

Terbentuknya *White Layer* pada Proses *Milling Austempered Ductile Iron* (ADI)

Rusnaldy*, Yusuf Umardani, Jovian Bernard, Diva Tsamara Putra

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Tembalang-Semarang 50275 Indonesia

*Email: rusnaldy@yahoo.com

Abstract

Machining processes cause a white layer at the surface of a work piece. A white layer is a featureless layer that typically forms on machined steel surfaces and appears white when observed under an optical microscope after standard metallographic preparation. A white layer is known to be a function of the cutting conditions and its thickness ranges from a few microns to a few tens of microns. A white layer is generally a hard phase and leads to the surface becoming brittle causing crack permeation and product failure. This layer has been reported in a wide range of materials, from mild steels to nickel-based super alloys. This paper reports on an investigation of white layer formation for a range of cutting speeds, feeds and depth of cut in milling of Austempered Ductile Iron (ADI). To produce ADI, ductile irons were first austenitized in furnace at 900°C for 1 hour and then they were quenched in salt bath at 375°C for 1 hour. The machined specimens were analysed using an optical microscope with software Lumenera Infinity 1 to measure the thickness of white layer dan a micro hardness tester. The present results reveal that white layers were formed on the machined surfaces of ADI. The machined surface showed an increase in hardness with respect to the bulk material. The effects of cutting speeds, feeds and depth of cut on thickness and micro hardness of white layers are reported in this paper.

Keyword: *White Layer, Milling, Austempered Ductile Iron, Cutting Speed, Feed and Depth of Cut*

Abstrak

Proses permesinan dapat menyebabkan terbentuknya *white layer* pada permukaan benda kerja. *White layer* adalah lapisan tipis tanpa memiliki fitur yang jelas yang terbentuk pada permukaan benda kerja hasil proses permesinan dan terlihat berwarna putih di bawah pengamatan mikroskop optik setelah dilakukan proses metalografi yang standar. *White layer* yang terbentuk merupakan fungsi dari kondisi proses permesinan dan tebal lapisan ini sebesar beberapa mikron hingga beberapa puluh mikron. *White layer* adalah fasa yang keras dan cenderung menjadi getas yang dapat menjadi penyebab iniasi timbulnya retak dan kegagalan pada produk. *White layer* dilaporkan terbentuk pada proses permesinan pada banyak logam, dari baja (mild steels) hingga logam superalloy paduan nikel. Pada makalah ini dilaporkan hasil penelitian terbentuknya *white layer* akibat proses *milling austempered ductile iron* (ADI) dengan variasi kecepatan potong, kecepatan makan dan kedalaman potong. ADI dibuat dengan cara memanaskan *ductile iron* ke temperatur austenit di dalam suatu tungku *heat treatment* pada temperatur 900°C selama 1 jam dan kemudian dimasukkan ke dalam larutan garam yang bertemperatur 375°C selama 1 jam. Permukaan ADI hasil proses *milling* dianalisa dengan menggunakan mikroskop optik dengan bantuan software Lumenera Infinity 1 untuk mengukur ketebalan *white layer* yang terbentuk dan alat uji kekerasan mikro. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa *white layer* juga terbentuk di permukaan *milling* yang dilakukan pada ADI. Permukaan benda kerja (*white layer*) ternyata memiliki kekerasan yang lebih tinggi bila dibanding logam induknya (bulk material). Pengaruh kecepatan potong, kecepatan makan dan kedalaman potong dilaporkan dan didiskusikan dalam makalah ini.

Kata kunci: *White Layer, Milling, Austempered Ductile Iron, Kecepatan Potong, Kecepatan Makan dan Kedalaman Potong*

1. Pendahuluan

Austempered ductile irons (ADI) adalah salah satu jenis besi cor yang telah banyak dikembangkan seiring dengan meningkatnya aplikasi ADI di bidang rekayasa seperti untuk roda gigi, *crankshaft*, *connecting rod* dan komponen-komponen di peralatan berat dan transportasi. Hal ini disebabkan karena ADI memiliki kombinasi sifat mekanik yang baik seperti kekuatan yang tinggi, keuletan, ketangguhan, ketahanan lelah dan ketahanan aus yang lebih baik bila dibandingkan dengan besi cor lainnya [1-3]. Disamping itu ADI juga memiliki rasio kekuatan-berat yang baik, ketahanan aus dinamik, mudah dibuat (*manufacturability*) dan mudah dicor (*castability*) [4]. Sifat mekanik ADI tergantung pada kondisi proses perlakuan panas yang pernah diterima, ukuran dan distribusi grafit serta cacat-cacat yang ada pada struktur mikronya [5-6]. Untuk mendapatkan ADI, *ductile iron* yang baik kualitasnya menjadi persyaratan sebelum dilakukan proses austemper.

Karena ADI memiliki kekuatan yang tinggi dan keuletan yang baik, pada saat dilakukan proses pemesian pahat potong sering mengalami keausan, baik *flank wear* maupun *crater wear*. Sehingga dari beberapa percobaan yang telah dilakukan, ADI termasuk material yang memiliki *machinability* yang kurang baik [7].

Saat ini perhatian orang terhadap hasil proses pemesian tidak hanya terfokus kepada tingkat keausan pahat, kekasaran permukaan dan gaya potong yang terjadi, namun juga pada terbentuknya *white layer*. *White layer* adalah lapisan putih yang biasanya terbentuk pada permukaan logam dan tampak putih ketika diamati di bawah mikroskop optik setelah persiapan metalografi standar. Oleh karena itu lapisan ini sering disebut sebagai lapisan etsa putih dalam beberapa literatur. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa *white layer* terbentuk dari hasil proses pemesian pada benda kerja yang terbuat dari baja [8-14], paduan nikel [15] dan paduan titanium [16]. *White layer* berukuran sangat tipis dan memiliki sifat-sifat sebagai berikut, lebih keras dibanding logam induknya, mengandung tegangan sisa tekan dan tarik, dapat mengurangi ketahanan fatik dan umur pakai komponen serta bersifat getas [17]. Namun, sepanjang penulis tahu, belum ada hasil penelitian tentang terbentuknya *white layer* pada permukaan benda kerja hasil proses pemesian dari *austempered ductile iron* (ADI). Oleh karena itu, tujuan dari studi ini adalah untuk melihat apakah *white layer* juga terbentuk pada ADI dan kemudian melakukan pengamatan melalui proses metalografi, pengukuran dimensi serta melakukan uji kekerasan pada *white layer* tersebut

2. Metode Penelitian

2.1 Material Benda Kerja

Material benda kerja yang digunakan dalam studi ini adalah besi cor nodular (Nodular Cast Iron/Ductile Iron) FCD 50. Untuk mendapatkan *austempered ductile iron* (ADI), *ductile iron* dilakukan proses perlakuan panas dengan memanaskan benda kerja FCD 50 pada temperatur 900°C dan ditahan selama 1 jam dalam suatu tungku pemanas. Kemudian benda kerja dipindahkan ke dalam tungku lain yang berisi larutan garam KNO₃ yang bertemperatur 375°C selama 1 jam dan didinginkan di udara.

2.2 Proses Milling

Dimensi benda kerja yang digunakan pada studi ini adalah 50 x 50 x 30 mm. Mesin *Milling* yang digunakan adalah Aciera F4 *Milling Machine*. Sedangkan pahat yang digunakan untuk memotong permukaan benda kerja adalah jenis pahat *end mill* yang terbuat dari karbida yang memiliki diameter sebesar 20 mm dan 4 *flute*. Parameter proses *milling* dapat dilihat pada tabel 1. Proses *milling* yang dilakukan tanpa menggunakan cairan *coolant*.

Tabel 1. Parameter Proses *Milling*

Percobaan ke -	Parameter		
	Kecepatan Potong (m/menit)	Kecepatan Makan (mm/tooth)	Kedalaman Potong (mm)
1	15	0,05	0,1
2	15	0,075	0,2
3	15	0,1	0,3
4	20	0,05	0,2
5	20	0,075	0,3
6	20	0,1	0,1
7	25	0,05	0,3
8	25	0,075	0,1
9	25	0,1	0,2

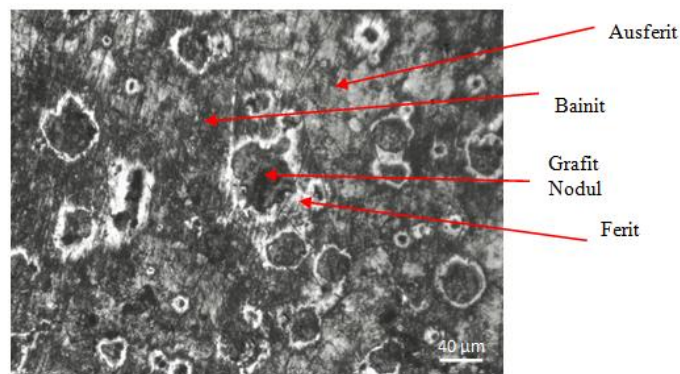
2.3 Pengamatan dan Pengujian

White layer yang terbentuk diamati dengan menggunakan mikroskop *Meiji Techno IM7200*. Sementara kekerasan dari *white layer* tersebut diuji dengan menggunakan *Mitutoyo HM-210 Digital Micro-Hardness Tester* (*Vickers Hardness Test*), di mana indenter yang digunakan adalah intan serta beban yang diberikan sebesar 0,3 kgf.

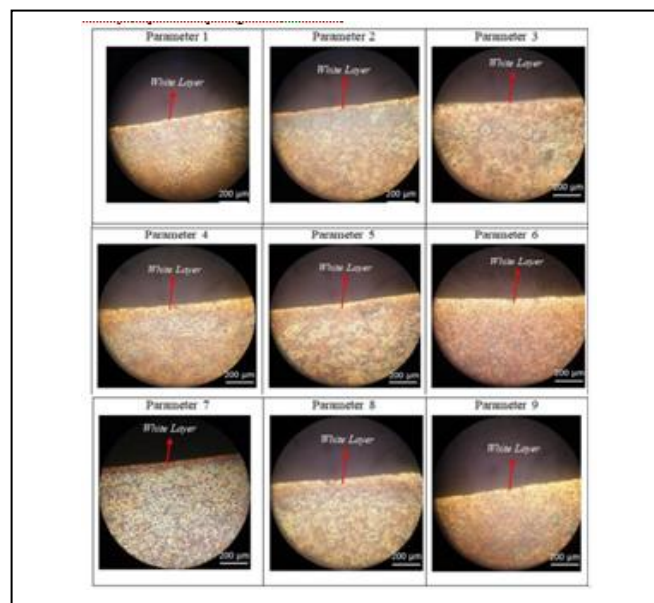
3. Hasil dan Pembahasan

Struktur mikro benda kerja ADI dapat dilihat pada Gambar 1. Dari gambar tersebut terlihat adanya grafit bulat atau nodul yang dikelilingi oleh fasa ferit yang berwarna putih. Disamping itu juga terlihat adanya fasa ausferit yang terang dan binit pada bagian yang gelap. Rata-rata ukuran grafit bulat yang dihasilkan adalah 47,81 μm . Sementara nilai kekerasan dari ADI yang dihasilkan sebesar 331-415 HV. Nilai kekerasan seperti ini masuk dalam kategori medium dan tidak menyebabkan laju keausan yang tinggi pada pahat potong.

Dari hasil pengamatan, untuk semua parameter proses pemesian yang digunakan menghasilkan lapisan tipis *white layer* dipermukaan benda kerja (lihat Gambar 2). *White layer* telah dikarakterisasi oleh beberapa peneliti sebagai area dengan ukuran butir yang sangat halus, sangat getas dan banyak mengandung tegangan sisa (18). Ini mengindikasikan terjadinya deformasi plastis dengan *strain rate* yg tinggi. Sehingga ketebalan *white layer* juga akan dipengaruhi oleh parameter proses pemesian.



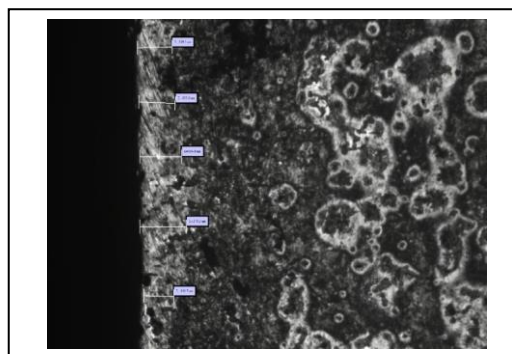
Gambar 1. Struktur mikro ADI



Gambar 2. White layer yang terbentuk di permukaan benda kerja setelah dilakukan proses permesinan

3.1 Ukuran white layer

Tebal *white layer* yang terbentuk di permukaan benda kerja diukur dengan menggunakan *software Lumenera Infinity 1*. Pengukuran ketebalan dilakukan pada perbesaran mikroskop 100x. Contoh cara pengukuran dapat dilihat pada Gambar 3 dan hasil pengukuran dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 3. Contoh Pengukuran Ketebalan White Layer dengan Software Lumenera Infinity 1

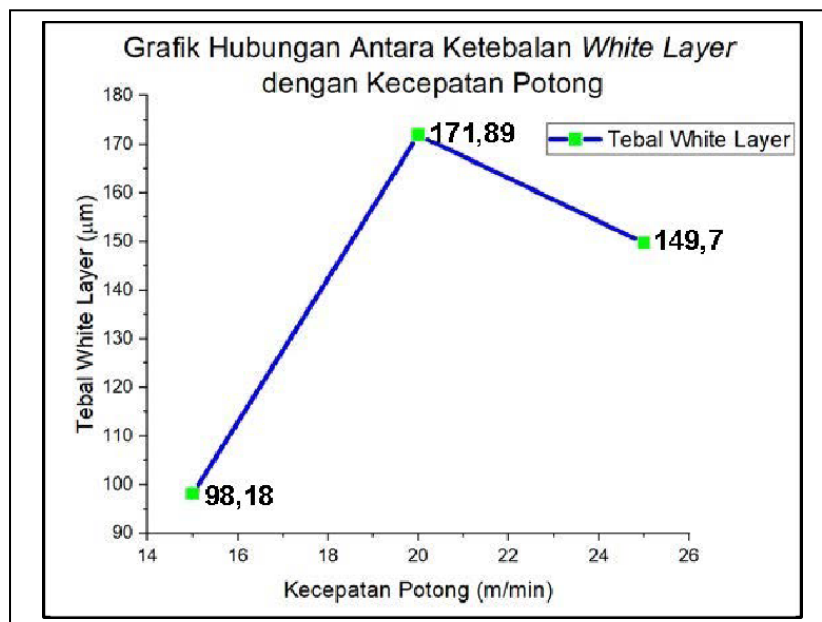
Pengaruh parameter proses permesinan terhadap ketebalan *white layer* yang terbentuk dapat dilihat pada Gambar 4 – 5. Gambar 4 menunjukkan pengaruh kecepatan potong terhadap tebal *white layer* yang terbentuk di permukaan benda kerja. Pada gambar terlihat dengan naiknya kecepatan potong dari 15 m/min ke 20 m/min tebal *white layer* juga meningkat dari 98,18 μm ke 171,89 μm . Namun ketika kecepatan potong meningkat dari 20 m/min ke 25 m/min tebal *white layer* berkurang menjadi 149,70 μm .

Menurut Pang dkk. temperatur pemotongan berpengaruh pada ketebalan *white layer* yang terbentuk [19]. Pada kecepatan potong rendah hingga menengah, temperatur yang terjadi pada benda kerja lebih besar dibanding dengan temperatur yang terjadi pada geram. Proses pemanasan yang tinggi dan pendinginan yang cepat pada benda kerja mengakibatkan peningkatan tebal *white layer* yang terbentuk. Pada kecepatan potong yang tinggi, temperatur pemotongan lebih besar terjadi pada geram yang dihasilkan dibanding pada benda kerja, sehingga *white layer* yang terbentuk menjadi lebih tipis.

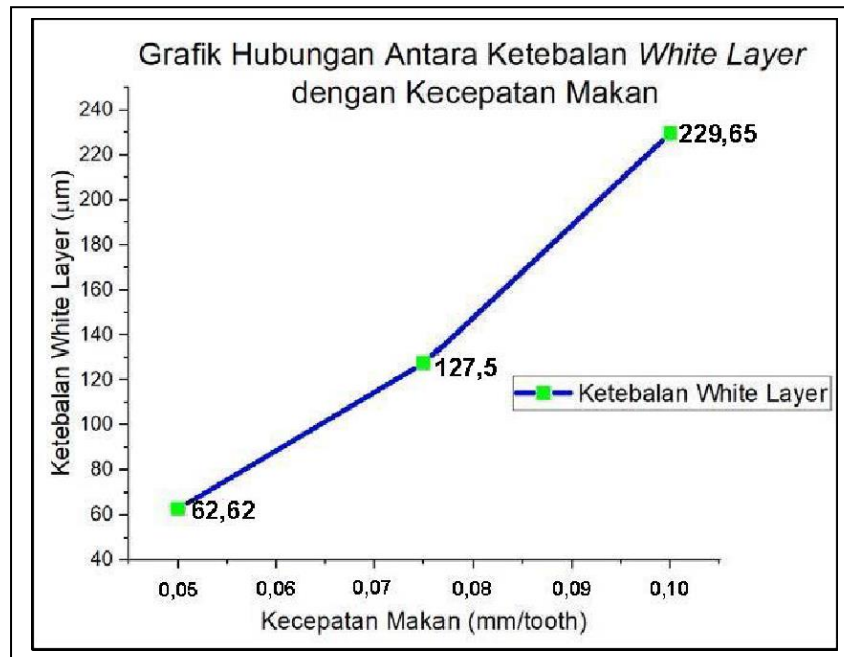
Gambar 5 menunjukkan pengaruh kecepatan makan terhadap tebal *white layer* yang terbentuk. Tebal *white layer* terlihat meningkat dengan naiknya kecepatan makan dari 0,05 mm/tooth menjadi 0,1 mm/tooth dengan persentase peningkatan sebesar 266%. Hal ini mungkin terjadi mengingat *cutting area* juga akan meningkat dengan bertambahnya kecepatan makan. Namun hal ini tidak berlaku bagi peningkatan kedalaman potong (lihat Gambar 6). *Cutting area* akan naik dengan meningkatnya kedalaman potong. Hasil yang didapat seharusnya adalah ketebalan *white layer* akan naik seiring dengan meningkatnya kedalaman potong yang dilakukan. Hasil ini perlu dikaji lebih teliti lagi di masa yang akan datang.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Ketebalan *White Layer*

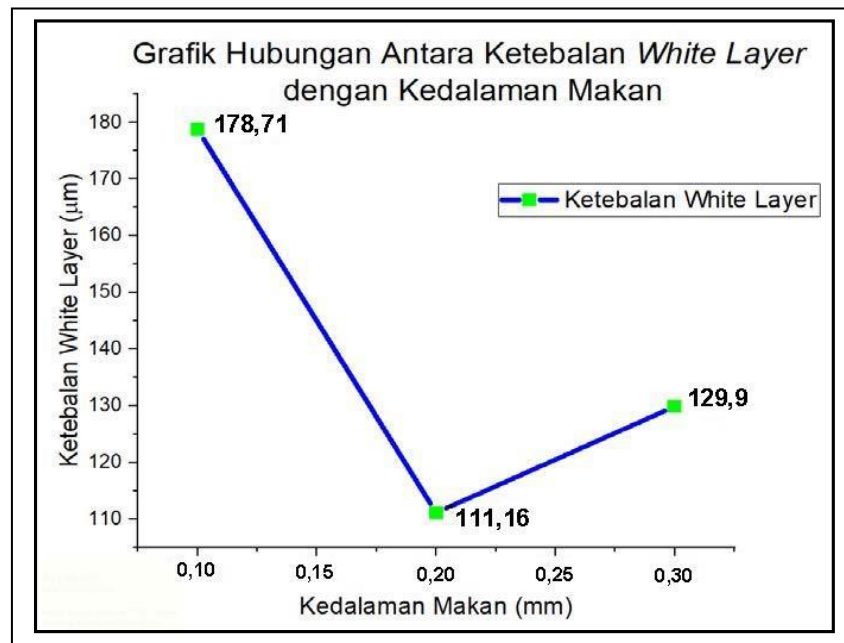
Parameter	Rata-rata Hasil Pengukuran (μm)
1	57,267
2	69,622
3	167,644
4	55,578
5	147,033
6	313,044
7	75,011
8	165,833
9	208,267



Gambar 4. Pengaruh Kecepatan Potong Terhadap Ketebalan *White Layer* yang Terbentuk



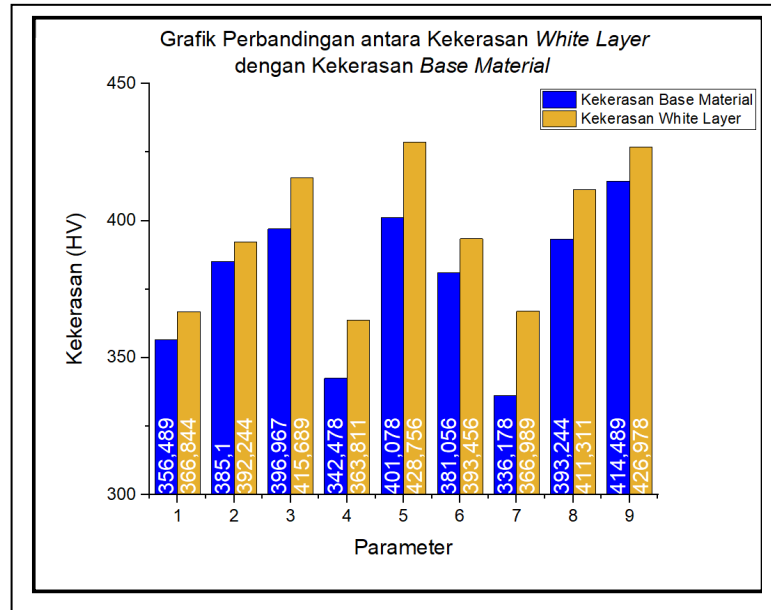
Gambar 5. Pengaruh Kecepatan Makan Terhadap Ketebalan White Layer yang Terbentuk



Gambar 6. Pengaruh Kedalaman Potong Terhadap Ketebalan White Layer yang Terbentuk

3.2 Kekerasan white layer

Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan alat uji kekerasan mikro Mitutoyo HM-210 *Digital Micro-Hardness Tester* dengan pembebanan menggunakan indenter intan sebesar 0,3 kgf. Pengujian kekerasan dilakukan di bagian *white layer* dengan masing-masing sebanyak tiga kali pada setiap permukaan spesimen. Hasil pengujian kekerasan pada *white layer* untuk semua parameter proses permesinan dan kekerasan logam induk dapat dilihat pada Gambar 7. Dari grafik tersebut terlihat bahwa *white layer* selalu lebih keras dibandingkan logam induknya. Hal ini dapat dipahami karena proses terbentuknya *white layer* adalah karena proses deformasi plastis yang melibatkan *strain rate* dan temperatur pemotongan yang tinggi disertai proses pendinginan yang cepat.

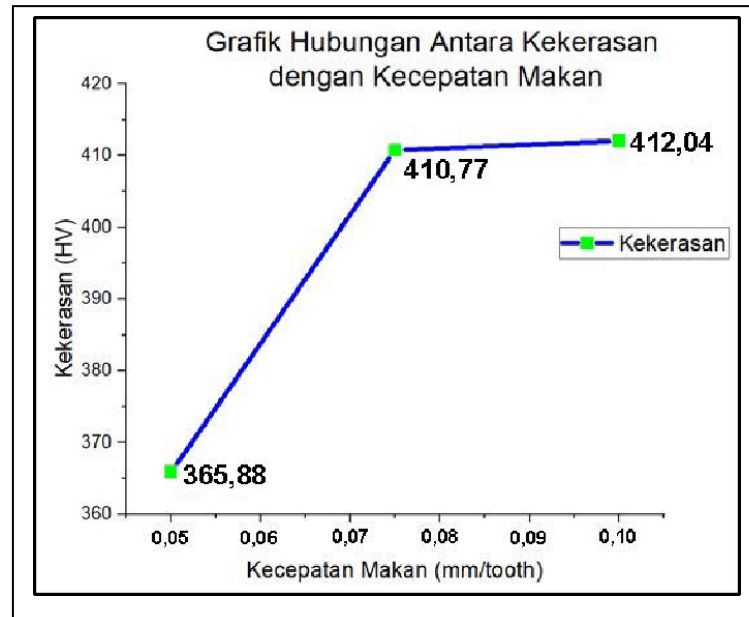


Gambar 7 Grafik Perbandingan Nilai Kekerasan antara *White Layer* dan Logam Induk

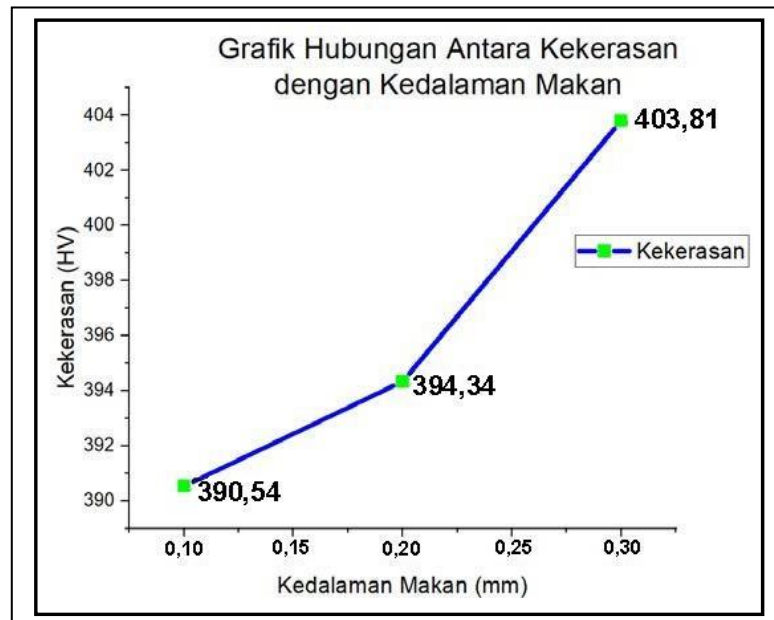
Gambar 8-10 adalah grafik hasil pengujian kekerasan pada *white layer* dengan variasi kecepatan potong, kecepatan makan dan kedalaman potong. Dari ketiga grafik yang ditampilkan terlihat bahwa baik kecepatan potong, kecepatan makan dan kedalaman potong akan mempengaruhi nilai kekerasan *white layer* yang terbentuk, dimana naiknya semua parameter tersebut akan meningkatkan nilai kekerasan *white layer*. Namun peningkatan nilai kekerasan *white layer* dengan naiknya kecepatan potong dan kedalaman potong tidaklah terlalu besar, yaitu sebesar 2,6% untuk kenaikan kecepatan potong dan 3,4% untuk peningkatan kedalaman potong. Sementara itu naiknya kecepatan makan dari 0,05 mm/tooth menjadi 0,1 mm/tooth membuat kekerasan *white layer* naik sebesar 12,6%. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa kecepatan makan adalah parameter yang signifikan terhadap kenaikan nilai kekerasan dari *white layer*.



Gambar 8. Pengaruh Kecepatan Potong Terhadap Nilai Kekerasan *White Layer* yang Terbentuk



Gambar 9. Pengaruh Kecepatan Makan Terhadap Nilai Kekerasan White Layer yang Terbentuk



Gambar 10. Pengaruh Kedalaman Potong Terhadap Nilai Kekerasan White Layer yang Terbentuk

4. Kesimpulan

Dari hasil eksperimen yang diperoleh terlihat bahwa *white layer* juga terbentuk pada proses permesinan dengan menggunakan benda kerja *Austempered Ductile Iron* (ADI). Tebal dan tipisnya *white layer* yang terbentuk dipengaruhi oleh parameter proses permesinan, yaitu kecepatan potong, kecepatan makan dan kedalaman potong. Pada mulanya, naiknya kecepatan potong menyebabkan kenaikan tebal *white layer*, namun setelah itu kenaikan kecepatan potong membuat turunnya ketebalan *white layer*. Sementara itu peningkatan kecepatan makan menyebabkan ukuran *white layer* menjadi semakin tebal. Hal yang berbeda dihasilkan pada parameter kedalaman potong, dimana pada awalnya peningkatan kedalaman potong membuat *white layer* menjadi lebih tipis, namun setelah itu kenaikan kedalaman potong membuat peningkatan ketebalan *white layer*. Dari hasil uji kekerasan mikro yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa *white layer* memiliki nilai kekerasan yang lebih besar dibanding dengan nilai kekerasan logam induknya. Kenaikan pada semua parameter proses permesinan menyebabkan peningkatan nilai kekerasan *white layer* yang terbentuk. Peningkatan kekerasan yang signifikan terjadi pada peningkatan parameter kecepatan makan, yaitu sebesar 12,6%. Sementara untuk parameter proses permesinan yang lain hanya menunjukkan kenaikan nilai kekerasan yang kecil.

Daftar Pustaka

- [1] Hatate M, Shiota T, Takahashi N, Shimizu K. Influence of graphite shapes on the wear characteristics of austempered cast iron. *Wear* 2001;251:885–9.
- [2] Rebasan N, Dommarco R, Sikora J. Wear resistance of high nodule count ductile iron. *Wear* 2002;253:855–61.
- [3] Magalhaes L, Seabra J. Wear and scuffing of austempered ductile iron gears. *Wear* 1998;215:237–46
- [4] S.Samaddar, T.Das, A.K.Chowdhury, M.Singh, Manufacturing of Engineering components with Austempered Ductile Iron – A Review, *Materials Today: Proceedings* 5 (2018) 25615–25624
- [5] K. Aslantas, S.Tasgetiren, Y. Yalcin. Austempering retards pitting failure in ductile iron spur gears. *Engineering Failure Analysis* 11 (2004) 935–941
- [6] K. Aslantas, S.Tasgetiren A study of spur gear pitting formation and life prediction *Wear* 257 (2004) 1167–1175
- [7] P. Parhad, V. Dakre, A. Likhite, J. Bhatt, The impact of cutting speed and depth of cut on cutting force during turning of austempered ductile iron, *Materials Today: Proceedings* 19 (2019) 663–669
- [8] H. Hassanpour, M. H. Sadeghi, A. Rasti, S. Shajari, Investigation of surface roughness, microhardness and white layer thickness in hard milling of AISI 4340 using minimum quantity lubrication, *Journal of Cleaner Production* 120 (2016) 124-134
- [9] Z. Fangyuan, D. Chunzheng, S. Wei, J. Kang, Effects of cutting conditions on the microstructure and residual stress of white and dark layers in cutting hardened steel, *Journal of Materials Processing Tech.* 266 (2019) 599–611
- [10] G. C. Niea, X. M. Zhang, D. Zhang, H. Ding, An experimental study of the white layer formation during cryogenic assisted hard machining of AISI 52100 steel, *Procedia CIRP* 77 (2018)223–226.
- [11] Z. F. Yuan, D. C. Zheng, W. M. Jie, S. Wei, White and dark layer formation mechanism in hard cutting of AISI52100 steel, *Journal of Manufacturing Processes* 32 (2018) 878–887
- [12] A. Alok, M. Das, White layer analysis of hard turned AISI 52100 steel with the fresh tip of newly developed HSN² coated insert, *Journal of Manufacturing Processes* 46 (2019) 16–25
- [13] M. Neslušana, J. Uričeka, A.Mičietová, P. Minárik, M.Pišák, M.Čilliková, Decomposition of cutting forces with respect to chip segmentation and white layer thickness when hard turning 100Cr6, *Journal of Manufacturing Processes* 50 (2020) 475–484
- [14] W. Zhang, K. Zhuang, Effect of cutting edge microgeometry on surface roughness and white layer in turning AISI 52100 steel, *Procedia CIRP* 87 (2020)53–58
- [15] Z. Chen, M. H. Colliander, G. Sundell, R. L. Peng, J. Zhou, S. Johansson, J. Moverare, Nano-scale characterization of white layer in broached Inconel 718, *Materials Science & Engineering A* 684 (2017) 373–384
- [16] M. Brown, P. Crawforth, R. M'Saoubi, T. Larsson, B. Wynne, A. Mantle, H. Ghadbeigi, Quantitative characterization of machining-induced white layers in Ti–6Al–4V, *Materials Science & Engineering A* 764 (2019) 138220
- [17] M.Brown, H.Ghadbeigi, P. Crawforth, R.M'Saoubi, A.Mantle, J.McGourlay, D.Wright, Non-destructive detection of machining-induced white layers in ferromagnetic alloys, *Procedia CIRP* 87 (2020)420–425
- [18] Kwong, J., Axinte, D.A., Withers, P.J., The Sensitivity of Ni-based Superalloy to Hole Making Operations: Influence of Process Parameters on Subsurface Damage and Residual Stress. *Journal of Materials Processing Technology* (2009),209:3968–3977
- [19] Pang, J.Z., Wang, M.J., Duan, C.Z., White Layer and Surface Roughness in High Speed Milling of P20 Steel, *Advanced Materials Research* (2007), Vol. 24-25: 45-54