

Analisis Pengaruh Variasi Waktu Tahan dan Temperatur *Tempering* terhadap Sifat Kekerasan Material *Crossbar* yang Di *Hardening* sebagai Solusi Kegagalan pada *Crossbar*

Dony Prasetya, Rochman Rochiem, dan Alvian Toto Wibisono

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: donyd.prasetya@gmail.com

Abstrak—*Clinker cooler* adalah alat yang berfungsi mentransportasikan *clinker* menuju *hammer crusher*. Salah satu bagian dari *clinker cooler* adalah *Crossbar*. *Crossbar* sering mengalami *crack* sehingga mengurangi umur pakai dari *clinker cooler*. Dalam penelitian ini, dilakukan analisis kegagalan dari *Crossbar* dan solusi dari kegagalan tersebut berupa *hardening* dan *tempering*. Pengujian yang dilakukan untuk menganalisis material ini adalah uji komposisi, uji stroomikroskop, uji SEM, metalografi, dan uji kekerasan Berdasarkan pengujian OES dan kekerasan, faktor yang kegagalan adalah kesalahan dalam pemilihan material yang ditinjau dari komposisi material, kekerasan material. Solusi dari kegagalan ini yaitu perlakuan panas yang dapat menghasilkan kekerasan yang sesuai dengan standar kekerasan ASTM A48 adalah *hardening* dan *tempering* 300°C dengan waktu tahan 120 menit, *hardening* dan *tempering* 350°C dengan waktu tahan 120 menit, *hardening* dan *tempering* 400°C dengan waktu tahan 120 menit, dan *hardening* dan *tempering* 300°C dengan waktu tahan 60 menit.

Kata Kunci : *Crossbar*, *Crack*, *Hardening*, *Tempering*, *ASTM A48*

kerja yang terus menerus. Material standar untuk *Crossbar* adalah baja tuang kelabu (*grey cast iron*). Akan tetapi setelah diuji komposisi, *Crossbar* yang digunakan di PT Semen Indonesia adalah baja karbon tinggi krom tinggi Berdasarkan jenis kegagalan yang terjadi, maka dibutuhkan peningkatan sifat kekerasan dan ketangguhan pada material tersebut. Untuk meningkatkan sifat- sifat tersebut maka material *Crossbar* tersebut akan diberi perlakuan *hardening*. Setelah di *hardening*, material tersebut akan di *tempering* dengan 2 variabel waktu tahan yang berbeda dan 4 variabel temperatur yang berbeda. *Tempering* bertujuan agar material yang di *hardening* tidak terlalu getas. Karena jika terlalu getas, maka akan terjadi *crack* ketika *Crossbar* tersebut beroperasi. Setelah diberi perlakuan, dilakukan uji kekerasan, uji struktur mikro menggunakan mikroskop stereo dan uji fraktografi menggunakan SEM. Dari penelitian ini diharapkan dapat mengetahui temperatur dan holding time *tempering* yang tepat untuk material *Crossbar* sebagai solusi permasalahan kegagalan komponen *Crossbar* pada *clinker cooler*.

I. PENDAHULUAN

PT. Semen Indonesia merupakan produsen semen terbesar di Indonesia. Keberhasilan pembangunan pabrik Tuban IV dan Tonasa V, serta akuisisi perusahaan semen Vietnam Thang Long Cement Company pada akhir tahun 2013, maka pada awal tahun 2013 perseroan memiliki kapasitas terpasang sebesar 30 ton/tahun dan telah menjadi perusahaan semen terbesar di Asia Tenggara berdasarkan kapasitas terpasang. Proses pembuatan semen PT. Semen Indonesia unit Tuban 3 secara garis besar melalui proses dengan dimulai dari pengambilan bahan baku, proses pembuatan klinker, proses penggilingan semen dan packing semen. Dalam proses produksi semen ini, terdapat banyak equipment yang digunakan dan salah satunya adalah *clinker cooler*.

Mesin pendingin terak (*clinker cooler*) berfungsi sebagai pendingin terak (*clinker*) yang keluar dari mesin pemanas (*kiln*). *Clinker* yang keluar dari kiln akan dihantarkan menuju mesin penggiling (*hammer crusher*) melalui papan silang (*crossbar*) yang berjajar diatas bagian cooler. Maka dari itu, dibutuhkan sifat kekerasan dan ketangguhan yang tinggi untuk komponen *crossbar*. Pada tanggal 21 Juli 2016, *crossbar* pada *clinker cooler* mengalami banyak retakan (*crack*). Komponen *Crossbar* mengalami kegagalan berupa *crack* yang diakibatkan oleh beban yang terlalu besar dan

II. METODE PENELITIAN

A. Review Dokumen Perusahaan

Review dokumen perusahaan dilakukan untuk mendapatkan data data perusahaan yang berkaitan dengan *Crossbar* sebagai pendukung hasil penelitian, berikut data yang harus diambil, yaitu:

1. Desain *Crossbar*
2. Data operasi
3. Spesifikasi material
4. *Maintenance record*

B. Preparasi Spesimen

Persiapan ini berupa proses cutting dan sectioning. Proses pemotongan dilakukan pada bagian ujung *crossbar* yang terindikasi adanya beban siklik dan bagian yang jauh dari *crack*. Spesimen yang terindikasi adanya beban siklik serta bagian yang jauh dari *crack* akan diuji sebagai perbandingan antara material yang baru dengan material yang sudah gagal. Proses pemotongan dilakukan dengan jenis pemotongan *wire cut*.

beban *clinker* pada permukaan *Crossbar* menyebabkan gaya tekan yang berlebih (*overload*). Untuk gambar 2 (b) dan (c) bagian sayap yang memiliki luas yang lebih kecil bergerak ke posisi awalnya. Bagian yang memiliki luas permukaan lebih kecil ini didesain aerodinamis agar *clinker* tidak terdorong kembali *rotary kiln*. Pada saat gerakan kembali ini, *Crossbar* juga mengalami gaya tekan yang berlebih yang diakibatkan oleh pembebanan *clinker* yang lebih besar dibandingkan dengan pembebanan *clinker* pada saat mendorong *clinker*. Akibat dari gaya – gaya yang bekerja pada *Crossbar* secara terus menerus, *Crossbar* mengalami kegagalan berupa *crack*.

B. Pengujian OES

Pengujian komposisi unsur dari spesimen *Crossbar* dilakukan dengan menggunakan OES (Optical Emission Spectroscopy). Tabel 2 menunjukkan hasil pengujian OES yang dibandingkan dengan komposisi material standar *Crossbar*.

Berdasarkan standar yang ada, komponen *Crossbar clinker cooler* biasanya menggunakan material besi tuang kelabu (*gray cast iron*) sesuai dengan standar ASTM A48.

Tabel 2 menunjukkan komposisi kimia pada sampel uji dan material standar *Crossbar*. Berdasarkan hasil pengujian komposisi diatas, komposisi material *Crossbar* tidak sesuai dengan standar material *Crossbar* yaitu besi tuang kelabu. Tidak adanya *mill certificate* yang menunjukkan kebenaran dari material yang digunakan, sehingga sulit untuk menentukan perbandingan standar komposisi materialnya.

Tabel 2 Perbandingan hasil uji komposisi unsur dari spesimen *Crossbar* dengan komposisi unsur ASTM A48

| Unsur | C | Si | Mn | Ni | S | P | Mo | Cr | Fe |
|------------------|---------|---------|-----|-----|------|------|------|----|---------|
| Material Uji | 1.2 | 2.5 | 0.9 | 3.6 | 0.02 | 0.06 | 0.33 | 16 | Balance |
| Material Standar | 2.7 - 4 | 1.8 - 3 | 0.8 | - | 0.07 | 0.2 | - | - | Balance |

Material standar yang digunakan untuk *Crossbar clinker cooler* ini adalah besi tuang kelabu (*gray cast iron*) dengan standar ASTM A48. Sedangkan berdasarkan hasil uji komposisi (OES), material yang didapatkan tidak sesuai dengan standar. Kandungan unsur karbon (C) pada material uji lebih tinggi daripada material standar. Hal ini menunjukkan bahwa material uji memiliki sifat kekerasan yang lebih rendah dibandingkan material standar. Selain itu, material *Crossbar* PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk juga memiliki kelebihan dengan adanya unsur kromium dengan komposisi tinggi sebesar 16,34%. Kromium merupakan unsur pembentuk karbida dan penstabil ferrit yang baik, dengan adanya kromium dapat menaikkan temperatur austenisasi karena kromium adalah unsur pembentuk karbida dan penstabil ferrit. Kromium juga dapat meningkatkan *hardenability* pada material *Crossbar* PT. Semen Indonesia Tbk. Ditinjau dari komposisi kromium tersebut untuk perlakuan panas dibutuhkan temperatur austenisasi lebih tinggi dari temperatur A1. Kandungan unsur Ni, Mn dan Mo lebih tinggi daripada material standar. Kandungan unsur – unsur Ni, Mn, Mo dan Cr dapat meningkatkan *hardenability* dari material *Crossbar*. Perbedaan komposisi ini mengakibatkan material *Crossbar* memiliki kekerasan yang lebih rendah sehingga lebih mudah mengalami *crack*. Hal

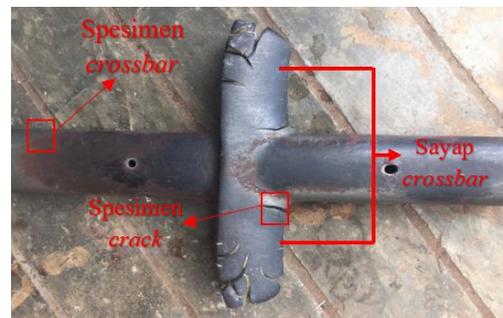
tersebut menjadi salah satu kegagalan yang terjadi pada *Crossbar* dan memperpendek umur *Crossbar* yang semestinya 2 tahun. [4]

C. Pengamatan Makroskopik

Pengamatan secara makroskopik bertujuan untuk melihat kegagalan yang terjadi pada *Crossbar*. Kegagalan yang terjadi pada *Crossbar* berupa *crack* yang terdapat di beberapa tempat. Gambar 3 menunjukkan letak dari kegagalan yang terjadi pada *Crossbar*.

Pada gambar 3, Bagian yang dilingkari merupakan bagian yang mengalami *crack*. *Crack* pada daerah ini cukup berbahaya dikarenakan letak *crack* pada bagian yang memiliki tegangan paling besar.

Bagian yang mengalami retak dipotong dan dianalisis permukaannya. Setelah diamati dengan menggunakan kamera DSLR, didapatkan bahwa mekanisme retak tersebut dapat dibagi menjadi 2 bagian. Dapat dilihat pada gambar 4 mekanisme retakan diawali pada daerah X atau dapat disebut retak awal (*initial crack*), lalu merambat ke daerah Y atau dapat disebut daerah penjalaran retak.

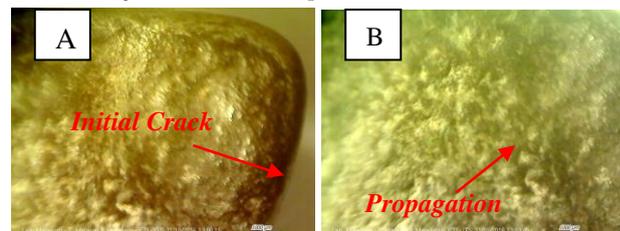


Gambar 3 *Crossbar* yang mengalami kegagalan (a) Tampak atas (b) Tampak samping



Gambar 4 Pengamatan makro komponen *Crossbar* gagal (*crack*)

D. Hasil Uji Stereomicroscope



Gambar 5 Observasi stereomikroskop bagian penampang retakan (*crack*)

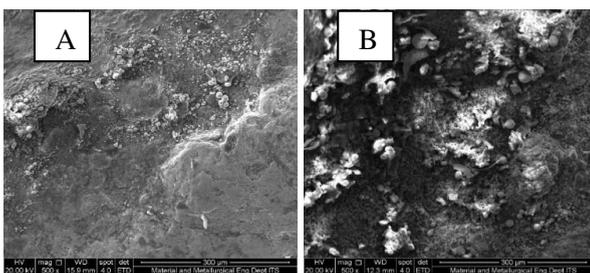
Gambar 5 (a) merupakan hasil gambar menggunakan *stereomicroscope* dengan perbesaran 10 kali, dari gambar 5 (b) menunjukkan adanya awal retak (*crack initiation*) ditunjukkan tanda panah yang kemudian arah retakannya menjalar ke samping kanan atas kemudian menjalar ke kiri.

Terlihat pada gambar 5 (a) *crack initiation* memiliki butiran lebih halus dibandingkan dengan *crack propagation*. Gambar 5 (b) merupakan hasil gambar menggunakan *stereomicroscope* dengan perbesaran 10 kali, dari gambar tersebut menunjukkan awal penjarangan patah (*crack propagation*) ditunjukkan tanda panah yang kemudian arah retakannya menjalar ke samping kiri. Hal ini terlihat pada *crack propagation* memiliki butir yang lebih kasar jika dibandingkan dengan *initial crack*. Pada skala makro juga di tunjukan adanya perubahan tinggi pada penampang komponen. Meninjau hasil pengamatan makro dengan menggunakan *stereomicroscope* tampak patahan yang terjadi pada permukaan *Crossbar* dapat di kategorikan patah getas. [3,9]

E. Hasil Uji Scanning Electron Microscope

Berdasarkan pengamatan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan perbesaran yang lebih besar dari kamera DSLR dan *stereomicroscope* sehingga retakan tampak jelas. Gambar 6 (a) merupakan hasil foto permukaan dari *Crossbar* yang mengalami *crack* difoto menggunakan bantuan Kamera DSLR dan gambar 6 (a), (b), dan (c) menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan perbesaran 500 kali.

Gambar 6 (a) memperlihatkan daerah *initial crack* pada *Crossbar* dengan menggunakan SEM perbesaran 500x. Di tandai dengan adanya permukaan yang lebih rendah dibandingkan permukaan yang lain. Daerah ini diambil tepat pada daerah sayap *Crossbar*, yang mendapatkan pembebanan paling besar pada saat *Crossbar* bekerja. Dari sini terlihat bahwa *Crossbar* telah mengalami *fatigue crack brittle* dengan arah retakan yang tegak lurus dengan pembebanan. Pada daerah awal retak ini tidak terdapat *beachmark* dan striasi yang berarti komponen ini menerima beban dinamis lebih sedikit dibandingkan beban statisnya. Hal ini sesuai dengan sifat material yang memiliki kekuatan dan kekerasan yang tinggi.



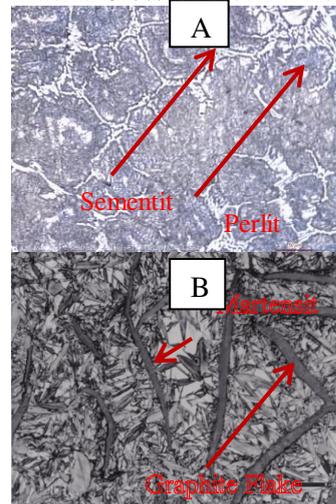
Gambar 6 Observasi SEM bagian yang mengalami *crack* (a) *initial crack* (b) *propagation*

Gambar 6 (b) memperlihatkan daerah perambatan retak (*propagation*) pada *Crossbar* yang mengalami kegagalan dimana terlihat adanya perbedaan ketinggian secara nyata dan juga warna yang lebih gelap dibandingkan daerah awal retak. dan dengan SEM pada perbesaran 500x daerah ini terlihat adanya sisa butiran butiran kasar yang merupakan ciri dari patah getas. Disini terlihat dengan jelas patahan yang melintasi butiran atau patah transgranular. Patah Transgranular Ini ditandai dengan adanya pola patahan dipermukaan yang memiliki bentuk butir butir yang kasar dan tersebar acak di permukaan patahan. Namun pada gambar 6.

(a) permukaan terlihat halus hal ini dikarenakan pada daerah ini *clinker* masuk dan menggerus permukaan *Crossbar* yang patah sehingga menyebabkan permukaan pada daerah *initial crack* menjadi halus.

F. Hasil Pengamatan Struktur Mikro (Metalografi)

Pengamatan struktur mikro dilakukan untuk melihat perubahan yang terjadi pada spesimen yang telah diberikan perlakuan panas berupa *hardening* dan *tempering* dengan beberapa variabel berbeda. Berikut adalah struktur mikro material *Crossbar* sebelum diberi perlakuan panas.



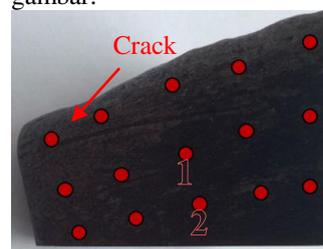
Gambar 7 Struktur mikro (a) Material *Crossbar* dan (b) *Martensitic Gray Cast Iron*

Pada gambar 7 dapat dilihat bahwa struktur mikro dari material ini terdiri dari perlit dan sementit. Bagian yang ditunjukkan berwarna lebih terang adalah sementit dan bagian yang berwarna lebih gelap adalah perlit. Hal ini membuktikan bahwa material ini termasuk kedalam baja hypereutektoid. [8]

Jika dibandingkan dengan material standar dari *Crossbar*, besi tuang kelabu, maka struktur mikronya berbeda. Struktur mikro besi tuang kelabu terdiri dari perlit, martensit dan serpihan grafit (*graphite flake*). Dapat disimpulkan bahwa material standar dari *Crossbar* ini lebih keras karena memiliki martensit. Martensit merupakan struktur mikro yang sangat keras. [7]

G. Hasil Pengujian Kekerasan Brinnel Material yang Gagal

Pengujian *hardness* ini dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan pada *Crossbar* yang mengalami kegagalan. Gambar 8 merupakan daerah yang dekat dengan *crack* Pengujian ini menggunakan indentasi sebanyak 10-15 titik secara merata, indentasi dilakukan pada daerah yang dekat dan jauh dari patahan dengan beban sebesar 187.5 kgf. Pembagian daerah indentasi dapat dilihat pada gambar 8 dan gambar.



Gambar 8 Daerah indentasi sejajar dekat dengan *crack*

Dari tabel 3 dapat dilihat bahwa nilai kekerasan di daerah sejajar dengan crack memiliki rata-rata sebesar 405 BHN. Dari sini bisa dilihat bahwa komponen ini mengalami kenaikan kekerasan pada daerah yang mengalami patahan bila dibandingkan dengan daerah yang berada jauh dari patahan. Selain itu adanya perbedaan temperatur pada saat bekerja juga mempengaruhi kekerasan pada *Crossbar*.

Pada tabel 4 menunjukkan bahwa kekerasan yang sesuai dengan material *Crossbar* adalah *grey cast iron* dengan type *heat treat hardened* yang memiliki nilai kekerasan sebesar 480-550 BHN dimana nilai kekerasannya jauh berbeda dari *Crossbar* yang ada di PT. Semen Indonesia yang memiliki nilai kekerasan rata-rata tertinggi sebesar 405 BHN.

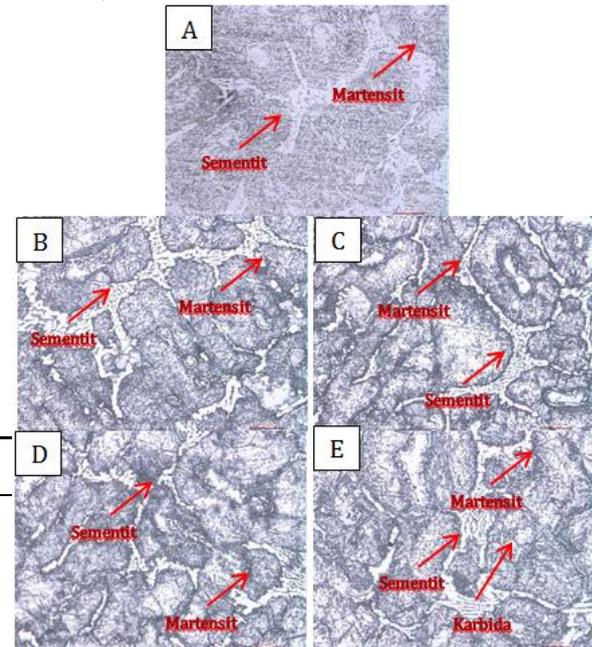
Tabel 3
Data Hasil Pengujian Kekerasan Dekat dari crack

| Daerah Indentasi | Sejajar dengan crack | | |
|------------------|----------------------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 |
| 1 | 408 | 390 | 370 |
| 2 | 416 | 398 | 379 |
| 3 | 400 | 384 | 366 |
| 4 | 402 | 386 | 368 |
| 5 | 399 | 380 | 360 |
| Average | 405 | 387,6 | 368,6 |

Tabel 4
Kekerasan besi tuang kelabu menurut ASTM A48

| Type of Gray Cast Iron | Matrix Microstructure Around Flake Graphite | Brinell Hardness (BHN) |
|----------------------------|---|------------------------|
| Soft-Annealed | All Ferrite | 110-140 |
| Ordinary | Pearlite and Ferrite | 140-200 |
| Higher Strength | Fine Pearlite | 200-270 |
| Alloyed-Arcicular | Bainite | 260-350 |
| Austenitic (Ni-Resist) | Austenite | 140-160 |
| Heat Treat Hardened | Martensite | 480-550 |
| Hardened and Tempered | Tempered Martensite | 250-450 |
| Chilled (White Iron) | Pearlite and Carbides | 400-500 |

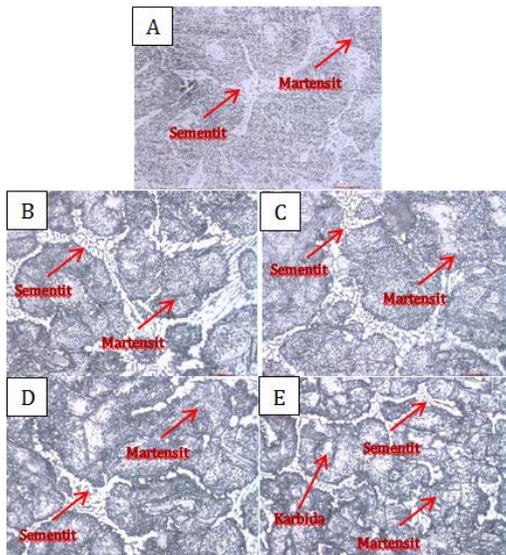
Gambar 9 (a) menunjukkan struktur mikro baja material *Crossbar* yang diberi perlakuan *hardening* pada temperatur 950°C tanpa *tempering*. Gambar 9 menunjukkan struktur mikro material *Crossbar* yang di *hardening* dan di *tempering* pada temperatur (b) 250°C, (c) 300°C, (d) 350°C dan (e) 400°C dengan waktu tahan sama yaitu selama 60 menit. Dari keempat spesimen yang diberikan perlakuan setelah tempering, hasil struktur mikronya sama seperti spesimen yang hanya diberi perlakuan *hardening*. Dari uji struktur mikro didapatkan hasil martensit dan sementit untuk spesimen yang ditempering pada temperatur HT250t60, HT300t60 dan HT350t60. Pada hasil uji struktur mikro spesimen HT400t60, didapatkan struktur mikro berupa sementit, martensit dan karbida.



Gambar 10 Struktur mikro spesimen (a) H (b) HT250t120 (c) HT300t120 (d) HT350t120 (e) HT400t120

H. Hasil Uji Metalografi Setelah Perlakuan Panas

Setelah diberi perlakuan panas berupa *hardening* pada temperatur 950°C dan *tempering* dengan variasi pada temperatur dan waktu tahan, spesimen diuji metalografi dengan perbesaran 500x untuk melihat perubahan pada struktur mikro.



Gambar 9 Struktur mikro spesimen (a) H (b) HT250t60 (c) HT300t60 (d) HT350t60 (e) HT400t60

Gambar 10 (a) menunjukkan struktur mikro baja material *Crossbar* yang diberi perlakuan *hardening* pada temperatur 950°C tanpa *tempering*. Gambar 10 menunjukkan struktur mikro material *Crossbar* yang di *hardening* dan di *tempering* pada temperatur (b) 250°C, (c) 300°C, (d) 350°C dan (e) 400°C dengan waktu tahan sama yaitu selama 120 menit. Dari keempat spesimen yang diberikan perlakuan setelah tempering, hasil struktur mikronya sama seperti spesimen yang hanya diberi perlakuan *hardening*. Dari uji struktur mikro didapatkan hasil martensit dan sementit untuk spesimen yang ditempering pada temperatur HT250t120, HT300t120 dan HT350t120. Pada hasil uji struktur mikro spesimen HT400t120, didapatkan struktur mikro berupa sementit, martensit dan karbida.

I. Hasil Uji Kekerasan Material Crossbar Setelah Diberi Perlakuan Panas

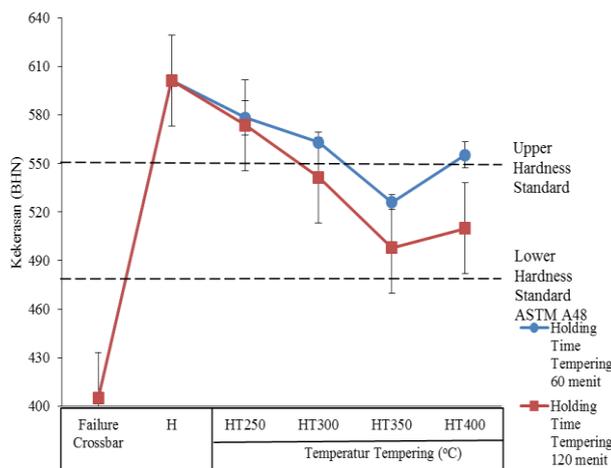
Uji kekerasan dilakukan pada tiap spesimen yang telah diberi perlakuan panas berupa *hardening* dan *tempering*. Uji kekerasan dilakukan pada tiga titik pada setiap spesimen. Hasil uji kekerasan ditampilkan pada Tabel 6. Dapat dilihat pada tabel 6, kekerasan awal dari material *Crossbar* tanpa perlakuan adalah 405 BHN. Setelah di *hardening* pada temperatur 950°C dan waktu tahan 30 menit, kekerasan yang didapatkan adalah sebesar 601,34 BHN. Setelah ditempering

didapatkan nilai kekerasan terbesar adalah pada tempering dengan temperatur 250°C dan waktu tahan 60 menit ataupun 120 menit. Setelah mengalami proses tempering nilai kekerasan dari kedelapan spesimen menurun hal ini dikarenakan *tempering* bertujuan untuk mengembalikan sebagian keuletan/ketangguhan, berakibat turunnya kekerasan, dan melepas tegangan dalam untuk memperoleh keuletan yang lebih baik. [5]

Tabel 5 Hasil uji kekerasan material *Crossbar* setelah diberi perlakuan panas

| Spesimen | Rata – rata Kekerasan (BHN) |
|-------------------------|-----------------------------|
| <i>Failure Crossbar</i> | 405 |
| H | 601,34 |
| HT250t60 | 578,34 |
| HT300t60 | 563 |
| HT350t60 | 526 |
| HT400t60 | 555,34 |
| HT250t120 | 573,67 |
| HT300t120 | 541,34 |
| HT350t120 | 498 |
| HT400t120 | 510 |

Untuk spesimen HT250t60 dan HT250t120 didapatkan kekerasan senilai 578,34 BHN dan 573,67 BHN. Untuk spesimen HT300t60 dan T300t120 didapatkan kekerasan senilai 563 BHN dan 541,33 BHN. Untuk spesimen HT350t60 dan HT350t120 didapatkan kekerasan senilai 526 BHN dan 498 BHN. Untuk spesimen HT400t60 dan HT400t120 didapatkan kekerasan senilai 555,34 BHN dan 510 BHN. Dari delapan spesimen yang diamati, dapat dilihat bahwa kekerasan spesimen dengan waktu tahan 60 menit akan lebih besar daripada spesimen dengan waktu tahan 120 menit dengan temperatur yang sama. Hal ini membuktikan bahwa waktu tahan mempengaruhi kekerasan dari baja karena terjadi perubahan martensit menjadi fase temper martensit. [9]



Gambar 11 Grafik hasil uji kekerasan material *Crossbar* setelah diberi perlakuan panas

Pada Gambar 12 grafik hasil uji kekerasan, dapat dilihat bahwa terjadi kenaikan kekerasan pada temperatur 400°C. Hal ini disebabkan karena adanya *secondary hardening* dari material *Crossbar* saat *tempering*. *Secondary hardening* diakibatkan adanya kandungan unsur pembentuk dan penstabil karbida. [6]

Pada saat proses *tempering* terjadi akibat terbentuknya karbida yang mengakibatkan kekerasan justru naik setelah dilakukan *tempering*. Terbentuknya karbida terjadi akibat adanya unsur – unsur pembentuk karbida dalam jumlah yang tinggi, seperti krom, sehingga ketika diberi perlakuan *tempering* pada temperatur tertentu terdapat energi yang cukup untuk membentuk karbida. [1]

IV. KESIMPULAN

Faktor yang menyebabkan terjadinya kegagalan pada *crossbar* adalah kombinasi beban dan gaya gesek pada *crossbar*. Mekanisme kegagalan dikarenakan adanya beban tekan dari bawah oleh *clinker* yang menyisip pada rongga antara sayap dan *air distribution plate*, dan beban tekan dari *clinker* yang terpusat hanya pada *Crossbar* di bagian tengah *cooling chamber*. Solusi dari kegagalan ini yaitu dengan memberikan perlakuan panas berupa *hardening dan tempering* pada komponen *Crossbar* agar dapat meningkatkan kekerasan dan juga kekuatannya. Jenis perlakuan panas yang dapat menghasilkan kekerasan yang sesuai dengan standar kekerasan ASTM A48 adalah *hardening dan tempering 300°C dengan waktu tahan 120 menit, hardening dan tempering 350°C dengan waktu tahan 120 menit, hardening dan tempering 400°C dengan waktu tahan 120 menit, dan hardening dan tempering 350°C dengan waktu tahan 60 menit.*

DAFTAR PUSTAKA

- [1] _____. 2002. *ASM Handbook Vol.9 Metallographic and Microstructure*. Material Park. Ohio. USA. ASM International.
- [2] _____. 2002. *ASM Handbook Vol.12 Fractography*. Material Park. Ohio. USA. ASM International.
- [3] _____. 2002. *ASM Handbook Vol.19 Fatigue and Fracture*. Material Park. Ohio. USA. ASM International.
- [4] _____. 2002. *ASTM A48 Standard Specification for Gray Iron*. Material Park. Ohio. USA. ASTM International.
- [5] Donald S Clark, Varney R Wilbur. 1962. *Physical Metallurgy for Engineers*. California: Litton Educational Publishing Inc.
- [6] Mazurkiewicz, J. 2007. *Comparison Of The Secondary Hardness Effect After Tempering Of The Hot-Work Tool Steels*. Polandia: Silesian University of Technology.
- [7] Subardi, Ratna Kartikasari, Achmad Supiani. 2011. *Pengaruh Viskositas Media Celup Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Martensitic White Cast Iron ASTM A532*. Yogyakarta: Jurusan Teknik Mesin STTNAS Yogyakarta.
- [8] Aisyah. 2011. *Perubahan Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Pada Pengelasan Drum Baja Karbon Wadah Limbah Radioaktif*. Yogyakarta: Pusat Penelitian Limbah Radioaktif BATAN.
- [9] Suherman, Wahid. 1999. *Ilmu Logam 2*. Surabaya : ITS Press.