

Analisis Pengaruh Variasi Temperatur Dan Waktu Tahan *Tempering* Pada Proses *Hardening* Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Material *Hammer Crusher*

Argyabrata, Rochman Rochiem, dan Dian Mughni Felicia

Departemen Teknik Material, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: rrohiem@gmail.com

Abstrak—*Clinker Cooler* adalah salah satu peralatan yang memiliki fungsi sangat penting dalam industri semen. *Clinker cooler* berfungsi untuk mendinginkan terak (*clinker*) yang diproduksi oleh *kiln* sebelum terak diproses lagi sebagai bahan baku pembuat semen. Terak yang dihasilkan oleh *kiln* didinginkan di dalam *clinker cooler*, kemudian ukuran terak tersebut diperkecil dengan *hammer crusher* yang ada di dalam *clinker cooler*. *Hammer crusher* merupakan alat penghancur *clinker* di PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk. *Hammer crusher* mengalami keausan yang cepat dan tidak sesuai dengan umur pakainya. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mencari solusi dengan menganalisis pengaruh variasi temperatur dan waktu tahan *tempering* pada proses *hardening* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro material *hammer crusher*. Spesimen uji dipanaskan pada temperatur 1000°C dengan waktu tahan 60 menit dan di-*quench* menggunakan oli, dilanjutkan *tempering* pada temperatur 200°C, 250°C, dan 300°C dengan variasi waktu tahan 2 jam dan 3 jam pada masing-masing variasi temperatur. Hasil proses perlakuan panas kemudian diuji kekerasan, metalografi, keausan, dan XRD (*X-ray diffraction*). Nilai kekerasan optimum dari material *hammer crusher* paduan krom tinggi adalah sebesar 699,60 HVN, yang dihasilkan dari proses *hardening* pada temperatur *tempering* 200 °C dan waktu tahan 2 jam. Tingginya harga kekerasan yang dihasilkan dari proses tersebut adalah akibat terbentuknya fasa martensit dan karbida Cr₇C₃.

Kata Kunci—*Hammer Crusher, High Chromium White Cast Iron, Hardening, Tempering.*

I. PENDAHULUAN

SECARA umum, proses pembuatan semen di PT. Semen Indonesia dimulai dari pengambilan bahan baku, proses pembuatan terak (*clinker*), proses penggilingan semen (*milling*), penyimpanan dalam *silo*, dan pengemasan semen (*packing*). Proses pembuatan terak (*clinker*) terdiri dari pemanasan awal, pengeringan dalam *rotary kiln*, dan pendinginan (*Cooling*). Pada unit Tuban I dan II, terdapat proses pembuatan terak/*clinker*. Pada proses pembuatan terak (*clinker*) terdapat suatu proses pendinginan *clinker* oleh *Clinker Cooler*. *Clinker Cooler* merupakan salah satu komponen yang vital dalam industri semen. *Clinker cooler* berfungsi sebagai pendingin material yang keluar dari *kiln* (*clinker*) sehingga fungsinya sangat penting untuk kelangsungan produksi terak (*clinker*) di Pabrik Tuban Semen Indonesia. *Clinker* hasil dari *rotary kiln* didinginkan di dalam *clinker cooler*, kemudian *clinker* tersebut diproses dengan *hammer crusher* yang ada di dalam

clinker cooler untuk mengubah ukuran menjadi ukuran yang lebih kecil. Kemudian, *clinker* yang masih bertemperatur kurang lebih 100-250°C dibawa menggunakan *pan conveyor* menuju *silo* [1]. *Clinker cooler* harus bekerja dengan optimal karena apabila terjadi masalah pada *clinker cooler*, maka akan mengganggu operasi lainnya seperti mengganggu operasi pada *rotary kiln* dan daerah *finish mill*. *Clinker cooler* membawa *clinker* dari *kiln* menuju *silo* secara terus-menerus. Proses ini sejalan dengan produksi terak pada *kiln*. Maka dari itu, jika *clinker cooler* mati, produksi *clinker* pada *kiln* mungkin dihentikan karena temperatur *clinker* yang dihasilkan sangat tinggi. Temperatur *clinker* yang tinggi berpotensi untuk merusak peralatan yang ada pada proses selanjutnya. Pada tanggal 13 Mei 2017 *hammer crusher* pada *clinker cooler* mengalami keausan (*wear*) yang tidak wajar. Kerusakan *hammer crusher* mengakibatkan *clinker cooler* mengalami penurunan distribusi terak dan proses produksi semen mengalami penurunan hingga *hammer crusher* tersebut diganti dengan *part* yang baru. *Hammer crusher* pada PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk mengalami keausan yang seharusnya umur pakainya selama 6 bulan hanya bertahan selama 3 bulan. Dari kasus tersebut dilakukan analisis kegagalan dengan menguji komposisi dan kekerasan material *hammer crusher* yang ada di PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk. Diperoleh komposisi yang tidak sesuai dengan material *hammer crusher*, serta nilai kekerasan yang tidak sesuai dengan standar yang ada, yaitu ASTM A532 [2]. Disisi lain, *hammer crusher* yang baru harus diganti secara keseluruhan. Sehingga hal ini dapat menambah *cost production* sekaligus sangat menghambat proses produksi di PT. Semen Indonesia. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian untuk menganalisis kegagalan yang terjadi dan meminimalisir terjadinya keausan pada material *hammer crusher* yang ada di PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk dengan melakukan proses pengerasan (*hardening*) dan *tempering*. Setelah diberi perlakuan panas, diharapkan kita dapat mengetahui hasil proses *hardening* dan *tempering* dari penelitian ini, sebagai solusi kegagalan dari material *hammer crusher*.

II. METODE PENELITIAN

A. Review Dokumen Perusahaan

Review dokumen perusahaan dilakukan untuk mendapatkan data data perusahaan yang berkaitan dengan

hammer crusher sebagai pendukung hasil penelitian, berikut data yang harus diambil, yaitu:

1. Desain hammer crusher
2. Data operasional
3. Maintenance record

B. Preparasi Spesimen

Tahap persiapan ini diperlukan sebelum melakukan pengujian untuk menentukan penyebab kegagalan/keausan Hammer Crusher pada PT. Semen Indonesia. Persiapan ini berupa proses cutting material menggunakan wire cut menjadi specimen yang berukuran diameter 17 mm dan tebal 11 mm.

C. Pengamatan Makroskopik dan Mikroskopik

Pengamatan makro dilakukan untuk mengetahui bentuk, tampilan dan lokasi komponen yang mengalami kegagalan secara makro. Pengamatan makro dilakukan menggunakan kamera digital dan mikro dengan mikroskop optik.

D. Pengujian Komposisi

Pengujian komposisi kimia adalah untuk mengetahui komposisi kimia yang terdapat pada komponen yang mengalami kegagalan. Identifikasi komposisi kimia material menggunakan alat Optical Emission Spectroscopy (OES) di Laboratorium Non Destructive Test/Destructive Test, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya untuk mengetahui komposisi yang ada pada hammer crusher.

E. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan dengan melakukan indentasi di beberapa titik pada sampel material. Pengujian ini dilakukan dengan metode Vickers dimana dalam pengujiannya memakai indenter intan, pembebanan sebesar 100 kgf dan waktu indentasi selama 10 detik. Pengujian ini menggunakan Universal Hardness Tester HBRV 187.5A di Laboratorium Metalurgi, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Sebelumnya, sampel yang digunakan harus memiliki permukaan yang rata untuk menghindari cacat indentasi.

F. Pengujian Keausan

Pengujian keausan dilakukan untuk mengetahui tingkat ketahanan aus (wearability) dari spesimen uji. Pengujian ini dilakukan dengan metode pin on disc, dimana dalam pengujiannya spesimen uji yang diberi beban seberat 1 kg diletakkan pada piringan disc yang berputar. Pengujian ini mengacu pada ASTM G99 dengan metode pin on disc.

G. Pengujian XRD

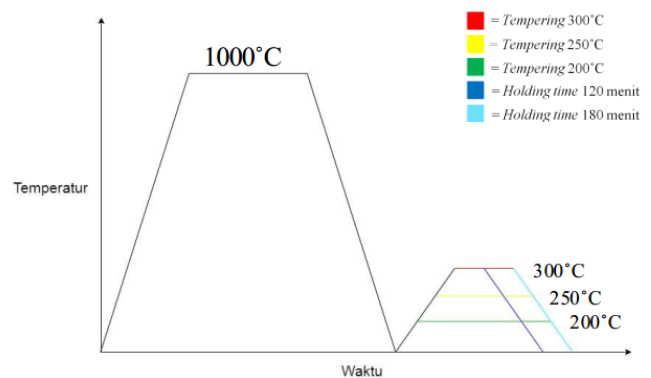
Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui fasa atau senyawa yang terbentuk setelah proses perlakuan panas. Pengujian ini dilakukan untuk mengidentifikasi fasa dalam struktur mikro setelah dilakukan proses perlakuan panas. Adapun parameter dari pengujian XRD yang digunakan adalah sebagai berikut:

- a. Sinar radiasi : Cu-K α
- b. 2 θ range : 10 – 90 derajat
- c. Scan speed : 2 derajat/menit

H. Perlakuan Panas

Perlakuan panas yang dilakukan untuk meningkatkan kekerasan pada material hammer crusher adalah dengan

proses hardening pada temperatur 1000°C dan dilanjutkan dengan quenching dengan media pendingin oli. Setelah itu, spesimen diberi perlakuan berupa tempering pada temperatur 200°C, 250°C, dan 300°C dengan waktu tahan 2 jam dan 3 jam pada masing-masing variasi temperatur dan dilanjutkan dengan pendinginan normal dengan udara. Kurva perlakuan panas ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kurva perlakuan panas

III. HASIL DAN DISKUSI

Berdasarkan hasil pengujian komposisi kimia yang telah dilakukan, didapati bahwa material hammer crusher yang mengalami kegagalan adalah material high chromium white cast iron yang komposisinya dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1.
Komposisi kimia material hammer crusher

Unsur	C	Mn	P	Si	Cr	Ni	Mo
%	1.70	0.677	0.0386	0.847	16.8	0.485	0.893

Standar material yang seharusnya digunakan pada komponen hammer crusher seharusnya adalah white cast iron sebagaimana terdapat pada ASTM A532 [2]. Ketidaksiharian komposisi material mengakibatkan terjadinya kegagalan (keausan) pada material. Hasil uji komposisi menunjukkan bahwa komposisi yang dimiliki oleh material hammer crusher tidak sesuai dengan standar ASTM A532 class IIA, IIB, II D, dan III A. Namun jika ditinjau dari kadar kromium, material hammer crusher lebih mendekati pada class IIB. Kadar kromium yang dimiliki material hammer crusher adalah 16,9%, sedangkan pada standar adalah 14-18%.

Dilihat dari kadar karbonnya, material hammer crusher memiliki kadar karbon sebanyak 1,70%, lebih rendah dibandingkan karbon standar pada ASTM 1532 senilai 2,0-3,3% max. Perbedaan komposisi inilah yang menjadi salah satu penyebab material hammer crusher memiliki nilai kekerasan dan kekuatan yang lebih rendah dibandingkan material standar. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan sebagai upaya untuk meningkatkan kekerasan material hammer crusher, agar memenuhi standar yang telah ditetapkan. Jenis perlakuan yang diterapkan pada material hammer crusher dapat dilihat pada Tabel 2.

A. Pengamatan Hasil Makro Hammer Crusher

Pengamatan secara makroskopik material hammer crusher dilakukan menggunakan kamera DSLR. Pengamatan secara makroskopik bertujuan untuk melihat kegagalan yang terjadi pada hammer crusher. Kegagalan

yang terjadi pada *hammer crusher* berupa aus yang terdapat di bagian bawah *hammer crusher*, dimana tempat terjadinya kontak langsung antara *hammer crusher* dan *clinker*. Gambar 2 menunjukkan letak dari kegagalan yang terjadi pada *hammer crusher*. Bagian yang dilingkari pada gambar (a) merupakan bagian yang mengalami keausan. Ukuran panjang material *hammer crusher* berubah dari 320 mm menjadi 242 mm setelah bekerja selama 6 bulan. Selain itu, pada gambar (b) menunjukkan permukaan material yang mengalami penipisan terdapat goresan-goresan arah vertikal yang searah dengan arah penggerusan *clinker*. Hal tersebut menunjukkan bahwa material *hammer crusher* bekerja pada kondisi dengan perilaku *abrasive wear*. Apabila partikel-partikel kecil yang keras dan tajam (seperti debu atau partikel keras dari proses permesinan tertentu) mengabrasi permukaan material yang lain, permukaan material yang terabrasi terdapat adanya goresan-goresan. [3]

Tabel 2.
Kode spesimen dan jenis perlakuan pada material *hammer crusher*

Kode Spesimen	Jenis Perlakuan Panas
AQ	<i>Hardening</i>
A1	<i>Hardening + Tempering</i> 200°C <i>holding time</i> 120 menit
A2	<i>Hardening + Tempering</i> 200°C <i>holding time</i> 180 menit
B1	<i>Hardening + Tempering</i> 250°C <i>holding time</i> 120 menit
B2	<i>Hardening + Tempering</i> 250°C <i>holding time</i> 180 menit
C1	<i>Hardening + Tempering</i> 300°C <i>holding time</i> 120 menit
C2	<i>Hardening + Tempering</i> 300°C <i>holding time</i> 180 menit

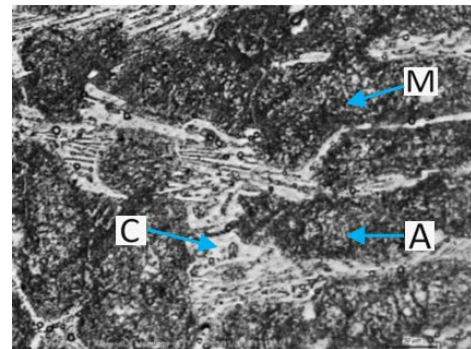


Gambar 2. Foto makroskopik material *hammer crusher* yang mengalami kegagalan (a) tampak depan; (b) tampak bawah.

B. Hasil Pengujian Struktur Mikro pada Hammer Crusher

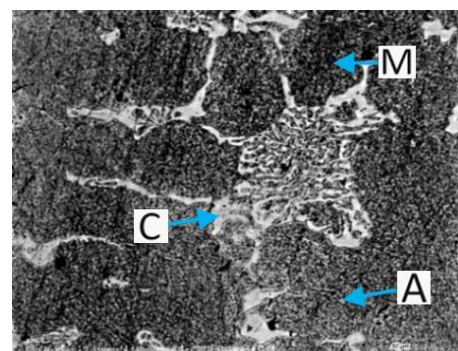
Pada pengujian metalografi dari material *hammer crusher* yang belum mendapat perlakuan panas, didapatkan struktur mikro material *as-cast* yang terdiri dari dendrite austenit, karbida krom Cr₇C₃, dan martensit yang ditunjukkan pada Gambar 3 [4]. Pada gambar, bagian yang berwarna putih terang yang saling membentuk *networking* antara satu dengan yang lainnya merupakan karbida eutektik Cr₇C₃. Sedangkan bagian gelap berbentuk menyerupai pulau

merupakan matriks austenit. Matriks austenit ini terdiri dari austenit yang berwarna lebih terang, dan juga martensit yang berwarna lebih gelap [5].



Gambar 3. Struktur mikro material *hammer crusher as-cast*. C, karbida; M, martensit; A, austenit. Etsa Nital 4%. Perbesaran 200x.

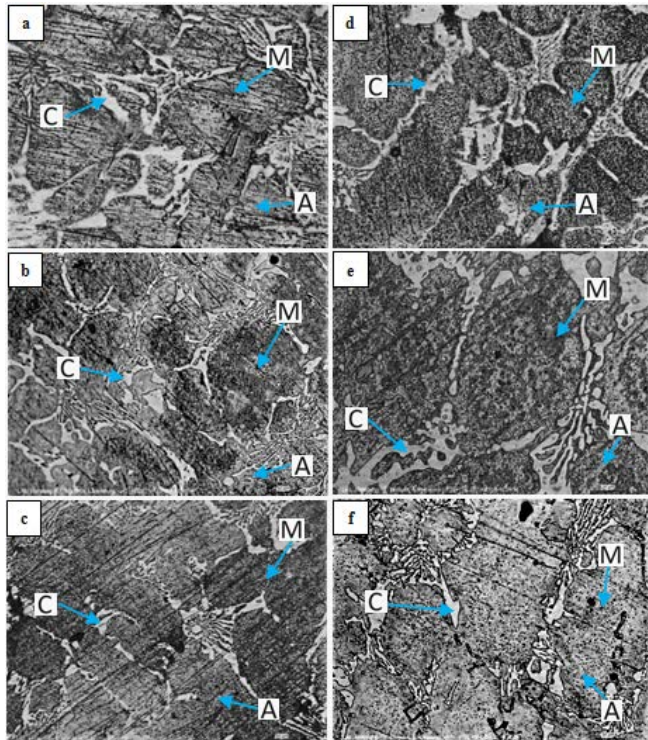
Setelah dilakukan perlakuan panas pada material *hammer crusher*, pengujian struktur mikro kembali dilakukan. Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengetahui struktur akhir yang terbentuk pada material *hammer crusher* setelah dilakukan perlakuan panas. Struktur mikro pada kondisi *as-queched* ditunjukkan pada gambar 4. Pada gambar tersebut, ditunjukkan bahwa struktur mikro yang terdapat dalam material *hammer crusher* pada kondisi *as-quenched* adalah austenit, karbida Cr₇C₃, dan martensit [6]. Martensit adalah struktur yang terbentuk karena proses pendinginan non-ekuilibrium yang cepat pada temperatur austenitisasinya. [7]. Martensit yang terdapat pada *high chromium cast iron* adalah *plate martensite*, karena mengandung wt% karbon lebih dari 1%. [8]. Pendinginan non-ekuilibrium tidak selalu menghasilkan martensit, namun bisa juga terbentuk *retained austenite*. *Retained austenite* merupakan austenit yang tidak mengalami transformasi menjadi martensit saat pendinginan cepat. Struktur mikro pada *high chromium white cast iron* hasil dari *hardening* selalu mengandung *retained austenite* sekitar 10-30% [9]. Salah satu penyebab terbentuknya *retained austenite* adalah akibat proses *quenching* yang tidak mencapai *Martensite Finish* (Mf) pada diagram CCT (*Continuous Cooling Temperature*), hal ini bisa diakibatkan oleh rendahnya temperatur Mf karena pengaruh unsur paduan.



Gambar 4. Struktur mikro material *hammer crusher as-quenched*. C, karbida; M, martensit; A, austenit. Etsa Nital 4%. Perbesaran 200x.

Struktur mikro pada berbagai kondisi *as-tempered* ditunjukkan pada Gambar 5. Gambar tersebut menunjukkan bahwa pada kondisi *as-tempered*, fasa yang dimiliki oleh material *hammer crusher* adalah austenit, karbida Cr₇C₃, dan martensit. Struktur mikro yang terdapat pada berbagai

kondisi *as-tempered* relatif sama, yang membedakan adalah jumlah volume karbida pada masing-masing spesimen. Jika dilihat secara visual, terlihat bahwa semakin tinggi temperatur tempering, maka volume karbida semakin sedikit. Selain itu, dapat dilihat pula bahwa semakin lama waktu tahan *tempering* maka volume karbida juga semakin sedikit. Untuk memperkuat hal ini, maka dilakukan penghitungan jumlah volume karbida.



Gambar 5. Struktur mikro material *hammer crusher* pada berbagai kondisi *as-tempered* dengan waktu tahan 2 jam dengan media *quench* oli: (a) *as-tempered* 200 °C, (b) *as-tempered* 250 °C, (c) *as-tempered* 300°C; dan kondisi *as-tempered* dengan waktu tahan 3 jam dengan media *quench* oli: (d) *as-tempered* 200 °C, (e) *as-tempered* 250 °C, (f) *as-tempered* 300 °C. C, karbida; M, martensit; A, austenit. Etsa Nital 4%. Perbesaran 200x.

Untuk menghitung jumlah volume karbida yang terkandung pada material, digunakan aplikasi Imagej pada perbesaran 200x. Hasil perhitungan jumlah volume karbida ditunjukkan pada tabel 3. Dari data tersebut, didapatkan bahwa volume karbida terbanyak dimiliki oleh spesimen A1 dengan perlakuan panas *tempering* pada 200°C dan waktu tahan 2 jam. Semakin tinggi temperatur tempering, maka semakin sedikit volume karbida yang dimiliki oleh material tersebut. [10]. Rendahnya volume karbida krom pada temperatur 250°C dan 350°C ini disebabkan oleh terdegradasinya karbida tersebut menjadi struktur austenit akibat temperatur *tempering* yang terlalu tinggi. [11]

Tabel 3. Hasil penghitungan volume karbida spesimen uji

Kode Spesimen	Volume Karbida (%)
A1	20,74
A2	20,35
B1	14,43
B2	13,63
C1	13,06
C2	12,06

C. Hasil Pengujian Kekerasan pada Hammer Crusher

Pengujian kekerasan dilakukan pada masing-masing permukaan spesimen *as-quenched* dan *as-tempered*. Sebagai perbandingan, ditampilkan pula hasil uji kekerasan pada material *as-cast*. Titik indentasi dilakukan pada material *hammer crusher* berukuran diameter 17 mm dan tebal 11 mm di 5 titik indentasi. Hasil dari pengujian kekerasan masing-masing spesimen dapat dilihat pada Tabel 4

Tabel 4. Hasil pengujian kekerasan spesimen uji

Material	Nilai Kekerasan (HVN)
AC	620.8 ± 5,72
AQ	678.4 ± 6,73
A1	699.6 ± 9,61
A2	692.4 ± 8,56
B1	666.8 ± 10,13
B2	657.2 ± 9,20
C1	654.2 ± 7,01
C2	645.6 ± 8,96

Setelah material *hammer crusher* diberi perlakuan *hardening* pada temperatur 1000°C dan dilanjutkan dengan *tempering* dengan variable temperatur dan waktu tahan yang berbeda, didapatkan perbedaan kekerasan dari kondisi *as-cast*. Pada kondisi *as-quenched*, kekerasan material *hammer crusher* naik menjadi 678,40 HV. Hal ini terjadi salah satunya dikarenakan terbentuknya struktur martensit pada saat pendinginan cepat. Struktur awal martensit mulai terbentuk saat austenit didinginkan dengan cepat dan dapat mencapai temperatur Ms. Karena pendinginan yang cepat, maka karbon bebas yang terlarut di dalam austenit tidak sempat berdifusi keluar kisi kristal sehingga tidak terjadi transformasi FCC menjadi BCC, melainkan terjadi transformasi geser pada kisi kristal menjadi bentuk struktur BCT. Struktur BCT ini menjadi sangat tegang, karena itu menjadi keras dan getas. Kekerasan martensit sendiri juga bergantung pada kadar karbon yang terkandung pada material. Semakin tinggi kadar karbonnya, maka akan semakin tinggi pula kekerasan martensitnya [12]. Penyebab kenaikan kekerasan lainnya adalah karena adanya struktur karbida krom. Karbida primer dan eutektik (*eutectic and primary carbide*) merupakan struktur karbida yang terbentuk pada saat proses solidifikasi, dimana pada material high chromium white cast iron, unsur khrom akan bereaksi dengan unsur karbon membentuk senyawa M_7C_3 , yang pada umumnya senyawa tersebut akan menempati ruang kosong (vacancy) pada daerah batas butir (grain boundary), sehingga membentuk karbida yang kontinu. [13].

Setelah diberi perlakuan *tempering* pada temperatur 200°C, kekerasan kembali naik menjadi 699,6HV dan 692,4 HV masing-masing pada variabel waktu tahan 2 jam dan 3 jam. Hal ini disebabkan karena adanya *secondary hardness* dari material *hammer crusher* saat *tempering*. *Secondary hardness* diakibatkan adanya kandungan unsur pembentuk dan penstabil karbida, yaitu kromium, yang menyebabkan kekerasan naik setelah dilakukan *tempering*. Terbentuknya karbida terjadi akibat adanya unsur – unsur pembentuk karbida dalam jumlah yang tinggi, seperti kromium,

sehingga ketika diberi perlakuan *tempering* pada temperatur tertentu terdapat energi yang cukup untuk membentuk karbida. Keberadaan karbida sekunder (*secondary carbide*) dalam matriks pada material *high chromium white cast iron* juga dapat memberikan peningkatan yang signifikan terhadap nilai kekerasan dan ketahanan aus dari material tersebut, mekanisme ini disebut *precipitation hardening*. Karbida sekunder (*secondary carbide*) terbentuk akibat proses perlakuan panas, dimana unsur krom yang terlarut dalam matriks berdifusi dengan unsur karbon membentuk senyawa karbida dalam matriks. Karbida tersebut bersifat diskontinyu dan tersebar dalam matriks austenit [13]. Proses *thermal hardening-temper* pada besi tuang putih paduan krom tinggi mampu meningkatkan nilai kekerasan [10].

Kekerasan material menurun saat diberi perlakuan berupa *tempering* 250°C dengan kekerasan sebesar 666,8 HV dan 657,2 HV masing-masing pada waktu tahan 2 jam dan 3 jam. Kemudian, kekerasan kembali turun saat diberi perlakuan berupa *tempering* 300°C dengan kekerasan sebesar 654,2HV dan 645,6 HV masing-masing pada waktu tahan 2 jam dan 3 jam. Jika dilihat dari struktur mikro dengan perbesaran 200x pada gambar 4.10, material dengan temperature *tempering* 300°C memiliki volume karbida yang lebih kecil dibandingkan dengan material dengan temperatur *tempering* 250°C dan 200°C, seperti yang telah dibuktikan dengan penghitungan volume karbida pada Tabel 4. Hal inilah yang mempengaruhi penurunan kekerasan pada temperatur *tempering* yang lebih tinggi.

Jika variabel waktu tahan 2 jam dan 3 jam dibandingkan, dapat dilihat bahwa material *hammer crusher* dengan waktu tahan 2 jam memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan spesimen dengan waktu tahan 3 jam. Hal ini membuktikan bahwa waktu tahan mempengaruhi kekerasan dari baja karena terjadi perubahan martensit menjadi temper martensit. Semakin lama waktu tahan pada proses *tempering* menyebabkan kekerasan menurun [14].

D. Hasil Pengujian Keausan

Pengujian keausan dilakukan bertujuan untuk mengetahui laju keausan pada material *hammer crusher*. Pada pengujian keausan ini, data yang diperoleh berupa selisih tebal material *hammer crusher* sebelum dan setelah pengujian. Hasil tersebut kemudian dikonversikan menjadi *thickness loss* per jam untuk luasan permukaan spesimen dengan ukuran diameter 17 mm dan tebal 10.8-11 mm. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4 sebagai berikut.

Tabel 4.
Hasil pengujian keausan sepsimen uji

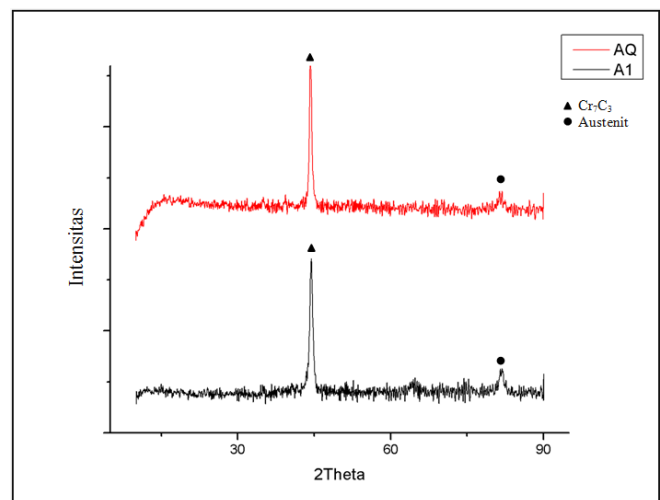
Kode Spesimen	Laju Keausan (mm/jam)
AC	3,67 ± 0.076
AQ	2,33 ± 0.029
A1	1,67 ± 0.029
A2	2,00 ± 0.050
B1	2,33 ± 0.029
B2	2,67 ± 0.058
C1	3,00 ± 0.075
C2	3,33 ± 0.058

Hasil pengujian keausan menunjukkan bahwa ketahanan aus tertinggi dimiliki oleh spesimen A1 yaitu

1,67mm/jam. Semakin tinggi temperatur *tempering*, maka semakin tinggi pula tingkat keausan material *hammer crusher*. Dapat dilihat pula pada Tabel 4 bahwa semakin lama waktu tahan *tempering*, maka semakin tinggi pula tingkat keausan material. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sifat ketahanan aus berbanding lurus dengan nilai kekerasan suatu material. Semakin tinggi nilai kekerasan suatu material, maka makin tinggi pula ketahanan aus material tersebut. Nilai kekerasan dan ketahanan aus akan semakin meningkat dengan semakin bertambahnya volume fraksi karbida [15].

E. Hasil Pengujian XRD

Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui senyawa apa saja yang terdapat dalam material *hammer crusher* setelah diberi proses perlakuan panas. Grafik hasil XRD dari material *hammer crusher* yang telah diberi perlakuan panas dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3. Grafik hasil pengujian XRD material *hammer crusher*.

Dari hasil pengujian XRD pada Gambar 4, teramati bahwa pada spesimen AQ, puncak-puncak tersebut menunjukkan adanya fasa-fasa austenit dan karbida krom Cr₇C₃. Pada material AQ muncul *peak* karbida Cr₇C₃ pada posisi 2θ=44.2448° dan *peak* austenit pada posisi 2θ=81.39°. Dari hasil analisa XRD pada Gambar juga teramati bahwa pada spesimen A1, puncak-puncak tersebut menunjukkan adanya fasa-fasa austenit dan karbida krom Cr₇C₃. Pada material AQ muncul *peak* karbida Cr₇C₃ pada posisi 2θ=44.3867° dan *peak* austenit pada posisi 2θ=81.9163°. Hal ini membuktikan bahwa karbida krom yang terdapat pada material *hammer crusher* adalah Cr₇C₃. Terbentuknya Cr₇C₃ diakibatkan oleh unsur krom yang terlarut dalam austenit bereaksi dengan karbon pada temperatur austenisasi, menyebabkan terjadinya pembentukan karbida krom baru (Cr₇C₃) atau karbida sekunder [16]. Pada material besi tuang putih paduan krom tinggi, pembentukan senyawa Cr₇C₃ lebih stabil dibandingkan dengan Cr₂₃C₆ untuk material besi tuang putih paduan krom tinggi dengan komposisi 2-2,5 %C dan 10-25%Cr [17]. Karbida Cr₇C₃ lebih stabil pada kondisi tersebut karena berada pada komposisi dan temperatur yang tepat.

IV. KESIMPULAN

1. Semakin tinggi temperatur *tempering*, maka akan mengakibatkan turunnya sifat kekerasan. Temperatur *tempering* yang paling optimal terdapat pada temperature 200°C dengan nilai kekerasan 699,6 HV dan 678,4 HV masing-masing pada waktu tahan 2 jam dan 3 jam. Struktur mikro yang dihasilkan adalah karbida krom (Cr₇C₃), austenit, dan juga martensit. Nilai kekerasan material berbanding terbalik terhadap laju keausan material, dimana semakin keras suatu material, maka laju keausan material akan semakin kecil. Temperatur *tempering* yang paling optimal menghasilkan laju keausan sebesar 1,67mm/jam.
2. Semakin lama waktu tahan pada proses *tempering*, maka akan mengakibatkan turunnya sifat kekerasan. Waktu tahan *tempering* yang paling optimal adalah selama 2 jam dengan nilai 699,6 HV; 666,8 HV; dan 654,2 HV masing-masing pada temperatur 200°C.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Anwar, "Analisis Perpindahan Panas pada Grate Cooler Industri Semen," *Majalah Ilmiah Mektek*, 2011.
- [2] A. A532, *Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons*. USA, 1999.
- [3] P. R. L. Gagg, Colin R, "Wear as a Product Failure Mechanism – Overview and Case Studies," pp. 1618–1640, 2007.
- [4] E. Karantzalis, "Microstructure And Properties Of HighChromium Cast Irons: Effect Of Heat Treatments And Alloying Additions," *Int. J. Cast Met. Res.*, 2017.
- [5] W. Riansyah, "Pengaruh Temperatur Destabilisasi dengan Perlakuan Sub Zero terhadap Kekuatan Mekanik Besi Tuang Putih untuk Aplikasi Grinding Ball," 2012.
- [6] A. K. Sinha, *Ferrous Physical Metallurgy*. London, 1989.
- [7] E. Karantzalis, *Microstructural Modifications of As-Cast High-Chromium White Iron by Heat Treatment*. 2009.
- [8] A. I. H. Committee, *ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures*. 2004.
- [9] A. I. H. Committee, *ASM Handbook Volume 4: Heat Treatment*. 1991.
- [10] A. dkk Shofi, "Karakteristik Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Besi Tuang Putih Paduan Krom Tinggi Hasil Thermal Hardening Untuk Aplikasi Grinding Ball," *UPT Balai Pengolah. Miner. Lampung*.
- [11] Z. Jiyang, "Serial Report: Colour Metallography of Cast Iron," pp. 337–349, 2011.
- [12] S. H. Avner, *Introduction To Physical Metallurgy*. Singapore: Mc Graw Hill, 1974.
- [13] F. Nurjaman, "Pembuatan Grinding Ball dari Material White Cast Iron dengan Penambahan Chromium, Molybdenum, Vanadium, dan Boron Sebagai Unsur Paduan Pembentuk Karbida," 2012.
- [14] Rinelda, "Analisa Pengaruh Lama Waktu Tahan Tempering terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Coulper Baja AAR-M201 Grade E," *J. Tek. ITS POMITS*, vol. 6, 2017.
- [15] and S. L. de M. Albertin, E., "Maximizing Wear Resistance of Balls for Grinding of Coa," pp. 43–47, 2007.
- [16] D. Bedolla-Jacuinde, A., "Kinetics of Secondary Carbides Precipitation in a High-Chromium White Irons," *J. Mater. Eng. Perform.*, 2003.
- [17] A. Wiengmoon, "Carbides in High Chromium Cast Iron," 2011.