

Analisis Kegagalan pada Komponen *Work Roll* Setelah Perlakuan Panas

Rifqi Al Hakim¹, dan Herry Oktadinata¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Manufaktur, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia

rifqialhakim84@gmail.com, herry.oktadinata@yahoo.com

Abstrak

Telah terjadi kegagalan pada komponen *work roll* berjenis besi tuang nodular setelah dilakukan proses perlakuan panas, kegagalannya yaitu berupa retakan pada permukaan. Dalam proses perlakuan panas dapat mencakup keseluruhan bagian atau sebagian dari komponen, konsekuensinya sebagian komponen akan mengalami retak dikarenakan *internal stress*. Tujuan dilakukannya penelitian analisis kegagalan ini yaitu untuk mengetahui penyebab kegagalan pada komponen *work roll*. Pada penelitian ini dilakukan pengamatan visual, pengujian tidak merusak *dye penetrant* dan *ultrasonic test*, pengujian komposisi kimia, pengujian fraktografi, pengujian struktur mikro, dan pengujian kekerasan Rockwell C terhadap komponen *work roll* yang mengalami kegagalan. Hasil penelitian menunjukkan komponen mempunyai kekerasan tinggi dan mengalami patah getas. Kekerasan yang tinggi tersebut dapat dipengaruhi oleh kandungan 0,275% chromium sebagai pembentuk karbida. Jumlah ini melebihi 0,10% dari komposisi chromium besi tuang nodular yang berakibat karbida akan sulit dihilangkan melalui perlakuan panas. Retak pada komponen *work roll* juga dapat dipengaruhi oleh konsentrasi tegangan akibat perubahan luas penampang secara tiba-tiba saat dilakukan perlakuan panas yang dipicu oleh porositas, inklusi, dan sudut yang lancip.

Kata kunci: kegagalan, *work roll*, besi tuang nodular, perlakuan panas, struktur mikro

Abstract

There has been a failure on the work roll components of the nodular cast iron type after the heat treatment, and the failure is in the form of cracks on the surface. In the heat treatment process, it can cover the whole or part of the component, and the consequence is that some elements will crack due to internal stress. This failure analysis research aims to find out the causes failure of work roll component. In this study, were carried out a visual inspection, non-destructive testing of dye penetrant and ultrasonic test, chemical composition test, fractography test microstructure test, and Rockwell C hardness test for the failed work roll components. The results showed that the component had high hardness and become brittle fracture. The content of 0,275% chromium can influence the high hardness of a carbide former. This amount exceeds 0,10% of the chromium composition of nodular cast iron, which makes carbides difficult to remove through heat treatment. Cracks in work roll components can also be affected by stress concentrations due to sudden changes in cross-sectional area during heat treatment triggered by porosity, inclusions, and acute angles.

Keywords: failure, work roll, nodular cast iron, heat treatment, microstructure

1. Pendahuluan

Kegagalan sebuah komponen dalam suatu pengoperasian dapat disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya pembebanan berlebih, pembebanan siklus, kesalahan desain, kesalahan pemilihan material, kesalahan operator, dan berbagai faktor lainnya (Suripto, 2014). Hal tersebut tentunya akan menimbulkan kerugian sehingga diperlukanantisipasi kemungkinan kegagalan dan tindakan yang tepat untuk menghindari atau meminimalkan kegagalan jika tidak dapat dihindari. Metode sistematis yang digunakan untuk menyelidiki akar penyebab dari mekanisme kegagalan pada suatu komponen adalah analisis kegagalan (Aji & Nugroho, 2014). Penelitiannya tentang kegagalan baut pengikat *gearbox* pada lokomotif kereta rel diesel elektrik yang di analisis melalui pengumpulan data komponen baut, pengamatan visual, pengujian komposisi kimia, pengujian struktur mikro, pengujian kekerasan, pengolahan data, dan analisis hasil pengujian. Hasil dari penelitian yang dilakukan Aji dan Nugroho menunjukkan bahwa baut memiliki kandungan komposisi yang tidak sesuai dengan standar yang ditentukan dan mengalami kegagalan akibat patah lelah yang dipercepat dengan proses *quenching* dan *tempering* yang tidak sempurna saat proses pembuatannya.

Pada industri pengolahan baja, komponen *work roll* merupakan *roll* yang berperan penting dalam pengerolan panas (*hot rolled*) dan berfungsi untuk mereduksi tebal serta membentuk *bloom* menjadi baja profil sesuai dengan dimensi yang ditentukan (Hwang, 2020). Salah satu material yang digunakan dalam pembuatan komponen *work roll* yaitu besi

Info Makalah:

Dikirim : 26-06-22;

Revisi 1 : 27-10-22;

Diterima : 08-16-23.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62 8956-1548-7695

e-mail : rifqialhakim84@gmail.com

tuang. Besi tuang memiliki temperatur cair yang rendah yaitu sekitar 1150°-1200°C, sehingga dalam proses pengecorannya akan lebih mudah (Suratman & Bandanadjaja, 2017). Pengecoran pasir merupakan salah satu metode pengecoran yang digunakan dalam pembuatan komponen *work roll*. Untuk mendapatkan sifat kekerasan, keuletan, dan keausan yang baik komponen *work roll* diperlukan upaya-upaya sehingga memenuhi standar sebagai komponen untuk proses pengerolan pada bidang industri pengolahan baja. Upaya yang

dilakukan yaitu perlakuan panas, dengan dilakukannya perlakuan panas maka struktur internal pada komponen akan berubah serta akan mengubah juga sifat maupun karakteristiknya (Istiyono, 2009).

Telah dilakukan proses pengecoran komponen *work roll* berjenis besi tuang nodular. Namun setelah dilakukan perlakuan panas *annealing*, *quenching*, dan *tempering* terjadi kegagalan pada komponen *work roll* tersebut, kegagalannya yaitu berupa retakan pada permukaan komponen *work roll* yang dapat dilihat pada Gambar 1. Menurut Sitompul dan Dharma proses perlakuan panas dapat mencakup keseluruhan bagian dari logam atau sebagian dari logam, konsekuensinya akan mengalami retak karena pengaruh *internal stress* (Sitompul & Dharma, 2018). Area komponen yang mengalami retak dapat diamati secara visual, dari pengamatan visual dapat diprediksi jenis kegagalan yang dialami komponen, lalu dapat dilakukan beberapa pengujian yang mengarah ke prediksi pertama yang dapat menjadi pemicu terjadinya kegagalan retak, namun perlu dilakukan analisis lebih mendalam agar penyebab kegagalan dapat diketahui lebih akurat. Kegagalan pada komponen dapat ditelusuri dari latar belakangnya, mulai dari perencanaannya, bahan yang digunakan, proses pembuatannya, dan proses perlakuannya.



Gambar 1. Komponen *Work Roll* yang Mengalami Kegagalan.

Pada penelitian kegagalan komponen *dies* ASSAB 8407 yang dilakukan oleh Susanto terjadi saat proses perlakuan panas dikarenakan proses permesinan yang kurang baik. Jari-jari sudut sangat kecil mengakibatkan terjadinya konsentrasi tegangan yang terjadi saat proses pemanasan dan pendinginan. Jari-jari sudut yang terlalu kecil menyebabkan awal terjadinya keretakan hingga merambat ke daerah lain. Selain itu juga profil komponen *dies* terdapat perbedaan ketebalan pada desainnya. Akibatnya penyebaran panas tidak merata sehingga saat proses *preheating* akan terjadi tegangan yang tidak sama pada komponen. Dari pengujian SEM keretakan yang terjadi adalah retak getas yang berciri alur sungai yang disebabkan oleh perambatan retak melalui kristal bidang sejajar yang membentuk lembah dan tepi yang tajam (Susanto, 2008).

Dari penelitian Sutowo, Kartika, dan Priyono terkait dengan kegagalan pada *camshaft* berjenis besi tuang meleabel terjadi saat proses perlakuan panas yang terindikasi dengan adanya retakan mikro yang terlihat pada pengujian fraktografi menggunakan SEM. Adanya retakan sekunder yang dipicu oleh inklusi juga teramati pada hasil struktur mikro. Patahan yang terjadi pada *camshaft* berjenis besi tuang meleabel adalah patah ulet-getas di mana pada area patah ulet terjadi patahan merambat sepanjang grafit dan batas butir ferit pada komponen tersebut (Sutowo dkk., 2015).

Sedangkan pada penelitian Sutowo, Senopati, Kartika, dan Priyono diketahui bahwa area komponen *cylinder block* berjenis besi tuang kelabu yang mengalami kegagalan retak diakibatkan langsung di *install* tanpa perlakuan panas, terbentuknya struktur dendrit yang membuat besi tuang lebih bersifat getas yang akan menyebabkan *cylinder block* mudah retak akibat adanya tegangan sisa saat proses permesinan. Patahan yang terjadi berdasarkan hasil pengujian SEM adalah patah getas. Adanya porositas, inklusi, dan retak mikro yang terlihat pada pengujian struktur mikro memberi peluang penjalaran retak (Sutowo dkk., 2016).

Kegagalan pada komponen *work roll* merupakan peristiwa yang tidak diharapkan dan akan menimbulkan kerugian biaya produksi bagi industri pengolahan baja sehingga perlu dilakukan penelitian analisis kegagalan untuk mengetahui penyebab terjadinya kegagalan pada komponen *work roll* agar kegagalan yang serupa tidak terjadi kembali. Pada beberapa penelitian analisis kegagalan yang sudah dilakukan sebelumnya komponen yang dianalisis adalah komponen yang mengalami kegagalan setelah di *install* atau diaplikasikan pada penggunaannya, sedangkan pada penelitian analisis kegagalan pada komponen *work roll* ini dianalisis sebelum digunakan pada industri baja sebagai *hot rolled* (pengerolan panas) dikarenakan terjadi kegagalan saat proses manufakturnya.

Manfaat dari dilakukannya penelitian analisis kegagalan ini dalam jangka pendek diharapkan dapat memperbaiki desain dan proses manufakturnya. Sedangkan untuk jangka panjang dapat digunakan sebagai pengembangan

komponen *work roll* serta sebagai metode terkini untuk mengevaluasi dan memperkirakan kualitas dari komponen *work roll* di industri pengolahan baja.

2. Metode

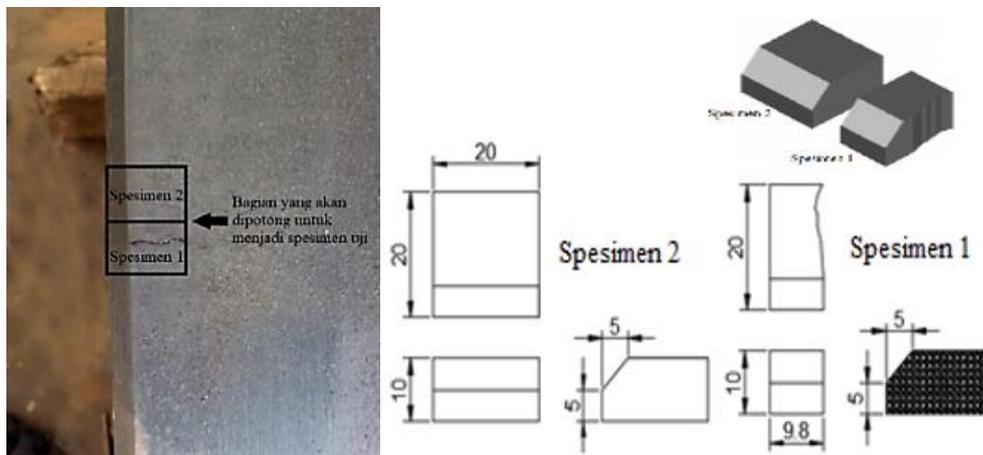
2.1. Persiapan

Pada penelitian ini menggunakan komponen *work roll* berjenis besi tuang nodular yang mengalami kegagalan setelah dilakukan perlakuan panas. Komponen tersebut sebelumnya sudah melalui beberapa proses tahapan manufaktur yang terdiri dari proses pengecoran, *machining*, hingga perlakuan panas. Di dalam penelitian ini dilakukan beberapa pengujian terhadap komponen *work roll* yang mengalami kegagalan.

Pada Gambar 2 dapat dilihat terdapat komponen *work roll* yang akan dilakukan pengujian tidak merusak (*dye penetrant* dan *ultrasonic test*) serta pengujian kekerasan Rockwell C untuk mengetahui cacat dan nilai kekerasan pada komponen. Sedangkan pada Gambar 3 dapat dilihat terdapat dua buah spesimen uji yang dipotong dari bagian retakan *work roll* digunakan untuk pengujian fraktografi menggunakan *scanning electron microscope* (SEM) yang bertujuan untuk menganalisis jenis patahan dan pola patahan pada spesimen 1, sedangkan untuk spesimen 2 digunakan untuk mengamati struktur mikro menggunakan *optical microscope*.



Gambar 2. Komponen *Work Roll* yang Akan Dilakukan Pengujian Tidak Merusak dan Pengujian Kekerasan.

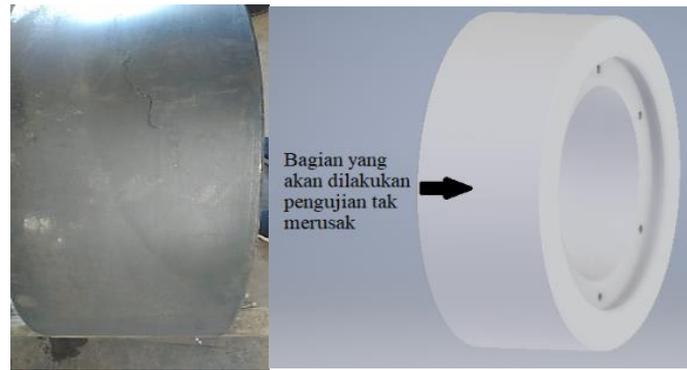


Gambar 3. Spesimen 1 dan Spesimen 2 yang akan Dilakukan Pengujian Fraktografi dan Struktur Mikro.

2.2. Pengujian Tidak Merusak

Area yang mengalami kegagalan pada komponen *work roll* diamati secara visual dengan metode pengujian tidak merusak (*dye penetrant* dan *ultrasonic test*) yang dapat dilihat pada Gambar 4 sehingga dari pengamatan secara visual ini akan diketahui daerah yang mengalami retak dan dapat diketahui juga kedalaman retak yang terjadi pada komponen *work roll*. Pengujian tidak merusak ini mengacu pada standar ASTM E 1417 untuk *dye penetrant test* di mana komponen *work roll* perlu dibersihkan terlebih dahulu menggunakan *cleaner* untuk menghilangkan kotoran-kotoran sisa pengecoran, permesinan, dan perlakuan panas lalu disemprotkan *penetrant* pada permukaan komponen *work roll* dan ditunggu beberapa menit kemudian dibersihkan kembali dan semprotkan *developer* pada permukaan komponen *work roll* untuk mengamati cacat.

Sedangkan untuk *ultrasonic test* mengacu pada standar ASTM E 797. Prosedurnya dengan memasang terlebih dahulu *probe* pada *display ultrasonic flaw detector* lalu atur *velocity* untuk logam pada *display*. Sebelum menguji diharuskan mengkalibrasi terlebih dahulu pada blok kalibrasi agar hasil yang didapatkan akurat. Jika sudah dikalibrasi lakukan pengujian pada permukaan komponen *work roll*.



Gambar 4. Komponen *Work Roll* yang Akan Dilakukan Pengujian Tidak Merusak.

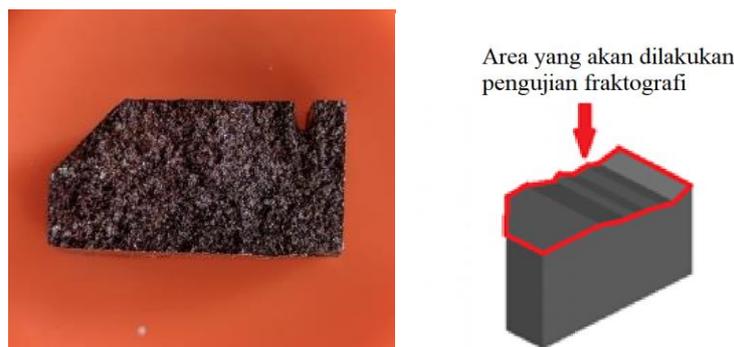
2.3. Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan sesuai standar (ASTM E 1999). Pada pengujian komposisi ini dilakukan saat proses pengecoran pada *ladle*. Alat yang digunakan untuk pengujian komposisi kimia yaitu menggunakan alat uji spektrometer. Dengan alat tersebut maka dapat diketahui presentase unsur kimia yang terkandung pada komponen *work roll*. Prosedurnya nyalakan terlebih dahulu alat uji spektrometer lalu potong spesimen uji sesuai dengan bentuk *holder*, selanjutnya pasangkan spesimen pada *holder* dan lakukan penembakan pada spesimen uji selama 30 detik hingga berbekas dan untuk hasil pengujian dapat dilihat pada *display* alat uji.

2.4. Pengujian Fraktografi

Pengujian fraktografi dilakukan dengan menggunakan mesin *scanning electron microscope* (SEM). *Scanning electron microscope* merupakan mikroskop elektron yang dapat digunakan dalam menganalisa permukaan objek solid secara langsung. Dengan mesin ini jenis patahan dan pola patahan dapat diketahui. Hal yang perlu diperhatikan dalam pengamatan fraktografi ini yaitu spesimen uji tidak perlu melalui proses preparasi seperti diampelas atau dipoles karena apabila melalui preparasi maka bentuk perpatahannya akan hilang. Dalam pengujian fraktografi ini menggunakan standar pengujian *Manual Book SEM Hitachi SU3500 With EDAX Octane Pro*.

Pada Gambar 5 dapat dilihat spesimen 1 yang akan dilakukan pengujian fraktografi. Prosedur yang dilakukan dalam pengamatan fraktografi menggunakan mesin *scanning electron microscope* terhadap spesimen 1 yaitu pertama-tama debu dan pengotor ringan dibersihkan terlebih dahulu menggunakan *blower* pada spesimen yang uji yang sudah dipotong, selanjutnya letakan spesimen uji pada *holder* yang sebelumnya sudah diberi *carbon tape* yang berfungsi melekatkan *holder* dengan spesimen uji, lalu masukan spesimen uji ke dalam mesin *scanning electron microscope* (SEM), dan terakhir lakukan pengamatan pada layar komputer sehingga akan terlihat permukaan spesimen uji dengan pembesaran 500-1000 kali.



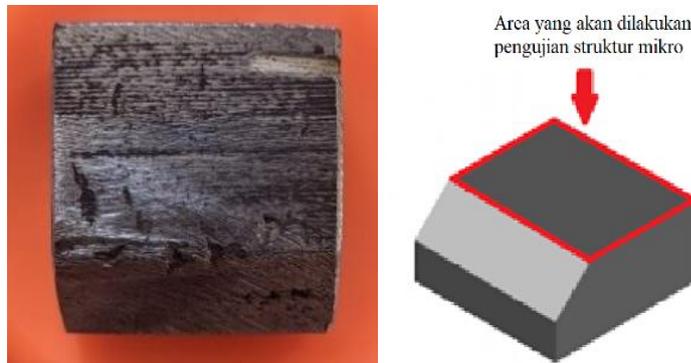
Gambar 5. Spesimen 1 untuk Pengujian Fraktografi.

2.5. Pengujian Struktur Mikro

Pada analisis kegagalan, pengujian struktur mikro membantu untuk mengetahui perlakuan apa yang dialami oleh sampel uji. Pemeriksaan struktur mikro membantu untuk memperoleh informasi seperti morfologi, pengamatan cacat, dan retakan. Pengujian struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik. Pengujian ini dilakukan pada area di sekitar spesimen uji. Pengujian struktur mikro dilakukan dengan standar (ASTM E3-11).

Pada Gambar 6 dapat dilihat spesimen 2 yang akan dilakukan pengujian struktur mikro. Prosedur yang dilakukan dalam pengujian struktur mikro menggunakan *optical microscope* terhadap spesimen 2 yaitu siapkan terlebih dahulu spesimen uji yang akan diamati oleh mikroskop, selanjutnya haluskan permukaan spesimen uji dengan menggunakan

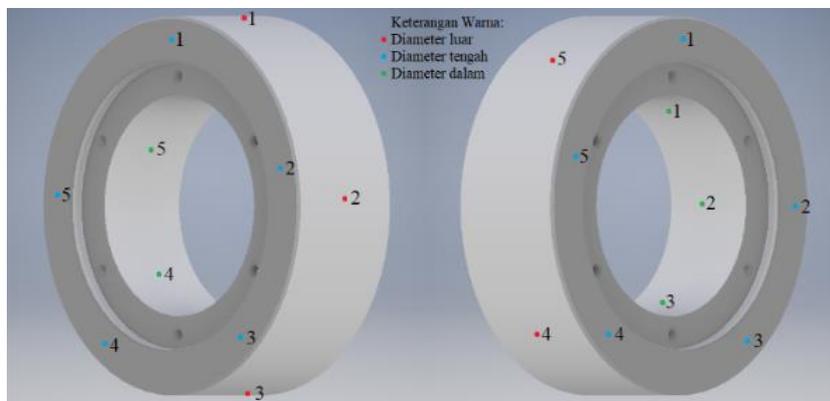
ampas secara bertahap dari grit #80 hingga #2000 (dari kasar sampai halus) dan harus menggunakan air agar permukaan spesimen uji halus dan rata, selanjutnya poles permukaan spesimen uji dengan zat alumina pada kain beludru sampai spesimen uji mengkilap dan goresan hilang, lalu masukan spesimen uji ke dalam cairan etsa nital 2% selama 2 detik dan terakhir lakukan pengamatan pada permukaan spesimen uji dan foto struktur mikro dengan menggunakan *optical microscope* dengan pembesaran 100x.



Gambar 6. Spesimen 2 untuk Pengujian Struktur Mikro.

2.6. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mendapatkan nilai kekerasan dengan melakukan indentasi 5 titik pada bagian luar, tengah, dan dalam pada komponen *work roll* yang mengalami kegagalan yang dapat dilihat pada Gambar 7. Pengujian kekerasan dilakukan dengan standar pengujian (ASTM E18) menggunakan alat uji kekerasan *portable* Rockwell. Prosedur yang dilakukan dalam pengujian kekerasan menggunakan alat uji kekerasan *portable* Rockwell C yaitu nyalakan tombol *power* pada alat, lalu pilih *scale* untuk memilih skala kekerasan Rockwell C, berikutnya pilih tombol material untuk memilih material besi tuang nodular, pilih arah *direction* atau arah impak lalu letakan *probe* pada komponen *work roll* dan tekan hingga berbunyi klik setelah bunyi lepaskan tombol pada *probe* dan lakukan pengujian sebanyak 3 hingga 5 kali.



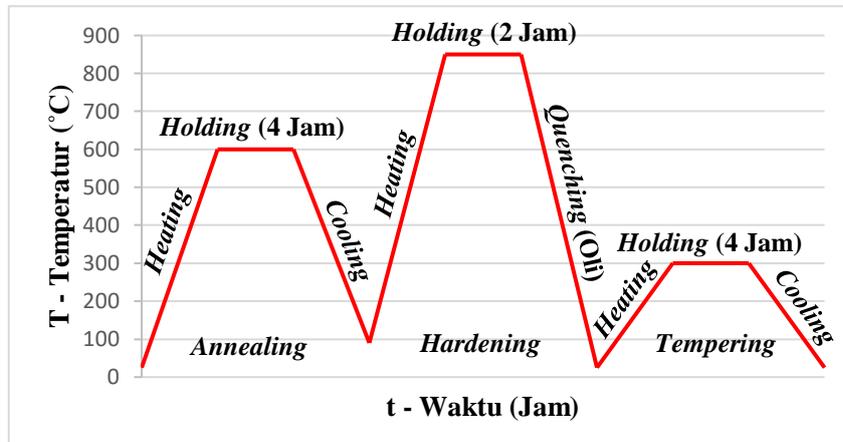
Gambar 7. Komponen *Work Roll* yang akan Dilakukan Pengujian Kekerasan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Tinjauan Proses Manufaktur Komponen *Work Roll*

Komponen *work roll* diproduksi dengan metode *sand casting* (pengecoran pasir) yang terdiri dari beberapa tahapan proses dimulai dengan persiapan bahan baku. Bahan baku yang digunakan pada pembuatan komponen *work roll* adalah potongan *work roll*, *steel scrap*, yang dicairkan menggunakan *electric arc furnace* kapasitas 2500 kg yang dilakukan pada temperatur di atas 1150°C selama 6 jam. Selanjutnya dilakukan pembuatan cetakan yang terbuat dari pasir kering dengan mencampurkan pasir silika dan *water glass*. Pola yang digunakan untuk membuat komponen *work roll* terbuat dari polisterina yang merupakan pola belah. Lalu dilakukan penambahan bahan paduan yang berfungsi untuk menyesuaikan komposisi logam cair. Penambahan bahan paduan dilakukan dengan memasukkan paduan ke dalam *electric arc furnace* setelah potongan *work roll* dan *steel scrap* melebur. Nodularisasi juga diperlukan untuk memproduksi grafit yang berbentuk bulat dengan menempatkan unsur Mg yang merupakan unsur pembulat yang terkandung pada Fe-Si-Mg pada bawah *ladle* dan ditutup dengan *steel chip* lalu dituangkan ke dalam cetakan dengan *ladle* berkapasitas 2200 kg.

Setelah proses pengecoran komponen *work roll as cast* perlu dilakukan proses *machining* dengan menggunakan *turning machine*. Dikarenakan komponen *work roll* tersebut akan di aplikasikan untuk *hot rolled* (pengerolan panas) maka diperlukan kekerasan, keuletan, dan ketahanan aus yang baik sehingga perlu dilakukan proses perlakuan panas pada komponen *work roll as cast*. Perlakuan panas pada komponen tersebut meliputi *annealing*, *hardening*, dan *tempering* yang dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Perlakuan Panas pada Komponen *Work Roll*.

Dari Gambar 8 dapat dilihat proses *annealing* dilakukan dengan memasukkan komponen *work roll* ke dalam *furnace* lalu dilakukan pemanasan secara perlahan agar tidak terjadi *thermal shock* hingga mencapai temperatur 600°C. Setelah temperatur sudah tercapai pada 600°C dilakukan *holding* di dalam *furnace* selama 4 jam agar panas yang menyebar merata pada semua bagian komponen *work roll* lalu dilakukan pendinginan di dalam *furnace*. Untuk proses *hardening* komponen *work roll* dipanaskan secara perlahan pada *furnace* hingga mencapai temperatur austenisasi 850°C. Setelah mencapai temperatur 850°C lalu di *holding* di dalam *furnace* selama 2 jam. Setelah di *holding* selama 2 jam, dilakukan *quenching* pada media oli untuk mendapatkan sifat kekerasan sesuai dengan standar komponen *work roll*. Sedangkan untuk proses *tempering* komponen *work roll* di masukan kedalam *furnace* kembali lalu dipanaskan hingga mencapai temperatur 300°C lalu di *holding* selama 4 jam di dalam tungku lalu didinginkan pada *furnace* dengan kondisi pintu *furnace* terbuka.

3.2. Pengujian Tidak Merusak

Pada pengujian tidak merusak dilakukan untuk mengetahui cacat yang terjadi pada bagian permukaan maupun bagian dalam komponen *work roll* setelah dilakukan perlakuan panas dengan menggunakan *dye penetrant* dan *ultrasonic flaw detector* yang dapat dilihat pada Gambar 9 melalui pengamatan visual. Pengujian tidak merusak ini mengacu pada standar ASTM E 1417 untuk *dye penetrant test* dan ASTM E 797 untuk *ultrasonic test*.

Berdasarkan dari pengamatan visual pada *work roll* setelah dilakukan *dye penetrant test* yang dapat dilihat pada Gambar 9 (a) bahwa retakan terjadi dan merambat hampir setengah dari diameter pada komponen *work roll*. Ukuran retaknya pun bervariasi, terdapat retakan yang berukuran kecil hingga berukuran besar. Retakan awal kemungkinan besar terjadi karena dipengaruhi sudut hasil proses *machining* pada ujung *chamfer work roll* lalu melewati bagian tengah pada permukaan dan retakan akhir kembali pada *chamfer* pada posisi yang berbeda. Sedangkan dari pengujian *ultrasonic test* yang dapat dilihat pada Gambar 9 (b) menggunakan *ultrasonic flaw detector* dapat dilihat bahwa tingkat kedalaman retakan bervariasi dengan maksimal retakan pada *work roll* mencapai kedalaman hingga 19mm.



Gambar 9. Kegagalan retak pada komponen *work roll* setelah dilakukan pengujian tidak merusak (a) *dye penetrant* dan (b) *ultrasonic test*

3.3. Pengujian Komposisi Kimia

Pada pengujian komposisi kimia dilakukan menggunakan mesin uji spektrometer yang dilakukan saat proses pengecoran yang diambil pada *ladle* untuk mengetahui apakah komposisi pada komponen *work roll* sesuai dengan standar yang ditetapkan. Pengujian komposisi kimia ini menggunakan standar ASTM E 1999. Setelah komposisi kimia dari komponen *work roll* diperoleh dapat dikomparasikan dengan komposisi kimia besi tuang nodular menurut buku *ductile iron book*.

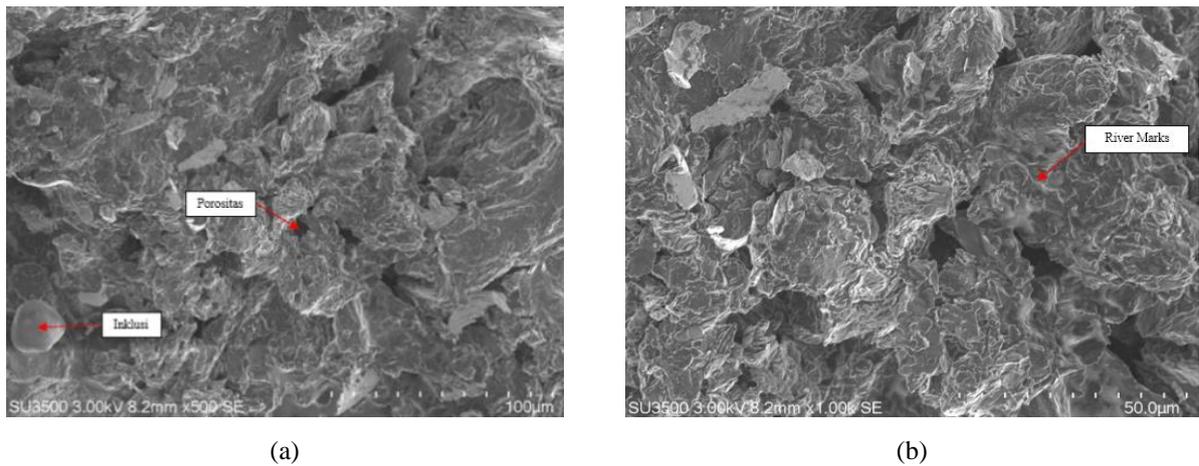
Dari komparasi komposisi kimia yang dapat dilihat pada Tabel 1 antara komponen *work roll* berjenis besi tuang nodular dengan komposisi kimia besi tuang nodular yang sesuai dengan buku *ductile iron book* (Henning.W.A. & Mercer, 1993) dapat dilihat unsur Cr (Chromium) sebagai elemen pembentuk karbida dan perlit berada pada nilai 0,275% berarti nilai tersebut melebihi dari nilai 0,10% hal ini akan berdampak karbida akan sulit dihilangkan melalui perlakuan panas. Mg (Magnesium) sebagai unsur yang berperan dalam pembentukan nodul ada pada nilai 0,100% berarti nilai tersebut melebihi dari *range* nilai 0,02-0,08% hal ini akan menyebabkan pembentukan karbida yang berlebih (Henning.W.A. & Mercer, 1993).

Tabel 1. Komparasi Komposisi Kimia.

Komposisi kimia komponen <i>work roll</i> besi tuang nodular					
No.	Unsur kimia	Komposisi (%)	No.	Unsur kimia	Komposisi (%)
1.	C	3,45	8.	Mo	0,177
2.	Si	2,60	9.	Mg	0,100
3.	Mn	0,635	10.	Al	0,0260
4.	P	0,0304	11.	Cu	0,0240
5.	S	0,0024	12.	V	0,0114
6.	Cr	0,275	13.	Ti	0,0128
7.	Ni	1,58	14.	As	0,0071
Komposisi kimia besi tuang nodular (Henning.W.A. & Mercer, 1993)					
No.	Unsur kimia	Komposisi (%)	No.	Unsur kimia	Komposisi (%)
1.	C	3,00-4,00	8.	Mo	0,01-0,75
2.	Si	1,80-2,75	9.	Mg	0,02-0,08
3.	Mn	0,80 <i>Max</i>	10.	Al	0,05 <i>Max</i>
4.	P	0,05 <i>Max</i>	11.	Cu	0,01-0,90
5.	S	0,02 <i>Max</i>	12.	V	0,05 <i>Max</i>
6.	Cr	0,10 <i>Max</i>	13.	Ti	0,07 <i>Max</i>
7.	Ni	0,01-2,00	14.	As	0,05 <i>Max</i>

3.4. Pengujian Fraktografi

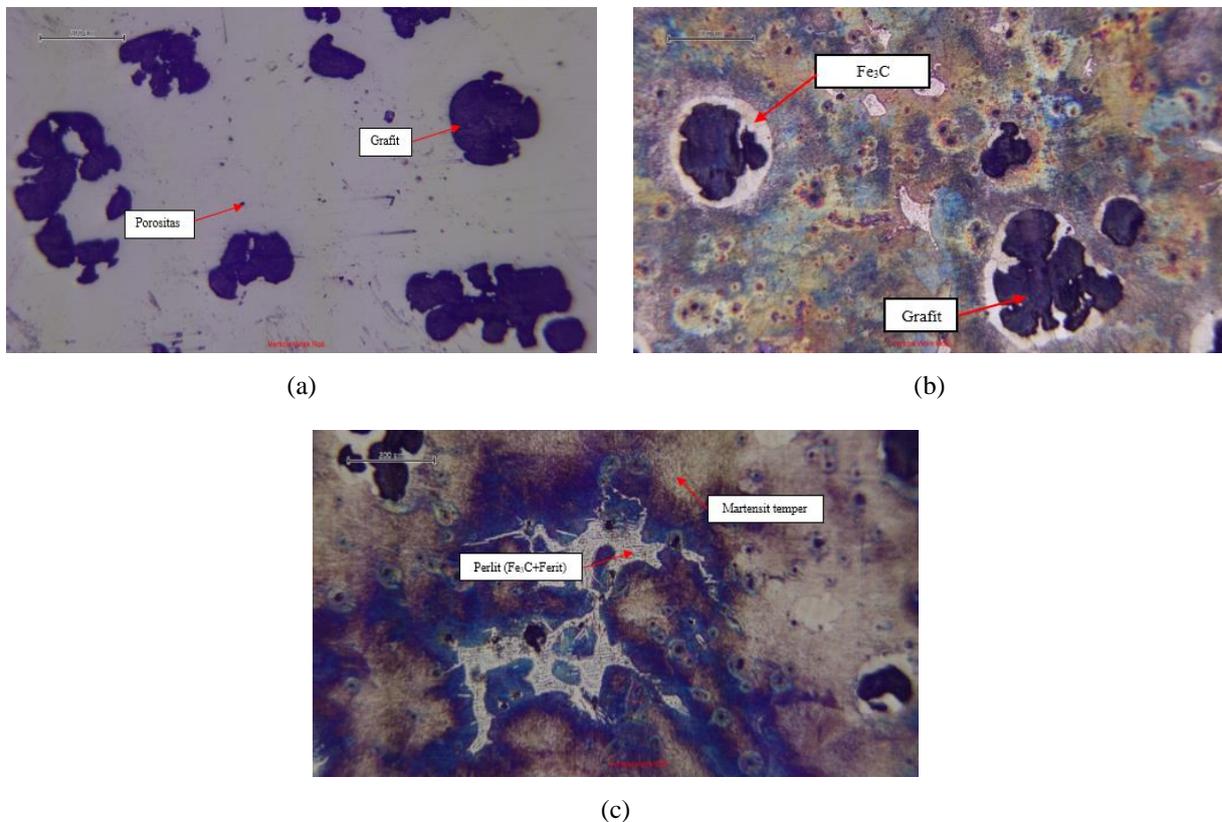
Berikut ini adalah hasil dari pengujian fraktografi menggunakan mesin uji SEM yang dilakukan pada spesimen uji 1 yang dapat dilihat pada Gambar 10. Dalam pengujian fraktografi ini mengacu dengan standar pengujian *Manual Book SEM Hitachi*. Dari pengujian fraktografi menggunakan mesin SEM dapat terlihat bahwa keretakan yang terjadi adalah keretakan getas yang ciri utamanya adalah alur sungai (*river marking*). Ciri tersebut disebabkan oleh perambatan retak melalui kristal sepanjang sejumlah bidang sejajar yang membentuk lembah dan tepi yang tajam (Susanto, 2008). Hal tersebut serupa dengan penelitian yang dilakukan oleh Susanto. Dari hasil pengujian SEM juga terlihat adanya porositas. Porositas bisa terjadi dikarenakan terjebaknya gelembung-gelembung gas yang terperangkap pada cairan logam saat proses pengecoran. Dengan adanya porositas akan memberikan pengaruh pada hasil coran dan akan menjadi pemusat tegangan sehingga akan memicu terjadinya retak. Selain itu juga pada hasil pengujian SEM terlihat adanya inklusi. Inklusi ini dapat terjadi akibat masuknya terak atau bahan bukan logam ke dalam cairan logam ke dalam cairan logam yang diakibatkan oleh reaksi kimia selama proses peleburan, penuangan, dan pembekuan.



Gambar 10. Hasil pengujian fraktografi menggunakan SEM spesimen uji 1 pada pembesaran: (a) 500x dan (b) 1000x

3.5. Struktur Mikro

Berikut ini adalah hasil dari pengujian struktur mikro menggunakan mikroskop optik yang dilakukan pada spesimen uji 2 yang dapat dilihat pada Gambar 11. Pada pengujian struktur mikro ini mengacu pada standar pengujian ASTM E 3-11. Berdasarkan dari hasil pengujian struktur mikro yang dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik pada komponen *work roll* yang mengalami kegagalan memiliki struktur khas besi tuang nodular yang terdiri dari grafit berbentuk bulat dengan matrik perlit. Perlit merupakan struktur yang berbentuk lapisan dari ferit yang liat dan sementit yang keras dan getas. Jadi matrik perlit bersifat baik sekali ketahanan ausnya. Pada hasil pengujian juga terlihat adanya struktur martensit temper yang artinya bahwa komponen *work roll* sudah melalui proses temper yang baik. Namun tampak juga banyak porositas pada hasil pengujian struktur mikro.



Gambar 11. Struktur Mikro Spesimen Uji 2 pada Pembesaran 100x: (a) Tanpa Etsa, (b-c) Etsa Nital 2%.

3.6. Pengujian Kekerasan

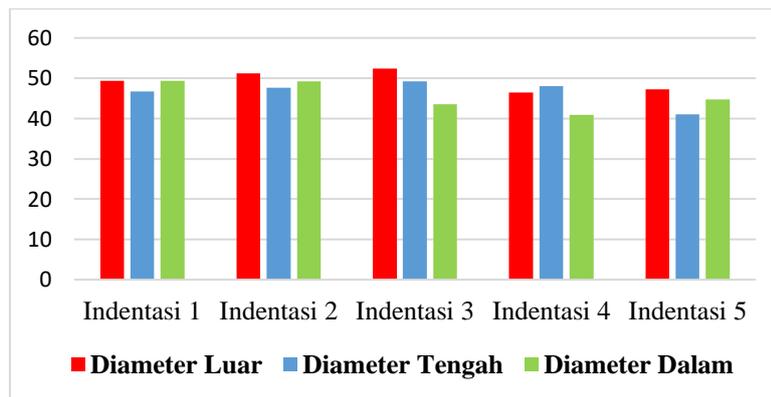
Pengujian kekerasan ini digunakan untuk mengetahui nilai distribusi kekerasan pada komponen *work roll* yang mengalami kegagalan. Pada pengujian kekerasan dilakukan pada bagian diameter luar, diameter tengah, dan diameter dalam dalam masing-masing sebanyak 5 titik indentasi menggunakan alat uji kekerasan *portable* Rockwell C.

Berdasarkan dari pengujian kekerasan yang dilakukan pada komponen *work roll* yang mengalami kegagalan setelah perlakuan panas dapat dilihat pada Tabel 2 bahwa nilai kekerasan tertinggi berada pada bagian luar *work roll* setelah dilakukan 5 titik indentasi pada masing-masing bagian yaitu sebesar 49,3 HRC, 51,2 HRC, 52,4 HRC, 46,5 HRC, dan 47,2 HRC sedangkan pada bagian tengah memiliki kekerasan yang lebih rendah dibandingkan dengan bagian luar sebesar 46,7 HRC, 47,6 HRC, 49,2 HRC, 41,0 HRC, dan 41,0 HRC begitu pun untuk bagian dalam yaitu 49,3 HRC, 49,2 HRC, 43,5 HRC, 40,9 HRC, dan 40,7 HRC.

Dapat diperjelas melalui grafik batang yang dapat dilihat pada Gambar 12 bahwa nilai kekerasan rata-rata tertinggi ada pada bagian diameter luar komponen *work roll* yaitu sebesar 49,3 HRC yang artinya saat dilakukan perlakuan panas penyebaran panas tidak menyebar dengan merata pada bagian luar, bagian tengah dan bagian dalam sehingga bagian dalam dan bagian tengah cenderung memiliki nilai kekerasan yang lebih kecil dibandingkan dengan bagian luar.

Tabel 2. Data Hasil Pengujian Kekerasan.

Nilai kekerasan (HRC)			
Daerah indentasi	Diameter luar	Diameter tengah	Diameter dalam
1	49,3 HRC	46,7 HRC	49,3 HRC
2	51,2 HRC	47,6 HRC	49,2 HRC
3	52,4 HRC	49,2 HRC	43,5 HRC
4	46,5 HRC	41,0 HRC	40,9 HRC
5	47,2 HRC	41,0 HRC	40,7 HRC
Rata-rata	49,3 HRC	46,5 HRC	44,7 HRC



Gambar 12. Grafik Hasil Pengujian Kekerasan.

Kesimpulan

Setelah dilakukan pengumpulan data, beberapa pengujian, dan hasil pembahasan komponen *work roll* sudah dilakukan proses perlakuan panas sesuai dengan standar yang ditentukan untuk jenis material besi tuang nodular, namun dari hasil pengujian komposisi kimia komponen *work roll* memiliki unsur Cr (Chromium) yang tidak sesuai dengan standar yang ditentukan. Unsur Cr (Chromium) yang berlebih pada komponen *work roll* menunjukkan komponen *work roll* akan menjadi getas dan dapat memicu terjadinya keretakan saat dilakukan perlakuan panas.

Unsur Cr (Chromium) sebagai elemen pembentuk karbida dan perlit berada pada 0,275%, persentase tersebut melebihi 0,10% pada komposisi Cr (Chromium) besi tuang nodular yang berakibat karbida akan sulit dihilangkan melalui perlakuan panas. Selain itu unsur Mg (Magnesium) sebagai elemen pembulat berada pada 0,100%, persentase tersebut melebihi *range* 0,02-0,08% pada komposisi Mg (Magnesium) besi tuang nodular sehingga akan berakibat terbentuknya karbida yang berlebih. Unsur kimia Cr (Chromium) dan Mg (Magnesium) yang berlebih pada komponen *work roll* akan membuat komponen menjadi getas yang dibuktikan dengan bentuk patahannya yang berbentuk patah getas secara *transgranular* yang bercirikan *river marks* pada pengujian fraktografi menggunakan SEM. Hal tersebut juga dibuktikan dengan hasil pengujian struktur mikro terdapat karbida primer yang dikarenakan tingginya kadar komposisi unsur Cr (Chromium) dan Mg (Magnesium). Dari hasil pengujian fraktografi dapat terlihat adanya porositas dan inklusi yang dapat berpotensi menjadi konsentrasi tegangan saat dilakukan perlakuan panas.

Sedangkan dari komponen *work roll* memiliki ketebalan yang tidak seragam yang dibuktikan dengan pengujian kekerasan terdapat nilai kekerasan yang berbeda antara bagian luar (49,3 HRC), tengah (46,5 HRC), dan dalam (44,7

HRC). Desain komponen *work roll* juga terdapat sudut yang lancip yang dapat menjadi pusat konsentrasi tegangan. Dari beberapa faktor tersebut bisa menjadi faktor terjadinya kegagalan retak pada *work roll* saat dilakukan perlakuan panas. Kegagalan pada komponen *work roll* terjadi saat proses perlakuan panas yang disebabkan oleh sifat material yang bersifat getas. Adanya porositas, inklusi, dan sudut yang lancip pada desain komponen *work roll* dapat menjadi sumber konsentrasi tegangan saat dilakukan perlakuan panas.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan atas dukungan finansialnya melalui kegiatan Matching Fund 2021.

Daftar Notasi

%	= Persen
Al	= Aluminium
As	= Arsen
ASTM	= <i>American Standard Testing and Material</i>
C	= Carbon
Cr	= Chromium
Cu	= Cuprum
°C	= Derajat <i>Celcius</i>
HRC	= <i>Hardness Rockwell C</i>
kg	= Kilogram
Mg	= Magnesium
Mn	= Mangan
Mo	= Molybdenum
Ni	= Nikel
P	= Phospor
S	= Sulfur
Si	= Silicon
T	= Temperatur
t	= Waktu
Ti	= Titanium
V	= Vanadium

Daftar Pustaka

- Aji, W. S., & Nugroho, S. (2014). Analisis Kegagalan Baut Pengikat Gearbox Pada Lokomotif Kereta Rel Diesel Elektrik (Krde). *Jurnal Teknik Mesin*, 2(4), 413–420.
- ASTM E 1417. (1999). *Standard Practice for liquid Penetrant Examination*.
- ASTM E 1999. (2018). *Standard Test Method for Analysis of Cast Iron by Spark Atomic Emission Spectrometry*.
- ASTM E 797. (2016). *Standard Practice for Measuring Thickness by Manual Ultrasonic Pulse-Echo Contact Method*.
- ASTM E 18. (2020). *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*.
- ASTM E 3-11. (2017). *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*.
- Henning, W.A., & Mercer, J. (1993). *Ductile Iron Book*. American Foundrymen's Society, Inc.
- Hwang, J. K. (2020). Thermal Behavior Of A Rod During Hot Shape Rolling And Its Comparison With A Plate During Flat Rolling. *Processes*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/pr8030327>
- Istiyono, E. (2009). Analisis Sifat Magnetik Bahan Yang Mengalami Proses Annealing Dan Quenching. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan, Dan Penerapan*, 311–319.
- Sitompul, E. D., & Dharma, S. (2018). Pengaruh Variasi Konsentrasi Media Pendingin (*Quenchant*) Pada Proses *Quench Terhadap kekerasan, Struktur Mikro Dan Retak Akinat Quench (Quench Crack) Dari Baja AISI 1040*. 11(April), 1–7. <https://doi.org/https://doi.org/10.19184/rotor.v11i1.6003>
- Suratman, R., & Bandanadjaja, B. (2017). Analisis Perubahan Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Besi Cor Nodular 700 Setelah Mengalami Proses Perlakuan Panas. *Mesin*, 17(2), 44–50.
- Suripto, D. (2014). Analisa Kegagalan Pada Pipa Ulir di Lingkungan Perminyakan. *Jurnal Material Komponen dan Kontruksi*, 14(2), 26-34.
- Susanto, E. E. (2008). Kegagalan Komponen Dies Pada Proses Heat Treatment. *Jurnal Flywheel*, 1(Desember), 1–7.
- Sutowo, C., Kartika, I., & Priyono, B. (2015). Analisa Keretakan Pada Komponen Camshaft. *Prosiding Seminar Material Metalurgi 2015*.
- Sutowo, C., Senopati, G., Kartika, I., & Priyono, B. (2016). Analisa Kegagalan Retak Material Besi Cor Kelabu Untuk Aplikasi Cylinder Block. *Jurnal Teknik*, 1(November), 50–57.