



RANCANGAN PROSES PERLAKUAN PANAS UNTUK MENINGKATKAN SIFAT KETAHANAN EROSI BAJA AISI 4140

Beny Bandanadjaja, Dewi Idamayanti*, Rinaldy Alviana Hanafi

Politeknik Manufaktur Bandung
Jl. Kanayakan 21 Dago Bandung Indonesia
*E-mail: idamayanti79@gmail.com

Masuk tanggal : 3-10-2019, revisi tanggal : 06-10-2019, diterima untuk diterbitkan tanggal 24-11-2019

Abstrak

Part Diffuser merupakan bagian dari mesin *mill* batu bara PLTU (pembangkit listrik tenaga uap) Bukit Asam yang terkikis habis oleh erosi serbuk batu bara. Material asli yang digunakan sebelumnya adalah FC250+0,5%Cr yang memiliki nilai laju erosi 0,0015 mg/s dan harga dampak 4,25 J/cm². Material tersebut memiliki umur pakai hanya 6 bulan, sementara umur pakai yang diinginkan adalah minimal 18 bulan. Dalam penelitian ini dilakukan perancangan proses pada material AISI 4140 untuk menjadi pengganti material lama. Tujuannya untuk mendapatkan material pengganti yang memiliki umur pakai 18 bulan atau lebih. Selain sifat ketahanan erosi, ketahanan terhadap munculnya retak akibat getaran juga menjadi tuntutan yang perlu diperhatikan. Dengan demikian yang menjadi batas atas adalah laju erosi material baru 1/3 laju erosi material asli yaitu sebesar 0,0005 mg/s dan batas bawahnya adalah nilai dampak material asli sebesar 4,25 J/cm². Metode yang dipakai pada material AISI 4140 adalah dengan proses perlakuan panas *normalising-hardening* yang diikuti dengan variasi *tempering* 200, 300, 450, dan 600 °C sebagai pilihan untuk dianalisis proses terbaiknya. Pengujian yang dilakukan adalah uji kekerasan Rockwell, uji dampak dan uji keausan. Dari hasil percobaan dapat diperoleh persamaan fungsi umur pakai $U(x)$ terhadap kekerasan HRC (x), yaitu $U(x) = 0,9574 \cdot e^{0,071x}$. Hasil terbaik diperoleh pada material AISI 4140 dengan variasi *tempering* 200 °C dengan perkiraan umur 27 bulan dan *tempering* 450 °C dengan perkiraan umur pakai 18 bulan.

Kata Kunci: Ketahanan erosi, AISI 4140, *mill* batu-bara, *diffuser*, perlakuan panas

Abstract

The diffuser is a spare part of the coal mill machine of the Bukit Asam Steam Electricity Power Plant. This spare part was eroded completely by the erosion of coal powder. The previous diffuser material was FC250+0.5% Cr, which had an erosion rate of 0.0015 mg/s and an impact value of 4.25 J/cm². This material has a service life of 6 months only, while the requirement of service life is at least 18 months. In this study, a process design was carried out on AISI 4140 material for replacing the previous materials. This study aims to make alternate diffuser materials with a lifetime of 18 months or more. Besides the erosion resistance, the resistance to cracks propagation due to vibration also becomes an important consideration. According to the requirement, the upper limit was set at the maximum erosion rate of new material, which equals 1/3 of the erosion rate of original material (0.0005 mg/s), and the lower limit was set to the minimum, which is equal to the impact value of the original material (4.25 J/cm²). The method was the normalizing-hardening heat treatment process, followed by variations of tempering at 200, 300, 450, and 600 °C. The analytical tests were conducted using the Rockwell hardness test, impact test, and jet erosion test. The analysis showed that the derived equation could be used to estimate the lifetime $U(x)$ as a function of the hardness HRC (x). That is $U(x) = 0.9574 \cdot e^{0.071x}$. The best result was achieved from the sample with a tempering of 200 and 450 °C that conforms to the requirement for a lifetime of 27 months and 18 months, respectively.

Keywords: Erosion resistance, AISI 4140, coal mill, diffuser, heat treatment

1. PENDAHULUAN

Mill batu bara merupakan peralatan penghancur dan penggerus batu bara dari bentuk

bongkahan menjadi serbuk batu bara. Serbuk batu bara digunakan sebagai bahan bakar PLTU (pembangkit listrik tenaga uap). Seperti yang

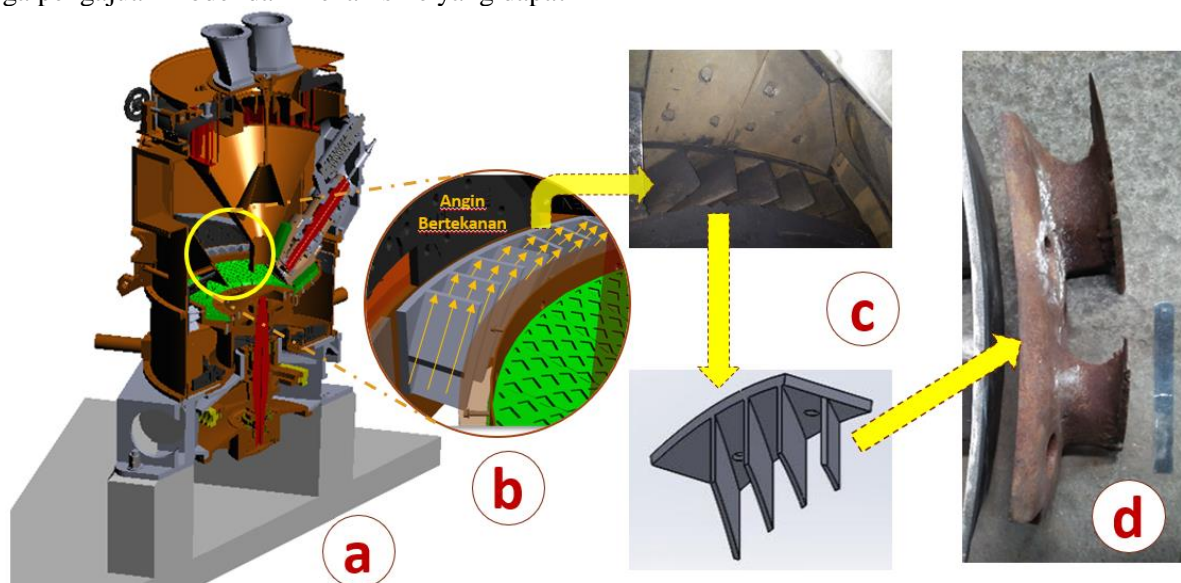
diilustrasikan pada Gambar 1(a) dan 1(b) dalam mesin *mill*, terdapat *part diffuser* yang berfungsi sebagai pengarah angin bertekanan yang ditiup dari arah bawah untuk menghasilkan putaran siklon sehingga dapat menghantarkan serbuk batu bara ke cerobong di atasnya menuju kamar pembakaran (*combustion chamber*). *Part diffuser* dibuat dalam bentuk segmen-segmen agar lebih mudah untuk dipasang melingkar (Gambar 1(c)). Material aslinya menggunakan FC250 + 0,5%Cr. Material ini dilaporkan oleh pihak pengguna hanya dapat bertahan 6 bulan [1], sedangkan umur ideal yang diinginkan adalah 18 bulan. Kerusakan utama yang terjadi pada bagian *mill* batu bara ini dikarenakan adanya erosi serbuk batu bara yang mengalir bersama angin bertekanan sehingga bagian komponen tersebut terkikis, menipis dan habis [1], seperti ditunjukkan pada Gambar 1(d) *part diffuser* mengalami erosi dan habis.

Kerusakan erosi adalah suatu kejadian hilangnya bagian permukaan dari material secara terus-menerus terkait dengan interaksi mekanik antara permukaan benda berupa tumbukan partikel padat [2]. Kerusakan akibat erosi seringkali menjadi masalah yang berat dan rumit bagi beberapa industri. Diantaranya industri migas yang banyak menggunakan pipa sebagai pengalir aliran minyak. Selama digunakan, lapisan pasif dari pipa baja dapat terkikis sebagian atau semuanya oleh keberadaan partikel pasir dalam aliran fluida minyak tersebut [3]. Oleh karenanya erosi menjadi perhatian utama bagi beberapa peneliti [4]-[6]. Banyak studi yang dilakukan untuk dapat memahami modus kegagalan erosi yang cukup kompleks ini dan juga pengajuan model dan mekanisme yang dapat

diperhitungkan untuk mengatasi laju erosi. Laju kerusakan erosi sangat tergantung kepada sifat material partikel yang menumbuk (berat jenis, kekerasan, ukuran dan bentuk), laju pengikisan partikel (*particle feed rate*), sudut impact dan kecepatan partikel abrasif dan sifat material target (kekerasan, keuletan dan struktur mikro) [7]. Syarat terjadinya erosi adalah material pengerosi (*erodent*) harus lebih keras dibandingkan material target [8].

Teknis perlindungan terhadap erosi pada material target dapat dengan menggunakan material pelapis yang keras seperti pelapisan dengan keramik [9]-[10]. Cara lainnya adalah dengan meningkatkan sifat mekanis material target sehingga memiliki sifat tahan erosi. Salah satu kesulitan dalam metode pelapis keramik adalah melibatkan temperatur proses yang cukup tinggi lebih dari 1000 °C [11], sehingga benda bisa berubah sifat mekanisnya dan juga terdeformasi, khususnya benda yang memiliki konstruksi kompleks. Benda *diffuser* memiliki bentuk kompleks, dengan demikian pilihan metode perbaikan sifat ketahanan erosi yang dapat diambil adalah dengan cara meningkatkan sifat mekanis material target.

Fokus penelitian ini dilakukan untuk meningkatkan performansi material target, dengan cara mencari material pengganti untuk *part diffuser mill* batu bara. Material pengganti yang diteliti adalah baja AISI 4140 yang diberikan proses perlakuan panas, sehingga dapat diperoleh sifat-sifat mekanis yang dapat meningkatkan kualitas ketahanan erosi *part diffuser*.



Gambar 1. Bagian komponen *diffuser* yang tererosi [1]

Baja AISI 4140 memiliki kandungan karbon 0,38-0,43 %berat dengan unsur paduan utama khromium 0,6-1,0 %berat dan molibdenum 0,15-0,3 %berat [12]. Baja ini masuk ke dalam kelompok baja paduan rendah yang diberi perlakuan panas (*low alloy heat treatable*). AISI 4140 memiliki kombinasi sifat yang cukup baik yaitu kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan aus yang baik [13]. Tipe baja ini juga dikategorikan sebagai baja QT (*quenched-tempered*) dimana struktur mikro yang dominan terbentuk setelah perlakuan panas QT adalah martensit temper [14]-[15]. Penelitian tentang perilaku erosi pada baja AISI 4140 dalam berbagai kondisi perlakuan panas telah dilakukan oleh Ambrosini dan Bahadur [16]. Pada penelitian tersebut, pengamatan dikonsentrasikan pada pengaruh berbagai struktur mikro dan sifat mekanik baja terhadap ketahanan erosi. Hasilnya disimpulkan bahwa ketahanan erosi meningkat dengan meningkatnya kekerasan dan kekuatan material, namun menurun dengan meningkatnya keuletan. Dalam penelitian tersebut, perlakuan panas yang terbaik untuk mendapatkan kombinasi sifat mekanik dan ketahanan erosi yang baik adalah dengan proses *quench* oli diikuti dengan *tempering* pada temperatur 480-595 °C dan penahanan selama 2 jam. Pada pengamatan SEM (*scanning electron microscopy*) diperoleh informasi adanya deformasi plastis yang berat pada zona tererosi yang ditandai dengan garis-garis abrasi, hal ini mengindikasikan bahwa material yang terkena erosi, kejadiannya diawali dengan deformasi plastis yang pada akhirnya akan disapu atau dihilangkan oleh adanya abrasi.

Beban lainnya yang terjadi pada konstruksi *diffuser* pada *mill* batu bara adalah adanya getaran akibat proses penghancuran batu bara [1]. Berkaitan dengan tuntutan sifat kekerasan yang tinggi untuk dapat menanggulangi erosi [16], maka dampak negatif yang terjadi pada sifat material yang keras akan cenderung menjadi getas [17]-[18], sehingga rentan terhadap terjadinya retak. Getaran yang terjadi pada mesin *mill* batu bara dapat berpotensi untuk menginisiasi adanya retak yang berujung pada patahnya *diffuser*. Walaupun getaran bersifat ringan dapat dipandang sebagai beban minor [1], namun sifat impact material perlu juga dipertimbangkan agar tidak dipilih yang terlalu rendah, dengan demikian kemungkinan pembentukan retakan akan dapat diantisipasi. Peningkatan nilai impact atau ketangguhan material baja hasil pengerasan (*hardening*) dapat diperoleh dengan menambahkan proses *tempering* setelah pengerasan [19]. Dilaporkan oleh Bandanadjaja [19] bahwa material baja

paduan Ni-Cr-Mo memiliki ketahanan impact yang meningkat jauh dengan adanya tambahan proses *tempering* setelah proses pengerasan. Saha [20] menyatakan bahwa proses *tempering* baja paduan akan menyebabkan berdifusinya karbon keluar dari fasa martensit, inilah yang menurunkan kekuatan dan kekerasan martensit. Dengan demikian ketangguhan material dapat meningkat.

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan material pengganti untuk *diffuser* yang memiliki kualitas yang lebih baik. Kualitas yang dimaksud adalah memiliki sifat ketahanan erosi yang baik namun tetap memiliki sifat impact yang baik sehingga memiliki kemampuan menahan getaran dan dapat terhindar dari terjadinya retak. Dengan menggunakan material AISI 4140 yang telah diproses perlakuan panas *hardening-tempering* maka material pengganti tersebut diharapkan dapat memiliki umur pakai yang lebih panjang dibandingkan dengan material FC250 + Cr 0,5%.

2. PROSEDUR PERCOBAAN

Dalam penelitian ini material *diffuser* yang sebelumnya digunakan yaitu FC250 + 0,5% Cr telah diperiksa ketahanan erosinya menggunakan metode *erosion jet testing*, diperoleh informasi material memiliki laju erosi rata-rata sebesar 0,0015 mg/s. Kekerasan material juga diperiksa dan diperoleh nilai rata-rata sebesar 26,68 HRC. Harga impact sebesar 4,25 J/cm².

Material pengganti yang dipilih untuk digunakan dalam penelitian ini adalah jenis baja AISI 4140. Baja ini dibuat dengan cara pengecoran dalam bentuk *Y block* standar ASTM E8. Hasil pengecoran material diperiksa komposisinya menggunakan OES (*optical emission spectroscopy*) dan hasil aktualnya memiliki komposisi sebagaimana disampaikan pada Tabel 1.

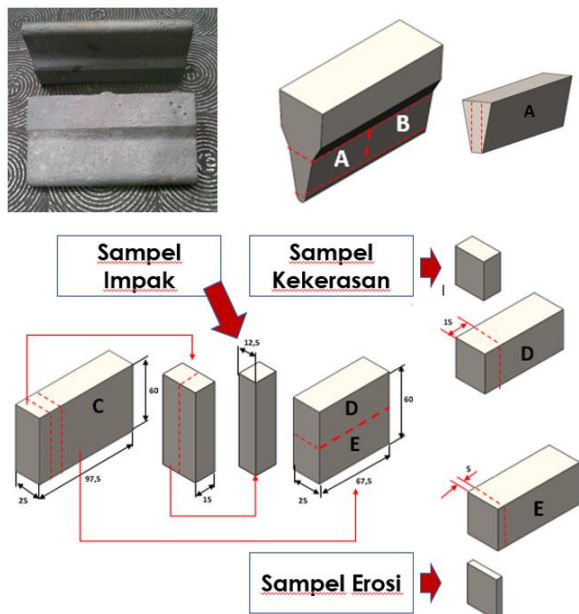
Tabel 1. Komposisi kimia material dan standar AISI 4140 (%berat)

Unsur	AISI 4140	Hasil OES
C	0,38-0,43	0,40
Si	0,2-0,35	0,36
Mn	0,75-1,0	0,99
P	0,03 max	0,02
S	0,04 max	0,01
Cr	0,6-1,0	0,95
Mo	0,15-0,3	0,25

Komposisi kimia hasil pengecoran pada *Y block* secara umum sudah mendekati nilai yang ditetapkan pada standar AISI 4140 [12]. Terdapat kelebihan pada Si sebesar 0,01 %berat, dapat dianggap minor pengaruhnya karena nilainya kecil.

Material AISI 4140 yang dicor berbentuk Y *block* dipotong untuk dibuat sampel uji impact, uji keras dan uji erosi. Posisi pemotongan material AISI 4140 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Y *block* dipotong-potong dimana untuk uji kekerasan dibuat dalam bentuk kotak ukuran 15x15x12 mm. Untuk uji erosi dibuat dalam bentuk kotak ukuran 25x25x5 mm, dan uji impact dibuat dengan ukuran 10x10x55 mm.

Masing-masing pengujian dibuatkan sampel sebanyak 14 buah untuk memenuhi variasi proses perlakuan panas yang ditetapkan.



Gambar 2. Persiapan dan pemotongan material AISI 4140

Material AISI 4140 kemudian diberikan proses perlakuan panas normalising (N) pada temperatur 853 °C, penahanan selama 2 jam, dan pendinginan udara bebas. Kemudian dilanjutkan dengan proses *hardening* (NH) pada temperatur 853 °C, penahanan selama 2 jam, dan pendinginan dengan media oli (*oil quenching*). Hasil normalising dan *hardening* diberikan proses *tempering* dengan variasi sebagai berikut:

1. NHT200 - *Tempering* pada T 200 °C, penahanan 30 menit, dan pendinginan udara bebas.
2. NHT300 - *Tempering* pada T 300 °C, penahanan 30 menit, dan pendinginan udara bebas.
3. NHT450 - *Tempering* pada T 450 °C, penahanan 30 menit, dan pendinginan udara bebas.
4. NHT600 - *Tempering* pada T 600 °C, penahanan 30 menit, dan pendinginan udara bebas.

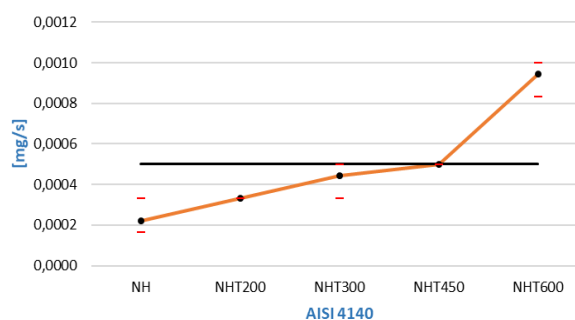
Material AISI 4140 hasil perlakuan panas kemudian diuji keras menggunakan metode Rockwell standard ASTM E 18. Material AISI

4140 untuk uji impact dibuat *notch* setelah proses perlakuan panas menggunakan mesin *wire cut*. Kemudian dilakukan pengujian impact metode *Charpy standard* ASTM E23. *Erosion jet testing* dilakukan sesuai standard ASTM G76-02.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penetapan parameter proses terbaik yang akan menjadi rekomendasi untuk digunakan sebagai material pengganti, maka yang menjadi acuannya adalah permintaan umur pakai selama 18 bulan [1]. Material sebelumnya yaitu FC250+0,5%Cr dilaporkan hanya memiliki umur pakai hanya 6 bulan [1]. Artinya material baru yang dipilih harus memiliki perkiraan umur minimal 18 bulan atau 3 kali lipat umur material asli. Umur pakai terkait dengan berapa lama material tersebut tererosi sampai habis tidak bisa digunakan lagi.

Material FC250+0,5%Cr telah diuji erosi hasilnya diperoleh nilai laju erosi sebesar 0,0015 mg/s. Dengan demikian bila permintaan umur 3 kali lipat maka laju erosi material baru dapat dihitung dapat dihitung maksimal atau sama dengan: $6/18 \times 0,0015 = 0,0005$ mg/s. Nilai ini menjadi batas atas yang dipersyaratkan harus dipenuhi material pengganti. Pengertian nilai erosi disini adalah semakin besar nilainya maka material semakin banyak tererosi dan umurnya semakin pendek. Material AISI 4140 yang telah mengalami perlakuan panas diuji erosi, dan diperoleh hasil sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.

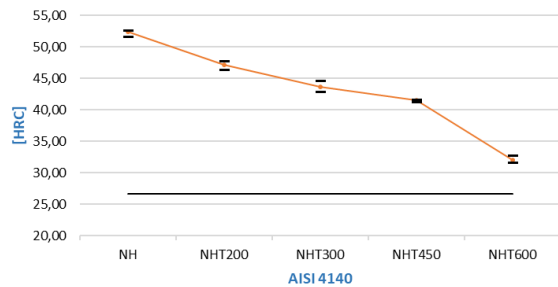


Gambar 3. Laju erosi material AISI 4140 dengan batas atas 1/3 laju erosi material asli

Dari hasil uji erosi pada Gambar 3 diperoleh informasi bahwa parameter yang memenuhi persyaratan umur adalah material AISI 4140 NH, NHT200, NHT300 dan NHT450. Dari hasil tersebut di atas dapat diperhitungkan bahwa material AISI 4140 NH memiliki nilai laju erosi terendah atau dengan kemampuan menahan erosi terbaik yaitu sebesar 0,00022 mg/s. Artinya apabila hanya menerima beban erosi saja maka material NH yang paling lama habisnya atau

umurnya paling lama.

Sifat ketahanan erosi ini terkait dengan kekerasan material, dimana semakin tinggi kekerasan maka semakin tahan terhadap erosi, seperti yang dinyatakan oleh Ambrosini dan Bahadur [16], Rodríguez, dkk. [21] dan Ojala, dkk. [22]. Material AISI 4140 hasil perlakuan panas diperiksa kekerasannya ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil uji kekerasan material AISI 4140 dari seluruh proses perlakuan panas

Gambar 4 menunjukkan hasil uji kekerasan material AISI 4140, dapat dilihat bahwa hubungan kekerasan dengan laju erosi (lihat Gambar 3) berbanding terbalik, artinya semakin keras material maka semakin rendah laju erosinya. Contohnya material NH memiliki kekerasan tertinggi sebesar rata-rata 52,36 HRC memiliki laju erosi terendah sebesar rata-rata 0,00022 mg/s.

Dari data kekerasan dan laju erosi dapat dibuat korelasi fungsi kekerasan terhadap laju erosi. Data diurutkan dari nilai kekerasan terkecil sampai yang terbesar sebagai variable bebas (x), kemudian nilai laju erosinya dibuat sebagai nilai variable terikat (y) atau nilai fungsi f(x) seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

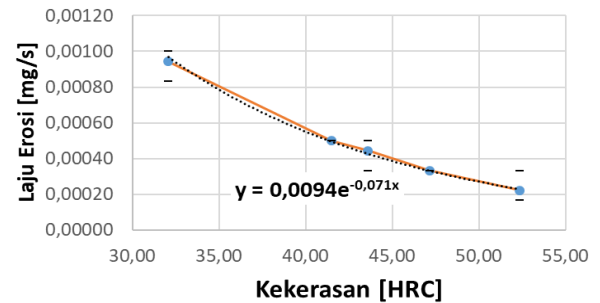
Tabel 2. Data kekerasan (HRC) vs laju erosi (mg/s) material AISI 4140

AISI 4140	Kekerasan	Laju erosi
NHT600	32,08	0,00094
NHT450	41,50	0,00050
NHT300	43,60	0,00044
NHT200	47,14	0,00033
NH	52,36	0,00022

Tabel 2 dan Gambar 5 menunjukkan grafik hubungan nilai kekerasan HRC dan laju erosi dari hasil eksperimen material AISI 4140. Hubungan keduanya dapat dinyatakan sebagai persamaan eksponensial, pada *software excel* dapat diperoleh *trend line exponential* dengan persamaan:

$$f(x) = 0,0094 \cdot e^{-0,071x} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana x = kekerasan (HRC) dan f(x) = laju erosi (mg/s)]. Rumus ini dapat digunakan untuk memperkirakan laju erosi material AISI 4140 dengan kekerasan HRC tertentu.

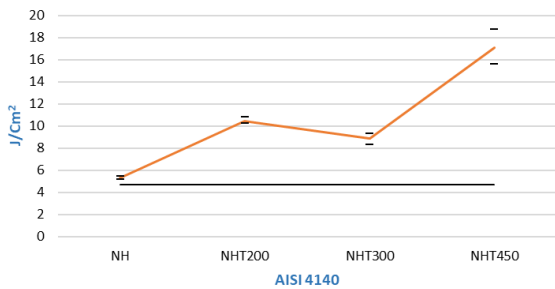


Gambar 5. Hubungan kekerasan dan laju erosi material AISI 4140 dari seluruh proses perlakuan panas

Sifat mekanis lainnya yang dievaluasi sebagai batasan adalah persyaratan kedua yaitu ketahanan material terhadap pembentukan retak [1]. Proses penghancuran dan penggerusan batu bara pada mesin *mill* menghasilkan hentakan-hentakan dan getaran yang memungkinkan memicu timbulnya retakan pada material yang berujung pada patahnya material. Material yang semakin keras memiliki sifat yang semakin getas dan material yang tangguh akan memiliki ketahanan terhadap inisiasi retakan [17], [23]. Dengan demikian perlu dievaluasi dari keempat material AISI 4140 (NH, NHT200, NHT300 dan NHT450) mana yang telah memenuhi persyaratan kriteria laju erosi aspek sifat ketangguhannya. Sifat ketangguhan dapat diperiksa menggunakan uji impact. Nilai impact referensi yang digunakan adalah nilai impact dari material asli. Berdasarkan laporan pengguna dan pengamatan part *diffuser* yang rusak bahwa material rusak karena habis tererosi dan tidak ada yang patah akibat retak [1]. Dengan demikian nilai impact material asli menjadi batas bawah dimana nilai impact material baru tidak boleh lebih rendah dari batas bawah tersebut. Semakin tinggi rentang nilai impact material baru dibanding material asli maka material semakin baik ketahanan terhadap kemungkinan munculnya retakan [17]. Hasil uji impact material AISI 4140 dibandingkan FC250+0,5%Cr diperoleh sebagai ditampilkan pada Gambar 6.

Dari hasil uji impact pada Gambar 6 nampak material AISI 4140 NH memiliki nilai impact yang hampir sama sehingga dapat dikeluarkan dari pilihan. Evaluasi dapat ditentukan dari tiga material AISI 4140 dengan proses NHT200, NHT300 dan NHT450. Dari ketiga material AISI 4140, perlu diperhatikan bahwa material AISI 4140 dengan *tempering* pada temperatur

300-350 °C masuk ke daerah *temper embrittlement*, sebagaimana yang disampaikan oleh Darwish [24]. *Embrittlement* terjadi karena adanya presipitasi karbida pada batas butir *prior austenite* [24].



Gambar 6. Hasil uji impact material AISI 4140 dari seluruh proses perlakuan panas

Dengan demikian pilihan terbaik jatuh pada material AISI 4140 NHT200 dan NHT450. Dengan menggunakan persamaan (1) maka dapat dirumuskan perkiraan umur yang merupakan fungsi dari kekerasan, yaitu dengan memasukkan data empirik material asli dengan umur 6 bulan dan laju erosi 0,0015 mg/s maka dapat disusun persamaan sebagai berikut:

$$U(x) = \frac{Ea}{Ei} Ua \dots\dots\dots (2)$$

- U(x) = Perkiraan umur (bulan), dengan variabel bebas (x) adalah kekerasan (HRC)
- Ea = Laju erosi material asli (mg/s)
- Ei = Laju erosi material baru (mg/s)
- Ua = Umur material asli (bulan)

Bila,

- Ea = 0,0015 mg/s
- Ei = f(x) dari persamaan (1)
- Ua = 6 bulan

Maka,

$$U(x) = \frac{0,0015}{0,0094 \cdot e^{-0,071x}} \cdot 6$$

$$U(x) = 0,9574 \cdot e^{0,071x} \dots\dots\dots (3)$$

- U(x) = perkiraan umur (bulan)
- x = kekerasan (HRC)

Dengan menggunakan persamaan (3) maka dapat diperoleh perkiraan umur pakai material AISI 4140 NHT200 dan NHT450 seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan umur material AISI 4140

AISI 4140	Kekerasan HRC	Umur [bulan]
NHT450	41,50	18,23
NHT200	47,14	27,21

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data percobaan menunjukkan bahwa semakin keras material AISI 4140, maka semakin baik ketahanan erosinya. Peningkatan kekerasan diikuti oleh penurunan ketahanan impaknya. Berdasarkan persyaratan tuntutan ketahanan umur dan sifat ketangguhan material pengganti untuk *diffuser* yang ditetapkan, maka dari hasil analisis dan perhitungan dapat disimpulkan bahwa material AISI 4140 yang memenuhi persyaratan adalah material AISI 4140 NHT200 dan NHT450. Perkiraan umur pakai NHT200 adalah 27 bulan dan NHT450 18 bulan. Keduanya masih memiliki sifat impact yang baik dimana harga impaknya berada di atas harga impact material asli, dengan rentang yang cukup besar yaitu NHT200 memiliki Δ +5,8 J/cm² dan NHT450 memiliki Δ +12,4 J/cm².

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya disampaikan kepada Politeknik Manufaktur Bandung, Jurusan Teknik Pengecoran Logam Politeknik Manufaktur Bandung dan DRPM Kemenristekdikti atas dukungan dana hibah Penelitian Pengembangan Tahun Anggaran 2019.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Purwadi, B. Bandanadjaja, D. Idamayanti, and A. Hidayat Saefudin, "Engineering Review Pulverizer Mill PLTU Sektor Pembangkitan Bukit Asam," Bandung, 2017.
- [2] M. A. Islam, T. Alam, Z. N. Farhat, A. Mohamed, dan A. Alfantazi, "Effect of microstructure on the erosion behavior of carbon steel," *Wear*, vol. 332, pp. 1080-1089, 2015. Doi :10.1016/j.wear.2014.12.004.
- [3] R. Bellman, dan A. Levy, "Erosion mechanism in ductile metals," *Wear*, vol. 70, no. 1, pp. 1-27, 1981, Doi :10.1016/0043-1648(81)90268-4.
- [4] M. V. Torres, J. R. L. Camacho, R. E. B. Castillo, E. A. G. Hernandez, E. E. V. Cárdenas, dan J. V. Torres, "Study of solid particle erosion on AISI 420 stainless steel using angular silicon carbide and steel round grit particles," *Wear*, vol. 301, no. 1-2, pp. 383-389, 2013. Doi:10.1016/j.wear.2013.01.071.
- [5] Y. P. Wang, D. Y. Li, L. Parent, dan H.

- Tian, "Performances of hybrid high-entropy high-Cr cast irons during sliding wear and air-jet solid-particle erosion," *Wear*, vol. 301, no. 1-2, pp. 390–397, 2013. Doi :10.1016/j.wear.2012.12.045.
- [6] Y. I. Oka, K. Okamura, dan T. Yoshida, "Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation," *Wear*, vol. 259, no. 1-6, pp. 95-101, 2005. Doi : 10.1016/j.wear.2005.01.039.
- [7] M. Liebhard dan A. Levy, "The effect of erodent particle characteristics on the erosion of metals," *Wear*, vol. 151, no. 2, pp. 381-390, 1991. Doi : 10.1016/0043-1648(91)90263-T.
- [8] A. A. Torrance, "An explanation of the hardness differential needed for abrasion," *Wear*, vol. 68, no. 2, pp. 263-266, 1981. Doi : 10.1016/0043-1648(81)90096-X.
- [9] D. Idamayanti, D. Ginanjar, B. Bandanadjaja, W. Purwadi, dan N. Lilansa, "Erosion behaviour of alumina ceramic coating on mild steel by the modified composition of phosphate binder," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 541, no. 1, 2019. Doi : 10.1088/1757-899X/541/1/012026.
- [10] D. Idamayanti, I. L. Nurhakim, B. Bandanadjaja, W. Purwadi, dan N. Lilansa, "Improvement of erosion resistance of alumina-phosphate ceramic coating on mild steel by SiC addition," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 541, no. 1, 2019. Doi : 10.1088/1757-899X/541/1/012027.
- [11] M. Bartsch, B. Saruhan, M. Schmücker, dan H. Schneider, "Novel low-temperature processing route of dense mullite ceramics by reaction sintering of amorphous SiO₂-coated γ -Al₂O₃ particle nano-composites," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 82, no. 6, pp. 1388-1392, 2004. Doi : 10.1111/j.1151-2916.1999.tb01928.x.
- [12] J. R. Davis, K. M. Mills, dan S. R. Lampman, "Metals handbook. Vol. 1. Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys," ASM Int. Mater. Park. Ohio 44073, USA, pp. 1063, 1990.
- [13] ASM International Handbook Committee, ASM Handbook Vol 1 - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, 2001.
- [14] S. M. Copley dan E. L. Langer, ASM Handbook, vol. 4, heat treating, 2002.
- [15] H. Chandler, "*Heat treating guides*," Met. Park. Ohio Am. Soc. Met., 1996.
- [16] L. Ambrosini dan S. Bahadur, "Erosion of AISI 4140 steel," *Wear*, vol. 117, no. 1, pp. 37-48, 1987. Doi : 10.1016/0043-1648(87)90243-2.
- [17] Dieter and D. Bacon, "Mechanical Metallurgy." McGraw-Hill book company, The United States of America, 1986.
- [18] O. Haiko *et al.*, "Comparison of impact-abrasive wear characteristics and performance of direct quenched (DQ) and direct quenched and partitioned (DQ&P) steels," *Wear*, vol. 400–401, pp. 21–30, Apr. 2018, DOI:10.1016/j.wear.2017.12.016.
- [19] B. Bandanadjaja dan D. Idamayanti, "Pengaruh proses tempering ganda terhadap sifat mekanik material baja cor paduan Ni-Cr-Mo," *Metalurgi*, vol. 32, no. 1, pp. 29-36, 2017. Doi : 10.14203/metalurgi.v32i1.219.
- [20] D. C. Saha, E. Biro, A. P. Gerlich, dan Y. Zhou, "Effects of tempering mode on the structural changes of martensite," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 673, pp. 467-475, 2016. Doi : 10.1016/j.msea.2016.07.092.
- [21] E. Rodríguez, M. Flores, A. Perez, R.D. M. Solis, R. Gonzales, J. Rodriguez, dan S. Valtierra, "Erosive wear by silica sand on AISI H13 and 4140 steels," *Wear*, vol. 267, no. 11, pp. 2109-2115, 2009. Doi :10.1016/j.wear.2009.08.009.
- [22] N. Ojala, K. Valtonen, V. Heino, M. Kallio, J. Aaltonen, P. Siitonen, dan V. T. Kuokkala, "Effects of composition and microstructure on the abrasive wear performance of quenched wear resistant steels," *Wear*, vol. 317, no. 1-2, pp. 225-232, 2014. Doi : 10.1016/j.wear.2014.06.003.
- [23] O. Haiko, M. Somani, D. Porter, P. Kantanen, J. Komi, N. Ojala, dan V. Heino, "Comparison of impact-abrasive wear characteristics and performance of direct quenched (DQ) and direct quenched and partitioned (DQ&P) steels," *Wear*, vol. 400-401, pp. 21-30, 2018. Doi :10.1016/j.wear.2017.12.016.
- [24] F. A. Darwish, L. C. Pereira, C. Gatts, dan M. L. Graça, "On the tempered martensite embrittlement in AISI 4140 low alloy steel," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 132, no. C, pp. L5-L9, 1991. Doi : 10.1016/0921-5093(91)90388-4.

