

PENGARUH WAKTU TAHAN *POST-HEAT* DAN LAJU PENDINGINAN PROSES *COPPERIZING* TERHADAP STUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN *COPPERIZED-API 5L GRADE B*

Angga Septa Soetrisno, Sutarsis, S.T., M.Sc., dan Alvian Toto Wibisono, S.T., M.T.
Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
e-mail: sutarsis@mat-eng.its.ac.id

Abstrak— Tembaga merupakan salah satu unsur paduan yang dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja dengan mekanisme penguatan *solid-solution*. Dalam penelitian ini, dilakukan pemuatan tembaga dengan baja API 5L grade B menggunakan metode *copperizing*, yaitu mencelupkan baja API 5L grade B yang telah di *pre-heat* sebelumnya ke dalam tembaga cair. Selanjutnya dilakukan perlakuan *post-heat* pada temperatur 1100°C dengan variasi waktu tahan *post-heat*, yaitu 5, 10 15, dan 20 menit. Setelah diberi perlakuan *post-heat*, baja kemudian didinginkan dengan variasi laju pendinginan, yaitu *annealing*, *normalizing*, dan *quenching media air*. Setelah itu, dilakukan pengujian struktur mikro, *vickers hardness*, dan XRD. Pada penelitian ini, didapatkan hasil bahwa lama waktu tahan *post-heat* berpengaruh terhadap struktur mikro *copperized-API 5L grade B* berdasarkan laju pendinginannya. Pada laju pendinginan *annealing* terjadi pertumbuhan butir *polygonal ferrite*. Pada laju pendinginan *normalizing*, terjadi peningkatan jumlah fase *widmanstatten ferrite* secara visual pada struktur mikro baja. Pada laju pendinginan *quenching* terjadi peningkatan ukuran jarum-jarum *martensite* secara visual pada struktur mikro baja. Laju pendinginan proses *copperizing* juga memberikan pengaruh perubahan struktur mikro *copperized-API 5L grade B*. Pendinginan *annealing* menghasilkan fase *polygonal ferrite* dan *pearlite*. Pendinginan *normalizing* menghasilkan fase *grain-boundary ferrite*, *widmanstatten ferrite*, *acicular ferrite*, dan *pearlite*. Pendinginan *quenching* menghasilkan fase *martensite*. Kekerasan *copperized-API 5L grade B* yang dihasilkan setelah perlakuan *post-heat* dengan variasi waktu tahan pada proses *copperizing* adalah: pada laju pendinginan *annealing* dan *quenching*, nilai kekerasan turun seiring dengan bertambahnya waktu tahan *post-heat*, sedangkan pada laju pendinginan *normalizing* kekerasan bertambah seiring dengan bertambahnya waktu tahan *post-heat*. Pengaruh laju pendinginan terhadap kekerasan *copperized-API 5L grade B* adalah: kekerasan tertinggi dicapai oleh spesimen dengan laju pendinginan *quenching*, sedangkan kekerasan terendah dicapai oleh spesimen dengan laju pendinginan *annealing*.

Kata Kunci—API 5L Grade B, *Copperizing*, Laju Pendinginan, *Post-Heat*.

I. PENDAHULUAN

High-strength low-alloy (HSLA) steels atau disebut juga *micro-alloyed steel* merupakan salah satu kategori penting dari baja dan diperkirakan memiliki jumlah sebesar 12% dari total produksi baja di dunia. HSLA banyak

digunakan pada *oil and gas industry*, konstruksi, dan transportasi [1]. HSLA adalah baja dengan kadar karbon yang rendah (0.05 – 0.25% C) yang dipadukan dengan sejumlah kecil unsur paduan, seperti *niobium*, *titanium*, dan *vanadium* yang dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja melalui pembentukan karbida dan nitrida dalam baja. Selain *niobium*, *titanium*, dan *vanadium*, unsur paduan yang sering digunakan, yaitu tembaga yang dapat meningkatkan ketahanan korosi baja dan meningkatkan kekuatan baja melalui *solid-solution strengthening* tanpa mengurangi keuletan baja tersebut [2]. Tembaga yang ditambahkan pada baja larut dalam besi membentuk larutan padat dan menghaluskan ukuran butir *ferrite* sehingga meningkatkan kekuatan baja. Mekanisme penguatan baja tersebut dinamakan *grain-refinement* [3]. Pada penelitian ini dilakukan pemuatan baja dengan tembaga menggunakan metode *copperizing*, yaitu dengan mencelupkan baja yang telah di-*preheat* pada temperatur tertentu ke dalam tembaga cair. Setelah *copperizing*, baja diberikan perlakuan *post-heat*, yaitu dengan memanaskan baja pada temperatur 1100°C dengan waktu tahan tertentu agar tembaga yang belum sempat berdifusi ke dalam baja saat *copperizing* dapat berdifusi ke dalam baja sehingga tidak adanya lapisan tembaga pada permukaan baja. Setelah perlakuan *post-heat*, baja didinginkan dengan variasi laju pendinginan. Pengaruh dari variasi waktu tahan *post-heat* dan laju pendinginan proses *copperizing* terhadap struktur mikro dan kekerasan baja API 5L grade B akan dianalisis lebih lanjut dengan berbagai pengujian.

II. METODE PENELITIAN

A. Preparasi Spesimen

Preparasi spesimen meliputi preparasi spesimen kontrol dan spesimen *copperizing*. Preparasi tersebut dimulai dengan memotong lembaran baja API 5L grade B menggunakan gerinda tangan dan gergaji tangan hingga menjadi bentuk pelat dengan dimensi $p \times l \times t = 7 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 0.3 \text{ cm}$. Setelah itu, spesimen dikikir dan diampas permukaannya menggunakan amplas grade 80 untuk menghilangkan lapisan pengotor di permukaannya. Spesimen kontrol kemudian dipreparasi lebih lanjut untuk pengujian metalografi, kekerasan, dan XRD.

B. Preparasi dan Peleburan Tembaga

Sebelum dilebur di dalam furnace, tembaga terlebih dahulu dipreparasi dengan cara dipotong-potong dengan ukuran tertentu agar dapat masuk ke dalam crucible grafit. Setelah itu, crucible grafit dimasukkan ke dalam furnace dan dipanaskan sampai temperatur leleh tembaga (1100°C). Banyaknya tembaga yang dileburkan dalam sekali peleburan untuk copperizing adalah ± 1100 gram.

C. Pemanasan Awal Spesimen

Selama proses peleburan tembaga berlangsung, spesimen baja API 5L grade B yang akan di-copperizing dipanaskan terlebih dahulu dengan muffle furnace pada temperatur 950°C dengan holding time sepuluh menit.

Untuk menghasilkan spesimen kontrol I, spesimen yang telah dipanaskan tersebut kemudian didinginkan dengan variasi laju pendinginan, yaitu annealing (pendinginan lambat di dalam furnace), normalizing (pendinginan sedang menggunakan media udara), dan quenching dengan media air (pendinginan cepat).

D. Proses Copperizing Tanpa Post-Heat

Proses ini bertujuan untuk menghasilkan spesimen kontrol II. Setelah spesimen dipanaskan pada temperatur 950°C selama sepuluh menit, spesimen dikeluarkan satu per satu dari dalam muffle furnace dan dicelupkan ke dalam tembaga cair dengan menggunakan penjepit baja. Pencelupan dilakukan selama sepuluh menit untuk masing-masing spesimen. Setelah waktu celup tercapai, spesimen diangkat dari tembaga cair dan didinginkan dengan variasi laju pendinginan, yaitu annealing (pendinginan lambat di dalam furnace), normalizing (pendinginan sedang menggunakan media udara), dan quenching dengan media air (pendinginan cepat).

E. Proses Copperizing Dengan Post-Heat

Setelah spesimen dipanaskan pada temperatur 950°C selama sepuluh menit, spesimen dikeluarkan satu per satu dari dalam muffle furnace dan dicelupkan ke dalam tembaga cair dengan menggunakan penjepit baja. Pencelupan dilakukan selama sepuluh menit untuk masing-masing spesimen. Setelah waktu celup tercapai, spesimen diangkat dari tembaga cair dan diberikan perlakuan post-heat di dalam furnace pada temperatur 1100°C dengan variasi waktu tahan, yaitu 5, 10, 15, dan 20 menit. Setelah itu, spesimen didinginkan dengan variasi laju pendinginan, yaitu annealing (pendinginan lambat di dalam furnace), normalizing (pendinginan sedang menggunakan media udara), dan quenching dengan media air (pendinginan cepat).

F. Pengujian Spesimen

Untuk mengetahui kondisi spesimen kontrol I, spesimen kontrol II, dan spesimen akhir hasil copperizing dengan post heat, dilakukan beberapa pengamatan dan pengujian spesimen sebagai berikut:

a. Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan untuk melihat dan mengamati struktur mikro penampang melintang spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir. Prosedur yang dilakukan, yaitu: Memotong spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir dengan ukuran 1×1 cm. Melakukan mounting pada penampang melintang spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir menggunakan resin poliester dan katalis. Mengamplas spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir hasil mounting menggunakan kertas amplas yang berjenjang dimulai dari grade 80 sampai 2000 hingga membentuk goresan dengan orientasi arah yang sama sambil dialiri air. Setiap pergantian kertas amplas menuju grade yang lebih tinggi, arah orientasi goresan diubah menjadi tegak lurus dengan arah orientasi goresan sebelumnya. Memoles spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir menggunakan mesin polish dan kain bludru dengan sebelumnya mengoleskan metal polish Autosol pada permukaan spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir. Mengetsa spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir dengan menggunakan etsa 2% Nital (HNO_3 1ml, methanol 95% 50 ml). Mengamati spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir dengan mikroskop optic. Menganalisis hasil pengamatan struktur mikro spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir.

b. Pengujian Kekerasan Vickers

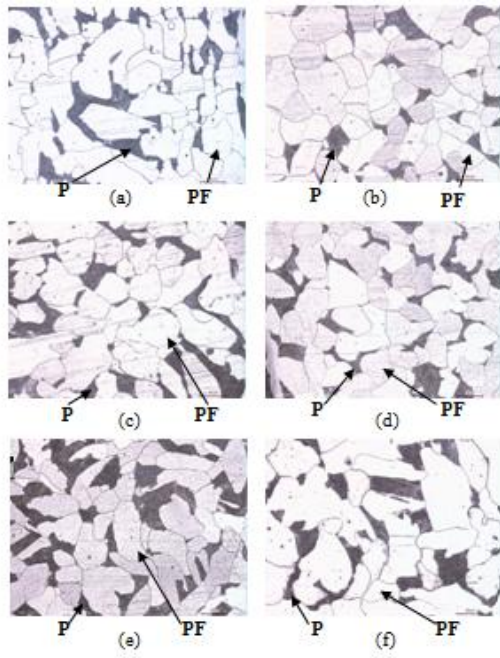
Pengujian kekerasan vickers dilakukan untuk mengukur kekerasan penampang melintang bagian tepi spesimen baja API 5L grade B tanpa copperizing, copperizing, dan copperizing dengan post-heat pada laju pendinginan annealing, normalizing, dan quenching. Prosedur yang dilakukan, yaitu: Memotong spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir dengan ukuran 1×1 cm. Melakukan preparasi permukaan sebelum uji hardness. Melakukan uji vickers hardness dengan beban 30 kgf dan waktu indentasi 10 detik pada bagian tepi penampang melintang kontrol I, kontrol II, dan akhir.

III. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengamatan Struktur Mikro

Hasil pengamatan struktur mikro spesimen dengan laju pendinginan annealing ditunjukkan oleh gambar 1 di bawah ini. Pada gambar tersebut, secara keseluruhan, fase yang terlihat pada struktur mikro spesimen baja API 5L grade B dengan pendinginan annealing adalah polygonal ferrite yang berwarna terang dan pearlite yang berwarna gelap pada batas butir polygonal ferrite [4].

Pengaruh penambahan tembaga pada baja melalui proses copperizing terhadap struktur mikro baja API 5L grade B annealing adalah adanya pengecilan/penghalusan ukuran butir ferrite. Luas butir ferrite rata-rata sebelum copperizing adalah $20558.503 \mu\text{m}$, sedangkan setelah copperizing adalah $7150.4336 \mu\text{m}$. Data tersebut dapat dilihat pada tabel 1 dan menunjukkan adanya pengecilan/penghalusan oleh tembaga yang larut dalam baja. Penambahan tembaga sebagai unsur paduan ke dalam baja menghaluskan butir ferrite [5].



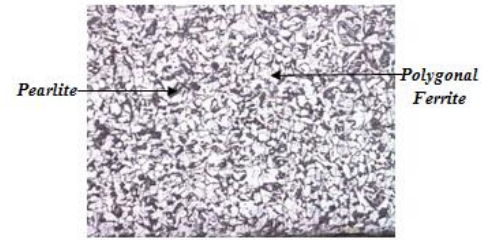
Gambar 1. Hasil Pengambilan Struktur Mikro Bagian Tepi Baja API 5L grade B pendinginan *annealing* dengan perbesaran 200x: (a) Tanpa *Copperizing* (b) *Copperizing* 10 menit (c) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 5 menit (d) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 10 menit (e) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 15 menit (f) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 20 menit.

Pengaruh waktu tahan *post-heat* pada struktur mikro baja API 5L grade B *annealing* adalah adanya peningkatan ukuran butir *ferrite*. Pada tabel 1 dapat dilihat bahwa luas rata-rata butir *ferrite* semakin meningkat seiring dengan bertambahnya waktu tahan *post-heat* sehingga dapat disimpulkan terjadinya pertumbuhan butir *austenite* saat perlakuan *post-heat* pada temperatur 1100°C berlangsung. Semakin lama waktu tahan pemanasan baja saat temperatur austenitisasi menyebabkan butir *austenite* mendapat energi untuk tumbuh (*grain growth*) menjadi semakin besar sehingga apabila didinginkan maka akan didapatkan struktur mikro akhir dengan butir yang berukuran besar pula [6].

Tabel 1 Hasil Perhitungan Luas Butir *Ferrite* Rata-Rata Spesimen Baja API 5L Grade B Dengan Laju Pendinginan *Annealing*

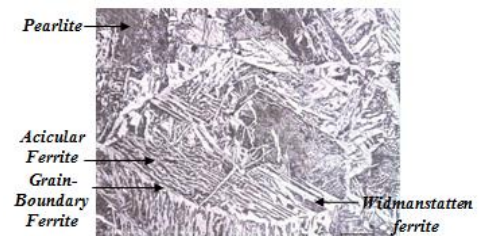
Spesimen	Luas Rata-Rata Butir <i>Ferrite</i> (μm)
Tanpa Cu	20558.503
10" Cu Tanpa PH	7150.4336
10" Cu PH 5"	8091.052
10" Cu PH 10"	9881.96
10" Cu PH 15"	10885.964
10" Cu PH 20"	12382.868

Hasil pengamatan struktur mikro spesimen baja API 5L grade B tanpa *copperizing normalizing* adalah sebagai berikut:



Gambar 2. Hasil Pengambilan Struktur Mikro Bagian Tepi Baja API 5L grade B Tanpa *Copperizing* pendinginan *normalizing* dengan perbesaran 200x

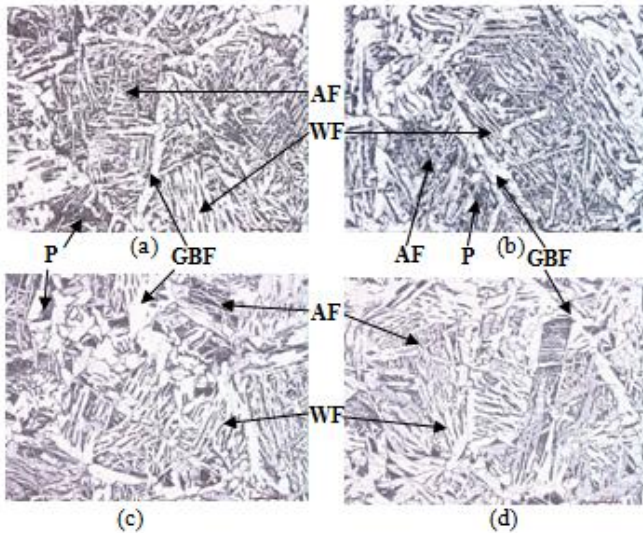
Gambar 2 diatas menunjukkan struktur mikro bagian tepi spesimen tanpa *copperizing*. Pada gambar tersebut fase yang terlihat adalah *polygonal ferrite/equiaxed ferrite* yang berwarna terang dan *pearlite* [4].



Gambar 3. Hasil Pengambilan Struktur Mikro Bagian Tepi Baja API 5L grade B 10 menit *copperizing* pendinginan *normalizing* dengan perbesaran 200x

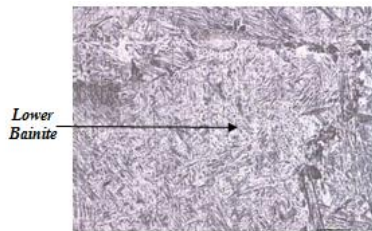
Gambar 3 diatas menunjukkan struktur mikro bagian tepi spesimen *copperizing* 10 menit. Pada gambar tersebut fase yang terlihat adalah *grain boundary ferrite*, *widmanstatten ferrite*, *acicular ferrite*, dan *pearlite*. Pengaruh penambahan tembaga pada baja melalui proses *copperizing* terhadap struktur mikro baja API 5L grade B *normalizing* adalah munculnya fase *ferrite* dengan morfologi yang berbeda Hal tersebut menandakan bahwa penambahan tembaga sebagai unsur paduan ke dalam baja akan menggeser kurva transformasi baja ke kanan sehingga dengan laju pendinginan yang sama (*normalizing*) akan menghasilkan struktur mikro dengan fase yang berbeda pada baja *copperized* [7]. Semua unsur paduan, kecuali *cobalt*, menggeser kurva transformasi baja ke kanan [8].

Gambar 4 dibawah ini menunjukkan struktur mikro spesimen *normalizing* dengan variasi waktu tahan *post-heat*. Secara keseluruhan, fase yang terlihat adalah *grain boundary ferrite*, *widmanstatten ferrite*, *acicular ferrite*, dan *pearlite*. Pengaruh waktu tahan *post-heat* pada struktur mikro baja API 5L grade B *normalizing* adalah bertambahnya jumlah fase *widmanstatten ferrite* secara visual pada struktur mikro baja. Jumlah fase *widmanstatten ferrite* pada baja meningkat seiring dengan meningkatnya ukuran butir *austenite* [9].



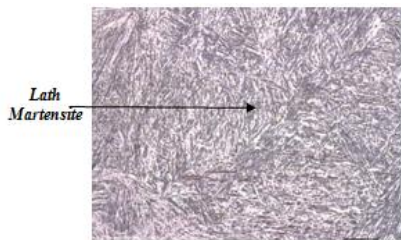
Gambar 4. Hasil Pengambilan Struktur Mikro Bagian Tepi Baja API 5L grade B 10 menit *copperizing* pendinginan *normalizing* dengan perbesaran 200x: (a) *post-heat* 5" (b) *post-heat* 10 " (c) *post-heat* 15" (d) *post-heat* 20"

Hasil pengamatan struktur mikro spesimen baja API 5L grade B tanpa *copperizing quenching* adalah sebagai berikut



Gambar 5. Hasil Pengambilan Struktur Mikro Bagian Tepi Baja API 5L grade B Tanpa *Copperizing* Pendinginan *Quenching* Dengan Perbesaran 500x

Gambar 5 diatas menunjukkan struktur mikro bagian tepi spesimen tanpa *copperizing quenching*. Pada gambar tersebut fase yang terlihat adalah *lower bainite* dengan presipitasi *cementite* yang berbentuk jarum berwarna hitam pada butir matriks *ferrite* [10].

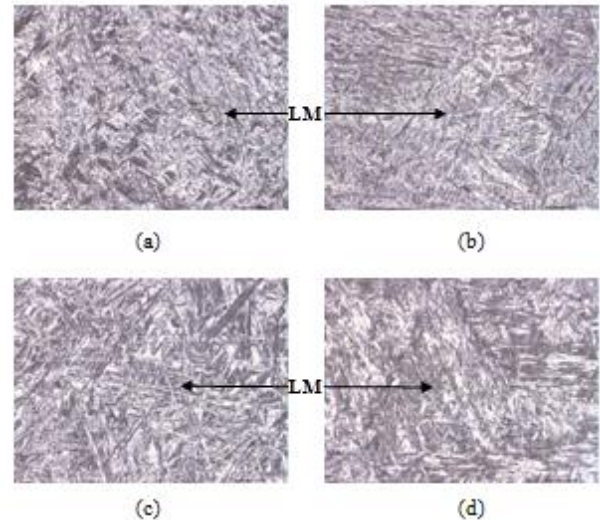


Gambar 6 Hasil Pengambilan Struktur Mikro Bagian Tepi Baja API 5L grade B *Copperizing* Pendinginan *Quenching* Dengan Perbesaran 500x

Gambar 6 diatas menunjukkan struktur mikro bagian tepi spesimen *copperizing quenching*. Pada gambar tersebut fase yang terlihat adalah *lath martensite*. Pada struktur mikro *lath martensite*, jarum-jarum *martensite* yang berwarna hitam cenderung mengelompok membentuk suatu "grup" dengan orientasi arah yang sama [10].

Pengaruh proses *copperizing* terhadap struktur mikro baja API 5L grade B *quenching* adalah munculnya fase yang

berbeda pada spesimen *copperizing* dengan laju pendinginan yang sama (*quenching*) jika dibandingkan dengan spesimen tanpa *copperizing*. Hal tersebut menandakan bahwa penambahan tembaga sebagai unsur paduan pada baja menggeser kurva transformasi baja ke kanan sehingga terjadi pembentukan fase *lath martensite* pada baja *copperizing* dengan laju pendinginan *quenching* media air [7]. Semua unsur paduan, kecuali *cobalt*, menggeser kurva transformasi baja ke kanan [8].



Gambar 7 Hasil Pengambilan Struktur Mikro Bagian Tepi Baja API 5L grade B 10 menit *copperizing* pendinginan *quenching* dengan perbesaran 500x: (a) *post-heat* 5" (b) *post-heat* 10 " (c) *post-heat* 15" (d) *post-heat* 20"

Gambar 7 diatas ini menunjukkan struktur mikro spesimen *quenching* dengan variasi waktu tahan *post-heat*. Secara keseluruhan, fase yang terlihat adalah *lath martensite* dengan ukuran jarum-jarum *martensite* meningkat secara visual seiring dengan bertambahnya waktu tahan *post-heat*. Ukuran jarum-jarum *martensite* semakin membesar seiring dengan peningkatan ukuran butir *austenite* saat temperatur *austenitisasi* sebelum *quenching* [11].

B. Hasil Pengujian Kekerasan Vickers

Hasil pengujian kekerasan *vickers* spesimen dengan laju pendinginan *annealing* dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2 Hasil Pengujian *Vickers Hardness* Spesimen Baja API 5L Grade B Laju Pendinginan *Annealing* Dengan Pembebanan 30 kgf

Perlakuan	VHN
Tanpa Cu	105
10" Cu	128
10" Cu PH 5"	116
10" Cu PH 10"	114
10" Cu PH 15"	112
10" Cu PH 20"	107

Peningkatan kekerasan pada spesimen *copperizing annealing* disebabkan karena penambahan tembaga dalam baja menghaluskan butir *ferrite* sehingga kekerasan baja meningkat [5]. Penurunan kekerasan pada spesimen *copperizing annealing* dengan variasi waktu tahan *post-heat* disebabkan karena adanya pertumbuhan butir

austenite saat perlakuan *post-heat* berlangsung sehingga didapat *ferrite* dengan ukuran butir yang semakin besar seiring bertambahnya waktu tahan *post-heat*. *Ferrite* dengan ukuran butir yang semakin besar menyebabkan semakin berkurangnya nilai kekerasan baja [6].

Hasil pengujian kekerasan *vickers* spesimen dengan laju pendinginan *normalizing* dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3 Hasil Pengujian *Vickers Hardness* Spesimen Baja API 5L Grade B Laju Pendinginan *Normalizing* Dengan Pembebanan 30 kgf

Perlakuan	VHN
Tanpa Cu	159
10" Cu	172.67
10" Cu PH 5"	180.33
10" Cu PH 10"	187.67
10" Cu PH 15"	193.67
10" Cu PH 20"	198.33

Peningkatan kekerasan pada spesimen *copperizing normalizing* disebabkan karena terbentuknya fase *acicular ferrite* dan *widmanstatten ferrite* pada struktur mikro spesimen *copperizing normalizing*. Semakin bertambahnya jumlah fase *widmanstatten ferrite* pada baja maka semakin meningkat kekerasan baja [9]. Selain itu, *acicular ferrite* juga dapat meningkatkan kekerasan baja karena *acicular ferrite* lebih keras daripada *polygonal ferrite* [12].

Peningkatan kekerasan pada spesimen *copperizing normalizing* dengan variasi waktu tahan *post-heat* disebabkan karena peningkatan jumlah fase *widmanstatten ferrite* pada baja akibat pertumbuhan butir *austenite* saat perlakuan *post-heat* berlangsung. Nilai kekerasan baja semakin meningkat seiring dengan peningkatan jumlah fase *widmanstatten ferrite* pada baja [9].

Hasil pengujian kekerasan *vickers* spesimen dengan laju pendinginan *quenching* dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4 Hasil Pengujian *Vickers Hardness* Spesimen Baja API 5L Grade B Laju Pendinginan *Normalizing* Dengan Pembebanan 30 kgf

Perlakuan	VHN
Tanpa Cu	389.33
10" Cu	472.67
10" Cu PH 5"	452.67
10" Cu PH 10"	446.67
10" Cu PH 15"	436
10" Cu PH 20"	409.67

Peningkatan kekerasan pada spesimen *copperizing quenching* disebabkan karena terbentuknya fase *lath martensite*, sedangkan pada spesimen tanpa *copperizing* fase yang terbentuk adalah *lower bainite*. Fase *lath martensite* memiliki nilai kekerasan yang lebih besar daripada fase *lower bainite*.

Penurunan kekerasan pada spesimen *copperizing quenching* dengan variasi waktu tahan *post-heat* disebabkan karena terbentuknya fase *martensite* dengan ukuran jarum-jarum *martensite* yang semakin besar seiring dengan peningkatan waktu tahan *post-heat*. Waktu tahan *post-heat* yang semakin lama menyebabkan butir *austenite* tumbuh semakin besar sehingga ketika di-*quench* menghasilkan struktur mikro akhir berupa *martensite* dengan jarum-jarum

yang besar (kasar). Semakin besar ukuran jarum *martensite*, maka densitas dislokasinya semakin berkurang sehingga kekerasannya semakin berkurang [11].

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data yang telah dilakukan dalam penelitian ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Struktur mikro *copperized-API 5L grade B* yang dihasilkan setelah perlakuan *post-heat* dengan variasi waktu tahan pada proses *copperizing* mengalami perubahan berdasarkan laju pendinginannya. Pada laju pendinginan *annealing* terjadi pertumbuhan butir *polygonal ferrite*. Pada laju pendinginan *normalizing* terjadi peningkatan jumlah fase *widmanstatten ferrite* secara visual pada struktur mikro baja. Pada laju pendinginan *quenching* terjadi peningkatan ukuran jarum-jarum *martensite* secara visual pada struktur mikro baja.
2. Laju pendinginan proses *copperizing* juga memberikan pengaruh perubahan struktur mikro *copperized-API 5L grade B*. Pendinginan *annealing* menghasilkan fase *polygonal ferrite* dan *pearlite*. Pendinginan *normalizing* menghasilkan fase *grain-boundary ferrite*, *widmanstatten ferrite*, *acicular ferrite*, dan *pearlite*. Pendinginan *quenching* menghasilkan fase *martensite*.
3. Kekerasan *copperized-API 5L grade B* yang dihasilkan setelah perlakuan *post-heat* dengan variasi waktu tahan pada proses *copperizing* adalah: pada laju pendinginan *annealing* dan *quenching*, nilai kekerasan turun seiring dengan bertambahnya waktu tahan *post-heat*, sedangkan pada laju pendinginan *normalizing* kekerasan bertambah seiring dengan bertambahnya waktu tahan *post-heat*.
4. Pengaruh laju pendinginan terhadap kekerasan *copperized-API 5L grade B* adalah: kekerasan tertinggi dicapai oleh spesimen dengan laju pendinginan *quenching*, sedangkan kekerasan terendah dicapai oleh spesimen dengan laju pendinginan *annealing*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Morrison, W. B. 2000. *Overview of Microalloying in Steel*. Vanitec Symposium.
- [2] Skobir, Danijela A. 2011. *High-Strength Low-Alloy (HSLA) Steels*. Ljubljana: Materials and Technology 45 (2011) 4, 295-301
- [3] Kluken, A. O, T. A. Siewert, dan R. Smith. 1994. *Effects of Copper, Nickel, and Boron on Mechanical Properties of Low-Alloy Steel Weld Metals Deposited at High Heat Input*. Welding Research Supplement hal. 193-198.
- [4] Krauss, George. 2005. *Steels: Processing, structure, and performance*. ASM International

- [5] Ghosh, S. K., A. Haldar, dan P. P. Chattopadhyay. 2008. *The influence of copper addition on microstructure and mechanical properties of thermomechanically processed microalloyed steels*. Material Science (2009) 44: 580-590: Springer.
- [6] Klaric, Stefaniya. 2009. *The Influence of Austenizing Parameters On The Grain Size of Hypoeutectoid Steel*
- [7] Messler, Jr. 1999. *Principles of Welding*. John Wiley & Sons: New York
- [8] Suherman, W. 1999. *Ilmu Logam II*. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS
- [9] Bodnar, R. L. 1994. *Effects of Austenite Grain Size and Cooling Rate on Widmanstatten Ferrite Formation in Low Alloy Steels*
- [10] _____. 1990. *ASM Metals Handbook Vol. 9: Metallography, Steels, and High Performance Alloys*. Ohio: ASM International
- [11] Prawoto, Y. 2011. *Effect of Prior Austenite Grain Size on The Morphology and Mechanical Properties of Martensite in Medium Carbon Steel*.
- [12] Gharavol, M.H. Avazkonandeh; M. Haddad Sabzevar; A. Haerian. 2009. *Effect of Copper Content on the Microstructure and Mechanical Properties of Multipass MMA, Low Alloy Steel Weld Metal Deposits*. Material and Design 30, 1902-1912: Elsevier Ltd.