



**PENGARUH SUHU DAN WAKTU *TEMPERING* TERHADAP STRUKTUR MIKRO,
KEKERASAN, DAN KETAHANAN ABRASIF BAJA TAHAN KARAT
MARTENSITIK COR MODIFIKASI CA-15**

***EFFECT OF TEMPERATURE AND TEMPERING TIME TOWARDS
MICROSTRUCTURE, HARDNESS, AND ABRASIVE RESISTANCE OF
MARTENSITIC STAINLESS-STEEL CASTING MODIFICATION CA-15***

Ade Trya Aprilliansyah¹, Moch. Syaiful Anwar², Sunardi³ dan Efendi Mabru⁴

^{1,3}Teknik Mesin, FT. UNTIRTA, Jl. Jenderal Sudirman Km 03 Cilegon, Banten 42435

^{2,4}Pusat Penelitian Metalurgi dan Material-LIPI, Gedung 470 Kawasan Puspiptek, Tangerang Selatan

E-mail: ²moch026@lipi.go.id

Abstrak

Sudu turbin uap umumnya menggunakan baja tahan karat martensitik 13Cr yang ditempa (*forging*) namun baja martensitik cor masih sedikit penggunaannya untuk sudu turbin uap. Penelitian ini metode pengecoran dipilih karena dapat mempersingkat proses produksi dan pemesinan serta sebagai substitusi baja martensitik tempa yang selama ini masih impor. Pada penelitian ini telah dilakukan modifikasi baja tahan karat cor CA-15 dengan menambahkan unsur Mo dan Ni sebanyak masing-masing 3%. Tujuannya adalah untuk meningkatkan sifat mekanik dari baja tahan karat cor CA-15. Proses austenisasi pada temperatur 1100°C selama 3 jam dan dilakukan normalizing. Kemudian dilanjutkan pada proses *tempering* dengan tujuh variasi temperatur temper dan tiga variasi waktu tahan yang bertujuan untuk mengetahui ada tidaknya *secondary hardening*. Variasi suhu yang digunakan yaitu 300°C, 400°C, 500°C, 550°C, 600°C, 650°C dan 700°C serta waktu tahan masing-masing selama 1, 3, dan 5 jam. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa *secondary hardening* yang ditunjukkan dengan kenaikan nilai kekerasan terjadi pada temperatur 400°C dengan waktu tahan 1, 3, dan 5 jam sebesar 54,53; 53,1; 42,4 HRC. Karena itu baja menjadi keras dan getas dan tidak sesuai dengan kriteria material standar komersial baja tahan karat 13Cr sebagai sudu turbin uap. Baja martensitik cor modifikasi CA-15 yang telah ditemper pada temperatur 650 dan 700 °C dan waktu tahan 5 jam menghasilkan baja yang sesuai dengan kriteria sudu turbin uap dengan fasa martensitik temper dengan nilai kekerasan HRC 35,1 dan 34,73 serta nilai kehilangan berat setelah uji abrasi sebesar 18,6 dan 23,8 mg/cm².

Kata kunci: Baja tahan karat, cor, martensitik, modifikasi CA-15, tempering

Abstract

Steam turbine blades generally use forged 13Cr martensitic stainless steel, but cast martensitic steel is still of little use for steam turbine blades. In this research, casting method was chosen which aims to simplify manufacturing and machining process as well as to substitute the forged martensitic steel which has been imported so far. In this study, martensitic steel CA-15 has been modified CA-15 material by adding Mo and Ni element of 3% each. The aim was to increase mechanical properties of martensitic steel CA-15. Austenisation process at a temperature of 1100°C for 3 hours and normalizing was carried out. Then proceed to the tempering process with seven variations in tempering temperature and three variations of holding time which aims to determine whether there was a secondary hardening. The temperature variations used are 300, 400, 500, 550, 600, 650 and 700°C and hold time of 1, 3 and 5 hours respectively. The results of this study indicate that secondary hardening as indicated by the

increase in hardness value occurs at a temperature of 400°C with a holding time of 1, 3, and 5 hours of 54.53, 53.1, 42.4 HRC. Therefore the steel become hard and brittle and did not meet the criteria as a turbine blade. Modified cast-martensitic steel CA-15 which has been tempered at temperatures of 650 and 700° C and 5 hours of holding time produces steel according to the criteria of steam turbine blades with tempered martensite phase with hardness values of HRC of 35.1 and 34.73 and weight loss values after the abrasion test of 18,6 and 23.8 mg / cm².

Keywords: Stainless steel, cast, martensitic, modified CA-15 cast, tempering.

PENDAHULUAN

Turbin adalah sebuah mesin berputar yang mengambil energi dari aliran fluida. Sudu turbin merupakan bagian dari komponen pada turbin pembangkit listrik tenaga uap yang memiliki peran penting. Akan tetapi dalam penggunaannya, sering ditemukan kegagalan dikarenakan sudu turbin bekerja pada putaran yang tinggi dan lingkungan yang korosif (E. Mabruri, et al. 2016). Salah satu kerusakan yang terjadi pada akhir-akhir ini yaitu kausan abarasis menjadi masalah dalam komponen-komponen turbin uap (M.S. Anwar, et al. 2015).

Pada umumnya material yang digunakan untuk sudu turbin yaitu baja tahan karat martensitik seperti SS 410 sebagai bahan bakunya karena memiliki kekuatan, ketangguhan, ketahanan abrasive dan ketahanan korosi yang baik. Selain material tersebut, CA-15 juga termasuk dalam jenis baja tahan karat martensitik yang bisa digunakan untuk sudu turbin karena memiliki karakteristik yang *equivalen* dengan SS 410. Dalam pengembangan baja tahan karat martensitik tersebut banyak dilakukan penelitian dengan cara penambahan unsur Mo dan Ni bertujuan untuk meningkatkan ketahanan korosi dan sifat mekanik pada material yang dihasilkan.

Namun penambahan Mo dan Ni tidak berpengaruh terhadap morfologi karbida pada temperatur temper rendah, akan tetapi dapat meningkat ketahanan aus ketika temperatur temper diatas 350°C (M.S. Anwar, et al. 2015). Oleh karena itu penulis melakukan penelitian bertujuan untuk mengetahui pengaruh suhu dan waktu temper terhadap baja cor modifikasi CA-15.

TINJAUAN PUSTAKA

Baja tahan karat merupakan baja paduan yang mengandung unsur Cr minimum 12%. Baja tahan karat termasuk dalam baja paduan tinggi yang mempunyai sifat mampu bentuk yang baik, ketangguhan yang baik pada

temperatur rendah maupun tinggi, mempunyai ketahanan korosi yang baik, juga mempunyai ketahanan mulur yang cukup besar pada temperatur tinggi. Karena sifatnya, maka baja ini banyak digunakan dalam reaktor atom, turbin, mesin jet, pesawat terbang, alat rumah tangga dan lain-lainnya.

Stainless steel merupakan baja tahan karat yang sulit untuk bereaksi terhadap udara dan air karena memiliki kandungan kromium (Callister W.D, et. al. 2001). CA-15 termasuk ke dalam *Martensitic Stainless Steel* (MSS) dimana memiliki kualitas yang sangat baik seperti kekuatan, ketahanan korosi, dan ketahanan erosi, dan memiliki grade yang sama dengan baja tahan karat AISI 410. Material ini banyak digunakan pada tempat bertekanan tinggi dengan berbagai permasalahan seperti yang terdapat pada sudu turbin, bahan pipa atau tabung, bodi katup, dan baling-baling kapal (Hwei-Yuan Teng, et.al. 2003). *Martensitic stainless steel* memiliki struktur kristal *body centered tetragonal* dengan tingkat krom yang rendah dan tingkat karbonnya tinggi, dengan mendapatkan struktur *austenitic* pada temperature tinggi kemudian didinginkan secara tiba-tiba untuk mengubah fase *austenitic* ke *martensite* (Davis J.R, et al. 2001). Komposisi kimia yang terkandung pada CA-15 sesuai dengan standar ASTM dapat dilihat pada Tabel 1.

Proses perlakuan panas pada baja tahan karat martensitik memiliki hal yang sama dengan perlakuan panas terhadap baja yang lainnya. Kekerasan dari baja tahan karat juga bergantung kepada kadar karbonnya, apabila kadar karbonnya tinggi maka kekerasan juga akan semakin tinggi. Sebaliknya apabila kadar karbonnya rendah maka kekerasan baja tahan karat akan semakin rendah.

Austenisasi merupakan suatu proses untuk menghasilkan struktur akhir yang lebih keras dengan memanaskan baja terlebih dahulu sehingga didapat fasa austenit (γ). Austenisasi merupakan tahap yang sangat kritis pada proses pengerasan dimana proses ini berdampak

terhadap proses pelarutan karbida ke dalam matriks austenit yang akan berubah pada pendinginan cepat menjadi martensit (M.A. Gebril, et.al. 2014)

Pada proses *tempering*, sampel didinginkan menggunakan media udara. Hal ini

dilakukan dikarenakan fasa martensit *temper* memiliki sifat-sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan fasa martensit (Windra S., et.al, 2016).

Tabel 1. Komposisi Kimia baja tahan karat martensitik CA-15 (Hwei-Yuan Teng, et. al. 2013)

Unsur	C	Mn	Si	Cr	P	S	Ni	Mo	Fe
Berat (%)	0,15 Max	1,0 Max	1,5 Max	11,5-14 Max	0,04 Max	0,04 Max	1,0 Max	0,5 Max	Bal.

METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini berupa baja tahan karat martensitik modifikasi CA-15 3Mo-3Ni yang akan dibuat melalui proses pengecoran dalam bentuk *rod* dengan diameter 24 mm. Komposisi kimia dari baja tahan karat martensitik modifikasi CA-15 dapat dilihat pada Tabel 2.

Pada awalnya, sampel yang memiliki tebal 12 mm dilakukan proses *austenisasi* dimana baja dipanaskan sampai dengan temperatur 1100°C selama 3 jam untuk mencapai fasa austenit. Kemudian dilakukan pendinginan dengan media udara ruang. Setelah dilakukannya proses *austenisasi* sampel akan dilakukan proses *tempering* dengan variasi temperatur pemanasan dan waktu penahanan kemudian diikuti dengan pendinginan udara. Setelah dilakukan proses *tempering*, sampel akan dilakukan beberapa proses pengujian. Pengujian pada penelitian ini yang akan dilakukan diantaranya yaitu metalografi, pengujian kekerasan, dan pengujian ketahanan abrasif.

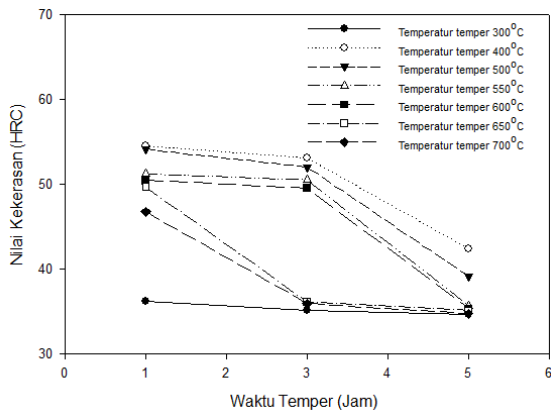
Uji metalografi dilakukan sesuai dengan ASTM E3 dengan cara mengamplas permukaan sampel sampai pada grit 1200 kemudian dilakukan polishing menggunakan alumina powder 0,3 µm. Setelah itu, proses etsa dilakukan dengan cara mencelupkan permukaan baja di dalam larutan kalling reagent kemudian dilakukan pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik. Uji kekerasan Rockwell C dilakukan sesuai dengan ASTM E18. Uji ketahanan abrasif pada sampel dilakukan secara *rotary* menggunakan mesin uji ADAMEL LHOMARGY pada sampel berbentuk silinder dimana sampel yang permukaannya telah rata tersebut diletakan di bawah kertas SiC no. 120 yang mengacu pada ASTM G 132-96. Perhitungan fasa martensit menggunakan *software imageJ*.

Data hasil pengujian ini diperoleh dengan melakukan pengujian kekerasan sebanyak 3 kali pengukuran HRC, metalografi sebanyak 2 kali perbesaran (100x, dan 200x) struktur mikro. Kemudian pengujian selanjutnya yaitu pengujian ketahanan abrasif menggunakan pembebanan 1 kg selama 1000 putaran dengan melakukan penimbangan berat awal dan akhir sebanyak 3 kali. Semua pengujian dalam penelitian ini dilakukan pada setiap sampel. Setelah mendapatkan data hasil dari pengujian akan dilakukan analisa dan kesimpulan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tahan *Tempering* Terhadap Nilai Kekerasan HRC

Pada Gambar 1 menunjukkan nilai kekerasan HRC baja tahan karat martensitik cor modifikasi CA-15 dengan variasi temperatur dan waktu *temper*. Pada kondisi awal nilai kekerasan setelah proses *austenisasi* sebesar 38,7 HRC namun ketika dilakukan proses *tempering* nilai kekerasan mulai mengalami penurunan. Hal ini dapat dilihat pada temperatur *temper* 300°C dengan waktu tahan 1 jam nilai kekerasan mengalami penurunan dari sebelumnya 38,7 HRC menjadi 36,23 HRC. Penurunan nilai kekerasan pada suhu *temper* 300°C tidak hanya terjadi pada waktu tahan 1 jam, hal ini juga terjadi pada waktu tahan 3 jam dan 5 jam. Penurunan nilai kekerasan tersebut kemungkinan disebabkan karena adanya fasa martensit *temper*.



Gambar 1. Nilai kekerasan HRC baja tahan karat cor modifikasi CA-15 dengan variasi temperatur dan waktu temper

Namun peningkatan nilai kekerasan terjadi ketika temperatur temper berada di 400°C baik dengan waktu tahan baik 1 jam, 3 jam dan 5 jam. Kenaikan nilai kekerasan tertinggi terjadi pada waktu tahan 1 jam di temperatur 400°C dengan nilai 54,53 HRC. *Range* peningkatan nilai kekerasan yang dihasilkan dari temperatur 300°C ke 400°C ini cukup signifikan perbedaannya. Peningkatan nilai kekerasan yang terjadi pada temperatur 400°C ini disebabkan oleh terjadinya *secondary hardening*. Fenomena *secondary hardening* pada umumnya terjadi pada temperatur antara 400°C - 500°C karena terbentuknya terbentuknya karbida kromium dan karbida molibdenum (Hadi, et.al. 2017).

Tabel 2. Komposisi kimia baja tahan karat martensitik cor modifikasi CA-15

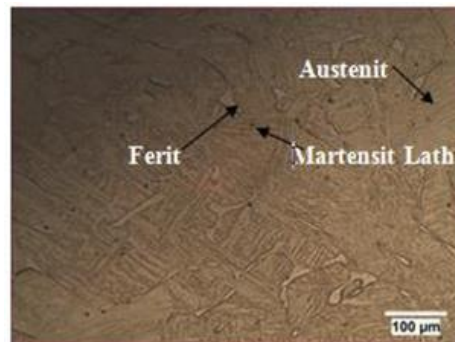
Unsur	C	Mn	Si	Cr	P	S	Ni	Mo	Fe
Berat (%)	0,12	0,06	0,29	12,23	0,01	0,002	2,98	2,86	Bal.

Sehingga hal ini yang menyebabkan dimana pada temperatur 400°C mengalami peningkatan kekerasan. Pada tabel di atas dapat dilihat juga dimana pada temperaturtempering 500°C - 700°C terjadi penurunan kekerasan. Hal ini sama seperti yang diketahui dimana semakin tinggi temperatur temper maka fasa martensitik temper semakin banyak sehingga akan menurunkan nilai kekerasan.

Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tahan Tempering Terhadap Struktur Mikro

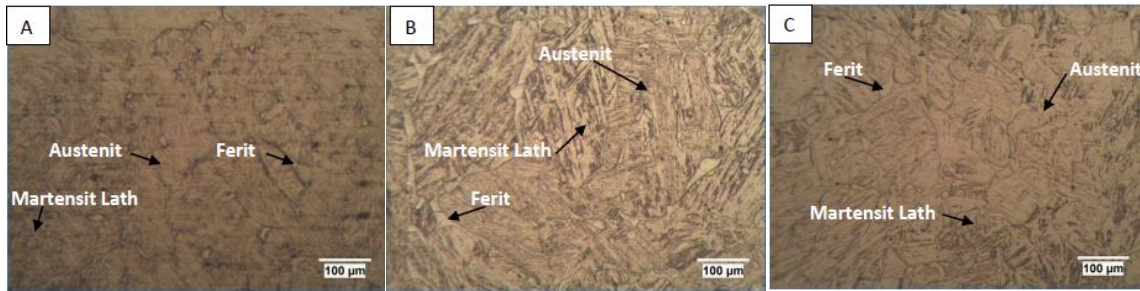
Pada material CA-15 ini dilakukan proses austenisasi pada suhu 1100°C dan kemudian dilakukan pendinginan udara. Dimana menurut Efendi Mabruhi (E. Mabruhi, et.al. 2015) mengatakan bahwa pada umumnya struktur mikro yang terbentuk pada baja martensitik setelah proses tempering adalah fasa martensitik berbentuk bilah (*lath*), ferit, karbida logam, austenisasi sisa, dan ferit delta.

Pada Gambar 2 struktur mikro yang terbentuk yaitu fasa martensitik *lath* dengan kandungan fasa martensitik 37,59% dan terdapat beberapa fasa austenit dan fasa ferit. Sehingga pada material austenisasi ini memiliki nilai kekerasan rendah seperti pada pembahasan pengujian kekerasan sebelumnya dimana nilai kekerasan material austenisasi ini yaitu 38.7 HRC.



Gambar 2. Struktur mikro baja tahan karat cor modifikasi CA-15 setelah Austenisasi 1100°C dengan pendinginan udara, etsa *kalling reagent*, pembesaran 200X.

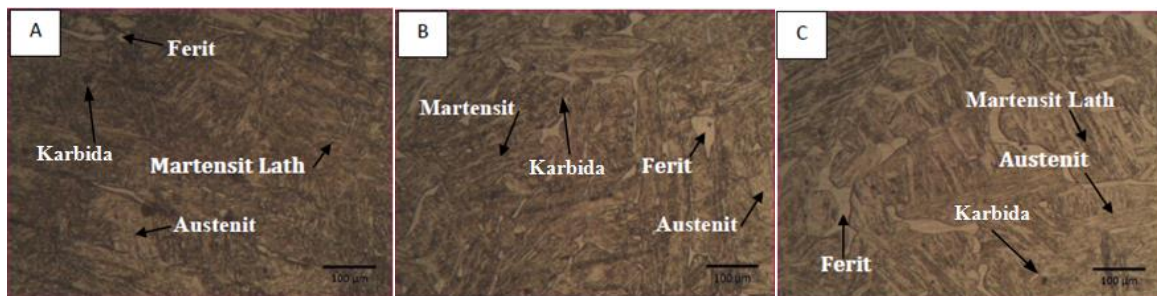
Gambar 3 menunjukkan sampel yang ditempering pada temperatur 300°C dan masing-masing ditahan selama 1 jam, 3 jam, dan 5 jam. Pada gambar tersebut dapat dilihat fasa yang terbentuk yaitu terdapatnya fasa martensitik *lath*, fasa austenit, dan terdapat fasa ferit. Pada gambar tersebut juga dapat dilihat dimana fasa martensitik *lath* mengalami penurunan jumlah dengan kandungan fasa martensitik pada Gambar 3A 35,41% , B 34,30% dan C 30,83%.



Gambar 3. Struktur mikro baja tahan karat cor modifikasi CA-15 setelah *tempering* 300°C selama: (a) 1 jam, (b) 3 jam, (c) 5 jam dengan pendinginan udara, etsa *kalling reagent*, pembesaran 200X

Gambar 4 adalah struktur mikro dari material CA-15 yang telah dilakukan tempering pada suhu 400°C dengan waktu masing-masing 1 jam, 3 jam, dan 5 jam. Fasa yang terbentuk seperti pada gambar sebelumnya yaitu fasa martensit lath, fasa austenit, dan fasa ferit. Dapat dilihat gambar tersebut berbeda dengan yang terjadi pada Gambar 4a, dimana seperti yang diketahui pada suhu temper 400°C terjadi peningkatan kekerasan yang disebabkan oleh

secondary hardening yang ditunjukkan oleh jumlah fasa martensit yang lebih banyak. Dimana pada temperatur temper 400°C fasa martensit jumlahnya mengalami peningkatan dengan kandungan fasa martensit pada Gambar 4 A 60,24%, B 56,41%, C 48,89%. Sehingga nilai kekerasan pada temperatur temper 400°C memiliki nilai kekerasan terbesar dari temperatur lainnya yaitu di waktu tahan 1 jam dengan nilai 54,53 HRC.



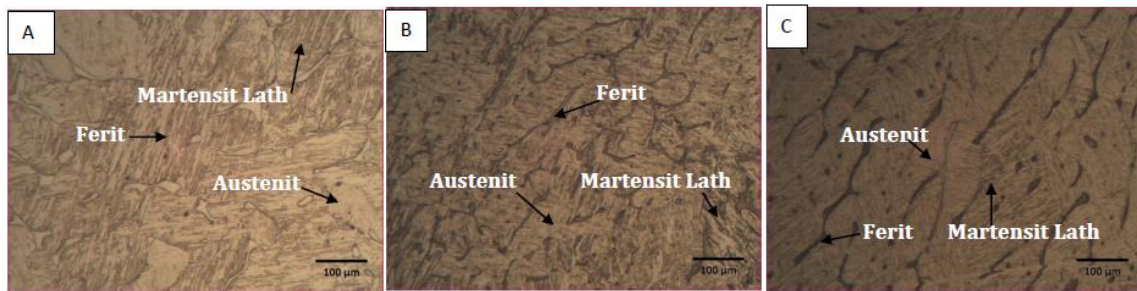
Gambar 4. Struktur mikro baja tahan karat cor modifikasi CA-15 setelah *tempering* 400°C selama (a) 1 jam, (b) 3 jam, (c) 5 jam dengan pendinginan udara, etsa *kalling reagent*, pembesaran 200X

Pada Gambar 5, temperatur temper 600°C struktur mikro yang terbentuk masih terlihat fasa martensit lath, fasa austenit, dan fasa ferit. Namun pada Gambar 5 mengalami perubahan yang cukup signifikan dibandingkan dengan pada Gambar 4. Perubahan tersebut dapat dilihat jumlah fasa martensit lath mengalami penurunan yaitu dengan kadar fasa martensit pada Gambar 5 A 45,59%, B 40,90%, dan C 38,43%. Hal ini menunjukkan bahwa seiring meningkatnya temperatur temper dan waktu tahan menyebabkan terjadinya perubahan jumlah fasa martensit *lath* dan menurunkan nilai kekerasan pada material. Kemudian penambahan fasa austenite dan fasa ferit yang terjadi dengan meningkatnya temperatur temper ini menurut Hadi Perdana (Hadi, et.al. 2017) fasa austenit akan bertambah pada temperatur tempering 500°C - 600°C. Hal ini dapat terjadi karena karbida logam yang

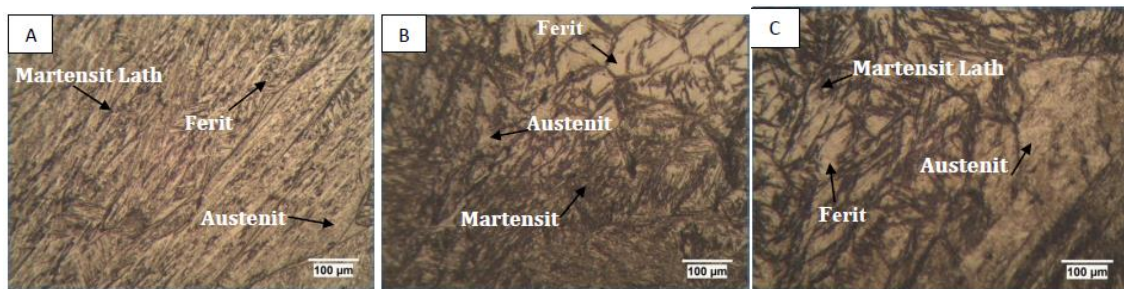
sudah terbentuk pada temperatur tempering 400°C - 500°C bertransformasi kembali menjadi fasa austenit sehingga menyebabkan fasa austenit bertambah.

Gambar 6 merupakan hasil tempering pada temperatur 700°C. Fasa yang terdapat pada gambar di atas yaitu fasa martensit *lath*, fasa austenit, dan fasa ferit. Fasa martensit *lath* terlihat jelas mengalami penurunan jumlahnya dengan fasa martensit pada Gambar 6 A 39,92%, B 38,79%, dan C 37,55%. Penurunan jumlah fasa martensit ini disebabkan oleh terdekomposisinya fasa martensit tersebut menjadi struktur fasa austenit akibat temperatur tempering terlalu tinggi. Sehingga hal tersebut menyebabkan Gambar 6 memiliki nilai kekerasan yang terendah dari pada temperatur temper lainnya yaitu sebesar 34,73 HRC yang terdapat pada waktu penahanan 5 jam. Hal ini bisa terjadi dikarenakan pada umumnya waktu

tahan yang digunakan pada proses tempering adalah 1 jam sampai 2 jam (ASM, 1991).



Gambar 5. Struktur mikro baja tahan karat cor modifikasi CA-15 setelah *tempering* 600°C selama (a) 1 jam, (b) 3 jam, (c) 5 jam dengan pendinginan udara, etsa *kalling reagent*, pembesaran 200X



Gambar 6. Struktur mikro baja tahan karat cor modifikasi CA-15 setelah *tempering* 700°C selama (a) 1 jam, (b) 3 jam, (c) 5 jam dengan pendinginan udara, etsa *kalling reagent*, pembesaran 200X

Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tahan *Tempering* Terhadap Ketahanan Abrasif

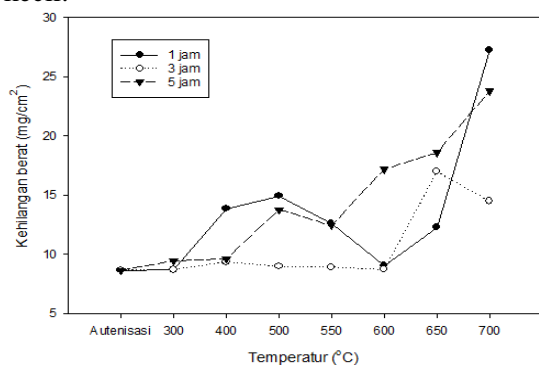
Pengujian abrasif ini mengacu pada ASTM G 132-96 yang dilakukan dengan menggunakan alat uji rotari abrasi ADAMEL LHOMARGY pada sampel berbentuk silinder dengan diameter 2,4 cm dan memiliki ketebalan 1 cm. Kemudian sampel tersebut diletakkan dibawah kertas silica dengan no.120 yang berputar dengan kecepatan 100 rpm sebanyak 1000 putaran dan dengan pembebanan 1000 gram. Hasil pengujian abrasif adalah kehilangan berat dengan satuan mg/cm² yang menunjukkan ketahanan abrasif.

Tabel 3. Ketahanan abrasif baja tahan karat cor modifikasi CA-15 setelah proses *tempering*

Temperatur (°C)	Ketahanan Abrasif (mg/cm ²)		
	1 jam	3 jam	5 jam
Austenisasi	8,64	8,64	8,64
300	8,68	8,69	9,40
400	13,8	9,35	9,61
500	14,92	8,96	13,75
550	12,60	8,90	12,40
600	9,01	8,70	17,00
650	12,25	16,97	18,57
700	27,25	14,47	23,79

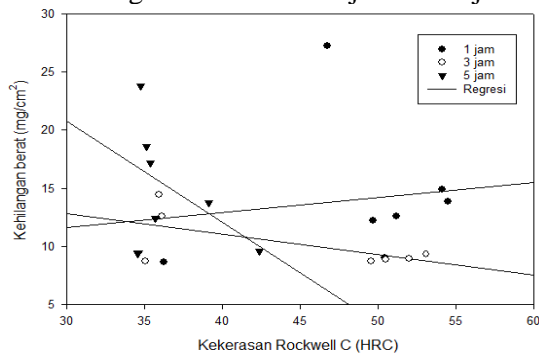
Pada Tabel 3 dan Gambar 7 merupakan data nilai ketahanan abrasif pada material yang telah dilakukannya perlakuan panas dengan variasi temperatur tempering. Pada material austenisasi yang tidak dilakukan proses tempering memiliki nilai ketahanan abrasif yang baik yaitu sebesar 8,64001 mg/cm², namun memiliki nilai kekerasan yang rendah sebesar 38,7 HRC. Kemudian untuk material yang mengalami kehilangan berat paling sedikit setelah dilakukan perlakuan panas terdapat pada temperatur tempering 300°C selama 1 jam waktu penahanan sebesar 8,67613 mg/cm² namun memiliki nilai kekerasan yang rendah 36,23 HRC. Berdasarkan gambar tersebut untuk variasi waktu tahan pada proses tempering baik 3 jam dan 5 jam memiliki bentuk grafik yang hampir sama yaitu mengalami kenaikan. Ketika temperature 300°C nilai ketahanan abrasif dengan waktu tahan 3 jam sebesar 8,69161 mg/cm² dengan nilai kekerasan 35,06 HRC sedangkan untuk waktu tahan 5 jam sebesar 9,40662 mg/cm² dengan nilai kekerasan 34,6 HRC. Kemudian perbedaannya terletak ketika temperatur tempering berada pada temperatur 600°C nilai ketahanan abrasif dengan waktu 5 jam mengalami peningkatan kehilangan berat menjadi 17,1841 mg/cm² dengan nilai

kekerasan 35,36 HRC. Sedangkan untuk waktu tahan 3 jam pada temperatur 600°C nilai ketahanan abrasif menurun menjadi 8,69825 mg/cm² dengan nilai kekerasan 49,56 HRC. Selain di temperatur 600°C perbedaannya juga terletak pada temperatur temper 700°C. Dimana pada saat temperatur tersebut nilai ketahanan abrasif pada waktu tahan 3 jam mengalami penurunan nilai kehilangan berat, namun nilai tersebut masih cukup tinggi yaitu sebesar 14,4712 mg/cm² dan memiliki nilai kekerasan 35,93 HRC. Pada Gambar 8 menunjukkan hubungan antara nilai kekerasan dengan ketahanan abrasif. Secara umum kekerasan merupakan hal penting dalam menentukan nilai ketahanan abrasif yang dihasilkan. Dimana semakin keras suatu material maka ketahanan abrasif yang dimiliki material tersebut akan semakin bagus. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 8 dimana waktu tahan 3 jam dan 5 jam memiliki bentuk yang sama yaitu menunjukkan semakin tinggi kekerasan maka nilai kehilangan berat semakin kecil.



Gambar 7. Ketahanan abrasifbaja tahan karat cor modifikasi CA-15 setelah proses tempering

Namun pada waktu tahan 1 jam di gambar tersebut memiliki bentuk yang berbeda sendiri dengan waktu tahan 3 jam dan 5 jam.



Gambar 8. Hubungan Kekerasan dengan ketahanan Abrasif

Pada waktu 1 jam dalam gambar di atas menunjukkan semakin tinggi nilai kekerasan yang dihasilkan semakin besar pula nilai kehilangan berat yang dihasilkan. Hal yang sama juga terjadi pada Gambar 7 dimana pada waktu tahan 1 jam memiliki bentuk yang berbeda dengan yang lainnya. Peristiwa yang terjadi pada waktu tahan 1 jam baik di Gambar 7 dan 8 disebabkan karena pengaruh karbida dan jumlah fasa austenit yang terbentuk dari proses perlakuan panas. Dimana fasa austenit dan karbida merupakan peran utama dalam menentukan nilai ketahanan abrasif dan nilai kekerasan yang dihasilkan. Sehingga hubungan antara kekerasan dengan ketahanan abrasif pada penelitian ini adalah semakin keras suatu material belum tentu memiliki ketahanan abrasif yang baik dan begitupun sebaliknya. Kemudian jika dibandingkan dengan data penelitian sebelumnya data penelitian ini lebih baik dari pada yang dilakukan oleh Moch. Syaiful (M.S. Anwar, et. al 2015). Pada penelitian ini di suhu 600°C dengan waktu tahan 1 jam menghasilkan kehilangan berat sebesar 9,00853 mg/cm². Sedangkan pada penelitian sebelumnya nilai kehilangan berat yang didapat yaitu sebesar 43,13 mg/cm² pada suhu 625°C dengan waktu tahan 1 jam.

Variasi suhu dan waktu optimal dalam penelitian

Menentukan variasi temperatur tempering dan waktu tahan terbaik dalam penelitian ini, dapat dicari dengan menggunakan metode statistik sederhana. Berdasarkan pada Tabel 4 yang merupakan hasil perhitungan statistik deskriptif didapatkan 3 variasi terbaik yaitu pada temperatur tempering 700°C yang ditahan selama 3 jam dan 5 jam dengan nilai kekerasan 35,93 HRC dan 34,73 HRC serta nilai kehilangan berat 14,476 mg/cm² dan 23,797 mg/cm².

Tabel 4. Perhitungan Statistik Variasi Suhu dan Waktu Terbaik

Austenisasi (°C)	Tempering		Kekerasan		Ketahanan abrasif		X1.X2	Persentase terbaik %
	Suhu (°C)	Waktu (jam)	HRC	x1	mg/cm ²	x2		
1100	-	-	38,7	0,709701	8,643	1	0,709701	70,97
	300	1	36,23	0,664405	8,6799	1	0,664405	66,44
		3	35,06	0,642949	8,6946	1	0,642949	64,29
		5	34,6	0,634513	9,41	0,924761	0,586773	58,68
	400	1	54,53	1	13,8421	0,628662	0,628662	62,87
		3	53,1	0,980972	9,3584	0,92986	0,912166	91,22
		5	42,4	0,783299	9,6091	0,9056	0,709356	70,94
	500	1	54,13	1	14,2035	0,612666	0,612666	61,27
		3	52,03	1	8,9675	0,970393	0,970393	97,04
		5	39,13	0,764258	13,753	0,632735	0,483572	48,36
	550	1	51,2	1	12,5737	0,692079	0,692079	69,21
		3	50,53	1	8,9011	0,977632	0,977632	97,76
		5	35,67	0,706897	12,418	0,700757	0,495363	49,54
	600	1	50,46	1	9,0117	0,965634	0,965634	96,56
		3	49,56	0,997785	8,702	1	0,997785	99,78
		5	35,36	0,711899	17,1902	0,712964	0,507558	50,76
	650	1	49,67	1	12,256	1	1	100,00
		3	36,13	0,773165	16,976	0,852733	0,659304	65,93
		5	35,1	0,751123	18,576	0,779285	0,585339	58,53
	700	1	46,73	1	27,2566	0,531101	0,531101	53,11
		3	35,93	1	14,476	1	1	100,00
		5	34,73	1	23,797	1	1	100,00

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan data yang telah diuraikan maka dapat diambil kesimpulan bahwa baja tahan karat martensitik CA-15 mengalami *secondary hardening* yang ditunjukkan dengan kenaikan nilai kekerasan terjadi pada temperatur 400°C dengan waktu tahan 1, 3, dan 5 jam sehingga baja menjadi keras dan getas dan tidak sesuai dengan kriteria sebagai sudu turbin. Temperatur dan waktu temper dapat mempengaruhi nilai kekerasan dan ketahanan abrasi. Baja martensitik cor modifikasi CA-15 yang telah ditemper pada temperatur 650 dan 700 °C dan waktu tahan 5 jam menghasilkan baja yang sesuai dengan kriteria sudu turbin uap dengan fasa martensit temper dengan nilai kekerasan HRC 35,1 dan 34,73 serta nilai kehilangan berat setelah uji abrasi sebesar 23,8 mg/cm².

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Pusat Penelitian Metalurgi dan Material (P2MM) LIPI yang telah memfasilitasi dan membimbing dalam pengujian melalui skema pendanaan Tematik 2018 dan terima kasih kepada jurusan teknik mesin UNTIRTA yang telah membimbing hingga proses penelitian selesai dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- ASM International Handbook Committee. 1991. "Heat Treating", ASM Metals Handbook, Volume 04, United States of America.
- Callister W.D, 2001, *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, Fifth Edition, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Davis, J. R. 2001. "Alloying: Understanding the basics". Materials Park, OH: ASM International.
- E. Mabruri, M. S. Anwar, S. Prifiharni, T. B. Romijarso, and B. Adjiantoro. 2016. "Tensile Properties of The Modified 13Cr Martensitic Stainless Steel." in *Proc. AIP Conference 1725*, pp. 020039-1-020039-5.
- E. Mabruri, M. S. Anwar, S. Prifiharni, T. B. Romijarso, and B. Adjiantoro. 2015. "Pengaruh Mo dan Ni Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Baja Tahan Karat Martensitik 13Cr." *Metalurgi*, vol. 3, pp. 133-140.
- Hadi Perdana, Moch Syaiful Anwar, Andinnie Juniarsih, Efendi Mabruri. 2017. "Pengaruh Temperatur dan Waktu Tahan Tempering Terhadap Kekerasan,

- Struktur Mikro dan Laju Korosi Pada Baja Tahan Karat Martensitik 13Cr3Mo3Ni.” *Metalurgi*, vol. 32, no. 1, pp. 37-44.
- Hwei-Yuan Teng, Cheng-Hsun. 2003. ”*Erosion Behavior of CA-15 Tempered Martensitic Stainless Steel.*” *Materials Transactions*, Vol. 44, No. 7 pp. 1480 – 1487.
- M.A. Gebril, Mohammad S. Aldlemey, A.F. Kablan. 2014. “Effect of austenization temperatures and times on hardness, microstructure and corrosion rate of high carbon steel, design and computation of modern engineering materials”, *Adv. Struct. Mater.* 54. pp. 4210–4428
- Moch. Syaiful Anwar dan Efendi Maburi. 2015. ”Ketahanan aus abrasif dari beberapa jenis modifikasi 13Cr baja tahan karat martensit,” *Majalah Metalurgi*, vol. 30, no.3, pp.149-154.
- Windra Sampurna dan Yusuf Kaelani. 2016. “Studi Eksperimen Proses Tempering Terhadap Kekerasan Permukaan dan Estimasi Keausan”. *JURNAL TEKNIK ITS* Vol. 5, No. 2.