechanism of casting skin formation in compacted graphite cast iron," *International Journal of Metalcasting*, vol. 3, pp. 19–24, 2009.
- [9] D. Stefanescu, S. Wills, J. Massone, and F. Duncan, "Quantification of casting skin in ductile and compacted graphite irons and its effect on tensile properties," *International Journal of Metalcasting*, vol. 2, pp. 7–28, 2008.
- [10] G. M. Goodrich, "Explaining the peculiar: cast iron anomalies and their causes," *Modern casting*, vol. 88, no. 4, pp. 40–42, 1998.
- [11] S. Boonmee, B. Gyesi, and D. M. Stefanescu, "Casting skin of compacted graphite iron part I: evaluation and mechanism for formation," *AFS Transactions*, vol. 118, pp. 205–216, 2010.
- [12] S. Boonmee and D. M. Stefanescu, "Casting skin management in compacted graphite iron. Part II: Mechanism of casting skin formation," *AFS Trans*, vol. 121, pp. 449–459, 2013.
- [13] R. Sulamet-Ariobimo and J. Wahyuadi, "Effect of Plate Thickness and Casting Position on Skin Effect Formation in Thin Wall Ductile Iron Plate," *International Journal of Technology*, vol. 7, p. 374, Nov. 2016, doi: 10.14716/ijtech.v7i3.2844.
- [14] R. D. Sulamet-Ariobimo, M. Fadhlan, Y. Oktaviano, T. Sukarnoto, Y. Mujalis, and A. Witonohadi, "The effects of I-Beam thickness to microstructure and compression load of thin wall ductile iron connecting rod," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 6, no. 3, pp. 392–404, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.ijlmm.2023.01.001.
- [15] R. Martinez, R. A. Martinez, R. E. Boeri, and J. A. Sikora, "EXPERIMENTAL Y MODELADO COMPUTACIONAL MULTI-ESCALA View project Applications of ADI in high strength thin wall automotive parts," 2002, Accessed: Nov. 17, 2022. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/266186440>

- [16] D. M. Stefanescu, G. Alonso, and R. Suarez, "Recent developments in understanding nucleation and crystallization of spheroidal graphite in iron-carbon-silicon alloys," *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 2, p. 221, 2020.

HUBUNGAN NILAI CE DENGAN LAPISAN KULIT THIN WALL DUCTILE IRON

ORIGINALITY REPORT

4%

SIMILARITY INDEX

4%

INTERNET SOURCES

2%

PUBLICATIONS

0%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1

journal.untar.ac.id

Internet Source

2%

2

adoc.pub

Internet Source

2%

3

rekakecik02.blogspot.com

Internet Source

<1%

Exclude quotes On

Exclude bibliography On

Exclude matches < 10 words

HUBUNGAN NILAI CE DENGAN LAPISAN KULIT *THIN WALL DUCTILE IRON*

M. Fadhlan^{1,*}), RD. Sulamet- Ariobimo²), Yoska Oktaviano³)

Mechanical Engineering Department, Faculty of Industrial Technology, Universitas Trisakti, Jakarta 11440

e-mail: ¹m.fadhlan@trisakti.ac.id, ²riantariobimo@trisakti.ac.id, ³yoska@trisakti.ac.id

*Korespondensi: m.fadhlan@trisakti.ac.id

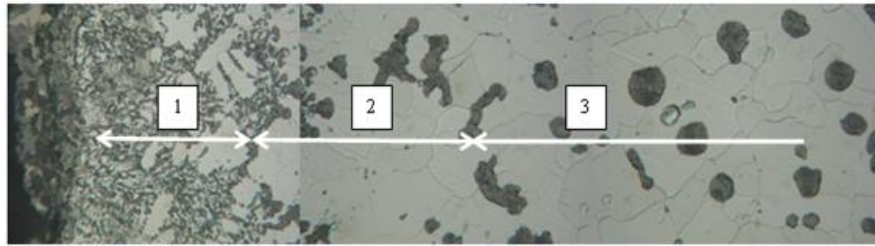
Abstract: *The formation of skin effects in nodular cast iron produced using sand molds is a general problem. Since it can be cleaned during the machining process along with gating system removal. Skin effects become a problem when they form in nodular cast iron thin wall castings. In thin-wall castings, the skin effect becomes a problem because the cleaning process is difficult to perform. Therefore, a mechanism is needed to avoid the formation of skin effects in nodular cast iron thin wall castings. This work is carried out to see the effects of carbon equivalent (CE) as one of the important parameters during the casting process to the formation of skin effects, especially when the cast object produced is a component. Molten metals with different CE values are used to make thin wall ductile iron connecting rod components. Microstructure observations were carried out both in the I-beam and end-rod areas. Then the results obtained are compared with the previous research regarding the skin effects formed in thin-wall ductile iron plates. The result obtained is that the skin effects detected in thin-wall ductile iron connecting rods with different types of patterns and thicknesses from that formed on the plate.*

Keywords: *CE, Plate, Thin wall components, TWDI, Skin Effects.*

PENDAHULUAN

Penggunaan komponen dinding tipis dalam komponen otomotif selain membantu penghematan penggunaan bahan bakar juga akan membantu mengurangi polusi udara. Tetapi penipisan yang dilakukan ini juga harus tetap memastikan bahwa komponen yang ditipiskan tersebut tetap memiliki karakteristik yang sama dengan kondisi awal. Berkaitan dengan karakteristik yang akan terbentuk, maka hal yang harus diperhatikan adalah kondisi logam cair. Ketika membicarakan kondisi logam cair, maka hal utama yang perlu diperhatikan dalam pengecoran besi tuang nodular (*ductile iron* – FCD) selain komposisi kimia adalah *carbon equivalent* (CE). CE adalah simplifikasi yang dilakukan untuk mengetahui efek dari komposisi kimia terhadap jenis besi tuang yang terbentuk.

Ketika teknologi dinding tipis diterapkan pada FCD untuk menghasilkan komponen ringan maka selain CE, perlu juga diperhatikan terbentuknya lapisan kulit pada struktur mikro. Lapisan kulit biasa terbentuk pada pengecoran besi tuang nodular yang menggunakan cetakan pasir. Pada pengecoran umum, lapisan kulit ini akan dibersihkan saat benda cor mengalami proses pembersihan dari pasir cetakan dengan menggunakan proses *shot blasting* maupun ketika dilakukan proses permesinan untuk memisahkan antara benda dengan sistem saluran tuangnya. Pembersihan ini perlu dilakukan mengingat hasil penelitian yang dilakukan oleh Goodrich dan Lobenhofer [1] menunjukkan bahwa keberadaan lapisan kulit ini mengurangi nilai tegangan tarik maksimum (UTS) dan elongasi. Sementara Dix dkk. [2] menemukan bahwa TWDI yang bersih dari lapisan kulit memiliki sifat mekanis yang setara bahkan lebih tinggi dari besi tuang nodular (FCD). Demikian juga hasil yang diperoleh Boonmee dkk. [3]. Hasil penelitian Boonmee menunjukkan bahwa rasio kekuatan tarik antara kondisi benda uji yang memiliki lapisan kulit dengan yang lapisan kulitnya dibersihkan untuk TWDI adalah 0,93. Sementara untuk rasio ketahanan lelah antara kondisi benda uji yang memiliki lapisan kulit dengan yang lapisan kulitnya dibersihkan adalah 0,687 untuk tekanan rata-rata 250 MPa dan 0,650 untuk tekanan rata-rata 300 MPa [4] untuk dan keterkaitan antara lapisan kulit, nodularitas dan ketahanan lelah adalah semakin tipis lapisan kulit, nodularitas akan meningkat dan faktor rasio ketahanan lelah akan menurun [5].



Gambar 1. Struktur Mikro Plat Dinding Tipis Besi Tuang Nodular (*Thin Wall Ductile Iron*). Daerah 1 adalah lapisan kulit (*skin effect*), Daerah 2 adalah daerah transisi dan Daerah 3 adalah bagian inti

Lapisan kulit yang dikenal juga sebagai *flake graphite rim anomaly* [6] atau *skin effect* [7] adalah lapisan yang terbentuk dari grafit serpih atau vermicular pada bagian tepi dari benda cor yang bersentuhan langsung dengan pasir cetakan seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Tingginya tingkat kesulitan proses permesinan untuk membersihkan lapisan kulit pada TWDI disebabkan karena tipisnya benda dan perbedaan ketebalan lapisan kulit yang terbentuk.

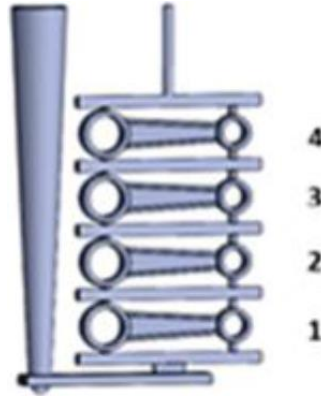
Aufderheiden dkk. menyatakan bahwa istilah Lapisan Kulit (*skin effect*) pertama kali digunakan oleh Reisener [7], [8] di tahun 1962 untuk menjelaskan lapisan yang terbentuk pada permukaan hasil coran besi tuang kelabu sebagai akibat berkurangnya jumlah karbon pada lapisan tersebut. *Skin effect* ini juga dikenal dengan sebutan lapisan *flake graphite rim anomaly* karena berkurangnya jumlah grafit yang terbentuk akibat terjadinya dekarburisasi [8] dan degradasi bentuk grafit [6]. *Skin effect* merupakan bagian dari lapisan kulit pengecoran (*casting skin*). Stefanescu dkk. [9] membagi *casting skin* menjadi 2 bagian, yaitu lapisan di permukaan (*surface*) dan lapisan di bawah permukaan (*subsurface*). *Skin effect* adalah lapisan kulit di bawah permukaan (*subsurface casting skin*).

Goodrich [10] menjelaskan bahwa *skin effect* terbentuk karena adanya kontaminasi sulfur pada pasir cetakan. Sementara Ruxanda dkk. [6] menyimpulkan bahwa *skin effect* terbentuk karena terjadinya oksidasi dari magnesium. Aufderheiden dkk [7] menyatakan bahwa faktor utama dalam pembentukan *skin effect* adalah kecepatan pendinginan. Boonmee dkk [11], [12] menyampaikan beberapa mekanisme untuk pembentukan *skin effect*. Mekanisme pertama adalah berkurangnya jumlah grafit karena karbon dalam logam cair bereaksi dengan uap air dan oksigen yang ada dalam pasir. Mekanisme ini sering ditemui pada cetakan yang terbuat dari *green sand* dan mengakibatkan terbentuknya lapisan kulit feritik. Mekanisme lain terkait berkurangnya jumlah grafit adalah terbentuknya lapisan austenit karena kinetika solidifikasi. Mekanisme ini khususnya menjelaskan terjadinya lapisan kulit pada pengecoran dengan cetakan baja. Pembentukan austenit dapat dipicu oleh besarnya derajat *undercooling* sehingga jumlah austenit meningkat sementara jumlah grafit berkurang. Pada mekanisme ini, karbon ekuivalen (CE) mempengaruhi Kondisi ini menyebabkan berkurangnya jumlah grafit. Ketika derajat *undercooling* meningkat dan/atau CE berkurang maka jumlah austenit primer akan meningkat. Ketebalan lapisan kulit akan berkurang jika CE meningkat mendekati daerah *coupled zone*. Selain CE, inoculasi dan konduktivitas termal juga mempunyai peran penting dalam mekanisme ini. Selain mekanisme diatas, Boonmee dkk. juga menjelaskan bahwa selain berkurangnya jumlah karbon, lapisan kulit juga terjadi karena berkurangnya jumlah magnesium. Pengurangan ini terjadi karena magnesium bereaksi dengan sulfur (S) dan oksigen (O) membentuk Mg-S dan Mg-O. Sulamet-Ariobimo dan Soedarsono [13] menyimpulkan bahwa komposisi jumlah magnesium dan kecepatan pendinginan adalah faktor utama dalam pembentukan *skin effect*.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh CE terhadap lapisan kulit yang dibentuknya pada komponen batang piston (*connecting rod*).

METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian dilakukan proses pengecoran batang piston dengan model pengecoran seperti terlihat pada Gambar 2. Proses pengecoran dengan menggunakan 5 jenis logam cair yang berbeda nomor tuangannya (*batch*). Cetakan yang digunakan adalah cetakan pasir furan yang menggunakan sulfurik katalisator. Komposisi kimia dari setiap logam cair diambil untuk proses pengujian komposisi kimia dengan menggunakan spektrometer dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 2. Desain Pengecoran Komponen Stang Piston [14]

Setelah logam cair tersolidifikasi secara sempurna dalam cetakan, lalu dilakukan proses pembongkaran dan pembersihan pasir cetak dengan menggunakan proses *sand blasting* seperti terlihat pada Gambar 3. Proses dilanjutkan dengan melakukan pengamatan makro untuk melihat kondisi dari batang piston. Proses pengamatan makro dilanjutkan dengan proses pengamatan mikro untuk melihat struktur mikro yang dihasilkan. Proses pengamatan mikro dilakukan baik tanpa etsa maupun dengan menggunakan etsa. Cairan etsa yang digunakan adalah Nitral 2%.



(a)



(b)

Gambar 3. Hasil Pengecoran Sebelum (a) dan Sesudah (b) Proses Pembersihan

Adapun hasil dari pengamatan struktur mikro tersebut disampaikan oleh Gambar 5.

Tabel 1. Komposisi Kimia Logam Cair

KODE	CE	Unsur Kimia - %									
		C	Si	Mn	Cu	Cr	Ni	Mg	P	S	Mo
Std-1	4,4 - 4,6	3,6-3,8	1,8-2,8	0,15-1,00	0,015-1,00	0,03-0,07	0,05-0,2	0,03-0,06	< 0,03	< 0,02	0,01-0,10
Std-2	-	3,5-3,9	2,4-2,8	0,3-0,5	≤ 0,15	≤ 0,15	≤ 0,15	≥ 0,03	≤ 0,03	≤ 0,02	-
S-1	4,37	3,67	2,68	0,44	0,27	0,03	0,01	0,05	0,01	0,02	0,01
S-2	4,47	3,62	2,54	0,42	0,23	0,09	0,007	0,04	0,02	0,02	-
S-3	4,47	3,62	2,54	0,42	0,23	0,09	0,007	0,04	0,02	0,02	-
S-4	4,61	4,02	1,77	0,45	0,20	-	0,05	0,03	-	0,02	-
S-5	4,70	3,81	2,65	0,40	0,19	0,05	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01

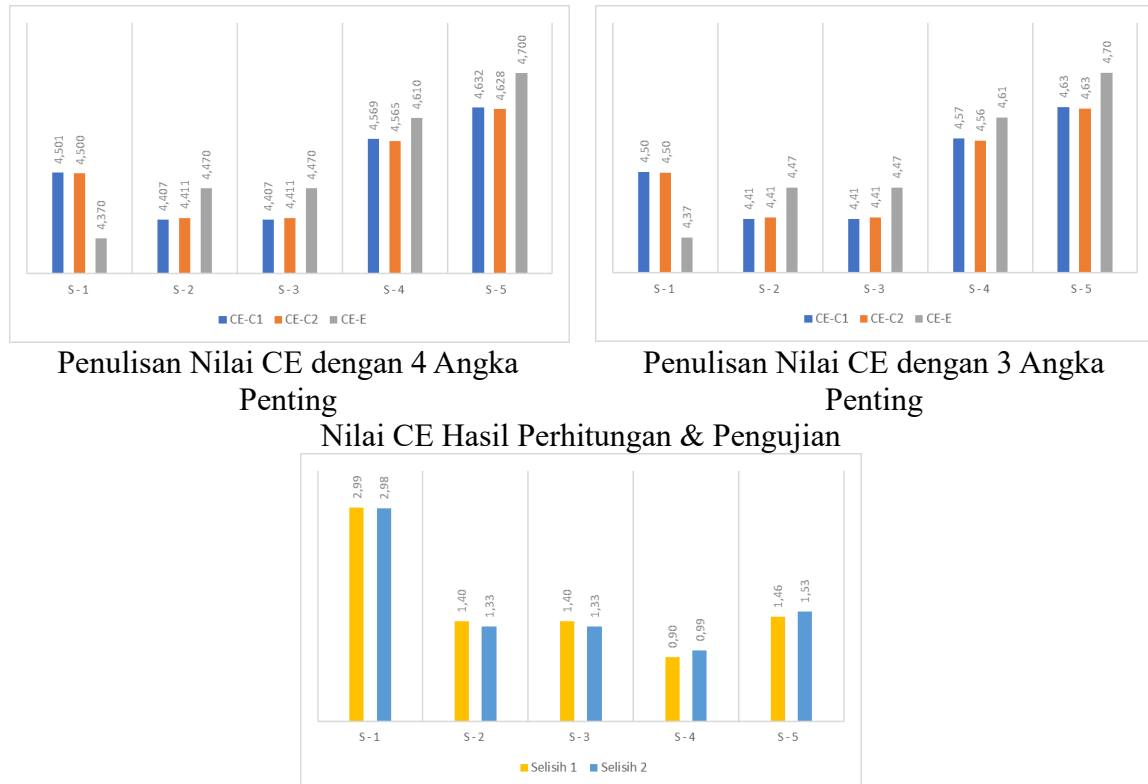
PEMBAHASAN

Merujuk pada standar komposisi kimia yang diberikan oleh ASTM (Std-1), Tabel 1, maka terlihat S-4 dan S-5 mempunyai kadar karbon yang tidak memenuhi persyaratan. Kadar karbon (C) S-4 melebihi standar maksimum yang diijinkan sebesar 6% dan S-5 sebesar 0,3%. Sementara itu, untuk kadar silikon (Si), ditemukan bahwa S-4 kekurangan sebanyak 2%. Kandungan mangan (Mn) semuanya masuk dalam standar. Sementara untuk kadar magnesium (Mg), semuanya berada pada batas yang diberikan. Pada kadar krom (Cr) ditemukan adanya penyimpangan pada S-2 dan S-3 sebesar 29% lebih tinggi dari batas maksimum. Sementara S-4 kekurangan 100% dari batas minimal. Pada kadar nikel (Ni) ditemukan bahwa untuk semua tuangan kecuali S-4, tidak memenuhi standar. Kadar nikel pada S-1 dan S-5 adalah 80% lebih rendah dari standar minimal dan S-2 dan S-3 adalah 86%. Kadar fosfor (P) dan sulfur (S) semuanya memenuhi standar yang diberikan. Kadar molybdenum (Mo), kadar pada S-2, S-3 dan S-4 sebesar 100% dari batas minimal. Sementara untuk kadar tembaga, semuanya sesuai dengan standar yang diberikan.

Sementara ketika merujuk pada standar komposisi kimia yang ditentukan oleh Pabrik Pembuat (Std-2), Tabel 1, maka hanya kadar karbon pada S-4 yang melebihi standar maksimum yang diijinkan sebesar 3%. Terkait kadar silikon, ditemukan juga bahwa S-4 kekurangan sebanyak 29%. Terkait kadar mangan, semua sampel memenuhi standar. Pada kadar Magnesium, krom dan nikel dan semua sudah sesuai dengan standar yang diberikan. Sementara kadar nikel ditemukan bahwa untuk semua tuangan kecuali S-4, tidak memenuhi standar. Demikian juga untuk kadar fosfor dan sulfur. Kadar molybdenum tidak diberikan standar sehingga tidak dapat dianalisa kadar yang ada. Sementara itu untuk kadar tembaga, kadar tembaga pada logam cair semuanya tidak memenuhi standar, dengan penyimpangan paling kecil dari nilai maksimum adalah 27% untuk S-5 dan paling besar 80% untuk S1. Penyimpangan dari nilai maksimal untuk S-2 dan S-3 adalah 53% dan S-4 adalah 33%.

Karbon adalah unsur yang memegang peranan penting dalam proses pembentukan grafit, nodularitas dan pembentukan matriks ferritis. Terkait proses pengecoran, karbon memiliki peran penting terkait nilai CE, *fluidity* dan cacat pada proses pengecoran. Melihat pada hasil pengujian komposisi kimia yang secara umum memenuhi standar yang diberikan maka grafit nodular akan terbentuk dengan matriks ferritis. Kemungkinan akan terjadi flotasi grafit pada S-4. Selain peran pentingnya pada CE, silikon juga berperan mendukung karbon dalam pembentukan grafit dengan mengontrol pembentukan karbida. Selain itu silikon juga berperan dalam pembentukan matriks ferritis. Hasil analisa komposisi kimia menunjukkan bahwa sampel S-4 terjadi kekurangan silikon. Jika dibandingkan terhadap standar pabrik (Std-2) maka terlihat hampir 29%; sementara terhadap standar ASTM (Std-1) masih dibawah 10%. Melihat hal ini maka keberhasilan pembentukan grafit dan matriks merujuk kepada nilai CE. Sementara terkait mangan, walaupun semua sampel memenuhi standar tetapi terlihat bahwa nilai mangan S4 adalah yang paling tinggi. Mangan memiliki fungsi terbalik dari silikon. Mangan adalah unsur pembentuk karbida. Keberadaan mangan yang cukup tinggi walaupun dalam batas standar dengan silikon yang kurang dari standar kemungkinan akan terjadi gangguan pada pembentukan grafit dan matrik. Seperti halnya dengan kadar mangan, semua sampel memiliki kadar magnesium yang ada dalam standar. Walaupun demikian, ditemukan pula, bahwa kadar magnesium pada sampel S-4 adalah yang terendah. Magnesium memiliki fungsi sebagai agen pembulat grafit. Dengan kondisi yang dimiliki oleh S-4, maka kemungkinan grafit nodul yang terbentuk tidak akan sempurna. Terkait fosfor dan sulfur semuanya masuk dalam standar sehingga tidak dikhawatirkan akan terbentuk karbida mengingat fosfor dan sulfur adalah pembentuk karbida. Kandungan krom pada sampel S-2 dan S-3 melebihi batas maksimum yang diijinkan oleh standar ASTM tetapi berada dibawah standar pabrik. Krom adalah unsur kuat pembentukan karbida. Dengan hasil ini maka ada kemungkinan terbentuknya karbida pada S-2 dan S-3. Semua sampel memiliki

kadar nikel di bawah standar pabrik tetapi ketika merujuk pada standar ASTM, semua kadar nikel-nya berada dibawah batas minimum kecuali untuk S-4. Nikel berperan dalam memperkuat matrik feritis. Tembaga adalah unsur yang berperan dalam pembentukan matrik perlitis. Hasil pengujian komposisi kimia terkait tembaga menunjukkan bahwa menurut standar ASTM semuanya masih dalam batas, tetapi tidak demikian halnya dengan standar pabrik. Kadar tembaga pada setiap sampel cenderung sama kecuali pada sampel S-5. Pengaruh yang ditimbulkan akan terlihat pada matriks yang terbentuk.



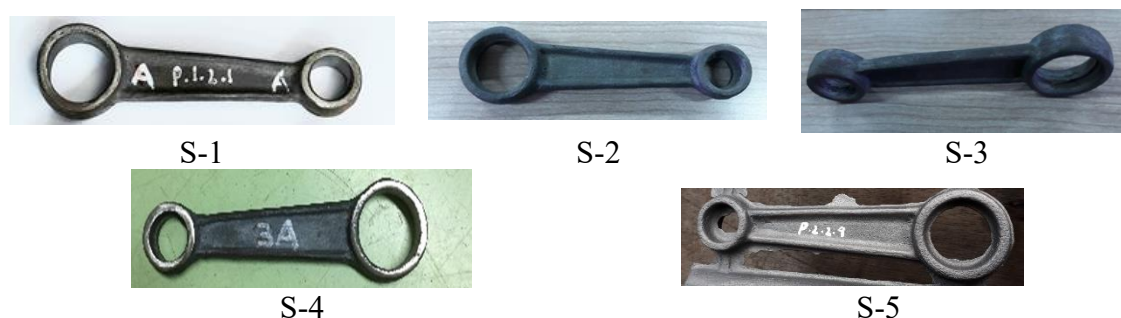
Selisih Nilai CE Hasil Perhitungan dengan Pengujian
Gambar 4. Nilai *Carbon Equivalen* (CE)

Nilai CE-C1 dihitung dengan menggunakan rumus $CE = \%C + 0,31\%Si$ [13]
 Nilai CE-C2 dihitung dengan menggunakan rumus $CE = \%C + 0,31\%Si + 0,33\%P - 0,027\%Mn + 0,4\%S$ [13]

Nilai *carbon equivalent* (CE) diperoleh melalui perhitungan dan pengujian seperti disampaikan pada Gambar 4. Hasil perhitungan dengan menggunakan rumus yang lebih lengkap tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dengan selisih 0,01 sampai 0,09%. Dengan mengikuti kebiasaan menyampaikan nilai CE dengan format 2 angka setelah koma maka tidak ditemukan perbedaan seperti terlihat pada Gambar 4. Ketika dibandingkan nilai CE hasil perhitungan dengan pengukuran terlihat perbedaan paling besar adalah 2,9%. Perbedaan ini terjadi pada S-1 dengan kondisi nilai CE hasil pengukuran lebih kecil dibandingkan dengan hasil perhitungan. Sehingga walaupun terdapat perbedaan tetapi perbedaan itu tidak cukup signifikan sehingga memberikan hasil yang berbeda. Perbedaan nilai CE ini terjadi antara lain karena pembulatan yang dilakukan pada saat perhitungan dan perbedaan ketelitian alat yang digunakan. Selanjutnya nilai CE yang digunakan adalah nilai CE hasil pengujian. Berdasarkan nilai CE hasil pengujian terlihat bahwa nilai CE yang diperoleh adalah 4,4 sampai 4,7. Dengan nilai CE seperti ini, maka dapat dikatakan bahwa nilai CE sesuai dengan standar yang diberikan kecuali untuk S-5 dengan nilai CE 4,7. S-5 dengan nilai CE 4,7 ini 2% lebih tinggi dari batas maksimal yang disampaikan Martinez

[15]. Tetapi secara umum nilai CE 4,7 masih dapat diterima. Jika melebihi nilai CE 4,7, maka dikhawatirkan terjadinya flotasi grafit.

Semua nilai CE dari tuangan yang dihasilkan memiliki nilai di atas 4,3. Hal ini berarti semua FCD yang dihasilkan adalah FCD jenis *hypereutectic*. Merujuk kepada hasil penelitian Stefanescu [16] dan Boonmee [12] maka kecenderungan pembentukan lapisan kulit pada FCD jenis *hypereutectic* adalah rendah karena kecenderungan hasil proses solidifikasi adalah secara keseluruhan diperoleh austenit/grafit penuh atau austenit/grafit dengan struktur eutektik. Hasil ini ditentukan oleh derajat *undercooling* yang terjadi. Penelitian Boonmee [12] menunjukkan bahwa kenaikan nilai CE akan mengurangi lapisan kulit yang terbentuk. Hasil pengecoran untuk semua tuangan dapat dilihat pada Gambar 5.

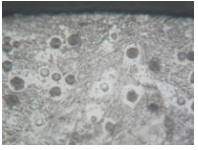
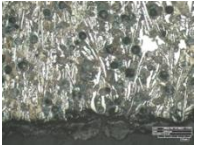
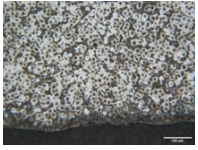
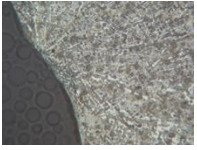
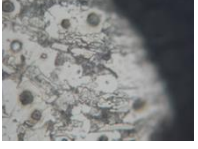
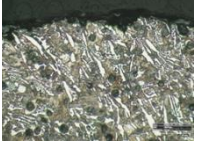
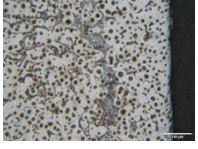
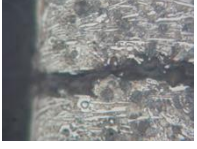
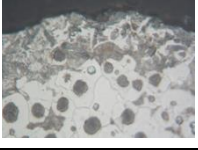
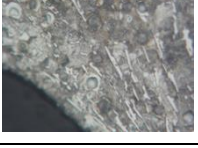
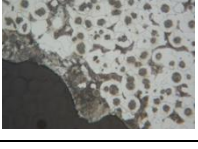
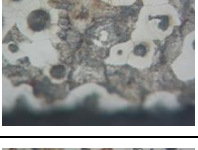
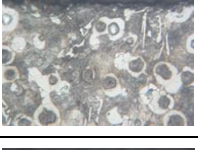
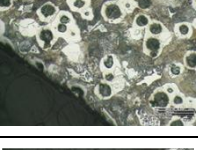
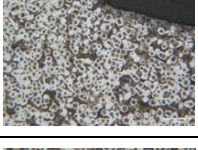
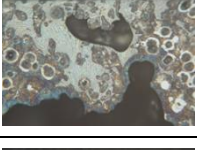
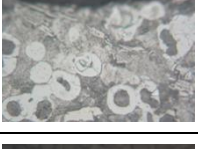
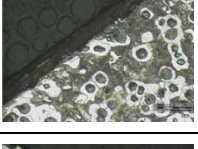
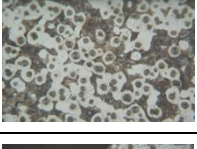
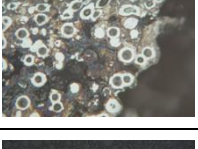
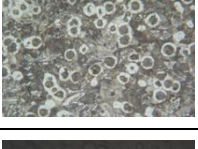
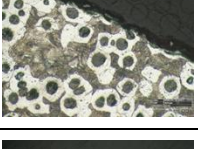
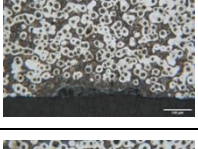
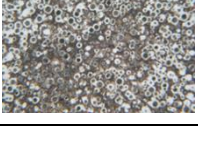
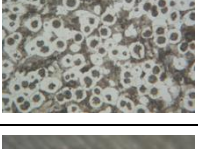
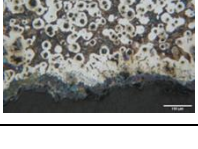
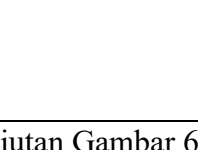
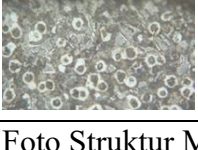
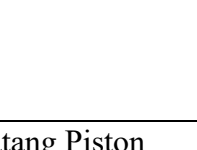


Gambar 5. Produk Cor yang dihasilkan

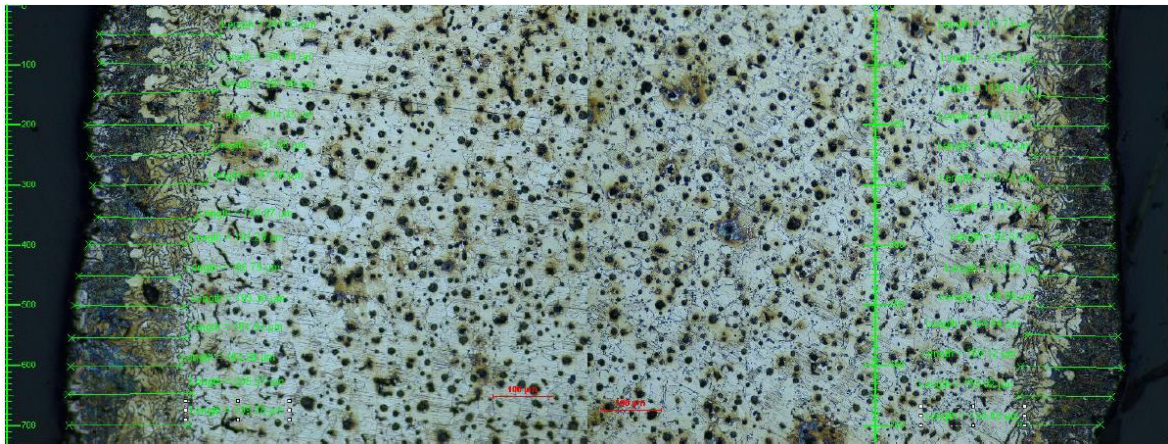
Hasil pengecoran dari kelima proses penuangan dapat di lihat pada Gambar 5. Pada gambar ini terlihat bahwa secara pengamatan makro, semua tuangan menghasilkan produk cor dengan kondisi tanpa cacat. Hasil pengamat struktur mikro yang ditunjukkan oleh Gambar 6, memperlihatkan ada beberapa gabungan jenis struktur mikro yang terbentuk. Hal ini terjadi karena adanya perbedaan ketebalan yang cukup signifikan antara ketebalan bagian *rod* dengan *I-beam*. Selain itu, merujuk pada desain pengecoran vertikal yang digunakan seperti disampaikan pada Gambar 2, maka terdapat pula perbedaan kecepatan solidifikasi diantara komponen tersebut. Secara umum struktur mikro yang terbentuk adalah grafit nodular dengan matriks gabungan perlit dengan ferit, grafit nodular dengan matrik perlit, dan grafit nodular dengan karbida. Seperti sudah disampaikan sebelumnya bahwa semua nilai CE yang digunakan pada penelitian ini berada di atas 4,3, sehingga jenis FCD yang dihasilkan adalah hipereutektik. Semua struktur mikro yang terbentuk mengikuti pola dari FCD jenis hipereutektik yang menurut Stefanescu [13] akan menghasilkan austenit/grafit penuh atau austenit/grafit dengan struktur eutektik.

POSISI	NILAI CE				
	S-1 (4,37)	S-2 (4,47 – P1)	S-3 (4,47 – P2)	S-4 (4,61)	S-5 (4,70)
<i>I-Beam</i>					

Gambar 6. Foto Struktur Mikro Komponen Dinding Tipis Batang Piston Daerah analisa meliputi *I-beam* yang mengalami penipisan dan *End-rod* dengan ketebalan normal

POSISI	NILAI CE				
	S-1 (4,37)	S-2 (4,47 – P1)	S-3 (4,47 – P2)	S-4 (4,61)	S-5 (4,70)
<i>I-Beam</i>					
					
					
					
					
<i>End-Rod</i>					
					
					
					
					

Lanjutan Gambar 6. Foto Struktur Mikro Komponen Dinding Tipis Batang Piston Daerah analisa meliputi *I-beam* yang mengalami penipisan dan *End-rod* dengan ketebalan normal



Gambar 7. Kondisi Lapisan Kulit Sampel Plat TWDI

Lapisan kulit, seperti terlihat pada Gambar 6, ditemukan tetapi tidak terbentuk pada seluruh bagian tepi seperti yang terjadi pada penelitian sebelumnya dengan produk cor adalah plat, seperti disampaikan pada Gambar 7 dan hasil penelitian Sulamet-Ariobimo & Soedarsono [13]. Lapisan kulit terbentuk, Gambar 6, mayoritas pada bagian *I-beam*. Ketika dilakukan analisa berdasarkan nilai CE, maka lapisan kulit terlihat timbul pada daerah *I-beam* yang memiliki nilai CE 4,37 (S-1) dan 4,47 (S-2). Nilai CE untuk S-2 dan S-3 adalah 4,47; tetapi pada S-3 tidak terlihat terbentuknya lapisan kulit. Berkaitan dengan temuan ini maka perlu dilakukan kajian yang lebih mendalam terkait dengan parameter pembentukan lapisan kulit. Ketika dilakukan analisa lebih lanjut pada S-4 dan S-5 tidak terlihat adanya lapisan kulit. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Boonmee [12].

Berkaitan dengan kondisi S-2 dan S-3, Gambar 6, pengamatan lebih lanjut menemukan adanya perbedaan struktur mikro yang terbentuk walaupun memiliki nilai CE yang sama. Struktur karbida terbentuk pada bagian *I-beam* dari kedua sampel. Terbentuknya karbida ini adalah sebagai akibat kadar krom yang tinggi, yaitu 0,09%. Kadar ini melebihi batas maksimum yang diijinkan oleh ASTM tetapi masih dalam batasan standar pabrik. Krom adalah promotor kuat dalam pembentukan karbida. Pada daerah *I-beam* sampel S-3 semua struktur mikro yang terbentuk adalah grafit nodul dengan karbida. Tetapi kondisi ini berbeda untuk sampel S-2. Pada sampel S-2 ada daerah *I-beam* dengan struktur mikro grafit nodular dalam matriks gabungan ferit-perlit. Analisa yang dilakukan terhadap daerah *End-Rod* memberikan hasil yang berbeda. Hasil analisa struktur mikro pada daerah *End-Rod* menunjukkan adanya kesamaan struktur mikro yang terbentuk pada sampel S-2 dengan S-3.

SIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah ketebalan lapisan kulit yang terbentuk dipengaruhi kadar CE. Semakin tinggi kadar CE maka lapisan kulit yang terbentuk semakin tipis.

Selain itu terlihat pula bahwa lapisan kulit yang terbentuk pada komponen batang piston berbeda dengan yang terbentuk pada pelat. Lapisan kulit untuk komponen batang piston hanya ditemukan pada daerah *I-beam*, sementara pada pelat ditemukan pada seluruh bagian. Hal lain adalah pada batang piston, nilai CE yang sama membentuk pola struktur mikro yang berbeda termasuk lapisan kulit yang terbentuk.

Beberapa temuan baru ini mendorong untuk dilakukannya kajian lebih mendalam tentang parameter pembentuk struktur mikro, khususnya lapisan kulit.

APRESIASI

Para penulis menyampaikan apresiasi yang sebesar-besarnya kepada Universitas Trisakti untuk dana penelitian yang diberikan, PT Geteka Founindo untuk ijin penggunaan

sarana dan prasarana *foundry* dan Laboratorium Metalurgi Fisik Jurusan Teknik Mesin Universitas Trisakti untuk fasilitas pengamatan struktur mikro.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. M. Goodrich and R. W. Lobenhofer, "Effect of cooling rate on ductile iron mechanical properties," in *Transactions of the American Foundry Society and the One Hundred Sixth Annual Casting Congress*, 2002, pp. 1003–1032.
- [2] L. P. Dix, R. Ruxanda, J. Torrance, M. Fukumoto, and D. M. Stefanescu, "Static mechanical properties of ferritic and pearlitic lightweight ductile iron castings," *AFS Transactions*, vol. 111, pp. 1149–1164, 2003.
- [3] S. Boonmee and D. M. Ștefănescu, "The mechanism of formation of casting skin in CG iron and its effect on tensile properties," *Key Eng Mater*, vol. 457, pp. 11–16, 2011.
- [4] S. Boonmee, M. K. Moran, and D. M. Stefanescu, "On the effect of the casting skin on the fatigue properties of CG iron," *AFS Transactions*, vol. 119, pp. 421–430, 2011.
- [5] S. Boonmee and D. M. Stefanescu, "The Effect of Nodularity and Surface Condition on the Fatigue Properties of CG Iron," *AFS Trans*, vol. 119, pp. 205–2016, 2012.
- [6] R. Ruxanda, D. Stefanescu, and T. S. Piwonka, "Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Castings," in *Transactions of the American Foundry Society*, vol. 110, 2002, pp. 1131–1147.
- [7] R. C. Aufderheide, R. E. Showman, and M. A. Hysell, "05-043 Controlling the" Skin Effect" on Thin-Wall Ductile Iron Castings," *Transactions-American Foundrymens Society*, vol. 113, p. 567, 2005.
- [8] S. Boonmee and D. Stefanescu, "On the mechanism of casting skin formation in compacted graphite cast iron," *International Journal of Metalcasting*, vol. 3, pp. 19–24, 2009.
- [9] D. Stefanescu, S. Wills, J. Massone, and F. Duncan, "Quantification of casting skin in ductile and compacted graphite irons and its effect on tensile properties," *International Journal of Metalcasting*, vol. 2, pp. 7–28, 2008.
- [10] G. M. Goodrich, "Explaining the peculiar: cast iron anomalies and their causes," *Modern casting*, vol. 88, no. 4, pp. 40–42, 1998.
- [11] S. Boonmee, B. Gyesei, and D. M. Stefanescu, "Casting skin of compacted graphite iron part I: evaluation and mechanism for formation," *AFS Transactions*, vol. 118, pp. 205–216, 2010.
- [12] S. Boonmee and D. M. Stefanescu, "Casting skin management in compacted graphite iron. Part II: Mechanism of casting skin formation," *AFS Trans*, vol. 121, pp. 449–459, 2013.
- [13] R. Sulamet-Ariobimo and J. Wahyuadi, "Effect of Plate Thickness and Casting Position on Skin Effect Formation in Thin Wall Ductile Iron Plate," *International Journal of Technology*, vol. 7, p. 374, Nov. 2016, doi: 10.14716/ijtech.v7i3.2844.
- [14] R. D. Sulamet-Ariobimo, M. Fadhlán, Y. Oktaviano, T. Sukarnoto, Y. Mujalis, and A. Witonohadi, "The effects of I-Beam thickness to microstructure and compression load of thin wall ductile iron connecting rod," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 6, no. 3, pp. 392–404, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.ijlmm.2023.01.001.
- [15] R. Martinez, R. A. Martínez, R. E. Boeri, and J. A. Sikora, "EXPERIMENTAL Y MODELADO COMPUTACIONAL MULTI-ESCALA View project Applications of ADI in high strength thin wall automotive parts," 2002, Accessed: Nov. 17, 2022. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/266186440>

- [16] D. M. Stefanescu, G. Alonso, and R. Suarez, “Recent developments in understanding nucleation and crystallization of spheroidal graphite in iron-carbon-silicon alloys,” *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 2, p. 221, 2020.

HUBUNGAN NILAI CE DENGAN LAPISAN KULIT *THIN WALL DUCTILE IRON*

M. Fadhlan^{1,*}), RD. Sulamet- Ariobimo²), Yoska Oktaviano³)

Mechanical Engineering Department, Faculty of Industrial Technology, Universitas Trisakti, Jakarta 11440

e-mail: ¹m.fadhlan@trisakti.ac.id, ²riantariobimo@trisakti.ac.id, ³yoska@trisakti.ac.id

*Korespondensi: m.fadhlan@trisakti.ac.id

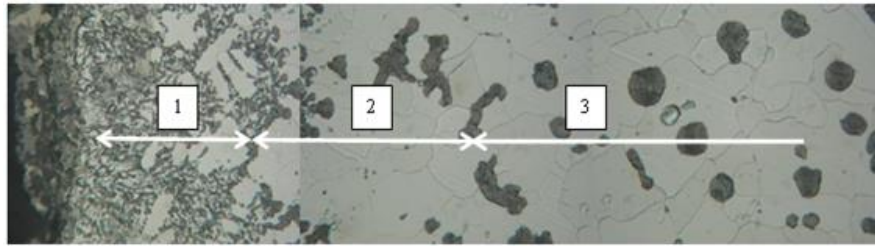
Abstract: *The formation of skin effects in nodular cast iron produced using sand molds is a general problem. Since it can be cleaned during the machining process along with gating system removal. Skin effects become a problem when they form in nodular cast iron thin wall castings. In thin-wall castings, the skin effect becomes a problem because the cleaning process is difficult to perform. Therefore, a mechanism is needed to avoid the formation of skin effects in nodular cast iron thin wall castings. This work is carried out to see the effects of carbon equivalent (CE) as one of the important parameters during the casting process to the formation of skin effects, especially when the cast object produced is a component. Molten metals with different CE values are used to make thin wall ductile iron connecting rod components. Microstructure observations were carried out both in the I-beam and end-rod areas. Then the results obtained are compared with the previous research regarding the skin effects formed in thin-wall ductile iron plates. The result obtained is that the skin effects detected in thin-wall ductile iron connecting rods with different types of patterns and thicknesses from that formed on the plate.*

Keywords: *CE, Plate, Thin wall components, TWDI, Skin Effects.*

PENDAHULUAN

Penggunaan komponen dinding tipis dalam komponen otomotif selain membantu penghematan penggunaan bahan bakar juga akan membantu mengurangi polusi udara. Tetapi penipisan yang dilakukan ini juga harus tetap memastikan bahwa komponen yang ditipiskan tersebut tetap memiliki karakteristik yang sama dengan kondisi awal. Berkaitan dengan karakteristik yang akan terbentuk, maka hal yang harus diperhatikan adalah kondisi logam cair. Ketika membicarakan kondisi logam cair, maka hal utama yang perlu diperhatikan dalam pengecoran besi tuang nodular (*ductile iron* – FCD) selain komposisi kimia adalah *carbon equivalent* (CE). CE adalah simplifikasi yang dilakukan untuk mengetahui efek dari komposisi kimia terhadap jenis besi tuang yang terbentuk.

Ketika teknologi dinding tipis diterapkan pada FCD untuk menghasilkan komponen ringan maka selain CE, perlu juga diperhatikan terbentuknya lapisan kulit pada struktur mikro. Lapisan kulit biasa terbentuk pada pengecoran besi tuang nodular yang menggunakan cetakan pasir. Pada pengecoran umum, lapisan kulit ini akan dibersihkan saat benda cor mengalami proses pembersihan dari pasir cetakan dengan menggunakan proses *shot blasting* maupun ketika dilakukan proses permesinan untuk memisahkan antara benda dengan sistem saluran tuangnya. Pembersihan ini perlu dilakukan mengingat hasil penelitian yang dilakukan oleh Goodrich dan Lobenhofer [1] menunjukkan bahwa keberadaan lapisan kulit ini mengurangi nilai tegangan tarik maksimum (UTS) dan elongasi. Sementara Dix dkk. [2] menemukan bahwa TWDI yang bersih dari lapisan kulit memiliki sifat mekanis yang setara bahkan lebih tinggi dari besi tuang nodular (FCD). Demikian juga hasil yang diperoleh Boonmee dkk. [3]. Hasil penelitian Boonmee menunjukkan bahwa rasio kekuatan tarik antara kondisi benda uji yang memiliki lapisan kulit dengan yang lapisan kulitnya dibersihkan untuk TWDI adalah 0,93. Sementara untuk rasio ketahanan lelah antara kondisi benda uji yang memiliki lapisan kulit dengan yang lapisan kulitnya dibersihkan adalah 0,687 untuk tekanan rata-rata 250 MPa dan 0,650 untuk tekanan rata-rata 300 MPa [4] untuk dan keterkaitan antara lapisan kulit, nodularitas dan ketahanan lelah adalah semakin tipis lapisan kulit, nodularitas akan meningkat dan faktor rasio ketahanan lelah akan menurun [5].



Gambar 1. Struktur Mikro Plat Dinding Tipis Besi Tuang Nodular (*Thin Wall Ductile Iron*). Daerah 1 adalah lapisan kulit (*skin effect*), Daerah 2 adalah daerah transisi dan Daerah 3 adalah bagian inti

Lapisan kulit yang dikenal juga sebagai *flake graphite rim anomaly* [6] atau *skin effect* [7] adalah lapisan yang terbentuk dari grafit serpih atau vermicular pada bagian tepi dari benda cor yang bersentuhan langsung dengan pasir cetakan seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Tingginya tingkat kesulitan proses permesinan untuk membersihkan lapisan kulit pada TWDI disebabkan karena tipisnya benda dan perbedaan ketebalan lapisan kulit yang terbentuk.

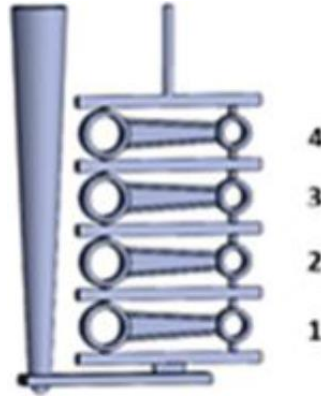
Aufderheiden dkk. menyatakan bahwa istilah Lapisan Kulit (*skin effect*) pertama kali digunakan oleh Reisener [7], [8] di tahun 1962 untuk menjelaskan lapisan yang terbentuk pada permukaan hasil coran besi tuang kelabu sebagai akibat berkurangnya jumlah karbon pada lapisan tersebut. *Skin effect* ini juga dikenal dengan sebutan lapisan *flake graphite rim anomaly* karena berkurangnya jumlah grafit yang terbentuk akibat terjadinya dekarburisasi [8] dan degradasi bentuk grafit [6]. *Skin effect* merupakan bagian dari lapisan kulit pengecoran (*casting skin*). Stefanescu dkk. [9] membagi *casting skin* menjadi 2 bagian, yaitu lapisan di permukaan (*surface*) dan lapisan di bawah permukaan (*subsurface*). *Skin effect* adalah lapisan kulit di bawah permukaan (*subsurface casting skin*).

Goodrich [10] menjelaskan bahwa *skin effect* terbentuk karena adanya kontaminasi sulfur pada pasir cetakan. Sementara Ruxanda dkk. [6] menyimpulkan bahwa *skin effect* terbentuk karena terjadinya oksidasi dari magnesium. Aufderheiden dkk [7] menyatakan bahwa faktor utama dalam pembentukan *skin effect* adalah kecepatan pendinginan. Boonmee dkk [11], [12] menyampaikan beberapa mekanisme untuk pembentukan *skin effect*. Mekanisme pertama adalah berkurangnya jumlah grafit karena karbon dalam logam cair bereaksi dengan uap air dan oksigen yang ada dalam pasir. Mekanisme ini sering ditemui pada cetakan yang terbuat dari *green sand* dan mengakibatkan terbentuknya lapisan kulit feritik. Mekanisme lain terkait berkurangnya jumlah grafit adalah terbentuknya lapisan austenit karena kinetika solidifikasi. Mekanisme ini khususnya menjelaskan terjadinya lapisan kulit pada pengecoran dengan cetakan baja. Pembentukan austenit dapat dipicu oleh besarnya derajat *undercooling* sehingga jumlah austenit meningkat sementara jumlah grafit berkurang. Pada mekanisme ini, karbon ekuivalen (CE) mempengaruhi Kondisi ini menyebabkan berkurangnya jumlah grafit. Ketika derajat *undercooling* meningkat dan/atau CE berkurang maka jumlah austenit primer akan meningkat. Ketebalan lapisan kulit akan berkurang jika CE meningkat mendekati daerah *coupled zone*. Selain CE, inoculasi dan konduktivitas termal juga mempunyai peran penting dalam mekanisme ini. Selain mekanisme diatas, Boonmee dkk. juga menjelaskan bahwa selain berkurangnya jumlah karbon, lapisan kulit juga terjadi karena berkurangnya jumlah magnesium. Pengurangan ini terjadi karena magnesium bereaksi dengan sulfur (S) dan oksigen (O) membentuk Mg-S dan Mg-O. Sulamet-Ariobimo dan Soedarsono [13] menyimpulkan bahwa komposisi jumlah magnesium dan kecepatan pendinginan adalah faktor utama dalam pembentukan *skin effect*.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh CE terhadap lapisan kulit yang dibentuknya pada komponen batang piston (*connecting rod*).

METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian dilakukan proses pengecoran batang piston dengan model pengecoran seperti terlihat pada Gambar 2. Proses pengecoran dengan menggunakan 5 jenis logam cair yang berbeda nomor tuangannya (*batch*). Cetakan yang digunakan adalah cetakan pasir furan yang menggunakan sulfurik katalisator. Komposisi kimia dari setiap logam cair diambil untuk proses pengujian komposisi kimia dengan menggunakan spektrometer dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 2. Desain Pengecoran Komponen Stang Piston [14]

Setelah logam cair tersolidifikasi secara sempurna dalam cetakan, lalu dilakukan proses pembongkaran dan pembersihan pasir cetak dengan menggunakan proses *sand blasting* seperti terlihat pada Gambar 3. Proses dilanjutkan dengan melakukan pengamatan makro untuk melihat kondisi dari batang piston. Proses pengamatan makro dilanjutkan dengan proses pengamatan mikro untuk melihat struktur mikro yang dihasilkan. Proses pengamatan mikro dilakukan baik tanpa etsa maupun dengan menggunakan etsa. Cairan etsa yang digunakan adalah Nitral 2%.



(a)



(b)

Gambar 3. Hasil Pengecoran Sebelum (a) dan Sesudah (b) Proses Pembersihan

Adapun hasil dari pengamatan struktur mikro tersebut disampaikan oleh Gambar 5.

Tabel 1. Komposisi Kimia Logam Cair

KODE	CE	Unsur Kimia - %									
		C	Si	Mn	Cu	Cr	Ni	Mg	P	S	Mo
Std-1	4,4 - 4,6	3,6-3,8	1,8-2,8	0,15-1,00	0,015-1,00	0,03-0,07	0,05-0,2	0,03-0,06	< 0,03	< 0,02	0,01-0,10
Std-2	-	3,5-3,9	2,4-2,8	0,3-0,5	≤ 0,15	≤ 0,15	≤ 0,15	≥ 0,03	≤ 0,03	≤ 0,02	-
S-1	4,37	3,67	2,68	0,44	0,27	0,03	0,01	0,05	0,01	0,02	0,01
S-2	4,47	3,62	2,54	0,42	0,23	0,09	0,007	0,04	0,02	0,02	-
S-3	4,47	3,62	2,54	0,42	0,23	0,09	0,007	0,04	0,02	0,02	-
S-4	4,61	4,02	1,77	0,45	0,20	-	0,05	0,03	-	0,02	-
S-5	4,70	3,81	2,65	0,40	0,19	0,05	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01

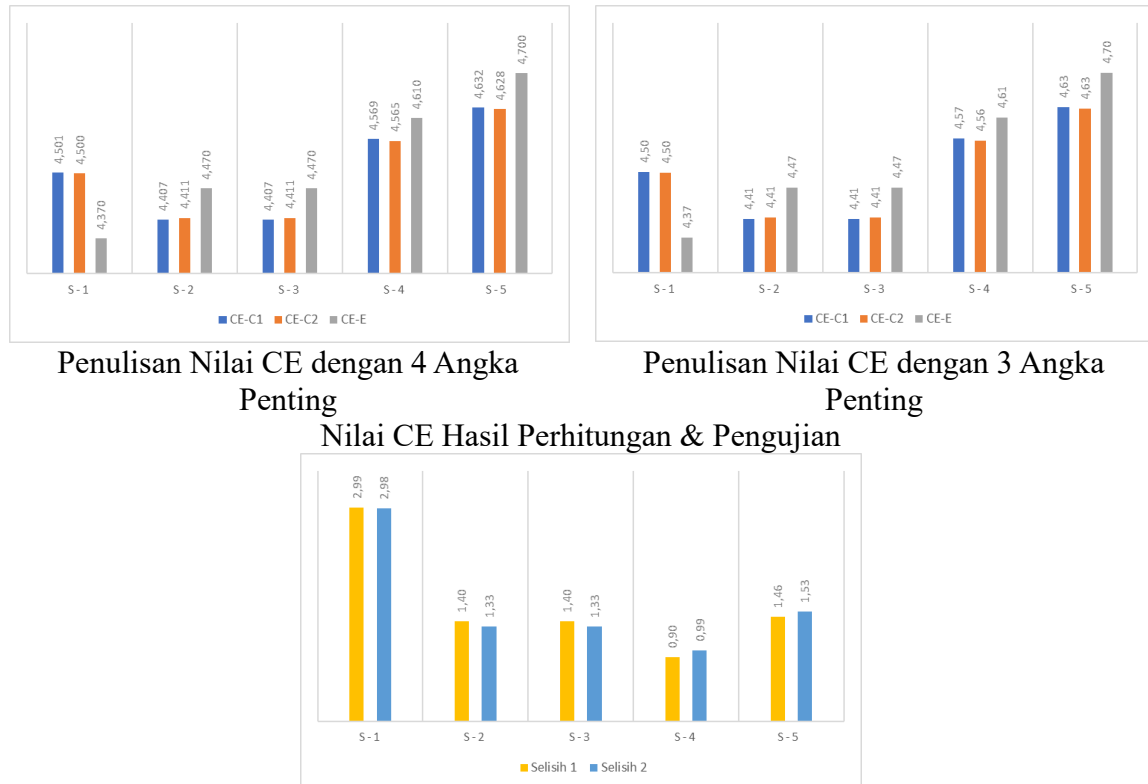
PEMBAHASAN

Merujuk pada standar komposisi kimia yang diberikan oleh ASTM (Std-1), Tabel 1, maka terlihat S-4 dan S-5 mempunyai kadar karbon yang tidak memenuhi persyaratan. Kadar karbon (C) S-4 melebihi standar maksimum yang diijinkan sebesar 6% dan S-5 sebesar 0,3%. Sementara itu, untuk kadar silikon (Si), ditemukan bahwa S-4 kekurangan sebanyak 2%. Kandungan mangan (Mn) semuanya masuk dalam standar. Sementara untuk kadar magnesium (Mg), semuanya berada pada batas yang diberikan. Pada kadar krom (Cr) ditemukan adanya penyimpangan pada S-2 dan S-3 sebesar 29% lebih tinggi dari batas maksimum. Sementara S-4 kekurangan 100% dari batas minimal. Pada kadar nikel (Ni) ditemukan bahwa untuk semua tuangan kecuali S-4, tidak memenuhi standar. Kadar nikel pada S-1 dan S-5 adalah 80% lebih rendah dari standar minimal dan S-2 dan S-3 adalah 86%. Kadar fosfor (P) dan sulfur (S) semuanya memenuhi standar yang diberikan. Kadar molybdenum (Mo), kadar pada S-2, S-3 dan S-4 sebesar 100% dari batas minimal. Sementara untuk kadar tembaga, semuanya sesuai dengan standar yang diberikan.

Sementara ketika merujuk pada standar komposisi kimia yang ditentukan oleh Pabrik Pembuat (Std-2), Tabel 1, maka hanya kadar karbon pada S-4 yang melebihi standar maksimum yang diijinkan sebesar 3%. Terkait kadar silikon, ditemukan juga bahwa S-4 kekurangan sebanyak 29%. Terkait kadar mangan, semua sampel memenuhi standar. Pada kadar Magnesium, krom dan nikel dan semua sudah sesuai dengan standar yang diberikan. Sementara kadar nikel ditemukan bahwa untuk semua tuangan kecuali S-4, tidak memenuhi standar. Demikian juga untuk kadar fosfor dan sulfur. Kadar molybdenum tidak diberikan standar sehingga tidak dapat dianalisa kadar yang ada. Sementara itu untuk kadar tembaga, kadar tembaga pada logam cair semuanya tidak memenuhi standar, dengan penyimpangan paling kecil dari nilai maksimum adalah 27% untuk S-5 dan paling besar 80% untuk S1. Penyimpangan dari nilai maksimal untuk S-2 dan S-3 adalah 53% dan S-4 adalah 33%.

Karbon adalah unsur yang memegang peranan penting dalam proses pembentukan grafit, nodularitas dan pembentukan matriks ferritis. Terkait proses pengecoran, karbon memiliki peran penting terkait nilai CE, *fluidity* dan cacat pada proses pengecoran. Melihat pada hasil pengujian komposisi kimia yang secara umum memenuhi standar yang diberikan maka grafit nodular akan terbentuk dengan matriks ferritis. Kemungkinan akan terjadi flotasi grafit pada S-4. Selain peran pentingnya pada CE, silikon juga berperan mendukung karbon dalam pembentukan grafit dengan mengontrol pembentukan karbida. Selain itu silikon juga berperan dalam pembentukan matriks ferritis. Hasil analisa komposisi kimia menunjukkan bahwa sampel S-4 terjadi kekurangan silikon. Jika dibandingkan terhadap standar pabrik (Std-2) maka terlihat hampir 29%; sementara terhadap standar ASTM (Std-1) masih dibawah 10%. Melihat hal ini maka keberhasilan pembentukan grafit dan matriks merujuk kepada nilai CE. Sementara terkait mangan, walaupun semua sampel memenuhi standar tetapi terlihat bahwa nilai mangan S4 adalah yang paling tinggi. Mangan memiliki fungsi terbalik dari silikon. Mangan adalah unsur pembentuk karbida. Keberadaan mangan yang cukup tinggi walaupun dalam batas standar dengan silikon yang kurang dari standar kemungkinan akan terjadi gangguan pada pembentukan grafit dan matrik. Seperti halnya dengan kadar mangan, semua sampel memiliki kadar magnesium yang ada dalam standar. Walaupun demikian, ditemukan pula, bahwa kadar magnesium pada sampel S-4 adalah yang terendah. Magnesium memiliki fungsi sebagai agen pembulat grafit. Dengan kondisi yang dimiliki oleh S-4, maka kemungkinan grafit nodul yang terbentuk tidak akan sempurna. Terkait fosfor dan sulfur semuanya masuk dalam standar sehingga tidak dikhawatirkan akan terbentuk karbida mengingat fosfor dan sulfur adalah pembentuk karbida. Kandungan krom pada sampel S-2 dan S-3 melebihi batas maksimum yang diijinkan oleh standar ASTM tetapi berada dibawah standar pabrik. Krom adalah unsur kuat pembentukan karbida. Dengan hasil ini maka ada kemungkinan terbentuknya karbida pada S-2 dan S-3. Semua sampel memiliki

kadar nikel di bawah standar pabrik tetapi ketika merujuk pada standar ASTM, semua kadar nikel-nya berada dibawah batas minimum kecuali untuk S-4. Nikel berperan dalam memperkuat matrik feritis. Tembaga adalah unsur yang berperan dalam pembentukan matrik perlitis. Hasil pengujian komposisi kimia terkait tembaga menunjukkan bahwa menurut standar ASTM semuanya masih dalam batas, tetapi tidak demikian halnya dengan standar pabrik. Kadar tembaga pada setiap sampel cenderung sama kecuali pada sampel S-5. Pengaruh yang ditimbulkan akan terlihat pada matriks yang terbentuk.



Selisih Nilai CE Hasil Perhitungan dengan Pengujian
Gambar 4. Nilai *Carbon Equivalen* (CE)

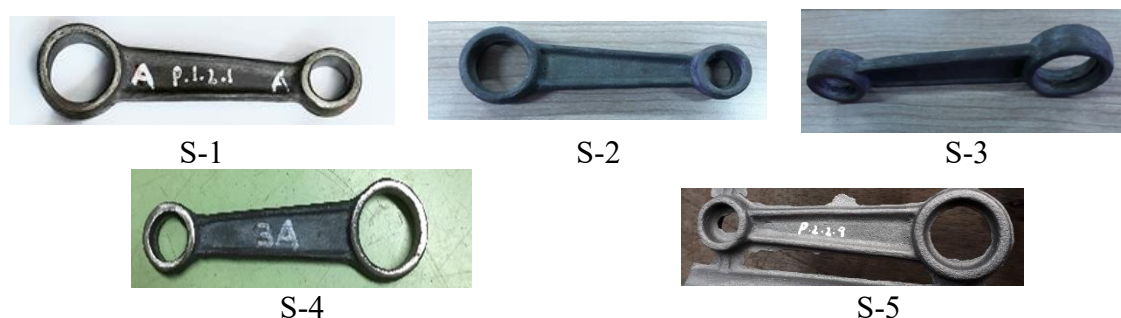
Nilai CE-C1 dihitung dengan menggunakan rumus $CE = \%C + 0,31\%Si$ [13]

Nilai CE-C2 dihitung dengan menggunakan rumus $CE = \%C + 0,31\%Si + 0,33\%P - 0,027\%Mn + 0,4\%S$ [13]

Nilai *carbon equivalent* (CE) diperoleh melalui perhitungan dan pengujian seperti disampaikan pada Gambar 4. Hasil perhitungan dengan menggunakan rumus yang lebih lengkap tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dengan selisih 0,01 sampai 0,09%. Dengan mengikuti kebiasaan menyampaikan nilai CE dengan format 2 angka setelah koma maka tidak ditemukan perbedaan seperti terlihat pada Gambar 4. Ketika dibandingkan nilai CE hasil perhitungan dengan pengukuran terlihat perbedaan paling besar adalah 2,9%. Perbedaan ini terjadi pada S-1 dengan kondisi nilai CE hasil pengukuran lebih kecil dibandingkan dengan hasil perhitungan. Sehingga walaupun terdapat perbedaan tetapi perbedaan itu tidak cukup signifikan sehingga memberikan hasil yang berbeda. Perbedaan nilai CE ini terjadi antara lain karena pembulatan yang dilakukan pada saat perhitungan dan perbedaan ketelitian alat yang digunakan. Selanjutnya nilai CE yang digunakan adalah nilai CE hasil pengujian. Berdasarkan nilai CE hasil pengujian terlihat bahwa nilai CE yang diperoleh adalah 4,4 sampai 4,7. Dengan nilai CE seperti ini, maka dapat dikatakan bahwa nilai CE sesuai dengan standar yang diberikan kecuali untuk S-5 dengan nilai CE 4,7. S-5 dengan nilai CE 4,7 ini 2% lebih tinggi dari batas maksimal yang disampaikan Martinez

[15]. Tetapi secara umum nilai CE 4,7 masih dapat diterima. Jika melebihi nilai CE 4,7, maka dikhawatirkan terjadinya flotasi grafit.

Semua nilai CE dari tuangan yang dihasilkan memiliki nilai di atas 4,3. Hal ini berarti semua FCD yang dihasilkan adalah FCD jenis *hypereutectic*. Merujuk kepada hasil penelitian Stefanescu [16] dan Boonmee [12] maka kecenderungan pembentukan lapisan kulit pada FCD jenis *hypereutectic* adalah rendah karena kecenderungan hasil proses solidifikasi adalah secara keseluruhan diperoleh austenit/grafit penuh atau austenit/grafit dengan struktur eutektik. Hasil ini ditentukan oleh derajat *undercooling* yang terjadi. Penelitian Boonmee [12] menunjukkan bahwa kenaikan nilai CE akan mengurangi lapisan kulit yang terbentuk. Hasil pengecoran untuk semua tuangan dapat dilihat pada Gambar 5.

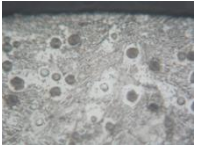
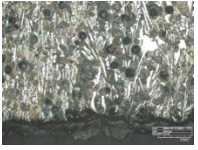
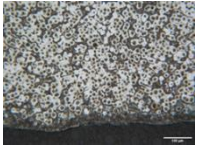
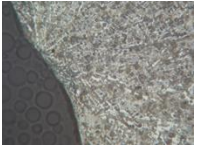
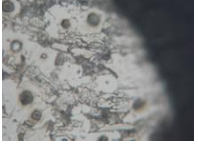
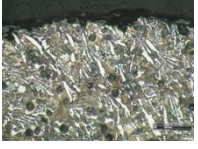
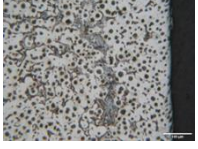
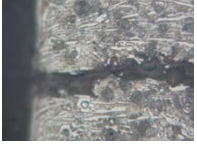
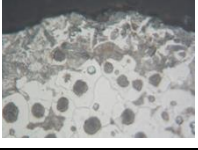
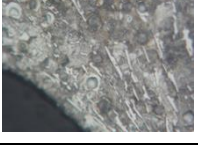
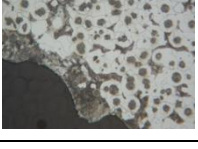
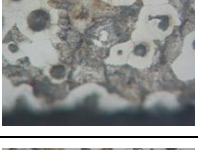
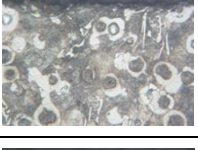
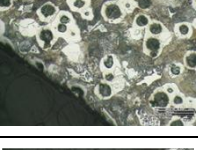
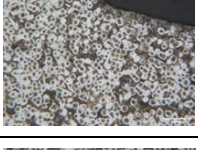
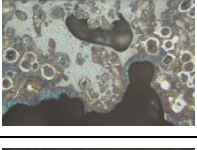
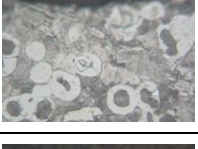
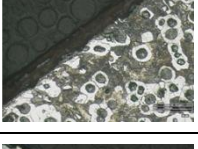
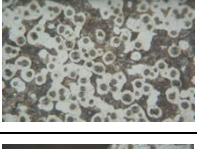
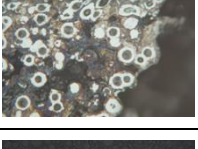
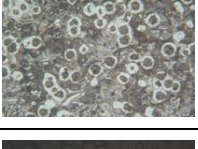
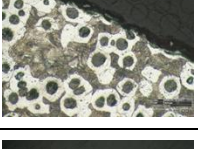
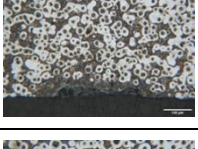
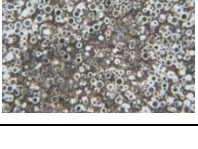
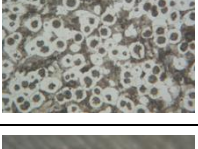
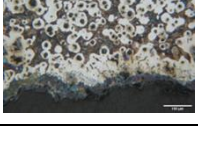
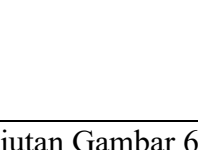
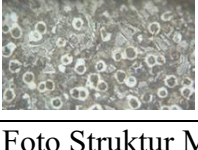
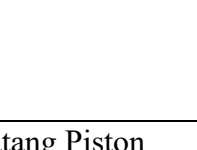


Gambar 5. Produk Cor yang dihasilkan

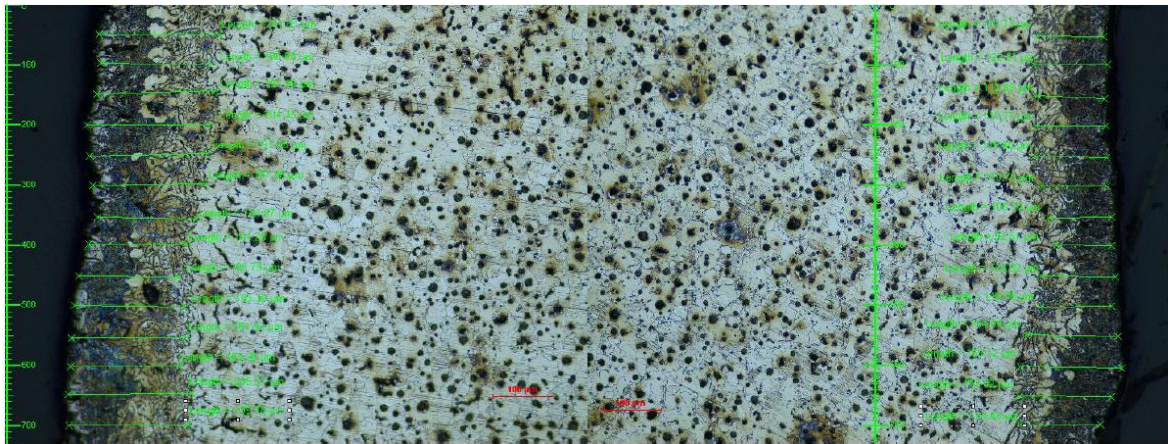
Hasil pengecoran dari kelima proses penuangan dapat di lihat pada Gambar 5. Pada gambar ini terlihat bahwa secara pengamatan makro, semua tuangan menghasilkan produk cor dengan kondisi tanpa cacat. Hasil pengamat struktur mikro yang ditunjukkan oleh Gambar 6, memperlihatkan ada beberapa gabungan jenis struktur mikro yang terbentuk. Hal ini terjadi karena adanya perbedaan ketebalan yang cukup signifikan antara ketebalan bagian *rod* dengan *I-beam*. Selain itu, merujuk pada desain pengecoran vertikal yang digunakan seperti disampaikan pada Gambar 2, maka terdapat pula perbedaan kecepatan solidifikasi diantara komponen tersebut. Secara umum struktur mikro yang terbentuk adalah grafit nodular dengan matriks gabungan perlit dengan ferit, grafit nodular dengan matrik perlit, dan grafit nodular dengan karbida. Seperti sudah disampaikan sebelumnya bahwa semua nilai CE yang digunakan pada penelitian ini berada di atas 4,3, sehingga jenis FCD yang dihasilkan adalah hipereutektik. Semua struktur mikro yang terbentuk mengikuti pola dari FCD jenis hipereutektik yang menurut Stefanescu [13] akan menghasilkan austenit/grafit penuh atau austenit/grafit dengan struktur eutektik.

POSISI	NILAI CE				
	S-1 (4,37)	S-2 (4,47 – P1)	S-3 (4,47 – P2)	S-4 (4,61)	S-5 (4,70)
<i>I-Beam</i>					

Gambar 6. Foto Struktur Mikro Komponen Dinding Tipis Batang Piston Daerah analisa meliputi *I-beam* yang mengalami penipisan dan *End-rod* dengan ketebalan normal

POSISI	NILAI CE				
	S-1 (4,37)	S-2 (4,47 – P1)	S-3 (4,47 – P2)	S-4 (4,61)	S-5 (4,70)
<i>I-Beam</i>					
					
					
					
					
<i>End-Rod</i>					
					
					
					
					

Lanjutan Gambar 6. Foto Struktur Mikro Komponen Dinding Tipis Batang Piston Daerah analisa meliputi *I-beam* yang mengalami penipisan dan *End-rod* dengan ketebalan normal



Gambar 7. Kondisi Lapisan Kulit Sampel Plat TWDI

Lapisan kulit, seperti terlihat pada Gambar 6, ditemukan tetapi tidak terbentuk pada seluruh bagian tepi seperti yang terjadi pada penelitian sebelumnya dengan produk cor adalah plat, seperti disampaikan pada Gambar 7 dan hasil penelitian Sulamet-Ariobimo & Soedarsono [13]. Lapisan kulit terbentuk, Gambar 6, mayoritas pada bagian *I-beam*. Ketika dilakukan analisa berdasarkan nilai CE, maka lapisan kulit terlihat timbul pada daerah *I-beam* yang memiliki nilai CE 4,37 (S-1) dan 4,47 (S-2). Nilai CE untuk S-2 dan S-3 adalah 4,47; tetapi pada S-3 tidak terlihat terbentuknya lapisan kulit. Berkaitan dengan temuan ini maka perlu dilakukan kajian yang lebih mendalam terkait dengan parameter pembentukan lapisan kulit. Ketika dilakukan analisa lebih lanjut pada S-4 dan S-5 tidak terlihat adanya lapisan kulit. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Boonmee [12].

Berkaitan dengan kondisi S-2 dan S-3, Gambar 6, pengamatan lebih lanjut menemukan adanya perbedaan struktur mikro yang terbentuk walaupun memiliki nilai CE yang sama. Struktur karbida terbentuk pada bagian *I-beam* dari kedua sampel. Terbentuknya karbida ini adalah sebagai akibat kadar krom yang tinggi, yaitu 0,09%. Kadar ini melebihi batas maksimum yang diijinkan oleh ASTM tetapi masih dalam batasan standar pabrik. Krom adalah promotor kuat dalam pembentukan karbida. Pada daerah *I-beam* sampel S-3 semua struktur mikro yang terbentuk adalah grafit nodul dengan karbida. Tetapi kondisi ini berbeda untuk sampel S-2. Pada sampel S-2 ada daerah *I-beam* dengan struktur mikro grafit nodular dalam matriks gabungan ferit-perlit. Analisa yang dilakukan terhadap daerah *End-Rod* memberikan hasil yang berbeda. Hasil analisa struktur mikro pada daerah *End-Rod* menunjukkan adanya kesamaan struktur mikro yang terbentuk pada sampel S-2 dengan S-3.

SIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah ketebalan lapisan kulit yang terbentuk dipengaruhi kadar CE. Semakin tinggi kadar CE maka lapisan kulit yang terbentuk semakin tipis.

Selain itu terlihat pula bahwa lapisan kulit yang terbentuk pada komponen batang piston berbeda dengan yang terbentuk pada pelat. Lapisan kulit untuk komponen batang piston hanya ditemukan pada daerah *I-beam*, sementara pada pelat ditemukan pada seluruh bagian. Hal lain adalah pada batang piston, nilai CE yang sama membentuk pola struktur mikro yang berbeda termasuk lapisan kulit yang terbentuk.

Beberapa temuan baru ini mendorong untuk dilakukannya kajian lebih mendalam tentang parameter pembentuk struktur mikro, khususnya lapisan kulit.

APRESIASI

Para penulis menyampaikan apresiasi yang sebesar-besarnya kepada Universitas Trisakti untuk dana penelitian yang diberikan, PT Geteka Founindo untuk ijin penggunaan

sarana dan prasarana *foundry* dan Laboratorium Metalurgi Fisik Jurusan Teknik Mesin Universitas Trisakti untuk fasilitas pengamatan struktur mikro.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. M. Goodrich and R. W. Lobenhofer, "Effect of cooling rate on ductile iron mechanical properties," in *Transactions of the American Foundry Society and the One Hundred Sixth Annual Casting Congress*, 2002, pp. 1003–1032.
- [2] L. P. Dix, R. Ruxanda, J. Torrance, M. Fukumoto, and D. M. Stefanescu, "Static mechanical properties of ferritic and pearlitic lightweight ductile iron castings," *AFS Transactions*, vol. 111, pp. 1149–1164, 2003.
- [3] S. Boonmee and D. M. Ștefănescu, "The mechanism of formation of casting skin in CG iron and its effect on tensile properties," *Key Eng Mater*, vol. 457, pp. 11–16, 2011.
- [4] S. Boonmee, M. K. Moran, and D. M. Stefanescu, "On the effect of the casting skin on the fatigue properties of CG iron," *AFS Transactions*, vol. 119, pp. 421–430, 2011.
- [5] S. Boonmee and D. M. Stefanescu, "The Effect of Nodularity and Surface Condition on the Fatigue Properties of CG Iron," *AFS Trans*, vol. 119, pp. 205–2016, 2012.
- [6] R. Ruxanda, D. Stefanescu, and T. S. Piwonka, "Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Castings," in *Transactions of the American Foundry Society*, vol. 110, 2002, pp. 1131–1147.
- [7] R. C. Aufderheide, R. E. Showman, and M. A. Hysell, "05-043 Controlling the" Skin Effect" on Thin-Wall Ductile Iron Castings," *Transactions-American Foundrymens Society*, vol. 113, p. 567, 2005.
- [8] S. Boonmee and D. Stefanescu, "On the mechanism of casting skin formation in compacted graphite cast iron," *International Journal of Metalcasting*, vol. 3, pp. 19–24, 2009.
- [9] D. Stefanescu, S. Wills, J. Massone, and F. Duncan, "Quantification of casting skin in ductile and compacted graphite irons and its effect on tensile properties," *International Journal of Metalcasting*, vol. 2, pp. 7–28, 2008.
- [10] G. M. Goodrich, "Explaining the peculiar: cast iron anomalies and their causes," *Modern casting*, vol. 88, no. 4, pp. 40–42, 1998.
- [11] S. Boonmee, B. Gyesei, and D. M. Stefanescu, "Casting skin of compacted graphite iron part I: evaluation and mechanism for formation," *AFS Transactions*, vol. 118, pp. 205–216, 2010.
- [12] S. Boonmee and D. M. Stefanescu, "Casting skin management in compacted graphite iron. Part II: Mechanism of casting skin formation," *AFS Trans*, vol. 121, pp. 449–459, 2013.
- [13] R. Sulamet-Ariobimo and J. Wahyuadi, "Effect of Plate Thickness and Casting Position on Skin Effect Formation in Thin Wall Ductile Iron Plate," *International Journal of Technology*, vol. 7, p. 374, Nov. 2016, doi: 10.14716/ijtech.v7i3.2844.
- [14] R. D. Sulamet-Ariobimo, M. Fadhlani, Y. Oktaviano, T. Sukarnoto, Y. Mujalis, and A. Witonohadi, "The effects of I-Beam thickness to microstructure and compression load of thin wall ductile iron connecting rod," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 6, no. 3, pp. 392–404, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.ijlmm.2023.01.001.
- [15] R. Martinez, R. A. Martínez, R. E. Boeri, and J. A. Sikora, "EXPERIMENTAL Y MODELADO COMPUTACIONAL MULTI-ESCALA View project Applications of ADI in high strength thin wall automotive parts," 2002, Accessed: Nov. 17, 2022. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/266186440>

- [16] D. M. Stefanescu, G. Alonso, and R. Suarez, “Recent developments in understanding nucleation and crystallization of spheroidal graphite in iron-carbon-silicon alloys,” *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 2, p. 221, 2020.