TUGAS AKHIR - TL141584

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

ANGGA SEPTA SOETRISNO
NRP. 2712 100 063

Dosen Pembimbing:
Sutarsis, ST., M.Sc.
Alvian Toto Wibisono, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL & METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

(halaman ini sengaja dikosongkan)

FINAL PROJECT – TL141584

EFFECTS OF POST-HEAT HOLDING TIMES AND COOLING RATE OF COPPERIZING PROCESS TO MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF COPPERIZED-API 5L GRADE B

ANGGA SEPTA SOETRISNO
NRP. 2712 100 063

Advisor:
Sutarsis, S.T., M.Sc.
Alvian Toto Wibisono, ST., MT.

MATERIALS & METALLURGICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGIES
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2016

(this page left intentionally blank)

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

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Metalurgi Manufaktur
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
ANGGA SEPTA SOETRISNO
NRP 2712100063

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Sutarsis, S.T., M.Sc. ..... (Pembimbing 1)
2. Alvian Toto Wibisono, ST. MT. .....(Pembimbing 2)

KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI

Surabaya,
Juli 2016

(halaman ini sengaja dikosongkan)

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

Nama	:	Angga Septa Soetrisno
NRP	:	2712100063
Jurusan	:	Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
Dosen Pembimbing	:	Sutarsis, S.T., M.Sc.
Dosen Co-Pembimbing	:	Alvian Toto Wibisono, ST, MT.

ABSTRAK

Tembaga merupakan salah satu unsur paduan yang dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja dengan mekanisme penguatan solid-solution. Dalam penelitian ini, dilakukan pemaduan 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^{o}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*, *post-heat*, laju pendinginan.

EFFECTS OF POST-HEAT HOLDING TIMES AND COOLING RATE OF COPPERIZING PROCESS TO MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF COPPERIZED-API 5L GRADE B

Name	: Angga Septa Soetrisno
NRP	: 2712 100 063
Department	: Materials and Metallurgical Enginering FTI-ITS
Advisor	: Sutarsis, S.T., M.Sc.
Co-Advisor	: Alvian Toto Wibisono, ST, MT.

ABSTRACT

Copper is one of the alloying elements in steel that can increase strength and hardness of steel through solid-solution strengthening mechanism. In this research, API 5L grade B is alloyed with copper using copperizing method, by immersing pre-heated API 5L grade B into molten copper. After that, steel is given a treatment called post-heat at 1100^{o}C with holding time variation, that is 5, 10, 15, and 20 minutes. After post-heat, steel is cooled off with variation of cooling rate (annealing, normalizing, and quenching using water). After that, steel is tested to observed the microstructure, hardness (using vickers hardness), and XRD. In this research, the effect of post-heat holding time to microstructure is based on the cooling rate. In annealing, the polygonal ferrite grains are growth with increasing the holding time. In normalizing, widmanstatten ferrite fraction volume is increased visually in microstructure. In quenching, the lath martensite become bigger visually in microstructure. Effect of cooling rates are: in annealing, the formed phase are polygonal ferrite and pearlite. In normalizing, the phase are grain boundary ferrite, widmanstatten ferrite, acicular ferrite, and pearlite. In quenching, the phase is martensite. The hardness of copperized-API 5L grade B after post-heat treatment is: in annealing and quenching the hardness

is decreased but in normalizing the hardness is increased with increasing post-heat holding time. The effect of cooling rates toward hardness of copperized-API 5L grade B are: the highest hardness is achieved by specimen with quenching cooling rate and the lowest hardness is achieved by specimen with annealing cooling rate.

Keywords: API 5L *grade* B, *copperizing, post-heat, cooling rates.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir beserta laporan Tugas Akhir dengan baik tanpa suatu halangan apapun dengan judul:

"Pengaruh Waktu Tahan *Post-Heat* Dan Laju Pendinginan Proses *Copperizing* Terhadap Struktur Mikro Dan Kekerasan *Copperized*-API 5L *Grade* B "

Laporan tugas akhir ini disusun untuk memenuhi syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir ini, penulis mendapat bimbingan, bantuan, petunjuk serta saran-saran dari berbagai pihak. Untuk itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Allah SWT, yang telah melimpahkan kemudahan, kelancaran, kesehatan, kekuatan, dan ridho-Nya;
2. Orang tua dan keluarga penulis yang selalu mendoakan dan memberi semangat serta memberikan dukungan kepada penulis;
3. Siti Afrianingsih;
4. Bapak Sutarsis S.T., M.Sc selaku dosen pembimbing Tugas Akhir;
5. Bapak Alvian Toto Wibisono, ST, MT., selaku *co*-pembimbing Tugas Akhir;
6. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS;
7. Dosen Tim Penguji seminar dan sidang, serta seluruh dosen dan staff Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS;
8. Kepada para petugas dan karyawan Laboratorium Metalurgi dan Laboratorium Manufaktur Teknik Material dan Metalurgi yaitu Pak Anto, Pak Tari , Pak Chanan serta Mbak Is, laboran Divisi Karakterisasi Material Teknik Material dan

Metalurgi yang selalu membantu dalam pengerjaan Tugas Akhir penulis;

9. Seluruh teman-teman anggota Laboratorium Metalurgi;
10. Seluruh anggota Himpunan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS.
11. Seluruh pihak yang tidak mampu penulis sebutkan satu per satu yang telah membantu kelancaran Tugas Akhir ini. Terima kasih banyak atas segala do'a dan dukungannya. Semoga Allah SWT membalas dengan balasan yang terbaik. Amin yaa robbal allamin.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kesalahan dan kekurangan dalam laporan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat baik bagi penulis, pembaca, maupun pihak-pihak lain.

Surabaya, Juli 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
LEMBAR PENGESAHAN v
ABSTRAK vii
ABSTRACT ix
KATA PENGANTAR xi
DAFTAR ISI xiii
DAFTAR GAMBAR xvii
DAFTAR TABEL xxiii
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 2
1.3 Batasan Masalah 2
1.4 Tujuan Penelitian 2
1.5 Manfaat Penelitian 2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 3
2.1 Susunan Paduan 3
2.1.1 Larutan Padat 3
2.1.2 Mekanisme Perubahan Sifat Mekanik Akibat Proses Pemaduan Logam 5
2.2 Baja Paduan 6
2.2.1 Kelompok Unsur Paduan 6
2.2.2 Pengaruh Unsur Paduan Pada Baja 8
2.3 Baja 11
2.3.1 Diagram Fase Fe-Fe_3C 12
2.3.2 Baja API 5L *Grade* B 21
2.4 Tembaga 22
2.5 Difusi 23
2.5.1 Difusi Tembaga Dalam Baja 24
2.6 Mekanisme Penguatan Pada Baja Melalui *Solid-Solution Strengthening* 26
2.7 Klasifikasi Struktur Mikro *Ferritic* 27
2.7.1 *Polygonal* atau *Equiaxed Ferrite* 28
2.7.2 *Widmanstatten Ferrite* 29

2.7.3 *Acicular Ferrite* 29
2.8 Penelitian Sebelumnya 30
2.8.1 *The Influence of Copper Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Thermomechanically Processed Microalloyed Steels*.... 30
2.8.2 *Effect of Copper Content On The Microstructure and Mechanical Properties of Multipass MMA, Low Alloy Steel Weld Metal Deposits* 34
2.8.3 *The Influence of Austenizing Parameters On the Grain Size Of Hypoeutectoid Steel* 36
2.8.4 *Effect of Prior Austenite Grain Size on The Morphology and Mechanical Properties of Martensite in Medium Carbon Steel*..... 37
2.8.5 *Effect of Austenite Grain Size and Cooling Rate On Widmanstatten Ferrite Formation in Low Alloy Steels* 41
BAB III METODOLOGI 47
3.1 Alat dan Bahan Percobaan..... 47
3.1.1 Bahan-bahan penelitian..... 47
3.1.2 Alat-alat penelitian 47
3.2 Diagram Alir 49
3.3 Prosedur Penelitian 50
3.3.1 Preparasi Spesimen..... 50
3.3.2 Preparasi dan Peleburan Tembaga 51
3.3.3 Pemanasan Awal Spesimen 51
3.3.4 Proses *Copperizing* Tanpa *Post-Heat* 52
3.3.5 Proses *Copperizing* Dengan *Post-Heat*..... 52
3.3.6 Pengujian Spesimen..... 53
3.4 Rancangan Penelitian 55
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN 57
4.1 Hasil Pengamatan Makro..... 57
4.2 Hasil Pengujian XRD 68
4.2.1 Spesimen Baja API 5L *Grade* B Dengan Laju Pendinginan *Annealing* 69

4.2.2 Spesimen Baja API 5L *Grade* B Dengan Laju Pendinginan *Normalizing* 71

4.2.3 Spesimen Baja API 5L *Grade* B Dengan Laju Pendinginan *Quenching* 74
4.3 Hasil pengamatan struktur mikro 77
4.3.1 Hasil pengamatan struktur mikro laju pendinginan *annealing* 77
4.3.2 Hasil pengamatan struktur mikro laju pendinginan *normalizing* 82
4.3.3 Hasil pengamatan struktur mikro laju pendinginan *quenching* 88
4.4 Pengujian kekerasan *vickers* 92
4.4.1 Pengujian Kekerasan *Vickers* Spesimen Dengan Laju Pendinginan *Annealing* 93
4.4.2 Pengujian Kekerasan *Vickers* Spesimen Dengan Laju Pendinginan *Normalizing* 95
4.4.3 Pengujian Kekerasan *Vickers* Spesimen Dengan Laju Pendinginan *Quenching* 97
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 99
5.1 Kesimpulan 99
5.2 Saran 100
DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN
BIODATA PENULIS

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Susunan atom dalam kristal di sekitar atom *solute* pada larutan padat (a) substitusional dan (b) interstisial menunjukkan adanya distorsi.... 5

Gambar 2.2 Peningkatan kekerasan *ferrite* oleh beberapa unsur paduan 8

Gambar 2.3 Pengaruh kadar Cr pada luas daerah *austenite*. 9

Gambar 2.4 Ilustrasi pengaruh unsur paduan terhadap diagram transformasi CCT baja..... 10

Gambar 2.5 Pengaruh kadar Cr terhadap penurunan kekerasan setelah *tempering* 11

Gambar 2.6 Kurva pendinginan besi murni 12

Gambar 2.7 Diagram Fase Fe-Fe_3C 13

Gambar 2.8 Struktur mikro *ferrite* dan *pearlite* baja *hypoeutectoid* 16

Gambar 2.9 Struktur mikro *pearlite* dan *cementite* baja *hypereutectoid* 17

Gambar 2.10 Struktur mikro *ledeburite* 17

Gambar 2.11 Ilustrasi fase *martensite:* (a) *lath martensite* (b) *plate martensite* 18

Gambar 2.12 Struktur mikro: (a) *Lath martensite* pada Fe-0.2% C *binary alloy,* etsa 2% nital 500x (b) *plate martensite* pada baja 0.93% C-1.45% Mn, etsa 2% nital 1000x 19

Gambar 2.13 Ilustrasi beberapa stuktur *ferrite* (putih) dan *cementite* (hitam) yang teridentifikasi sebaga *bainite:* (a) *nodular bainite* (b) *columnar bainite* (c) *upper bainite* (d) *lower bainite* (e) *grain boundary allotriomorphic bainite.* (f) *inverse bainite*..... 20

Gambar 2.14 *Upper bainite* (berwarna gelap) pada baja 4150. Etsa nital, 500x 20

Gambar 2.15 *Lower bainite* pada baja 4360. Perbesaran 750x 21

Gambar 2.16 (a) *X-ray map* yang menunjukkan daerah *interface* baja-tembaga (b) Hasil SEM menunjukkan difusi tembaga pada batas butir baja (c) Hasil *x-ray mapping* menunjukan difusi tembaga pada batas butir baja 25
Gambar 2.17 Pengaruh penguatan *solid-solution* pada *ferrite-pearlite* HSLA *steels*..... 26
Gambar 2.18 Temperatur mulai terjadinya transformasi sebagai fungsi dari: (a) laju pendinginan (b) kurva transformasi berbagai produk transformasi *austenite* pada Fe-0.01% C..... 27
Gambar 2.19 *Polygonal ferrite* (berwarna terang), etsa nital28
Gambar 2.20 *Widmanstatten ferrite* (plat putih memanjang berukuran besar), etsa nital 29
Gambar 2.21 *Acicular ferrite* (plat putih memanjang berbutir halus), etsa nital..... 30
Gambar 2.22 Diagram CCT baja *micro-alloyed* Ti-B: (1) tanpa Cu (2) dengan 1.5% Cu 31
Gambar 2.23 (a) Struktur mikro baja Ti-B *micro-alloyed* menunjukkan daerah perlit gelap (b) Hasil SEM menunjukkan daerah perlit berwarna terang karena efek etsa 32
Gambar 2.24 **(**a) Struktur mikro baja 1.5 Cu-Ti-B *micro-alloyed* menunjukkan ferit halus dengan distribusi *dark island* (b) Hasil SEM menunjukkan distribusi martensit, quasi-polygonal ferit, dan acicular ferrite..... 33
Gambar 2.25 (a) Grafik YS dan UTS baja paduan dan (b) Grafik keuletan baja paduan yang di-investigasi 33
Gambar 2.26 Hasil pengamatan struktur mikro logam lasan (etsa 2% nital): (b) struktur mikro logam lasan dengan penambahan 0.14% Cu (e) struktur mikro logam lasan dengan penambahan 0.94% Cu..... 34

Gambar 2.27 Hasil uji kekerasan *vickers* logam lasan berdasarkan variasi penambahan Cu..... 35
Gambar 2.28 Hasil pengamatan mikroskop optik struktur *prior austenite grain* dengan perbesaran 200x39
Gambar 2.29 Hubungan antara *holding time* temperatur austenitisasi, *microhardness,* dan densitas dislokasi pada baja 40
Gambar 2.30 Hasil observasi lebih lanjut terhadap morfologi *martensite*. Ukuran jarum-jarum dan *packet martensite* menjadi semakin besar seiring dengan peningkatan ukuran butir 41
Gambar 2.31 Grafik yang menunjukkan hubungan antara ukuran butir *austenite* dan laju pendinginan terhadap jumlah fase WF pada baja paduan... 43
Gambar 2.32 Pengaruh ukuran butir *austenite* pada (a) temperatur Ar_1 dan Ar_3 (b) hasil uji kekerasan *vickers* (beban 10 kg) pada baja C-Mn-Nb.... 44
Gambar 2.33 Hasil pengamatan struktur mikro yang menunjukkan fase: (a) *grain boundary ferrite/polygonal ferrite* (b) struktur *widmanstatten* 45
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian..... 49
Gambar 4.1 Hasil Pengamatan Makro Permukaan Baja API 5L *grade* B pendinginan *annealing:* (a) substrat API 5L (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 57
Gambar 4.2 Hasil Pengamatan Makro Permukaan Baja API 5L *grade* B pendinginan *normalizing* (a) Substrat API 5L (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 59

Gambar 4.3 Hasil Pengamatan Makro Permukaan Baja API 5L *grade* B pendinginan *quenching* (a) Substrat API 5L (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 61

Gambar 4.4 Hasil Pengamatan Makro Penampang Melintang Baja API 5L *grade* B pendinginan *annealing* dengan perbesaran 16x: (a) *Copperizing* 10 menit (b) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 5 menit (c) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 10 menit (d) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 15 menit (e) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 20 menit..... 63

Gambar 4.5 Hasil Pengamatan Makro Penampang Melintang Baja API 5L *grade* B pendinginan *normalizing* dengan perbesaran 16x: (a) *Copperizing* 10 menit (b) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 5 menit (c) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 10 menit (d) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 15 menit (e) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 20 menit..... 65

Gambar 4.6 Hasil Pengamatan Makro Penampang Melintang Baja API 5L *grade* B pendinginan *quenching* dengan perbesaran 16x: (a) *Copperizing* 10 menit (b) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 5 menit (c) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 10 menit (d) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 15 menit (e) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 20 menit..... 67

Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Hasil Uji XRD Spesimen Baja API 5L *Grade* B Laju Pendinginan *Annealing*.....69
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Hasil Uji XRD Spesimen Baja API 5L *Grade* B Laju Pendinginan *Normalizing*..... 72
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Hasil Uji XRD Spesimen Baja API 5L *Grade* B Laju Pendinginan *Quenching*..... 74
Gambar 4.10 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..... 78
Gambar 4.11 Grafik Hasil Perhitungan Luas Rata-Rata Butir *Ferrite* Spesimen Baja API 5L *Grade* B Dengan Laju Pendinginan *Annealing*..... 80
Gambar 4.12 Hasil Pengambilan Struktur Mikro Bagian Tepi Baja API 5L *grade* B Tanpa *Copperizing* pendinginan *normalizing* dengan perbesaran 200x..... 82
Gambar 4.13 Hasil Pengambilan Struktur Mikro Bagian Tepi Baja API 5L *grade* B 10 menit *copperizing* pendinginan *normalizing* dengan perbesaran 200x..... 83
Gambar 4.14 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"..... 84
Gambar 4.15 Hasil Pengambilan Struktur Mikro Bagian Tepi Baja API 5L *grade* B Tanpa *Copperizing*

Pendinginan *Quenching* Dengan Perbesaran 500x.....88
Gambar 4.16 Hasil Pengambilan Struktur Mikro Bagian Tepi Baja API 5L *grade* B *Copperizing* Pendinginan *Quenching* Dengan Perbesaran 500x 89
Gambar 4.17 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" 90
Gambar 4.18 Hasil Pengujian *vickers Hardness* Spesimen Baja API 5L *Grade* B Laju Pendinginan *Annealing* Dengan Pembebanan 30 kgf 93
Gambar 4.19 Hasil Pengujian *vickers Hardness* Spesimen Baja API 5L *Grade* B Laju Pendinginan *Normalizing* Dengan Pembebanan 30 kgf..... 95
Gambar 4.20 Hasil Pengujian *vickers Hardness* Spesimen Baja API 5L *Grade* B Laju Pendinginan *Quenching* Dengan Pembebanan 30 kgf 97

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perilaku unsur paduan dalam baja *annealed*..... 5
Tabel 2.2 Komposisi Kimia Baja API 5L berdasarkan *grade*-nya..... 22
Tabel 2.3 Kekuatan Tarik Baja API 5L berdasarkan *grade*-nya..... 22
Tabel 2.4 Koefisien difusi tembaga pada *pure iron*..... 26
Tabel 2.5 Komposisi kimia baja paduan yang di-investigasi31
Tabel 2.6 Data kuantitatif jumlah fase *proeutectoid ferrite* (PF) dan *acicular ferrite* (AF) terhadap efek penambaha tembaga pada logam lasan..... 35
Tabel 2.7 Komposisi Kimia Baja *hypoeutectoid* yang digunakan..... 36
Tabel 2.8 Parameter austinitisasi yang digunakan..... 36
Tabel 2.9 Hasil pengukuran ukuran butir spesimen baja 37
Tabel 2.10 Hasil pengukuran kekerasan baja menggunakan *vickers* 37
Tabel 2.11 Hasil pengukuran ukuran butir *prior austenite*... 38
Tabel 2.12 Hasil pengukuran butir dan *microhardness* spesimen..... 40
Tabel 2.13 Komposisi kimia baja paduan C-Mn yang digunakan 42
Tabel 3.1 Hasil Uji Komposisi Kimia OES pada plat sampel awal..... 48
Tabel 3.2 Rancangan Penelitian..... 55
Tabel 4.1 Hasil Perhitungan Luas Butir *Ferrite* Rata-Rata Spesimen Baja API 5L *Grade* B Dengan Laju Pendinginan *Annealing*..... 78
Tabel 4.2 Hasil Pengujian *vickers Hardness* Spesimen Baja API 5L *Grade* B Laju Pendinginan *Annealing* Dengan Pembebanan 30 kgf..... 91
Tabel 4.3 Hasil Pengujian *vickers Hardness* Spesimen Baja API 5L *Grade* B Laju Pendinginan *Normalizing* Dengan Pembebanan 30 kgf..... 93

Tabel 4.4 Hasil Pengujian *vickers Hardness* Spesimen Baja API 5L *Grade* B Laju Pendinginan *Quenching* Dengan Pembebanan 30 kgf 95

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

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 (Morrison, 2000). 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 (Skobir, 2011). 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* (Kluken dkk, 1994).

Pada penelitian ini dilakukan pemaduan 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 perlakukan *post-heat,* yaitu dengan memanaskan baja pada temperatur 1100^{o}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.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh waktu tahan *post-heat* dan laju pendinginan proses *copperizing* terhadap struktur mikro *copperized*-API 5L *grade* B?
2. Bagaimana pengaruh waktu tahan *post-heat* dan laju pendinginan proses *copperizing* terhadap kekerasan *copperized*-API 5L *grade* B?

1.3 Batasan Masalah

Agar diperoleh hasil penelitian sesuai dengan yang diinginkan dan tidak menyimpang dari tujuan penelitian, maka dibuat batasan masalah sebagai berikut:

1. Pengaruh dari lingkungan sekitar proses *copperizing* diabaikan.
2. Temperatur ketika pengangkatan substrat dan *immersing* dianggap konstan.
3. Temperatur tembaga cair dianggap konstan.
4. Kecepatan pendinginan dianggap konstan.
5. *Crucible grafit* dianggap tidak bereaksi dengan logam cair

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh waktu tahan *post-heat* dan laju pendinginan proses *copperizing* terhadap struktur mikro *copperized*-API 5L *grade* B.
2. Menganalisis pengaruh waktu tahan *post-heat* dan laju pendinginan proses *copperizing* terhadap kekerasan *copperized*-API 5L *grade* B.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk memberikan informasi mengenai pengaruh waktu tahan *post-heat* dan laju pendinginan proses *copperizing* terhadap perubahan struktur mikro dan kekerasan baja API 5L *grade* B.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Susunan Paduan

Paduan adalah sebuah campuran bahan yang memiliki sifat-sifat logam dan tersusun atas dua atau lebih unsur kimia (sedikitnya satu unsur tersebut adalah logam). Paduan dapat bersifat homogen atau campuran (*mixture*). Apabila paduan tersebut homogen, maka akan memiliki fase tunggal dan bila berupa campuran maka paduan akan terdiri dari beberapa fase. (Avner, 1982)

Pada keadaan padat, terdapat tiga kemungkinan fase yang terbentuk pada paduan, yaitu logam murni, senyawa, dan larutan padat. Apabila sebuah paduan bersifat homogen pada kondisi padat, maka fasenya dapat berupa larutan padat atau senyawa. Apabila suatu paduan merupakan campuran (*mixture*), maka fasenya berupa kombinasi dari fase-fase yang mungkin terjadi dalam keadaaan padat, seperti kombinasi logam murni dengan logam murni lain, larutan padat dengan larutan padat lain, atau larutan padat dengan senyawa. (Avner, 1982)

2.1.1 Larutan Padat

Larutan padat merupakan suatu larutan yang terdiri dari dua bagian, yaitu *solute* (terlarut) dan *solvent* (pelarut). *Solute* merupakan bagian yang lebih sedikit, sedangkan *solvent* adalah bagian yang lebih banyak. Jumlah *solute* yang dilarutkan oleh *solvent* merupakan fungsi temperatur, makin meningkat dengan naiknya temperatur. (Suherman, 2003)

Ada dua jenis larutan padat, yaitu larutan padat substitusional dan larutan padat interstisial: (Suherman, 2003)

a. Larutan padat substitusional

Pada larutan padat ini, atom *solute* menggantikan tempat (substitusi) atom *solvent* dalam struktur kristal *solvent.* Jumlah maksimum atom *solute* yang menggantikan atom *solvent* pada larutan padat ini dapat tidak terbatas karena larutan padat dapat

dibuat dengan segala komposisi sehingga kelarutan antara keduanya tidak terbatas.

Pada sistem larutan padat ini, ada beberapa faktor yang mempengaruhi kelarutan, yaitu:

- *Crystal structure factor:* kelarutan padat sempurna dari dua unsur tidak dapat terjadi apabila struktur kristalnya tidak sama. Jadi, pada larutan padat substitusional kedua unsurnya harus memiliki struktur kristal yang sama.
- *Relative size factor:* terbentuknya suatu larutan padat akan mudah terjadi apabila perbedaan diameter atom tidak terlalu besar, yaitu tidak lebih dari 15%. Bila perbedaan ini lebih dari 15% maka kelarutan padat-nya akan sangat terbatas. Contohnya adalah timbal dengan perak yang memiliki perbedaan diameter atom 20% sehingga kelarut-padatan timbal dalam perak hanya sekitar 1.5%, sedangkan kelarut-padatan perak dalam timbal hanya 0.1% Berbeda dengan antimon dan bismuth yang dapat saling melarutkan pada segala komposisi sehingga kelarut-padatannya tidak terbatas karena perbedaan diameter atomnya 7%.
- *Chemical affinity factor:* makin besar *chemical affinity* antara dua logam maka makin kecil kemungkinannya membentuk larutan padat. Mereka lebih cenderung membentuk senyawa. Biasanya makin jauh jarak letak antara dua unsur dalam tabel periodik maka makin besar *chemical affinity* antara keduanya.
- *Relative-valence factor:* bila *solute metal* memiliki valensi berbeda dari *solvent* maka jumlah elektron valensi per atom (*electron ratio*), akan berubah. Struktur kristal lebih peka terhadap penurunan *electron ratio* daripada kenaikan *electron ratio.* Jadi, logam bervalensi rendah dapat melarutkan lebih banyak logam bervalensi lebih tinggi daripada sebaliknya. Misalnya dalam sistem paduan aluminium-nickel, keduanya memiliki struktur kristal FCC, *relative size factor* 14%. Aluminium

bervalensi lebih tinggi daripada nickel sehingga kelarutannya dalam nickel mencapai 5%, tetapi aluminium hanya mampu melarutkan nickel 0.04%.

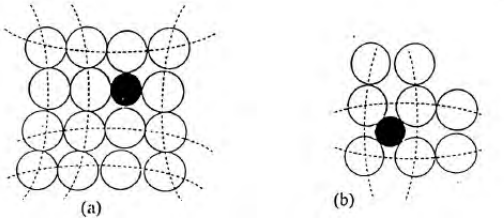
b. Larutan padat interstisial

Larutan ini terbentuk bila atom *solute* dengan diameter yang sangat kecil dapat masuk (menyisip) di rongga antar atom dalam struktur kristal dari *solvent* dengan diameter atom yang sangat besar. Karena celah (rongga) antar atom dalam suatu struktur kristal sangat kecil maka hanya atom yang sangat kecil, dengan radius kurang dari satu Angstrom, yang dapat menyisip dan membentuk larutan padat interstisial. Atom tersebut adalah hidrogen (0.46 A), boron (0.97 A), karbon (0.77 A), nitrogen (0.71 A), dan oksigen (0.60 A).

Larutan padat interstisial kelarut-padatannya sangat terbatas dan biasanya juga tidak penting, kecuali larutan padat karbon dalam besi yang sangat banyak mempengaruhi struktur dan sifat baja.

2.1.2 Mekanisme Perubahan Sifat Mekanik Akibat Proses Pemaduan Logam

Paduan logam yang berupa larutan padat interstisial maupun substitusional pada temperatur kamar (keadaan padat) memiliki struktur kristal yang terdistorsi terutama di sekitar tempat atom *solute,* seperti pada gambar berikut:



Gambar 2.1 Susunan atom dalam kristal di sekitar atom *solute* pada larutan padat (a) substitusional dan (b) interstisial menunjukkan adanya distorsi. (Suherman, 2003)

Distorsi ini akan menimbulkan tegangan di sekitarnya dan menghambat gerakan dislokasi pada bidang *slip* sehingga untuk menghasilkan *slip* diperlukan gaya yang lebih besar. Oleh karena itu, adanya atom *solute* akan menaikkan kekuatan dan kekerasan suatu larutan padat, makin banyak atom *solute* yang terlarut maka makin tinggi kenaikan kekuatan dan kekerasan yang terjadi. Hal ini merupakan salah satu dasar penguatan logam dengan proses pemaduan. (Suherman, 2003)

2.2 Baja Paduan

Baja paduan adalah baja karbon yang dikombinasikan dengan satu atau lebih unsur lain. Unsur-unsur yang ditambahkan tersebut biasanya logam. Pemaduan pada baja karbon dilakukan untuk mendapatkan sifat-sifat tertentu yang tidak terdapat pada baja karbon (Schreder, 2007). Pemaduan dapat meningkatkan sifat-sifat sebagai berikut pada baja karbon: (Avner, 1982)

a. *Hardenability*
b. Kekuatan pada temperatur kamar
c. Sifat mekanik pada temperatur tinggi atau rendah
d. Ketahanan aus
e. Ketahanan korosi
f. Sifat magnetik

2.2.1 Kelompok Unsur Paduan

Unsur paduan yang ditambahkan dalam baja dapat larut dalam *ferrite* atau membentuk karbida. (Suherman, 1999) Berikut tabel 2.1 yang memperlihatkan pengelompokkan unsur paduan berdasarkan kecenderungannya untuk larut dalam *ferrite* atau membentuk karbida:

Tabel 2.1 Perilaku unsur paduan dalam baja *annealed* (Avner, 1982)

ALLOYING ELEMENT	GROUP 1 DISSOLVED IN FERRITE		GROUP 2 COMBINED IN CARBIDE
Nickel	Ni		
Silicon	Si		
Aluminum	Al		
Copper	Cu		
Manganese	Mn	⟷	Mn
Chromium	Cr	⟷	Cr
Tungsten	W	⟷	W
Molybdenum	Mo	⟷	Mo
Vanadium	V	⟷	V
Titanium	Ti	⟷	Ti

Berikut kelompok unsur paduan menurut fungsinya: (Suherman, 1999)

a. Pembentuk/pen-stabil *ferrite:* unsur paduan yang membuat *ferrite* menjadi lebih stabil sampai ke temperatur tinggi. Hampir semua unsur paduan mempunyai sifat ini, kecuali *nickel* dan *mangan.* Unsur paduan yang penting pada kelompok ini adalah Cr, Si, Mo, W, dan Al.
b. Pembentuk/pen-stabil *austenite:* unsur paduan yang membuat *austenite* menjadi lebih stabil pada temperatur yang lebih rendah. Unsur yang terpenting pada kelompok ini adalah Ni dan Mn.
c. Pembentuk karbida: unsur paduan yang di dalam baja dapat membentuk karbida. Beberapa pembentuk karbida yang penting (diurut mulai dari yang kurang kuat) adalah: Cr, W, Mo, V, Ti, Nb, Ta, dan Zr. Karbida yang terbentuk ini dapat berupa karbida sederhana atau karbida kompleks. Adanya karbida akan menaikkan sifat tahan aus baja.
d. Pen-stabil karbida: unsur paduan yang membuat karbida menjadi lebih stabil, tidak mudah terurai dan larut ke dalam suatu fase. Unsur-unsur dalam kelompok ini (diurut dari yang lemah ke kuat): Co, Ni, W, Mo, Mn, Cr, V, Ti, Nb, dan Ta.

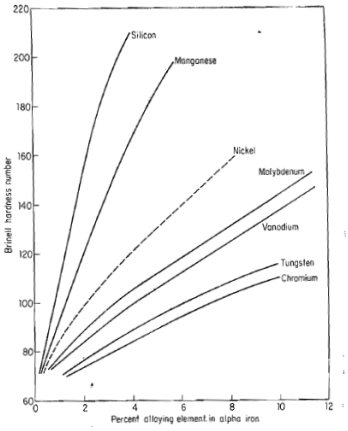
e. Pembentuk nitrida: unsur paduan yang dapat membentuk nitrida. Pada dasarnya semua unsur paduan pembentuk karbida adalah juga pembentuk nitrida (yang dapat membentuk nitrida bila dilakukan *nitriding*). Selain itu, aluminium juga merupakan pembentuk nitrida yang cukup kuat. Nitrida merupakan senyawa yang sangat keras sehingga adanya senyawa ini dapat menaikkan kekerasan baja.

2.2.2 Pengaruh Unsur Paduan Pada Baja

Pengaruh unsur paduan pada baja ditinjau dari beberapa aspek adalah sebagai berikut: (Suherman, 1999)

a. Pengaruh terhadap kekerasan *ferrite*

Semua unsur paduan yang larut dalam *ferrite* menaikkan kekuatan dan kekerasan *ferrite.* Pengaruh dari masing-masing unsur tidak sama (gambar 2.10). Pada gambar 2.2, Si dan Mn mempunyai pengaruh paling besar, sedangkan Cr memiliki pengaruh paling kecil.

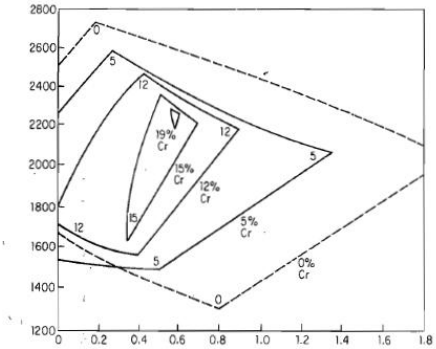


Gambar 2.2 Peningkatan kekerasan *ferrite* oleh beberapa unsur paduan. (Avner, 1982)

b. Pengaruh terhadap diagram fase Fe-Fe_3C

Adanya unsur paduan di dalam baja akan mengubah diagram fase besi-karbida besi, pada umumnya titik *eutectoid* akan tergeser ke kiri sehingga kadar karbon di dalam *pearlite* akan <0.8% C. Unsur paduan yang berfungsi sebagai pen-stabil *austenite* (Ni dan Mn) akan menurunkan temperatur *eutectoid,* sedangkan unsur paduan pen-stabil *ferrite* akan menaikkan temperatur *eutectoid.* Jadi, unsur paduan pen-stabil *ferrite* akan menggeser titik eutektoid ke kiri atas, sedangkan unsur pen-stabil *austenite* menggeser titik eutektoid ke kiri bawah.

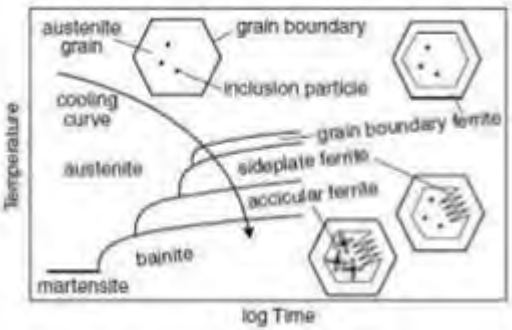
Selain itu, unsur pen-stabil *ferrite* akan memperluas daerah *ferrite* dan memperkecil daerah *austenite* (gambar 2.3), sedangkan unsur pen-stabil *austenite* akan memperluas daerah *austenite.*



Gambar 2.3 Pengaruh kadar Cr pada luas daerah *austenite* (Avner, 1982)

c. Pengaruh terhadap diagram transformasi

Semua unsur paduan, kecuali *cobalt,* akan menghambat pembentukan *ferrite* dan *cementite* pada pendinginan sehingga akan menggeser kurva transformasi baja ke kanan. Selain itu, semua unsur paduan, kecuali *cobalt,* menurunkan temperatur pembentukan *martensite* (Ms) juga Mf-nya sehingga menyebabkan *martensite* lebih mudah terbentuk. Jadi, dapat dikatakan unsur paduan meningkatkan *hardenability* baja.



Gambar 2.4 Ilustrasi pengaruh unsur paduan terhadap diagram transformasi CCT baja (Messler, 1999)

d. Pengaruh terhadap ukuran butir

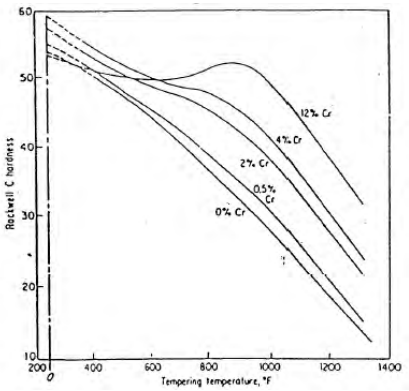
Beberapa unsur paduan dapat membentuk karbida atau nitrida berupa partikel halus yang terdispersi secara merata. Adanya partikel halus ini akan mencegah terjadinya pertumbuhan butir. Dalam banyak hal, ini akan memberi pengaruh baik terhadap sifat mekanik, kekuatan dan ketangguhan yang tinggi. Unsur paduan yang mencegah terjadinya pertumbuhan butir ini adalah: *vanadium, titanium, niobium,* dan aluminium. Unsur paduan tersebut banyak digunakan untuk membuat *fine-grained steel* untuk *case hardening.*

e. Pengaruh terhadap *tempering*

Baja yang dikeraskan akan melunak bila dipanaskan kembali (*tempering*). Makin tinggi temperatur *tempering* maka makin banyak penurunan kekerasan yang terjadi. Semua unsur paduan menghambat laju penurunan kekerasan karena proses *tempering.* Unsur-unsur yang mudah larut dalam *ferrite,* unsur yang tidak membentuk karbida (Ni, Si, dan Mn) pengaruhnya kecil sekali.

Unsur pembentuk karbida mempunyai pengaruh yang lebih kuat apalagi unsur pembentuk karbida kompleks, seperti Cr, W, Mo, V, dll. Pengaruh unsur-unsur paduan tersebut sangat kuat. Unsur paduan pembentuk karbida kompleks akan menghambat penurunan kekerasan baja akibat *tempering* dan bila terdapat

dalam jumlah besar dapat menaikkan kekerasan baja pada *tempering* temperatur tinggi, dikenal sebagai *secondary hardness.*



Gambar 2.5 Pengaruh kadar Cr terhadap penurunan kekerasan setelah *tempering* (Suherman, 1999)

2.3 Baja

Menurut diagram fasa besi-karbon, baja merupakan logam paduan antara besi dan karbon dengan kadar karbon kurang dari 2%, sedangkan paduan besi-karbon dengan kadar karbon lebih dari 2% dinamakan besi cor. Baja merupakan salah satu material yang banyak digunakan dalam bidang teknik karena melimpahnya kandungan besi di kerak bumi, tingginya titik leleh besi (1534^{o}C), sifat mekanik yang baik, seperti *yield strength* yang cukup (200-300 MPa) dengan keuletan yang sangat baik dan ketangguhan mencapai 100 MPa/m^2, serta memiliki beberapa struktur mikro yang dihasilkan dari transformasi fasa *solid-state* melalui variasi laju pendinginan fasa *austenite* (Totten, 2006). Selain karbon dan besi, baja juga mengandung sekitar 0.25% Si, 0.3 – 1.5% Mn, dan unsur-unsur pengotor lain, seperti P, S, dsb. (Prof. Tata Surdia, 1999)

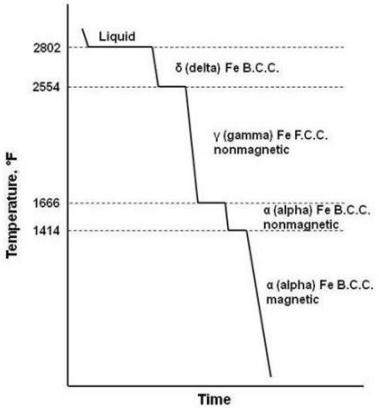
Klasifikasi baja karbon adalah sebagai berikut: (Khurmi, 2005)

- *Dead mild steel:* kadar karbon mencapai 0.15% C

- *Low carbon/mild steel:* kadar karbon mencapai 0.15-0.45% C
- *Medium carbon steel:* kadar karbon mencapai 0.45-0.8% C
- *High carbon steel:* kadar karbon mencapai 0.8-1.5% C

2.3.1 Diagram Fasa Fe-Fe_3C

Besi merupakan logam *allotropic,* yang berarti besi memiliki lebih dari satu stuktur kristal yang bergantung pada temperatur. Berikut merupakan kurva pendinginan dari besi murni:

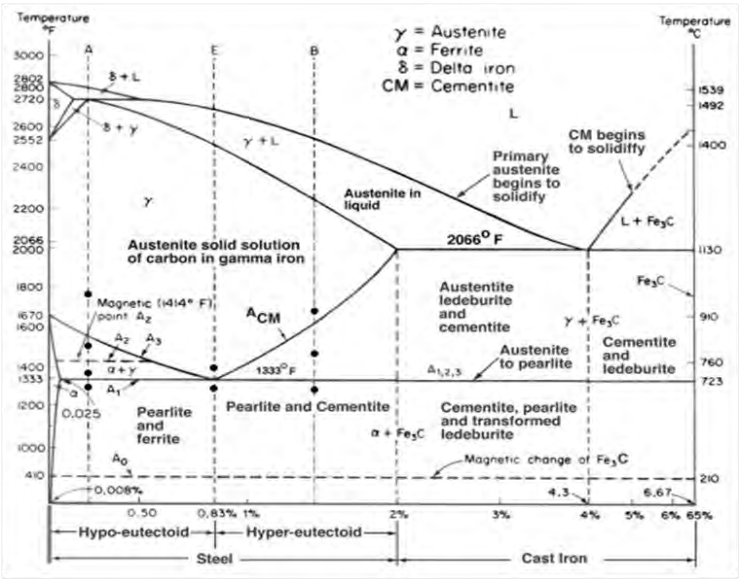


Gambar 2.6 Kurva pendinginan besi murni. (Avner, 1982)

Berdasarkan gambar kurva di atas, saat besi pertama membeku pada 2802^{o}F, besi memiliki struktur kristal *body-centered cubic* (BCC) dengan fasa *delta*. Selama pendinginan lanjut, pada 2554^{o}F, terjadi perubahan fasa dan atom-atom menyusun kembali dirinya menjadi fasa *gamma* yang memiliki struktur kristal *face-centered cubic* (FCC). Ketika temperatur mencapai 1666^{o}F, terjadi perubahan fasa kembali dari *gamma* non-magnetik FCC menjadi *alpha* non-magnetik BCC. Akhirnya,

pada 1414^{o}F, besi *alpha* berubah sifat menjadi magnetik tanpa mengalalmi perubahan struktur kristal. (Avner, 1982)

Diagram fasa Fe-Fe_3C berguna untuk memperkirakan dan memahami struktur mikro dan sifat dari baja karbon. Berikut merupakan gambar dari diagram fasa Fe-Fe_3C:



Gambar 2.7 Diagram fasa Fe- Fe_3C. (Prof. Tata Surdia, 1999)`

Menurut Prof. Tata Surdia (1999) dalam buku Pengetahuan Bahan Teknik, pada diagram fasa diatas, terdapat beberapa temperatur penting, yaitu:

- Temperatur 1536^{o}C
  Temperatur cair besi. Besi dengan fasa δ (delta) mulai berubah menjadi *liquid.*
- Temperatur 1494^{o}C

Pada temperatur ini, baja dengan kadar karbon 0.10 – 0.50% mengalami reaksi peritektik, yaitu: L+ $\delta \Leftrightarrow \gamma$. Reaksi berlangsung secara *isothermal.* (Suherman, 2003)

- Temperatur 1400^{o}C
  Temperatur transformasi dari besi $\delta \Leftrightarrow$ besi γ.
- Temperatur 1147^{o}C
  Pada temperatur ini, baja dengan kadar karbon 2.0 – 6.67% mengalami reaksi eutektik, yaitu: L $\Leftrightarrow \gamma$ + sementit. Reaksi berlangsung secara *isothermal.* (Suherman, 2003)
- Temperatur 911^{o}C
  Temperatur transformasi besi $\gamma \Leftrightarrow$ besi α.
- Temperatur 727^{o}C
  Pada temperatur ini, baja dengan kadar karbon antara 0.025 – 6.67% mengalami reaksi eutektoid, yaitu $\gamma \Leftrightarrow \alpha$ + sementit. Reaksi berlangsung secara *isothermal.* (Suherman, 2003)

Selain temperatur, menurut Prof. Tata Surdia (1999) dalam buku Pengetahuan Bahan Teknik, terdapat pula komposisi penting pada diagram fasa ini, yaitu:

- Komposisi 0.008% C
  Merupakan batas kelarutan karbon dalam *ferrite* pada temperatur kamar.
- Komposisi 0.025% C
  Merupakan batas kelarutan karbon dalam *ferrite* pada temperature 727^{o}C.
- Komposisi 0.8% C
  Merupakan komposisi eutektoid.
- Komposisi 2.0% C
  Paduan besi karbon sampai pada komposisi ini disebut baja.
- Komposisi 4.3% C
  Merupakan komposisi eutektik.
- Komposisi 6.67% C
  Merupakan rasio massa atom relatif Fe terhadap Fe_3C.

Selain komposisi dan temperatur, terdapat pula beberapa garis pada diagram fasa ini yang menandakan terjadinya perubahan fasa. Garis-garis ini digunakan sebagai acuan dalam proses perlakuan panas. Garis-garis tersebut adalah:

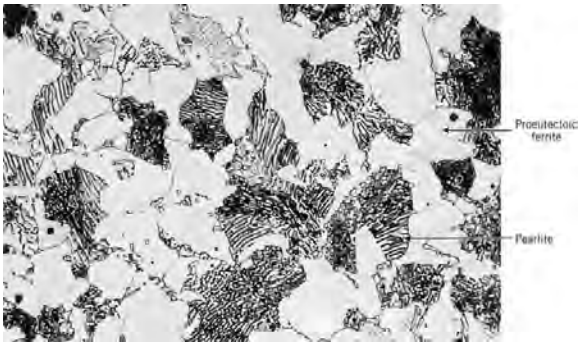
- Garis A_0
  Merupakan garis pada temperature 213^oC yang menandakan terjadinya transformasi magnetik untuk sementit. (Prof. Tata Surdia, 1999)
- Garis A_1
  Merupakan temperatur kritis bawah yang menyatakan temperatur eutektoid. Pada temperatur ini terjadi reaksi eutektoid: $\gamma \Leftrightarrow \alpha$ + sementit. (Suherman, 2003)
- Garis A_2
  Merupakan garis pada temperatur 780^oC yang menandakan terjadinya transformasi magnetik untuk besi atau *ferrite.* (Prof. Tata Surdia, 1999)
- Garis A_3
  Merupakan temperatur kritis atas yang menyatakan temperatur awal terjadinya perubahan allotropik dari γ ke α (pada pendinginan) atau akhir perubahan allotropik dari α ke γ (pada pemanasan). (Suherman, 2003)
- Garis A_{cm}
  Merupakan batas kelarutan karbon dalam *austenite.* (Suherman, 2003)

Menurut Avner (1982) dalam bukunya yang berjudul *Introduction to Physical Metallurgy,* terdapat beberapa struktur pada diagram fasa Fe-Fe_3C, yaitu:

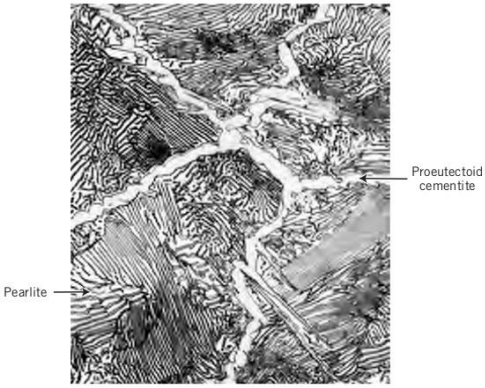
- *Cementite,* atau disebut juga karbida besi Fe_3C, merupakan senyawa interstisial dengan kadar karbon 6.67% C. *Cementite* bersifat keras, getas, dan kekuatan tarik rendah (sekitar 5000 psi). Struktur kristalnya *orthorhombic.*
- *Austenite,* merupakan larutan padat interstisial karbon dalam besi γ. Kelarutan maksimum karbon adalah 2.0% C pada 2065^oF. Kekuatan tarik 150000 psi, kekerasan 40

$HR_{C,}$ dan ketangguhan tinggi. *Austenite* biasanya tidak stabil pada temperatur kamar. Struktur kristalnya FCC.

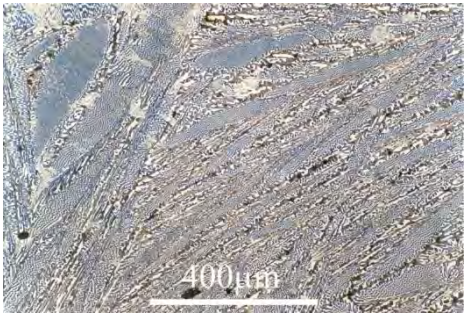
- *Ledeburite,* merupakan campuran eutektik antara *austenite* dan *cementite* dengan kandungan karbon 4.3% C dan terbentuk pada temperatur 2065^{o}F.
- *Ferrite,* merupakan larutan padat interstisial karbon dalam besi α. Kelarutan maksimum karbon adalah 0.025% C pada temperatur 1333^{o}F dan hanya 0.008% C pada temperatur kamar. Struktur ini bersifat lunak. *Ferrite* memiliki kekuatan tarik 40000 psi, keuletan tinggi (mencapai 40%), kekerasan kurang dari 90 $HR_{B.}$
- *Pearlite,* merupakan campuran eutektoid dengan kadar karbon 0.8% C dan terbentuk pada temperatur 1333^{o}F pada pendinginan sangat lambat. *Pearlite* memiliki kekuatan tarik 120000 psi, keuletan mencapai 20%, kekerasan 250-300 BHN atau 95-100 $HR_{B.}$



Gambar 2.8 Struktur mikro *ferrite* dan *pearlite* baja *hypoeutectoid.* (Callister, 2010)



Gambar 2.9 Struktur mikro *pearlite* dan *cementite* baja *hypereutectoid.* (Callister, 2010)



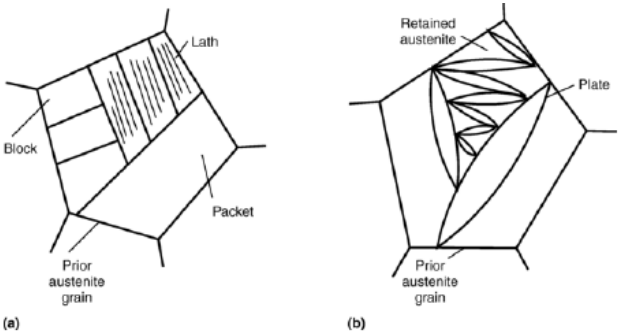
Gambar 2.10 Struktur mikro *ledeburite cast iron.* (Prof. Tata Surdia, 1999)

Selain struktur-struktur diatas, terdapat pula struktur baja yang tidak terdapat dalam diagram fasa Fe-Fe_3C dan dapat muncul karena pendinginan tidak semestinya *(non-equilibrium)* pada baja. Struktur tersebut adalah sebagai berikut:

- *Martensite*

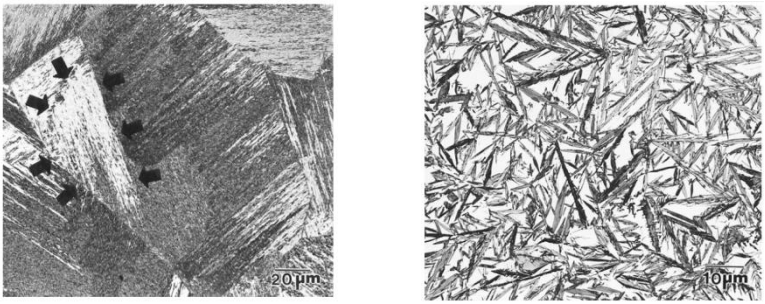
Merupakan larutan padat lewat jenuh dari karbon dalam sel satuan tetragonal pusat badan atau *body centered tetragonal* (BCT). Makin tinggi derajat jenuh karbon, maka makin besar

perbandingan satuan sumbu sel satuannya sehingga semakin keras dan getas *martensite* tersebut (Prof. Tata Surdia, 1999). *Martensite* pada struktur mikro material *ferrous* dibagi menjadi dua morfologi, yaitu *plate martensite* dan *lath martensite.* Illustrasi *lath martensite* ditunjukkan oleh gambar 2.11 (a) dan *plate martensite* ditunjukkan oleh gambar 2.11 (b):



Gambar 2.11 Ilustrasi fase *martensite:* (a) *lath martensite* (b) *plate martensite.* (ASM *Metals Handbook Vol. 9,* 2004)

Karakteristik dari *plate martensite* adalah terdapat pola zig-zag yang dibentuk oleh plat berukuran lebih kecil dan dibatasi oleh plat dengan ukuran lebih besar. Pada *lath martensite,* jarum-jarum *martensite* yang berwarna hitam cenderung mengelompok membentuk suatu "grup" dengan orientasi arah yang sama. "Grup" tersebut dinamakan *packet.* (ASM *Metals Handbook* Vol. 9, 2004)



(a) (b)

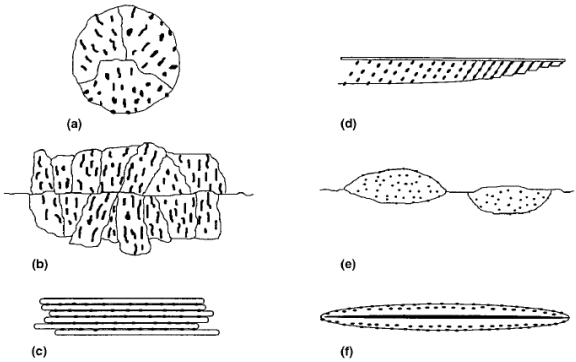
Gambar 2.12 Struktur mikro: (a) *Lath martensite* pada Fe-0.2% C *binary alloy,* etsa 2% nital 500x (b) *plate martensite* pada baja 0.93% C-1.45% Mn, etsa 2% nital 1000x. (Bramfitt dan Benscoter, 2002)

Lath martensite terbentuk pada baja dengan kadar karbon <0.6% C, sedangkan *plate martensite* terbentuk pada baja dengan kadar karbon >1.0%C. (Bramfitt dan Benscoter, 2002)

- *Bainite*

Merupakan struktur mikro yang terbentuk saat tranformasi *austenite* ke *ferrite* berlangsung dengan rentang temperatur diatas temperatur pembentukan *martensite* dan dibawah temperatur pembentukan *pearlite.* Morfologi *bainite* berupa *ferrite* berbentuk *lath* atau *plate* dengan presipitat *cementite* pada butir *ferrite* atau daerah *interlath.* Pada *bainite,* susunan *ferrite* dan *cementite* tidak berupa lamellar yang dimiliki oleh *pearlite.* (ASM *Metals Handbook* Vol. 9*,* 2004)

Berikut gambar ilustrasi morfologi *bainite:*

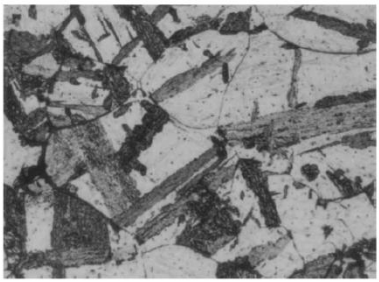


Gambar 2.13 Ilustrasi beberapa stuktur *ferrite* (putih) dan *cementite* (hitam) yang teridentifikasi sebaga *bainite:* (a) *nodular bainite* (b) *columnar bainite* (c) *upper bainite* (d) *lower bainite* (e) *grain boundary allotriomorphic bainite.* (f) *inverse bainite.*(Krauss, 2005)

Terdapat dua morfologi *bainite* yang paling sering ditemukan pada baja, yaitu *upper bainite* dan *lower bainite:*

- *Upper bainite*

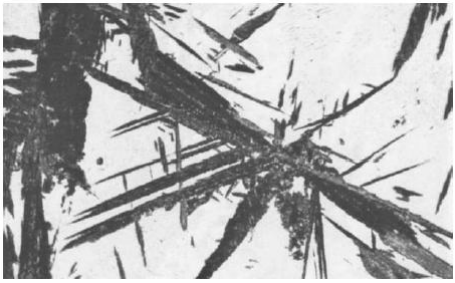
Upper bainite terbentuk pada rentang temperatur tepat dibawah temperatur pembentukan *pearlite* pada baja, yaitu dibawah 500^{o}C. *Upper bainite* ditunjukkan oleh gambar 2.14 yang mana *bainite* berwarna gelap dan *ferrite* berwarna terang. (Krauss, 2005)



Gambar 2.14 *Upper bainite* (berwarna gelap) pada baja 4150. Etsa nital, 500x. (Krauss, 2005)

- *Lower bainite*

Tersusun atas plat *ferrite* berukuran besar yang tidak sejajar antara plat yang satu dengan yang lainnya. *Cementite* pada *lower bainite* berwarna gelap saat dilihat melalui mikroskop optik akibat pengaruh etsa. (Krauss, 2005)



Gambar 2.15 *Lower bainite* pada baja 4360. Perbesaran 750x (Krauss, 2005)

2.3.2 Baja API 5L *Grade* B

Baja API 5L merupakan pipa baja karbon rendah (<0.25% C) yang diberikan sejumlah kecil unsur paduan *(micro-alloyed)*, seperti *vanadium, titanium,* dan *niobium,* untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasannya. Baja ini memiliki beberapa *grades,* seperti A25, A, B X42, dll. *Grades* pada baja API 5L menunjukkan perbedaan pada komposisi kimia dan sifat mekaniknya, seperti kekuatan tarik baja.

Komposisi kimia dan kekuatan tarik baja API 5L dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.2 Komposisi Kimia Baja API 5L berdasarkan *grade*-nya. (*American Petroleum Institute,* 2004)

(1)	(2)	(3)	(4)		(5)	(6)	(7)
Grade & Class	Carbon, Maximum[a]	Manganese, Maximum[a]	Phosphorus Minimum	Phosphorus Maximum	Sulfur, Maximum	Titanium, Maximum	Other
Seamless							
A25, Cl I	0.21	0.60		0.030	0.030		
A25, Cl II	0.21	0.60	0.045	0.080	0.030		
A	0.22	0.90		0.030	0.030		
B	0.28	1.20		0.030	0.030	0.04	b, c, d
X42	0.28	1.30		0.030	0.030	0.04	c, d
X46, X52, X56	0.28	1.40		0.030	0.030	0.04	c, d
X60[f],	0.28	1.40		0.030	0.030	0.04	c, d
X65[f], X70[f]	0.28	1.40		0.030	0.030	0.06	c, d

Tabel 2.3 Kekuatan Tarik Baja API 5L berdasarkan *grade*-nya. (*American Petroleum Institute,* 2004)

(1)	(2)		(3)		(4)
	Yield Strength, Minimum		Ultimate Tensile Strength, Minimum		Elongation in 2 in. (50.8 mm), Minimum, Percent
Grade	psi	MPa	psi	MPa	
A25	25,000	(172)	45,000	(310)	a
A	30,000	(207)	48,000	(331)	a
B	35,000	(241)	60,000	(414)	a
X42	42,000	(290)	60,000	(414)	a
X46	46,000	(317)	63,000	(434)	a
X52	52,000	(359)	66,000	(455)	a
X56	56,000	(386)	71,000	(490)	a
X60	60,000	(414)	75,000	(517)	a
X65	65,000	(448)	77,000	(531)	a
X70	70,000	(483)	82,000	(565)	a

Baja API 5L digunakan untuk mengalirkan gas, air, dan minyak di industri minyak dan gas alam. (*American Petroleum Institute,* 2004)

2.4 Tembaga

Tembaga merupakan salah satu logam yang banyak digunakan karena memiliki sifat konduktivitas listrik dan termal yang sangat baik. Selain itu, tembaga juga memiliki ketahanan korosi yang sangat baik, kemudahahan untuk di-fabrikasi, dan kekuatan serta ketahanan *fatigue* yang baik. Tembaga memiliki struktur kristal FCC dan secara umum bersifat non-magnetik. Tembaga murni secara umum digunakan sebagai kabel, kawat, dan berbagai produk penghantar listrik. Tembaga dan paduannya,

seperti kuningan dan perunggu digunakan untuk *automobile radiators, heat exchangers, home heating systems,* panel untuk menyerap energi matahari, dll. Tembaga dan paduannya juga sering digunakan sebagai bahan pipa, katup, dan produk-produk yang mengalirkan fluida karena ketahanan korosinya yang baik (ASM *Metals Handbook Vol.* 2, 1990). Tembaga memiliki nomor atom 29, berat atom sebesar 63.546, dan termasuk golongan IB pada tabel periodik unsur. (Kundig, 2006)

2.5 Difusi

Difusi merupakan proses perpindahan material yang melibatkan pergerakan atom-atom. Terdapat beberapa model pergerakan atom-atom saat difusi, khususnya difusi pada logam, yaitu: (Callister, 2001)

a. Difusi vakansi

Difusi vakansi terjadi karena adanya kekosongan pada struktur kristal sehingga atom dari struktur kristal lain mengisi kekosongan tersebut. Vakansi pada logam dapat terbentuk pada temperatur tinggi menurut persamaan sebagai berikut:

$$N_v = N \exp\left(-\frac{Q_v}{kT}\right)$$

Keterangan: Nv = nilai ekuilibrium vakansi
N = Jumlah atom (6.02×10^{23})
T = temperatur (K)
K = konstanta Boltzmann's (1.38×10^{-23} J/atom.K atau 8.62×10^{-5} eV/atom.K)

Proses *self-diffusion* dan *interdiffusion* merupakan difusi vakansi.

b. Difusi Interstisial

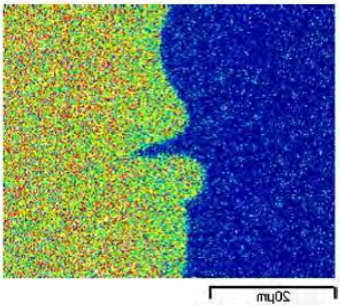
Mekanisme difusi dimana atom interstisi yang berukuran lebih kecil megisi ruang kosong diantara atom-atom induk. Mekanisme difusi ini terdapat pada *interdiffusion* dari *impurities,*

seperti hidrogen, karbon, nitrogen, dan oksigen yang memiliki ukuran atom cukup kecil untuk dapat menyisip diantara atom-atom unsur lain. Pada sebagian besar logam paduan, difusi interstisi terjadi lebih cepat daripada difusi vakansi karena difusi interstisi atom-atom yang berpindah lebih kecil. Selain itu, posisi kekosongan interstisi pada suatu struktur kristal lebih banyak daripada vakansi.

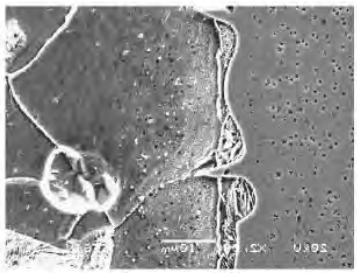
2.5.1 Difusi Tembaga Dalam Baja

Molleda dkk (2008) menyatakan bahwa tembaga cair dapat berdifusi ke dalam baja saat proses pelapisan baja dengan tembaga menggunakan metode *furnace brazing* ($T=1100^{o}C$). Pada daerah *interface* antara tembaga dan baja, diperoleh hasil bahwa tembaga berdifusi di sepanjang batas butir pada baja melalui pengamatan SEM dan *x-ray mapping* pada gambar 2.16.

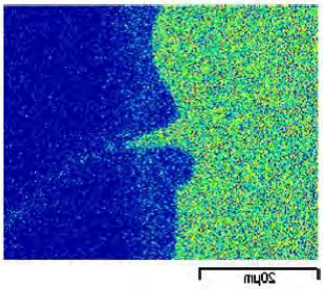
Hasil penelitian oleh Molleda dkk (2008) tersebut juga sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Yourong Xu dkk (1993) yang melakukan penelitian mengenai perilaku difusi Fe-Cu pada *interface copper-brazed steel tubes.* Hasilnya menyatakan bahwa tembaga cair mampu berdifusi ke dalam baja dengan tiga mekanisme, yaitu (1) tembaga berdifusi ke dalam baja sepanjang batas butir *ferrite,* (2) tembaga berdifusi ke dalam butir *ferrite,* dan (3) Fe berdifusi ke dalam lapisan tembaga. Kedalaman difusi tembaga pada penelitian tersebut adalah 10-20 μm dengan jumlah Cu yang berdifusi ke dalam batas butir *ferrite* lebih banyak daripada Cu yang berdifusi ke dalam butir *ferrite.*



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.16 (a) *X-ray map* yang menunjukkan daerah *interface* baja-tembaga (b) Hasil SEM menunjukkan difusi tembaga pada batas butir baja (c) Hasil *x-ray mapping* menunjukan difusi tembaga pada batas butir baja. (Molleda dkk, 2008)

Prediksi kedalaman difusi tembaga cair pada baja dapat dihitung melalui persamaan berikut: (Kurniasari, 2008)

$$X = \sqrt{Dt}$$

Keterangan: X = ketebalan difusi (cm)
D = koefisien difusi (cm^2/s)
t = waktu proses difusi (s)

Koefisien difusi tembaga pada baja dengan temperatur 1100^{o}C adalah: $0.59x10^{-6}$ cm^2/s dan pada temperatur 1130^{o}C

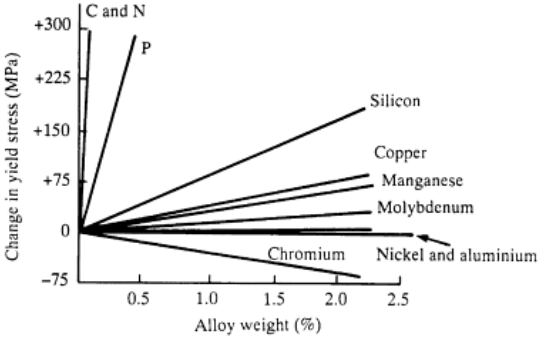
adalah $0.97x10^{-6}$ cm^2/s (Hough dan Rolls, 1971). Adapun koefisien difusi tembaga pada temperatur lainnya adalah:

Tabel 2.4 Koefisien difusi tembaga pada *pure iron.* (Butrymowickz dkk, 1976)

T (°C)	Phase	D* (cm^2/s)
1368[a]	γ	5.20×10^{-10}
1368	γ	5.03×10^{-10}
1315	γ	2.56×10^{-10}
1315	γ	2.45×10^{-10}
1285	γ	1.55×10^{-10}
1285	γ	1.52×10^{-10}
901.6[b]	α	5.1×10^{-11}
867.0	α	2.2×10^{-11}
854.5	α	1.8×10^{-11}

2.6 Mekanisme Penguatan Pada Baja Melalui *Solid-Solution Strengthening*

Efek unsur paduan terhadap penguatan *solid solution* pada baja dapat ditunjukkan melalui gambar berikut:

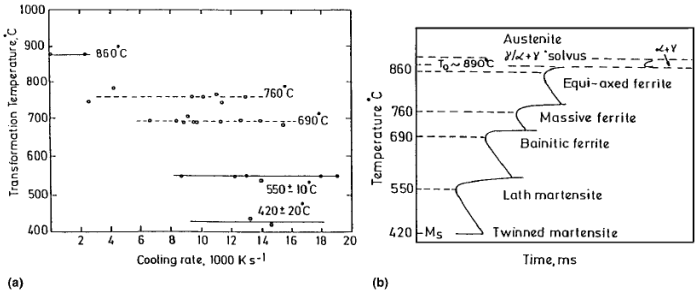


Gambar 2.17 Pengaruh penguatan *solid-solution* pada *ferrite-pearlite* HSLA *steels.* (Llewellyn, 1998)

Data pada gambar 2.17 diatas memberikan informasi mengenai penguatan yang signifikan oleh unsur-unsur interstisial, seperti karbon dan nitrogen, tetapi unsur-unsur tersebut memiliki kelarutan yang terbatas pada *ferrite.* Selain itu, karbon dan nitrogen memiliki efek yang berlawanan terhadap ketangguhan. Untuk unsur-unsur substitusional, fosfor yang memiliki pengaruh signifikan pada penguatan baja. Akan tetapi, seperti halnya karbon dan nitrogen, fosfor memiliki pengaruh negatif pada ketangguhan baja sehingga tidak digunakan sebagai agen penguat pada baja struktural. Di sisi lain, fosfor ditambahkan pada baja untuk meningkatkan ketahanan korosi atmosfer *(weathering steels).* (Llewellyn, 1998)

2.7 Klasifikasi Struktur Mikro *Ferritic*

Variasi morfologi *ferrite* pada baja karbon dan baja paduan merupakan hasil dari transformasi *austenite* pada rentang temperatur transformasi tertentu, seperti yang ditunjukkan oleh gambar di bawah ini:



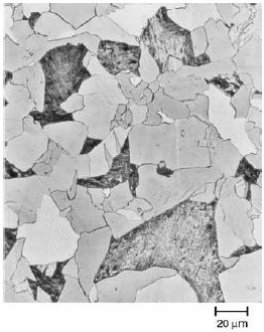
Gambar 2.18 Temperatur mulai terjadinya transformasi sebagai fungsi dari: (a) laju pendinginan (b) kurva transformasi berbagai produk transformasi *austenite* pada Fe-0.01% C. (Krauss, 2005)

Transformasi *austenite* ke *equiaxed ferrite* berlangsung pada temperatur tinggi karena melibatkan penyusunan kembali atom Fe dan difusi karbon yang membutuhkan energi tinggi. Pada

temperatur menengah, atom-atom interstisi karbon masih memiliki mobilitas yang baik, tetapi pergerakan dari atom-atom Fe sangat lambat (mobilitas buruk). Hal tersebut menyebabkan terbentuknya butir kristal *ferrite* dengan bentuk yang tidak *equiaxed* (Krauss, 2005). Butir *ferrite* dengan bentuk yang tidak *equiaxed* akan dijelaskan pada sub bab ini:

2.7.1 *Polygonal* atau *Equiaxed Ferrite*

Ferrite tipe ini merupakan *proeutectoid ferrite* yang terbentuk pada temperatur temperatur tinggi saat transformasi *austenite* ke *ferrite* berlangsung dengan laju pendinginan lambat pada baja karbon rendah. Butir *ferrite* tersebut terbentuk pada batas butir *austenite* dan tumbuh membesar dengan arah menjauhi batas butir *austenite* untuk membentuk butir yang *equiaxed. Polygonal ferrite* berbutir halus, terang dan berwarna putih serta butir *ferrite*-nya yang *equiaxed* dipisahkan oleh batas butir yang kontinyu. (Krauss, 2005)

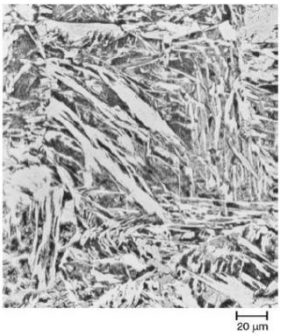


Gambar 2.19 *Polygonal ferrite* (berwarna terang), etsa nital. (Krauss, 2005)

2.7.2 *Widmanstatten Ferrite*

Widmanstatten ferrite (WF) memiliki morfologi berupa plat memanjang berwarna putih dengan ukuran butir yang besar. WF terbentuk dengan laju pendinginan yang lebih cepat daripada

polygonal ferrite dan pada rentang temperatur transformasi dibawah *polygonal ferrite.*

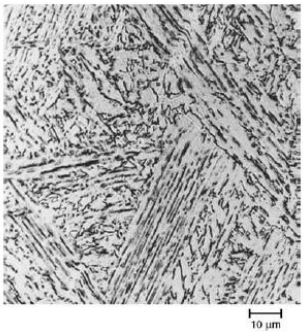


Gambar 2.20 *Widmanstatten ferrite* (plat putih memanjang berukuran besar), etsa nital. (Krauss, 2005)

2.7.3 *Acicular Ferrite*

Acicular ferrite terbentuk pada laju pendinginan tinggi pada baja karbon rendah. Bentuk kristal *acicular ferrite* adalah berupa plat memanjang dengan ukuran butir yang halus. *Acicular ferrite* terbentuk pada rentang temperatur transformasi di bawah *widmanstatten ferrite* dengan laju pendinginan tinggi (Krauss, 2005)

Karakteristik *acicular ferrite* adalah memiliki plat memanjang berbutir halus, sejajar antara satu butir dengan yang lainnya dalam satu "blok", dan bersentuhan dengan *prior austenite grain boundary* (Krauss, 2005).



Gambar 2.21 *Acicular ferrite* (plat putih memanjang berbutir halus), etsa nital. (Krauss, 2005)

2.8 Penelitian Sebelumnya

2.8.1 *The Influence of Copper Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Thermomechanically Processed Microalloyed Steels*

Ghosh (2008) melakukan penelitian tentang pengaruh penambahan tembaga terhadap struktur mikro dan sifat mekanik baja Ti-B *microalloyed* melalui proses termo-mekanik. Material yang digunakan adalah baja Ti-B. Metode yang digunakan, yaitu meleburkan paduan menggunakan *induction melting furnace.* Setelah itu, paduan dituang dalam cetakan berbentuk kotak dan diberikan perlakuan homogenisasi pada 1200^0C selama 120 menit. Selanjutnya, paduan ditempa menjadi bentuk batang berdimensi 12.5 mm x 12.5 mm. Batang tersebut kemudian dipanaskan pada 1200^oC dan di *hot-rolling* hingga ketebalan 6 mm dengan temperatur *finish rolling* 750^oC. Setelah di *hot-rolling* paduan didinginkan di udara.

Berikut hasil uji komposisi kimia paduan menggunakan OES:

Tabel 2.5 Komposisi kimia baja paduan yang di-investigasi (Ghosh, 2008)

Steel identification	C	Mn	Si	S	P	Ti	B	Cu	Ni	N
Ti –B	0.04	1.60	0.49	0.021	0.013	0.028	0.0009	–	–	0.0056
1.5 Cu–Ti–B	0.04	1.69	0.57	0.021	0.013	0.032	0.0013	1.54	–	0.0080
1.5 Cu–Ti–B–Ni	0.04	1.68	0.53	0.020	0.013	0.032	0.0012	1.55	0.79	0.0058

Berikut diagram CCT untuk baja *micro-alloyed* Ti-B tanpa penambahan Cu dan dengan penambahan 1.5% Cu:

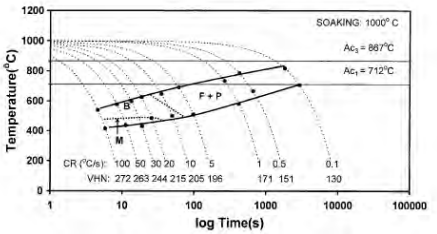


Fig. 1 CCT diagram for Ti- and B- containing steel. F: Ferrite, P: Pearlite, B: Bainite, M: Martensite

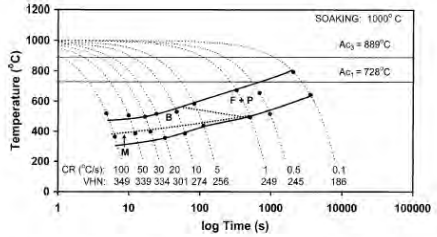


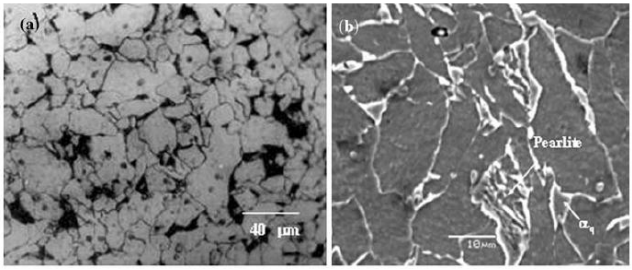
Fig. 2 CCT diagram for 1.5 wt% Cu-containing Ti–B microalloyed steel

Gambar 2.22 Diagram CCT baja *micro-alloyed* Ti-B: (1) tanpa Cu (2) dengan 1.5% Cu. (Ghosh, 2008)

Berdasarkan gambar diagram CCT diatas, penambahan 1.5% Cu pada baja *micro-alloyed* Ti-B menurunkan temperatur

transformasi *austenite* dibawah 600^{o}C untuk laju pendinginan 5^{o} C/s. Pada laju pendinginan yang lebih tinggi, struktur mikro yang didapat adalah martensit dan/atau bainit.

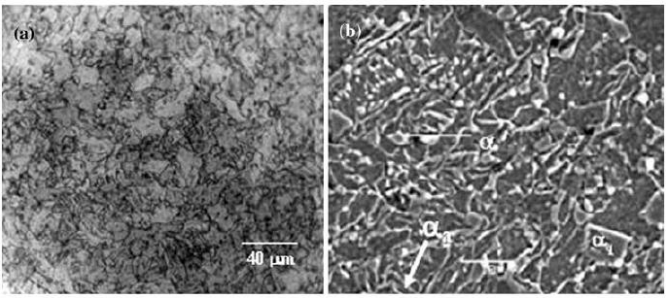
Perubahan mikrostruktur pada baja akibat penambahan 1.5% Cu adalah sebagai berikut:



Gambar 2.23 (a) Struktur mikro baja Ti-B *micro-alloyed* menunjukkan daerah perlit gelap (b) Hasil SEM menunjukkan daerah perlit berwarna terang karena efek etsa. (Ghosh, 2008)

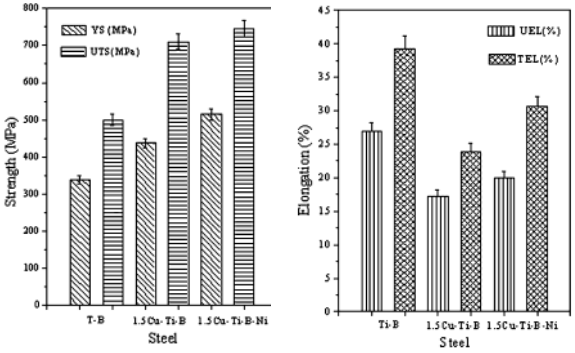
Gambar 2.23 (a) menunjukkan struktur mikro baja sebelum ditambahkan tembaga berupa campuran butir *ferrite* dengan distribusi *dark phase* pada batas butir ferit dan *triple point regions*. Gambar 2.23 (b) menunjukkan persebaran daerah perlit yang berwarna terang sepanjang batas butir ferit.

Setelah dilakukan penambahan 1.5% Cu, gambar 2.24 (a) menunjukkan fase ferit dengan ukuran butir yang lebih halus disertai dengan distribusi *dark island* yang merata. Gambar 2.24 (b) merupakan hasil SEM yang menunjukkan bahwa hasil dari dekomposisi austenit berupa struktur *acicular*. Selain itu, juga terdapat ferit dengan batas yang tidak beraturan. Struktur tersebut telah ditetapkan sebagai *quasi-polygonal ferrite* oleh ISIJ Bainitic Committee yang terbentuk karena pendinginan cepat baja karbon rendah dari fasa tunggal austenit ke fasa tunggal ferit.



Gambar 2.24 (a) Struktur mikro baja 1.5 Cu-Ti-B *micro-alloyed* menunjukkan ferit halus dengan distribusi *dark island* (b) Hasil SEM menunjukkan distribusi martensit, quasi-polygonal ferit, dan acicular ferrite. (Ghosh, 2008)

Penambahan 1.5% Cu pada baja *micro-alloyed* Ti-B menambah kekuatan baja tersebut sebagai akibat dari pembentukan martensit pada batas butir, penghalusan ukuran butir ferrit, dan presipitasi Cu (gambar 2.34). Akan tetapi penambahan Cu tersebut mengurangi keuletan baja karena adanya struktur martensit pada batas butir ferrit.

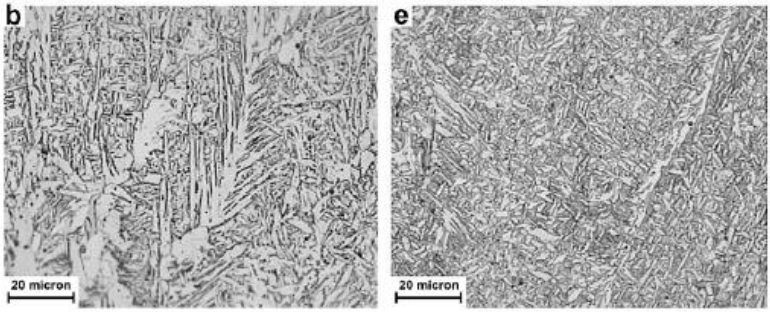


Gambar 2.25 (a) Grafik YS dan UTS baja paduan dan (b) Grafik keuletan baja paduan yang di-investigasi. (Ghosh, 2008)

2.8.2 *Effect of Copper Content On The Microstructure and Mechanical Properties of Multipass MMA, Low Alloy Steel Weld Metal Deposits*

Avazkonandeh (2009) melakukan penelitian mengenai pengaruh penambahan tembaga dengan kadar 0.14-0.94% Cu terhadap struktur mikro dan sifat mekanik dari Cr-Ni-Cu *low alloy steel weld metal deposits.* Preparasi logam lasan menggunakan metode *metal arc welding* pada posisi datar.

Struktur mikro logam lasan diamati menggunakan mikroskop optik menggunakan etsa 2% nital. Berikut hasil pengamatan struktur mikro logam lasan:



Gambar 2.26 Hasil pengamatan struktur mikro logam lasan (etsa 2% nital): (b) struktur mikro logam lasan dengan penambahan 0.14% Cu (e) struktur mikro logam lasan dengan penambahan 0.94% Cu. (Avazkonandeh, 2009)

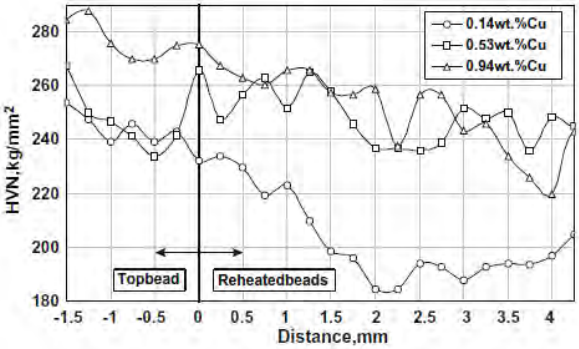
Hasil pengamatan struktur mikro logam lasan menunjukkan adanya peningkatan jumlah fase *acicular ferrite* dan penurunan fase *proeutectoid ferrite (grain boundary ferrite)* seiring dengan penambahan Cu ke dalam baja. Hal tersebut disebabkan penambahan tembaga sebagai unsur paduan kedalam baja menurunkan temperatur transformasi *austenite* ke *ferrite.* Penurunan temperatur transformasi *austenite* ke *ferrite* mengakibatkan berkurangnya waktu untuk pertumbuhan butir *grain boundary ferrite* sehingga didapat fase *grain boundary ferrite* dengan butir yang tipis dan meningkatkan jumlah fase

acicular ferrite pada baja. Data kuantitatif jumlah fase ditunjukkan oleh tabel berikut:

Tabel 2.6 Data kuantitatif jumlah fase *proeutectoid ferrite* (PF) dan *acicular ferrite* (AF) terhadap efek penambaha tembaga pada logam lasan. (Avazkonandeh, 2009)

wt.% Cu in the weld metal	Top bead (%)		
	PF	FS	AF
0.14	22.6	24.5	52.9
0.53	22.8	7.9	69.3
0.94	5.1	4.3	90.6

Pengaruh penambahan Cu terhadap kekerasan logam lasan ditunjukkan oleh gambar berikut:



Gambar 2.27 Hasil uji kekerasan *vickers* logam lasan berdasarkan variasi penambahan Cu. (Avazkonandeh, 2009)

Dari gambar diatas, terlihat bahwa peningkatan kekerasan logam lasan sebanding dengan penambahan Cu ke dalam logam lasan. Hal tersebut disebabkan oleh penguatan *ferrite* oleh Cu melalui larutan padat, penghalusan butir *ferrite,* dan peningkatan jumlah *acicular ferrite* pada logam lasan.

2.8.3 *The Influence of Austenizing Parameters On the Grain Size Of Hypoeutectoid Steel*

Klaric (2009) melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh parameter austenitisasi terhadap ukuran butir dan kekerasan baja *hypoeutectoid.* Komposisi kimia baja yang digunakan ditunjukkan oleh tabel berikut:

Tabel 2.7 Komposisi Kimia Baja *hypoeutectoid* yang digunakan. (Klaric, 2009)

C	Mn	P	S	N
≤ 0,17	≤ 1,40	≤ 0,045	≤ 0,045	≤ 0,009

Berikut tabel parameter austenitisasi yang digunakan:

Tabel 2.8 Parameter austinitisasi yang digunakan. (Klaric, 2009)

Austenitizing temperature, ϑ°C	900			975			1050		
Austenitizing time, log t, s	2	3	4	2	3	4	2	3	4
Sample mark	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Type of test	- determination of the grain size by ASTM E112 method - and Vickers hardness tests HV2								

Pengukuran ukuran butir menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 100x sesuai metode ASTM E112. Hasil pengukuran butir menunjukkan bahwa semakin besar temperatur austenitisasi dan waktu tahan austenitisasi, maka semakin besar butir austenit yang didapat. Hal tersebut karena terjadinya pertumbuhan butir (*grain growth*) *austenite* saat temperatur austenitisasi. Hasil perhitungan butir spesimen dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.9 Hasil pengukuran ukuran butir spesimen baja. (Klaric, 2009)

		Grain size by ASTM E112 method								
Sample mark		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Measurement number	I.	8	8	7	7	6	5	6	6	5
	II.	7	7	6	7	6	5	6	6	5
	III.	8	8	7	8	7	6	7	7	6
	IV.	8	7	6	7	6	6	6	6	5
	V.	8	8	7	8	6	6	7	6	6

Pengujian kekerasan baja dilakukan dengan menggunakan metode *vickers*. Hasil pengukuran kekerasan baja menunjukkan bahwa semakin besar ukuran butir maka kekerasan baja semakin menurun. Hasil pengukuran kekerasan baja dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.10 Hasil pengukuran kekerasan baja menggunakan *vickers*. (Klaric, 2009)

		Hardness HV2								
Sample mark		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Measurement number	I.	110	106	101	108	105	104	101	101	97
	II.	110	106	100	109	105	102	102	102	96
	III.	109	106	101	109	105	104	101	101	96
	IV.	110	105	101	107	104	103	102	100	97
	V.	111	106	102	108	104	103	102	100	95

2.8.4 *Effect of Prior Austenite Grain Size on The Morphology and Mechanical Properties of Martensite in Medium Carbon Steel*

Prawoto (2011) melakukan penelitian mengenai pengaruh ukuran butir *austenite* saat temperatur austenitisasi terhadap morfologi dan sifat mekanik *martensite* pada baja karbon medium. Penelitian ini menggunakan baja dengan komposisi kimia sebagai berikut: C 0.4311, Mn 0.6632, S 0.0028, P 0.0019, dan Fe *balanced.*

Metode penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut: spesimen baja dipanaskan pada temperatur 1100^{o}C dengan variasi waktu tahan, yaitu 1, 2, 16, 24, dan 48 jam. Setelah itu, spesimen di *quenched.* Pengambilan struktur mikro

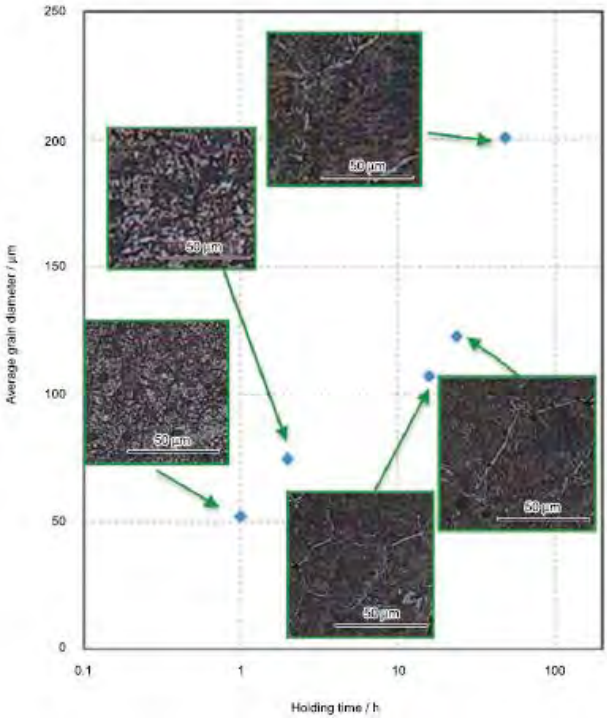
dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 1000x dan SEM dengan perbesaran 20000x pada bagian tengah spesimen. Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode *microhardness* dengan beban 400 gram.

Tabel di bawah ini menunjukkan ukuran butir *prior austenite.* Pada tabel tersebut terlihat bahwa ukuran butir *prior austenite* semakin besar seiring dengan peningkatan waktu tahan temperatur austenitisasi.

Tabel 2.11 Hasil pengukuran ukuran butir *prior austenite.* (Prawoto, 2011)

Holding time/h	Average grain diameter/μm	Approximate ASTM grain size/μm	Grain size using eye piece reticle/μm
1	52.12	5.59	5.33
2	74.64	4.55	4.63
16	107.14	3.50	3.67
24	122.61	3.11	3.33
48	200.50	1.68	1.50

Selain itu, struktur mikro dari *prior austenite grain* dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



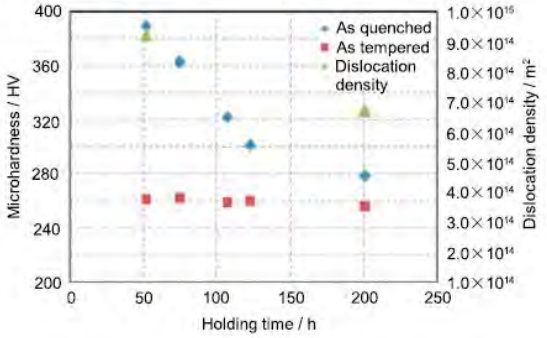
Gambar 2.28 Hasil pengamatan mikroskop optik struktur *prior austenite grain* dengan perbesaran 200x. (Prawoto, 2011)

Tabel 2.12 di bawah ini menunjukkan diameter butir rata-rata serta nilai *microhardness* rata-rata spesimen. Diameter butir rata-rata semakin besar, sedangkan nilai *microhardness* semakin turun seiring dengan semakin besarnya waktu tahan temperatur austenitisasi.

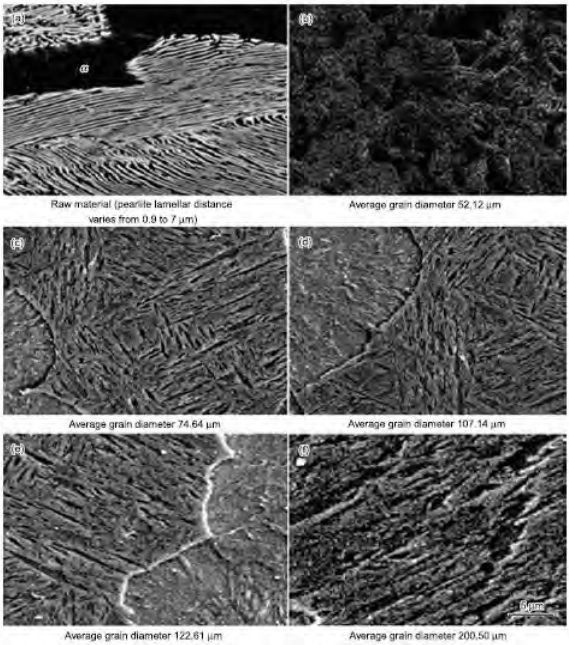
Tabel 2.12 Hasil pengukuran butir dan *microhardness* spesimen. (Prawoto, 2011)

Holding time/h	Average grain diameter/μm	Average microhardness (from 10 locations)	
		As quenched	As tempered
Original	32–45 (ASTM GS 6–7)	–	–
1	52.12	388.8	261
2	74.64	362.4	262
16	107.14	321.6	259
24	122.61	300.8	260
48	200.50	278.4	261

Gambar 2.30 dibawah ini menunjukkan ketika ukuran butir menjadi semakin besar, maka ukuran *packet* pada struktur *martensite* juga menjadi semakin besar. Selain itu, morfologi jarum-jarum *martensite* juga terlihat semakin besar seiring dengan peningkatan ukuran butir. Ukuran butir yang membesar menyebabkan densitas dislokasi pada struktur mikro menurun sehingga kekerasan baja juga menurun karena kekuatan dan kekerasan *martensite* bergantung terhadap densitas dislokasi pada *prior austenite grain* (dapat dilihat pada gambar 2.29).



Gambar 2.29 Hubungan antara *holding time* temperatur austenitisasi, *microhardness,* dan densitas dislokasi pada baja. (Prawoto, 2011)



Gambar 2.30 Hasil observasi lebih lanjut terhadap morfologi *martensite.* Ukuran jarum-jarum dan *packet martensite* menjadi semakin besar seiring dengan peningkatan ukuran butir. (Prawoto, 2011)

2.8.5 *Effect of Austenite Grain Size and Cooling Rate On Widmanstatten Ferrite Formation in Low Alloy Steels*

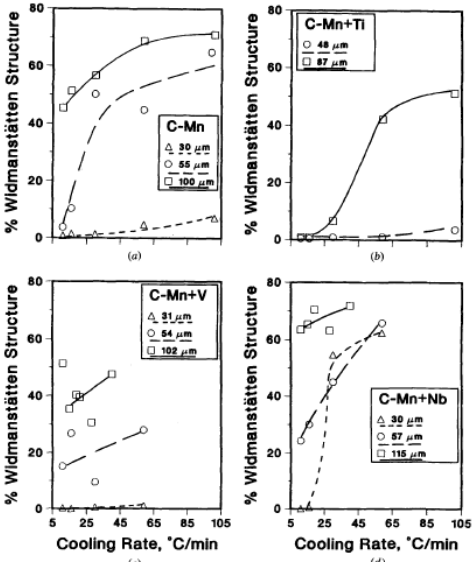
Bodnar (1994) melakukan penelitian mengenai pengaruh ukuran butir *austenite* dan laju pendinginan terhadap pembentukan fase *widmanstatten ferrite* pada baja paduan rendah. Material yang digunakan adalah baja dengan komposisi seperti tabel berikut:

Tabel 2.13 Komposisi kimia baja paduan C-Mn yang digunakan. (Bodnar, 1994)

Steel	C	Mn	P	S	Si	Cu	V	Nb	Ti	Al	N
C-Mn	0.18	1.15	0.015	0.030	0.18	0.09	<0.003	<0.005	—	0.026	0.0073
C-Mn+Ti	0.19	1.06	0.014	0.011	0.21	0.02	<0.003	<0.005	0.020	0.046	0.0100
C-Mn+V	0.19	1.11	0.009	0.028	0.03	0.11	0.058	<0.005	—	<0.005	0.0065
C-Mn+Nb	0.19	1.15	0.007	0.027	0.01	0.14	<0.003	0.022	—	0.007	0.0067

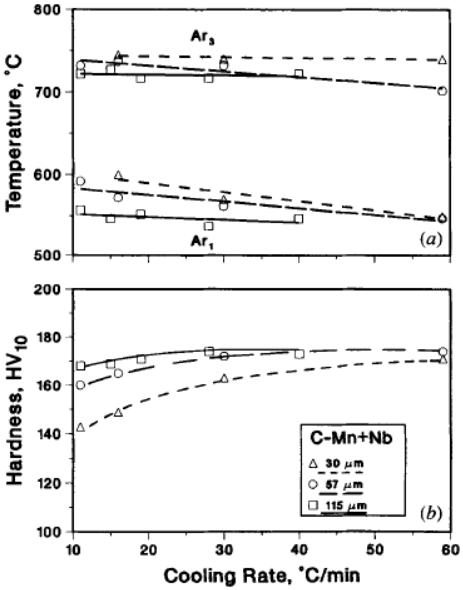
Metode yang digunakan adalah dengan memanaskan masing-masing baja paduan pada rentang temperatur 925-1370^{o}C untuk mendapatkan variasi ukuran butir *austenite.* Setelah itu, spesimen kemudian di *quench.*

Hasil pengujian struktur mikro menunjukkan bahwa semakin besar ukuran butir *austenite* saat temperatur austenitisasi maka semakin banyak jumlah fase *widmanstatten ferrite* (WF) yang terbentuk pada masing-masing baja paduan. Hasil tersebut dapat dilihat pada gambar berikut:



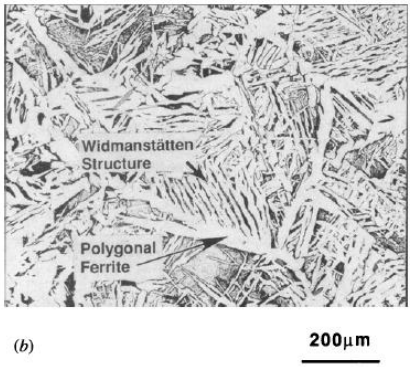
Gambar 2.31 Grafik yang menunjukkan hubungan antara ukuran butir *austenite* dan laju pendinginan terhadap jumlah fase WF pada baja paduan. (Bodnar, 1994)

Jumlah fase *widmanstatten ferrite* yang semakin banyak pada baja akan menaikkan kekerasan baja tersebut. Pada penelitian ini, seluruh baja paduan mengalami peningkatan kekerasan dengan bertambahnya fase *widmanstatten ferrite* pada baja. Selain itu, bertambahnya ukuran butir *austenite* menurunkan temperatur transformasi Ar_1 dan Ar_3 dalam jumlah kecil dan tidak signifikan pada baja.



Gambar 2.32 Pengaruh ukuran butir *austenite* pada (a) temperatur Ar_1 dan Ar_3 (b) hasil uji kekerasan *vickers* (beban 10 kg) pada baja C-Mn-Nb. (Bodnar, 1994)

Gambar di bawah ini menunjukkan fase *widmanstatten ferrite* pada baja paduan yang digunakan pada penelitian ini. *Polygonal ferrite* disebut juga sebagai *grain boundary ferrite* yang tumbuh pada batas butir *austenite* dengan bentuk yang mengikuti kontur dari batas butir *austenite,* sedangkan *widmanstatten ferrite* tumbuh dari *grain boundary ferrite* ke dalam butir *austenite* dengan bentuk plat memanjang, sejajar, dan berwarna putih.



Gambar 2.33 Hasil pengamatan struktur mikro yang menunjukkan fase: (a) *grain boundary ferrite/polygonal ferrite* (b) struktur *widmanstatten.* (Bodnar, 1994)

Pembentukan fase *widmanstatten ferrite* dipengaruhi oleh ukuran butir *austenite* serta laju pendinginan baja. Semakin besar ukuran butir *austenite* dan semakin cepat laju pendinginan, maka semakin banyak fase *widmanstatten ferrite* yang muncul pada baja. Fase *widmanstatten ferrite* banyak ditemukan pada baja dengan kadar karbon 0.20-0.40% C.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III
METODOLOGI

3.1 Alat dan Bahan Percobaan

3.1.1 Bahan-bahan Penelitian

1. Baja API 5L *grade* B
2. Tembaga murni
3. Larutan etsa Nital (HNO_3 dan methanol)
4. Resin poliester
5. Katalis
6. *Metal polish* Autosol
7. Kain bludru
8. Air

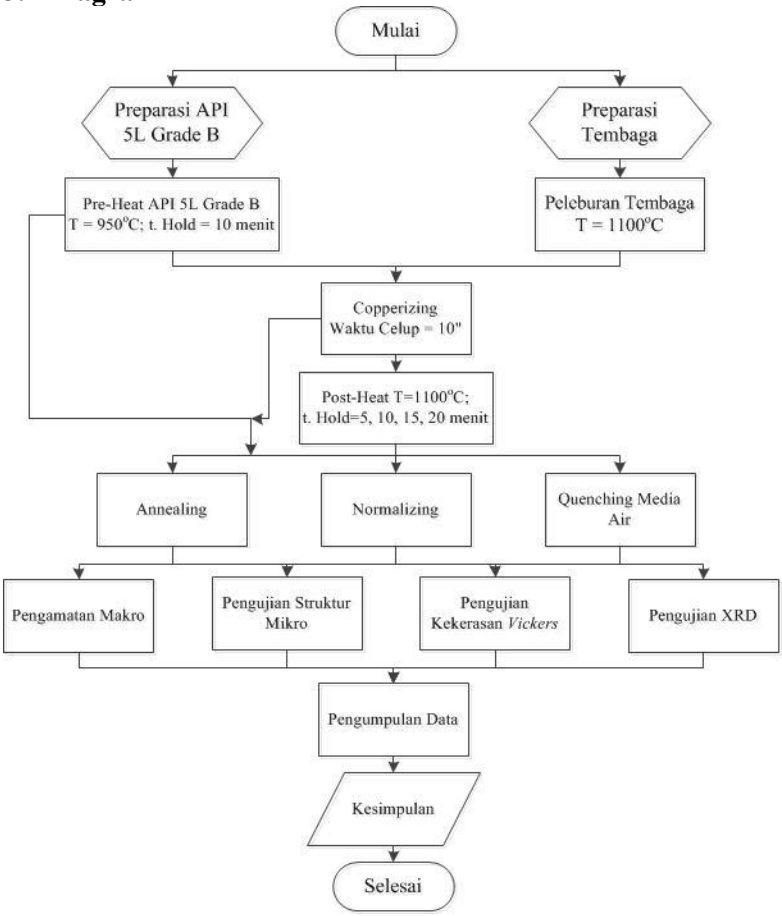
3.1.2 Alat-alat Penelitian

1. Gerinda tangan
   Digunakan untuk memotong lembaran baja API 5L *grade* B berukuran besar menjadi ukuran yang lebih kecil.
2. Gergaji tangan
   Digunakan untuk memotong spesimen baja API 5L *grade* B yang berukuran sangat kecil yang tidak dapat dipotong menggunakan gerinda tangan.
3. *Crucible* grafit
   Diugunakan sebagai wadah tembaga murni yang akan dicairkan saat proses *copperizing* di dalam *furnace.*
4. *Muffle furnace*
   Digunakan untuk melakukan pemanasan awal *(pre-heat)* spesimen baja API 5L *grade* B sebelum proses *copperizing* dan mencairkan tembaga murni.
5. Penjepit baja
   Digunakan untuk memindahkan spesimen baja API 5L *grade* B dari maupun ke dalam *furnace.*
6. Ember
   Digunakan sebagai wadar air untuk *water quenching*
7. Alat kikir

Digunakan untuk meratakan permukaan spesimen API 5L *grade* B sebelum dilakukan pengamplasan.

8. Pipa sok
   Digunakan sebagai cetakan *mounting* spesimen baja API 5L *grade* B untuk uji metalografi.
9. Kertas amplas
   Digunakan untuk *grinding* spesimen baja API 5L *grade* B untuk preparasi uji metalografi.
10. Mesin *polish*
    Digunakan untuk menghilangkan *scratch* pada permukaan spesimen baja API 5L *grade* B yang tidak dapat dihilangkan dengan pengamplasan sebelum uji metalografi.
11. Alat uji kekerasan *microvickers*
    Digunakan untuk mengukur kekerasan spesimen kontrol dan spesimen akhir.
12. Alat uji SEM/EDX
    Digunakan untuk mengetahui morfologi bagian penampang spesimen dan *mapping* kandungan tembaga dalam spesimen.
13. Alat uji XRD
    Digunakan untuk mengetahui fasa yang terbentuk pada spesimen setelah perlakuan *post-heat* dan pendinginan proses *copperizing.*

3.2 Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 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 x l x t = 7 cm x 4 cm x 0.3 cm. Setelah itu, spesimen dikikir dan diamplas permukaannya menggunakan amplas *grade* 80 untuk menghilangkan lapisan pengotor di permukaannya. Spesimen kontrol kemudian dipreparasi lebih lanjut untuk pengujian metalografi, kekerasan, kekuatan impak, dan *optical emission spectroscopy* (OES).

Berikut tabel komposisi kimia baja API 5L *grade* B hasil uji *optical emission spectroscopy* di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS):

Tabel 3.1 Hasil Uji Komposisi Kimia OES pada plat sampel awal

Elements	Ave. wt%	Elements	Ave. wt%
Fe	98.9	Al	0.0133
C	0.205	Co	< 0.0005
Si	0.196	Cu	0.0119
Mn	0.449	Nb	0.0283
P	0.0143	Ti	0.0073
S	0.0044	V	0.0064
Cr	0.323	W	< 0.0010
Mo	0.0046	Pb	< 0.0010
Ni	0.0127		

Hasil spektro diatas menunjukkan bahwa baja API 5L *grade* B merupakan baja HSLA-Nb karena terdapat penambaha unsur paduan dalam jumlah kecil, yaitu 0.0283 pada baja karbon rendah (0.205% C). Penambahan Nb pada *microalloyed steels* berkisar antara 0.02-0.1% Nb (Misra, 2015).

3.3.2 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 kedalam *furnace* dan dipanaskan sampai temperatur leleh tembaga (1100^{o}C). Banyaknya tembaga yang dileburkan dalam sekali peleburan untuk *copperizing* adalah ±1100 gram.

3.3.3 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^{o}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).

3.3.4 Proses Copperizing Tanpa Post-Heat

Proses ini bertujuan untuk menghasilkan spesimen kontrol II. Setelah spesimen dipanaskan pada temperatur 950^{o}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).

Prediksi kedalaman difusi tembaga pada baja dapat dihitung melalui persamaan berikut: (Kurniasari, 2008)

$$X = \sqrt{Dt}$$

Keterangan: X = ketebalan difusi (cm)
D = koefisien difusi (cm^2/s)
t = waktu proses (s)

Dengan waktu celup selama sepuluh menit (600 s), maka kedalaman difusi tembaga dalam baja pada temperatur 1100°C adalah: (D_{Cu} (1100°C) = 0.59 x 10^{-6} cm^2/s)

$$X = \sqrt{0.59 \times 10^{-6} \times 600} = 1.88 \times 10^{-2}\, cm = 188\, \mu m$$

3.3.5 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).

Copperizing baja AISI 1006 dengan waktu celup 5 menit dan pendinginan udara menghasilkan lapisan tembaga di permukaan baja dengan ketebalan (X) 141.21 µm (Vicky, 2016). Dari hasil tersebut, dapat diperkirakan waktu tahan *post-heat* (T = 1100°C) untuk menghilangkan lapisan tembaga tersebut melalui perhitungan sebagai berikut:

$$X = \sqrt{Dt}\ ; maka\ t = \frac{X^2}{D}$$

$$t = \frac{(141.21 \times 10^{-4})^2\, cm}{0.59 \times 10^{-6}}$$

$$t = 337.97\, s = 5.63\, menit$$

3.3.6 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 Makro

Alat : Kamera Canon DSLR EOS 70D
Mikroskop Stereo Carl Zeiss Stemi DV4

Tujuan : Untuk mengetahui gambar permukaan dan penampang melintang spesimen kontrol I, spesimen kontrol II, dan spesimen akhir pada skala makro.

Prosedur :

- Mengambil foto permukaan spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir menggunakan kamera Canon DSLR EOS 70D
- Memotong spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir dengah arah melintang menggunakan gergaji tangan
- Mengambil gambar penampang melintang spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir menggunakan mikroskop stereo carl zeiss stemi DV4
- Menganalisis hasil pengamatan makro.

b. Pengamatan Struktur Mikro

Alat : Mikroskop Optik Olympus BX51M-RF di laboratorium metalurgi JTMM FTI-ITS.

Tujuan : Melihat dan mengamati struktur mikro pada penampang melintang spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir.

Prosedur :

- Memotong spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir dengan ukuran 1 x 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 optik
- Menganalis hasil pengamatan struktur mikro spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir.

c. Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD)

Alat : Mesin *X-ray Diffraction* (XRD) PANanalytical X'Pert PRO MPD di laboratorium karakterisasi material JTMM FTI-ITS.

Tujuan : Untuk mengidentifikasi fase dan struktur kristal α-Fe pada spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir.

Prosedur :

- Memotong spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir
- Menghaluskan bagian penampang melintang spesimen menggunakan kikir
- Melakukan uji XRD pada bagian penampang melintang spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir.

d. Pengujian kekerasan *vickers*

Alat : *Macrohardness Tester* Wilson 402 MVD

Tujuan: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 :

- Memotong spesimen kontrol I, kontrol II, dan akhir dengan ukuran 1 x 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.

3.4 Rancangan Penelitian

Untuk memperoleh data yang sistematis, maka dibuat rancangan penelitian yang ditunjukkan oleh tabel dibawah ini:

Tabel 3.2 Rancangan Penelitian

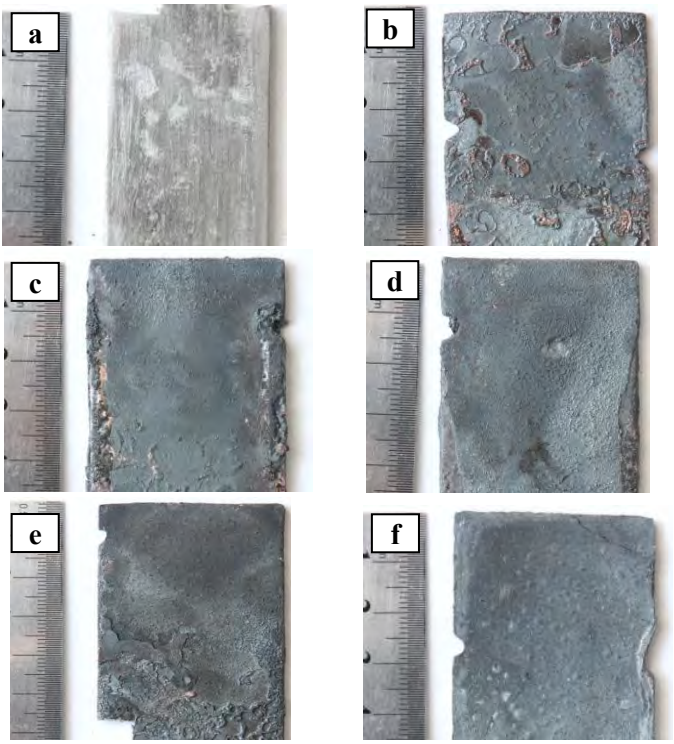
Laju Pendinginan	Perlakuan	Pengujian			
		Metalografi	Kekerasan Vickers	XRD	Pengamatan Makro
Annealing	Tanpa Cu	V	V	V	V
	10" Cu				
	10" Cu PH 5"				
	10" Cu PH 10"				
	10" Cu PH 15"				
	10" Cu PH 20"				
Normalizing	Tanpa Cu	V	V	V	V
	10" Cu				
	10" Cu PH 5"				
	10" Cu PH 10"				
	10" Cu PH 15"				
	10" Cu PH 20"				
Quenching	Tanpa Cu	V	V	V	V
	10" Cu				
	10" Cu PH 5"				
	10" Cu PH 10"				
	10" Cu PH 15"				
	10" Cu PH 20"				

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengamatan Makro

Hasil pengamatan makro permukaan spesimen baja API 5L *grade* B dengan laju pendinginan *annealing* ditunjukkan oleh gambar dibawah ini:



Gambar 4.1 Hasil Pengamatan Makro Permukaan Baja API 5L *grade* B pendinginan *annealing:* (a) substrat API 5L (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.

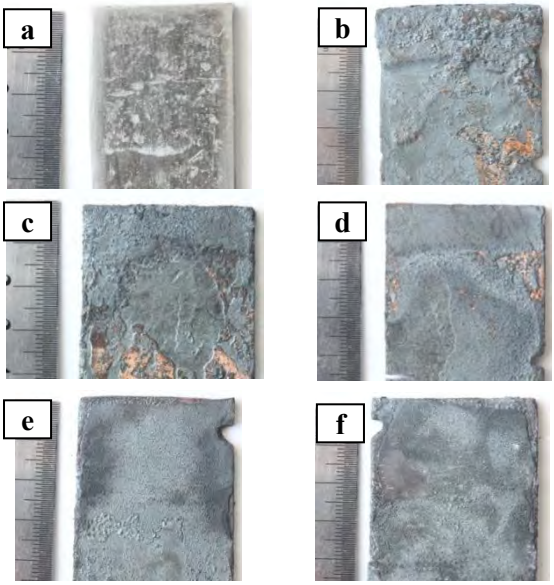
Hasil pengamatan makro permukaan baja API 5L *grade* B pendinginan *annealing* ditunjukkan oleh gambar 4.1 diatas. Gambar 4.1 (a) menunjukkan kondisi permukaan spesimen baja API 5L *grade* B tanpa *copperizing.* Pada gambar tersebut terlihat lapisan tipis oksida berwarna hitam yang tersisa pada permukaan spesimen setelah proses *grinding* dilakukan. Gambar 4.1 (b) menunjukkan kondisi permukaan spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga berwarna coklat kemerahan pada bagian tepi kiri, tengah, dan kanan bawah permukaan spesimen. Selain itu, terdapat lapisan oksida berwarna hitam yang menutupi sebagian besar permukaan spesimen.

Gambar 4.1 (c) menunjukkan kondisi permukaan spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 5 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga berwarna coklat kemerahan pada bagian tepi kiri dan kanan permukaan spesimen dan lapisan oksida berwarna hitam yang menutupi sebagian besar permukaan spesimen. Gambar 4.1 (d) menunjukkan kondisi permukaan spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 10 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga berwarna kemerahan pada bagian tepi kiri bawah dan kanan bawah permukaan spesimen dan lapisan oksida berwarna hitam yang menutupi sebagian besar permukaan spesimen.

Gambar 4.1 (e) menunjukkan kondisi permukaan spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 15 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga berwarna coklat kemerahan pada bagian bawah permukaan spesimen dan terdapat pula lapisan oksida berwarna hitam yang menutupi sebagian besar permukaan spesimen. Gambar 4.1 (f) menunjukkan kondisi permukaan spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 20 menit. Pada gambar tersebut, terlihat lapisan oksida berwarna hitam yang menutupi seluruh permukaan spesimen.

Secara keseluruhan hasil pengamatan makro yang ditunjukkan oleh gambar 4.1 menunjukkan adanya lapisan tembaga berwarna coklat kemerahan dan lapisan oksida berwarna hitam pada permukaan spesimen baja API 5L *grade* B pendinginan *annealing,* kecuali spesimen dengan waktu tahan *post-heat* 20 menit yang hanya terlihat lapisan oksida berwarna hitam pada seluruh permukaannya. Selain itu, lapisan tembaga berwarna coklat kemerahan secara visual terlihat berkurang pada permukaan spesimen seiring dengan bertambahnya waktu tahan *post-heat* pada proses *copperizing.*

Hasil pengamatan makro permukaan spesimen baja API 5L *grade* B dengan laju pendinginan *normalizing* ditunjukkan oleh gambar dibawah ini:



Gambar 4.2 Hasil Pengamatan Makro Permukaan Baja API 5L *grade* B pendinginan *normalizing* (a) Substrat API 5L (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.

Hasil pengamatan makro permukaan baja API 5L *grade* B pendinginan *normalizing* ditunjukkan oleh gambar 4.2 diatas. Gambar 4.2 (a) menunjukkan kondisi permukaan spesimen baja API 5L *grade* B tanpa *copperizing.* Pada gambar tersebut terlihat lapisan tipis oksida berwarna hitam yang tersisa pada permukaan spesimen setelah proses *grinding* dilakukan. Gambar 4.2 (b) menunjukkan kondisi permukaan spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga berwarna coklat kemerahan dan lapisan oksida berwarna hitam yang menutupi sebagian besar permukaan spesimen.

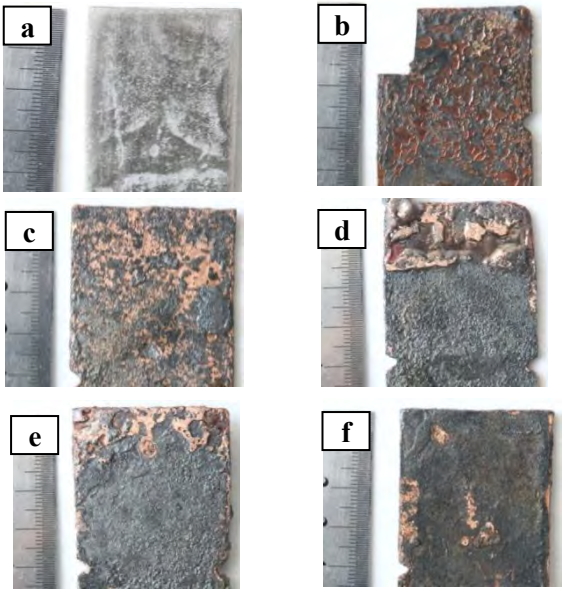
Gambar 4.2 (c) menunjukkan kondisi permukaan spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 5 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga berwarna coklat kemerahan pada bagian bawah permukaan spesimen dan lapisan oksida berwarna hitam yang menutupi sebagian besar permukaan spesimen. Gambar 4.2 (d) menunjukkan kondisi permukaan spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 10 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga berwarna kemerahan pada bagian tepi kanan spesimen dan lapisan oksida berwarna hitam yang menutupi sebagian besar permukaan spesimen. Lapisan tembaga pada spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 10 menit secara visual terlihat lebih sedikit jika dibandingkan dengan lapisan tembaga pada permukaan spesimen *copperizing* sebelumnya.

Gambar 4.2 (e) menunjukkan kondisi permukaan spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 15 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga berwarna coklat kemerahan yang secara visual terlihat sangat sedikit pada bagian tepi atas permukaan spesimen. Selain itu, terdapat lapisan oksida berwarna hitam yang menutupi sebagian besar permukaan spesimen. Gambar 4.2 (f) menunjukkan kondisi permukaan spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 20 menit. Pada gambar tersebut, terlihat lapisan tembaga berwarna coklat kemerahan yang secara visual terlihat sangat sedikit pada bagian tepi kiri permukaan spesimen. Selain itu, terdapat lapisan

oksida berwarna hitam yang menutupi sebagian besar permukaan spesimen.

Secara keseluruhan hasil pengamatan makro yang ditunjukkan oleh gambar 4.2 menunjukkan adanya lapisan tembaga berwarna coklat kemerahan dan lapisan oksida berwarna hitam pada permukaan spesimen baja API 5L *grade* B pendinginan *normalizing*. Selain itu, lapisan tembaga berwarna coklat kemerahan secara visual terlihat berkurang pada permukaan spesimen seiring dengan bertambahnya waktu tahan *post-heat* pada proses *copperizing*.

Hasil pengamatan makro permukaan spesimen baja API 5L *grade* B dengan laju pendinginan *quenching* ditunjukkan oleh gambar dibawah ini:



Gambar 4.3 Hasil Pengamatan Makro Permukaan Baja API 5L *grade* B pendinginan *quenching* (a) Substrat API 5L (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.

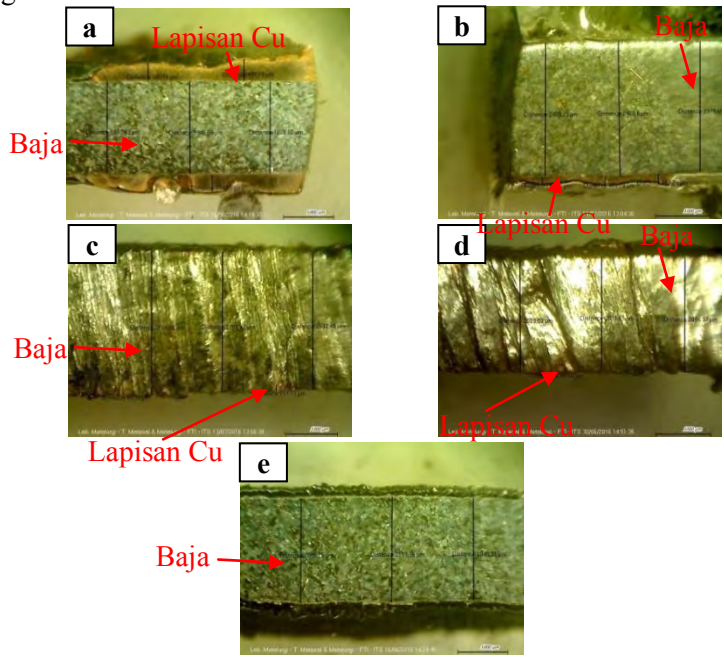
Hasil pengamatan makro permukaan baja API 5L *grade* B pendinginan *quenching* ditunjukkan oleh gambar 4.3 diatas. Gambar 4.3 (a) menunjukkan kondisi permukaan spesimen baja API 5L *grade* B tanpa *copperizing.* Pada gambar tersebut terlihat lapisan tipis oksida berwarna hitam yang tersisa pada permukaan spesimen setelah proses *grinding* dilakukan. Gambar 4.3 (b) menunjukkan kondisi permukaan spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga berwarna coklat kemerahan yang menutupi sebagian besar permukaan spesimen. Selain itu, terdapat lapisan oksida berwarna hitam pada permukaan spesimen.

Gambar 4.3 (c) menunjukkan kondisi permukaan spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 5 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga berwarna coklat kemerahan yang menutupi sebagian besar permukaan spesimen dan cenderung dominan pada bagian tepi atas permukaan spesimen. Selain itu, terdapat lapisan oksida berwarna hitam pada permukaan spesimen. Gambar 4.3 (d) menunjukkan kondisi permukaan spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 10 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga berwarna kemerahan pada bagian tepi atas permukaan spesimen dan lapisan oksida berwarna hitam yang menutupi sebagian besar permukaan spesimen.

Gambar 4.3 (e) menunjukkan kondisi permukaan spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 15 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga berwarna coklat kemerahan pada bagian tepi atas permukaan spesimen dan lapisan oksida berwarna hitam yang menutupi sebagian besar permukaan spesimen. Gambar 4.3 (f) menunjukkan kondisi permukaan spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 20 menit. Pada gambar tersebut, terlihat lapisan tembaga berwarna coklat kemerahan pada bagian tepi kiri, tepi kanan, dan tengah permukaan spesimen. Selain itu, terdapat lapisan oksida berwarna hitam yang menutupi sebagian besar permukaan spesimen.

Secara keseluruhan hasil pengamatan makro yang ditunjukkan oleh gambar 4.3 menunjukkan adanya lapisan tembaga berwarna coklat kemerahan dan lapisan oksida berwarna hitam pada permukaan spesimen baja API 5L *grade* B pendinginan *quenching*. Selain itu, lapisan tembaga berwarna coklat kemerahan secara visual terlihat berkurang pada permukaan spesimen seiring dengan bertambahnya waktu tahan *post-heat* pada proses *copperizing*.

Hasil pengamatan makro penampang melintang baja API 5L *grade* B dengan laju pendinginan *annealing* ditunjukkan oleh gambar dibawah ini:



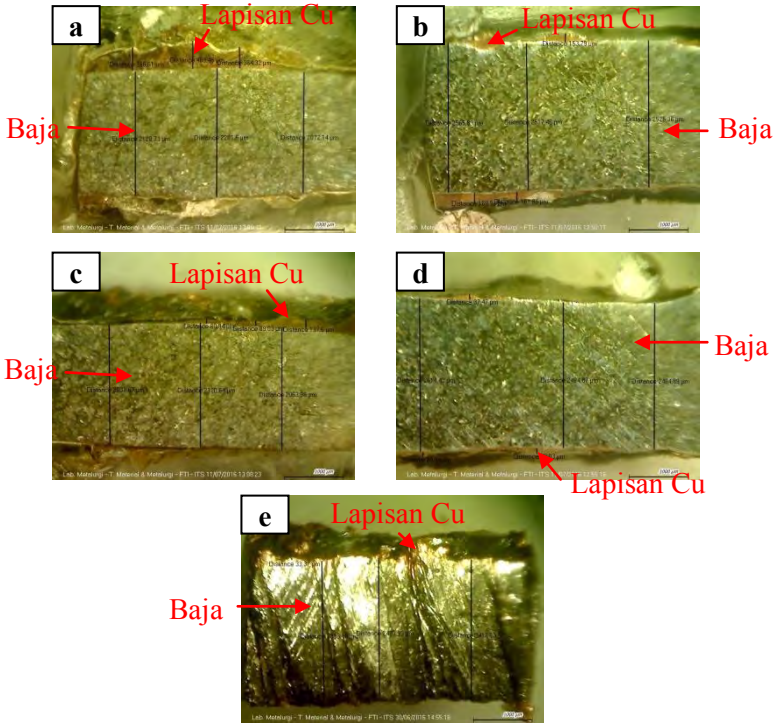
Gambar 4.4 Hasil Pengamatan Makro Penampang Melintang Baja API 5L *grade* B pendinginan *annealing* dengan perbesaran 16x: (a) *Copperizing* 10 menit (b) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 5 menit (c) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 10 menit (d) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 15 menit (e) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 20 menit.

Hasil pengamatan makro penampang melintang spesimen baja API 5L *grade* B pendinginan *annealing* ditunjukkan oleh gambar 4.4 diatas. Gambar 4.4 (a) menunjukkan kondisi penampang melintang spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga pada permukaan baja dengan ketebalan rata-rata: 377.03 µm. Gambar 4.4 (b) menunjukkan kondisi penampang melintang spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 5 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga pada permukaan baja dengan ketebalan rata-rata: 151.17 µm.

Gambar 4.4 (c) menunjukkan kondisi penampang melintang spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 10 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga pada permukaan baja dengan ketebalan rata-rata: 89.75 µm. Gambar 4.4 (d) menunjukkan kondisi penampang melintang spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 15 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga pada permukaan baja dengan ketebalan rata-rata: 48.56 µm. Gambar 4.4 (e) menunjukkan kondisi penampang melintang spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 20 menit. Pada gambar tersebut tidak terlihat adanya lapisan tembaga pada permukaan baja.

Secara keseluruhan, hasil pengamatan makro penampang melintang spesimen baja API 5L *grade* B pendinginan *annealing* menunjukkan adanya lapisan tembaga pada permukaan baja, kecuali spesimen dengan waktu tahan *post-heat* 20 menit yang tidak terdapat lapisan tembaga pada permukaannya. Selain itu, lapisan tembaga tersebut berkurang ketebalannya seiring dengan bertambahnya waktu tahan *post-heat* pada proses *copperizing*.

Hasil pengamatan makro penampang melintang baja API 5L *grade* B dengan laju pendinginan *normalizing* ditunjukkan oleh gambar dibawah ini:



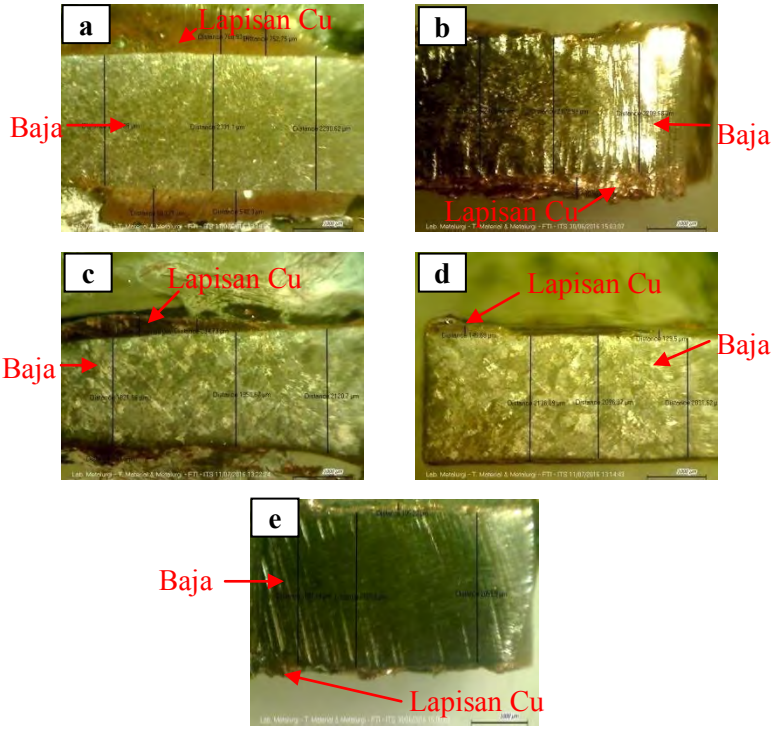
Gambar 4.5 Hasil Pengamatan Makro Penampang Melintang Baja API 5L *grade* B pendinginan *normalizing* dengan perbesaran 16x: (a) *Copperizing* 10 menit (b) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 5 menit (c) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 10 menit (d) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 15 menit (e) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 20 menit.

Hasil pengamatan makro penampang melintang spesimen baja API 5L *grade* B pendinginan *normalizing* ditunjukkan oleh gambar 4.5 diatas. Gambar 4.5 (a) menunjukkan kondisi penampang melintang spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga pada permukaan baja dengan ketebalan rata-rata: 410.13 µm. Gambar 4.5 (b) menunjukkan kondisi penampang melintang spesimen

baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 5 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga pada permukaan baja dengan ketebalan rata-rata: 161.88 µm. Gambar 4.5 (c) menunjukkan kondisi penampang melintang spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 10 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga pada permukaan baja dengan ketebalan rata-rata: 102.52 µm. Gambar 4.5 (d) menunjukkan kondisi penampang melintang spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 15 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga pada permukaan baja dengan ketebalan rata-rata: 89.15 µm. Gambar 4.5 (e) menunjukkan kondisi penampang melintang spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 20 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga pada permukaan baja dengan ketebalan rata-rata: 33.37 µm.

Secara keseluruhan, hasil pengamatan makro penampang melintang spesimen baja API 5L *grade* B pendinginan *normalizing* menunjukkan adanya lapisan tembaga pada permukaan baja. Selain itu, lapisan tembaga tersebut berkurang ketebalannya seiring dengan bertambahnya waktu tahan *post-heat* pada proses *copperizing*.

Hasil pengamatan makro penampang melintang baja API 5L *grade* B dengan laju pendinginan *quenching* ditunjukkan oleh gambar dibawah ini:



Gambar 4.6 Hasil Pengamatan Makro Penampang Melintang Baja API 5L *grade* B pendinginan *quenching* dengan perbesaran 16x: (a) *Copperizing* 10 menit (b) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 5 menit (c) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 10 menit (d) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 15 menit (e) *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 20 menit.

Hasil pengamatan makro penampang melintang spesimen baja API 5L *grade* B pendinginan *quenching* ditunjukkan oleh gambar 4.6 diatas. Gambar 4.6 (a) menunjukkan kondisi penampang melintang spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga pada permukaan baja dengan ketebalan rata-rata: 681.92 µm. Gambar 4.6 (b) menunjukkan kondisi penampang melintang spesimen

baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 5 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga pada permukaan baja dengan ketebalan rata-rata: 380.51 µm. Gambar 4.6 (c) menunjukkan kondisi penampang melintang spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 10 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga pada permukaan baja dengan ketebalan rata-rata: 285.86 µm. Gambar 4.6 (d) menunjukkan kondisi penampang melintang spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 15 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga pada permukaan baja dengan ketebalan rata-rata: 137.6 µm. Gambar 4.6 (e) menunjukkan kondisi penampang melintang spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* 10 menit *post-heat* 20 menit. Pada gambar tersebut terlihat lapisan tembaga pada permukaan baja dengan ketebalan rata-rata: 105.22 µm.

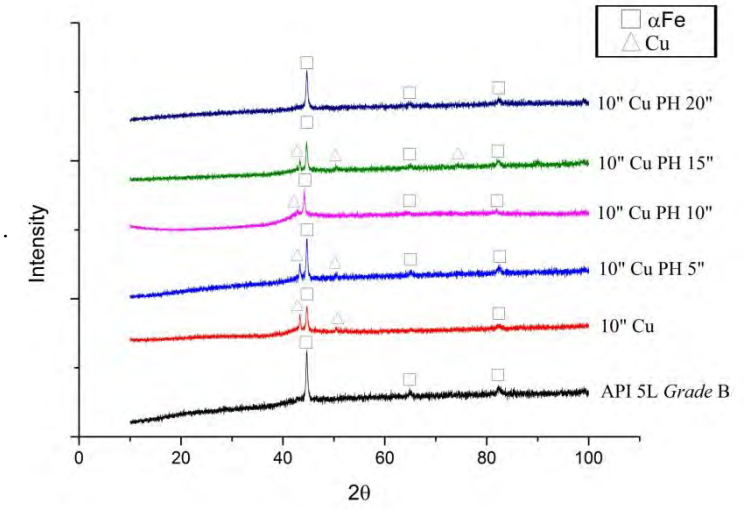
Secara keseluruhan, hasil pengamatan makro penampang melintang spesimen baja API 5L *grade* B pendinginan *quenching* menunjukkan adanya lapisan tembaga pada permukaan baja. Selain itu, lapisan tembaga tersebut berkurang ketebalannya seiring dengan bertambahnya waktu tahan *post-heat* pada proses *copperizing*.

4.2 Hasil Pengujian X-Ray Diffraction

Pengujian XRD dilakukan menggunakan alat XRD *PAN Analytical X'Pert Pro* dengan parameter sudut $2\theta = 10^{o}$-100^{o} dan panjang gelombang CuKα 1,54060 Å. Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui fase yang terbentuk pada spesimen baja API 5L *grade* B tanpa *copperizing, copperizing,* dan *copperizing* dengan *post-heat.* Identifikasi fase hasil uji XRD dilakukan dengan menggunakan *software HighScore Plus* dan pencocokan manual dengan kartu JCPDF untuk puncak – puncak yang teridentifikasi saat *Search Match.*

4.2.1 Spesimen Baja API 5L *Grade* B Dengan Laju Pendinginan *Annealing*

Hasil uji identifikasi fase XRD untuk spesimen baja API 5L *grade* B dengan laju pendinginan *annealing* ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Hasil Uji XRD Spesimen Baja API 5L *Grade* B Laju Pendinginan *Annealing*

Gambar 4.7 menunjukkan perbandingan hasil uji XRD spesimen baja API 5L *grade* B dengan laju pendinginan *annealing*. Hasil XRD spesimen tanpa *copperizing* menunjukkan tiga *peak* yang teridentifikasi sebagai fase αFe sesuai JCPDF 01-087-0721 dengan sistem kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 44.6576 dengan bidang kristal (110), 2θ = 64.9723 dengan bidang kristal (200), dan 2θ = 82.2973 dengan bidang kristal (211).

Hasil XRD spesimen *copperizing* 10" tanpa *post-heat* menunjukkan empat *peak* tertinggi. Dua *peak* teridentifikasi sebagai fase αFe sesuai JCPDF 01-087-0721 dengan sistem

kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 44.7241 dengan bidang kristal (110) dan 2θ = 82.4710 dengan bidang kristal (211). Selain itu, dua *peak* teridentifikasi sebagai fase Cu sesuai JCPDF 03-065-9026 dengan sistem kristal *cubic,* yaitu pada 2θ = 43.3070 dengan bidang kristal (111) dan 2θ = 50.4247 dengan bidang kristal (200).

Hasil XRD spesimen *copperizing* 10" *Post-Heat* 5" menunjukkan lima peak tertinggi. Tiga *peak* teridentifikasi sebagai fase αFe sesuai JCPDF 01-087-0721 dengan sistem kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 44.6487 dengan bidang kristal (110), 2θ = 65.1825 dengan bidang kristal (200), dan 2θ = 82.3568 dengan bidang kristal (211). Selain itu, dua *peak* teridentifikasi sebagai fase Cu sesuai JCPDF 01-071-4610 dengan sistem kristal *cubic,* yaitu pada 2θ = 43.3281 dengan bidang kristal (111) dan 2θ = 50.4561 dengan bidang kristal (200).

Hasil XRD spesimen *copperizing* 10" *Post-Heat* 10" menunjukkan empat peak tertinggi. Tiga *peak* teridentifikasi sebagai fase αFe sesuai JCPDF 01-085-1410 dengan sistem kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 44.1881 dengan bidang kristal (110), 2θ = 64.5476 dengan bidang kristal (200), dan 2θ = 82.0363 dengan bidang kristal (211). Selain itu, satu *peak* teridentifikasi sebagai fase Cu sesuai JCPDF 01-071-4610 dengan sistem kristal *cubic,* yaitu pada 2θ = 42.8031 dengan bidang kristal (111).

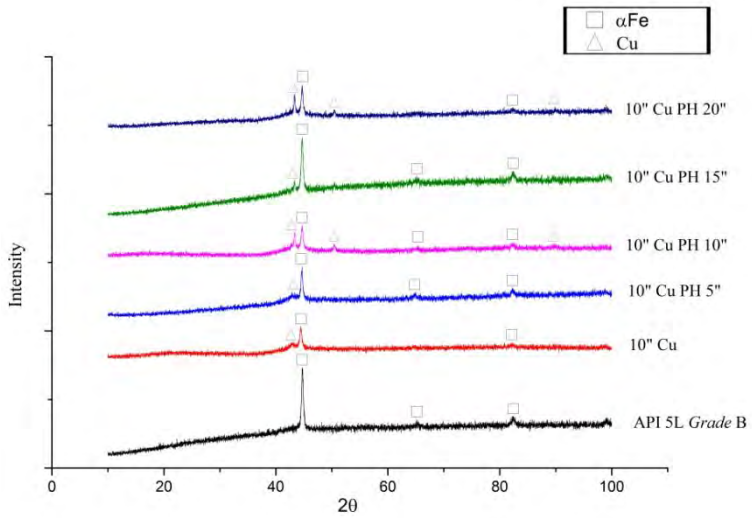
Hasil XRD spesimen *copperizing* 10" *Post-Heat* 15" menunjukkan enam *peak* tertinggi. Tiga *peak* teridentifikasi sebagai fase αFe sesuai JCPDF 03-065-4899 dengan sistem kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 44.6019 dengan bidang kristal (110), 2θ = 65.1681 dengan bidang kristal (200), dan 2θ = 82.3174 dengan bidang kristal (211). Selain itu, tiga *peak* teridentifikasi sebagai fase Cu sesuai JCPDF 01-071-4610 dengan sistem kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 43.2720 dengan bidang kristal (111), 2θ = 50.3432 dengan bidang kristal (200), dan 2θ = 74.2524 dengan bidang kristal (220).

Hasil XRD spesimen *copperizing* 10" *Post-Heat* 20" menunjukkan tiga *peak* tertinggi. Tiga *peak* teridentifikasi sebagai fase αFe sesuai JCPDF 01-087-0721 dengan sistem kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 44.6584 dengan bidang kristal (110), 2θ = 64.8309 dengan bidang kristal (200), dan 2θ = 82.3858 dengan bidang kristal (211).

Secara keseluruhan terdapat *peak* αFe pada spesimen baja API 5L *grade* B dengan pendinginan *annealing. Peak* αFe tersebut merupakan fase *ferrite* pada spesimen. Hal tersebut sesuai dengan diagram fase Fe-Fe_3C yang menunjukkan bahwa baja API 5L *grade* B dengan kadar karbon 0.2% merupakan baja *hypoeutectoid* dengan fase dominan adalah fase *ferrite.* Selain itu, terdapat pula *peak* Cu pada spesimen baja API 5L *grade* B dengan pendinginan *annealing*, kecuali pada spesimen dengan waktu tahan *post-heat* 20 menit. *Peak* Cu tersebut berasal dari lapisan Cu yang terdapat pada permukaan baja sesuai dengan hasil pengamatan makro spesimen pada sub bab 4.1.1. Hasil XRD spesimen *annealing* dengan waktu tahan *post-heat* 20 menit tidak menunjukkan adanya *peak* Cu karena tidak terdapat lapisan Cu pada permukaan baja.

4.2.2 Spesimen Baja API 5L *Grade* B Dengan Laju Pendinginan *Normalizing*

Hasil uji identifikasi fase XRD untuk spesimen baja API 5L *grade* B dengan laju pendinginan *normalizing* ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Hasil Uji XRD Spesimen Baja API 5L *Grade* B Laju Pendinginan *Normalizing*

Gambar 4.8 menunjukkan perbandingan hasil uji XRD spesimen baja API 5L *grade* B dengan laju pendinginan *normalizing*. Hasil XRD spesimen tanpa *copperizing* menunjukkan tiga *peak* yang teridentifikasi sebagai fase αFe sesuai JCPDF 01-087-0721 dengan sistem kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 44.7131 dengan bidang kristal (110), 2θ = 65.1623 dengan bidang kristal (200), dan 2θ = 82.4713 dengan bidang kristal (211).

Hasil XRD spesimen *copperizing* 10" tanpa *post-heat* menunjukkan tiga *peak* tertinggi. Dua *peak* teridentifikasi sebagai fase αFe sesuai JCPDF 01-087-0721 dengan sistem kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 44.4733 dengan bidang kristal (110) dan 2θ = 82.1558 dengan bidang kristal (211). Selain itu, satu *peak* teridentifikasi sebagai fase Cu sesuai JCPDF 01-071-4610 dengan sistem kristal *cubic,* yaitu pada 2θ = 42.9672 dengan bidang kristal (111).

Hasil XRD spesimen *copperizing* 10" *Post-Heat* 5" menunjukkan empat peak tertinggi. Tiga *peak* teridentifikasi sebagai fase αFe sesuai JCPDF 01-087-0721 dengan sistem kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 44.5321 dengan bidang kristal (110), 2θ = 64.8747 dengan bidang kristal (200), dan 2θ = 82.2605 dengan bidang kristal (211). Selain itu, satu *peak* teridentifikasi sebagai fase Cu sesuai JCPDF 01-071-4610 dengan sistem kristal *cubic,* yaitu pada 2θ = 42.9558 dengan bidang kristal (111).

Hasil XRD spesimen *copperizing* 10" *Post-Heat* 10" menunjukkan enam peak tertinggi. Tiga *peak* teridentifikasi sebagai fase αFe sesuai JCPDF 01-87-0721 dengan sistem kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 44.6501 dengan bidang kristal (110), 2θ = 65.0495 dengan bidang kristal (200), dan 2θ = 82.2557 dengan bidang kristal (211). Selain itu, tiga *peak* teridentifikasi sebagai fase Cu sesuai JCPDF 01-071-4610 dengan sistem kristal *cubic,* yaitu pada 2θ = 43.3054 dengan bidang kristal (111), = 50.4580 dengan bidang kristal (200), dan = 89.9625 dengan bidang kristal (311)

Hasil XRD spesimen *copperizing* 10" *Post-Heat* 15" menunjukkan empat *peak* tertinggi. Tiga *peak* teridentifikasi sebagai fase αFe sesuai JCPDF 01-87-0722 dengan sistem kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 44.6840 dengan bidang kristal (110), 2θ = 65.3304 dengan bidang kristal (200), dan 2θ = 82.4162 dengan bidang kristal (211). Selain itu, dua *peak* teridentifikasi sebagai fase Cu sesuai JCPDF 01-071-4610 dengan sistem kristal *cubic,* yaitu pada 2θ = 43.3147 dengan bidang kristal (111).

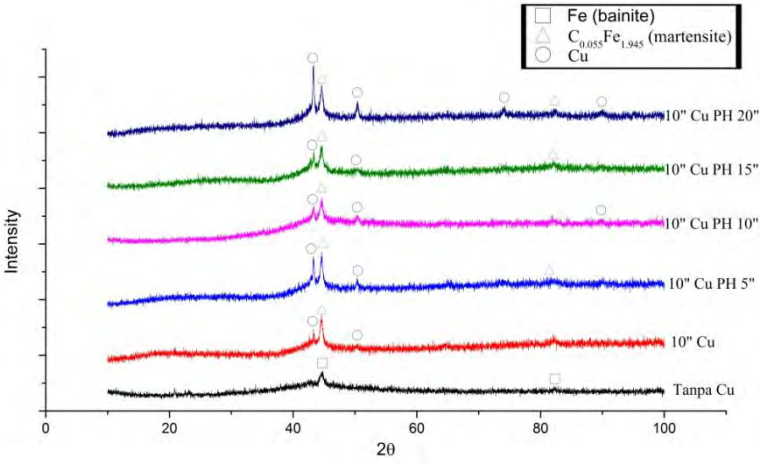
Hasil XRD spesimen *copperizing* 10" *Post-Heat* 20" menunjukkan lima *peak* tertinggi. Dua *peak* teridentifikasi sebagai fase αFe sesuai JCPDF 03-065-4899 dengan sistem kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 44.6677 dengan bidang kristal (110) dan 2θ = 82.3777 dengan bidang kristal (211). Selain itu, tiga *peak* teridentifikasi sebagai fase Cu sesuai JCPDF 03-065-9026 dengan sistem kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 43.2978 dengan

bidang kristal (111), 2θ = 50.5101 dengan bidang kristal (200), dan 2θ = 90.0207 dengan bidang kristal (311).

Secara keseluruhan terdapat *peak* αFe pada spesimen baja API 5L *grade* B dengan pendinginan *normalizing*. *Peak* αFe tersebut merupakan fase *ferrite* pada spesimen. Hal tersebut sesuai dengan diagram fase Fe-Fe_3C yang menunjukkan bahwa baja API 5L *grade* B dengan kadar karbon 0.2% merupakan baja *hypoeutectoid* dengan fase dominan adalah fase *ferrite.* Selain itu, terdapat pula *peak* Cu pada spesimen baja API 5L *grade* B dengan pendinginan *normalizing*. *Peak* Cu tersebut berasal dari lapisan Cu yang terdapat pada permukaan baja sesuai dengan hasil pengamatan makro spesimen pada sub bab 4.1.1.

4.2.3 Spesimen Baja API 5L *Grade* B Dengan Laju Pendinginan *Quenching*

Hasil uji identifikasi fase XRD untuk spesimen baja API 5L *grade* B dengan laju pendinginan *quenching* ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Hasil Uji XRD Spesimen Baja API 5L *Grade* B Laju Pendinginan *Quenching*

Gambar 4.9 menunjukkan perbandingan hasil uji XRD spesimen baja API 5L *grade* B dengan laju pendinginan *quenching*. Hasil XRD spesimen tanpa *copperizing* menunjukkan dua *peak* yang teridentifikasi sebagai fase *bainite* sesuai JCPDF 00-006-0696 dengan sistem kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 44.7198 dengan bidang kristal (110) dan 2θ = 82.2772 dengan bidang kristal (211).

Hasil XRD spesimen *copperizing* 10" tanpa *post-heat* menunjukkan tiga *peak* tertinggi. Dua *peak* teridentifikasi sebagai fase Cu sesuai JCPDF 01-071-4611 dengan sistem kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 43.2644 dengan bidang kristal (111) dan 2θ = 50.3387 dengan bidang kristal (200). Selain itu, satu *peak* teridentifikasi sebagai fase $C_{0.055}Fe_{1.945}$ (*martensite*) sesuai JCPDF 00-044-1290 dengan sistem kristal *tetragonal,* yaitu pada 2θ = 44.5906 dengan bidang kristal (110).

Hasil XRD spesimen *copperizing* 10" *Post-Heat* 5" menunjukkan empat peak tertinggi. Dua *peak* teridentifikasi sebagai fase Cu sesuai JCPDF 01-071-4611 dengan sistem kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 43.2774 dengan bidang kristal (111) dan 2θ = 50.3787 dengan bidang kristal (200). Selain itu, dua *peak* teridentifikasi sebagai fase $C_{0.055}Fe_{1.945}$ (*martensite*) sesuai JCPDF 00-044-1290 dengan sistem kristal *tetragonal,* yaitu pada 2θ = 44.6623 dengan bidang kristal (110) dan 2θ = 82.1937 dengan bidang kristal (211).

Hasil XRD spesimen *copperizing* 10" *Post-Heat* 10" menunjukkan empat peak tertinggi. Tiga *peak* teridentifikasi sebagai fase Cu sesuai JCPDF 01-071-4611 dengan sistem kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 43.3217 dengan bidang kristal (111) dan 2θ = 50.4041 dengan bidang kristal (200) serta 2θ = 89.9849 dengan bidang kristal (311). Selain itu, satu *peak* teridentifikasi sebagai fase $C_{0.055}Fe_{1.945}$ (*martensite*) sesuai JCPDF 00-044-1290 dengan sistem kristal *tetragonal,* yaitu pada 2θ = 44.6406 dengan bidang kristal (110).

Hasil XRD spesimen *copperizing* 10" *Post-Heat* 15" menunjukkan empat peak tertinggi. Dua *peak* teridentifikasi

sebagai fase Cu sesuai JCPDF 01-071-4611 dengan sistem kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 43.3968 dengan bidang kristal (111) dan 2θ = 50.4469 dengan bidang kristal (200). Selain itu, dua *peak* teridentifikasi sebagai fase $C_{0.055}Fe_{1.945}$ (*martensite*) sesuai JCPDF 00-044-1290 dengan sistem kristal *tetragonal,* yaitu pada 2θ = 44.5928 dengan bidang kristal (110) dan 2θ = 82.1296 dengan bidang kristal (211).

Hasil XRD spesimen *copperizing* 10" *Post-Heat* 20" menunjukkan enam peak tertinggi. Empat *peak* teridentifikasi sebagai fase Cu sesuai JCPDF 01-071-4611 dengan sistem kristal *cubic*, yaitu pada 2θ = 43.2153 dengan bidang kristal (111), 2θ = 50.3641 dengan bidang kristal (200), 2θ = 74.1425 dengan bidang kristal (220) dan 2θ = 90.0575 dengan bidang kristal (311). Selain itu, dua *peak* teridentifikasi sebagai fase $C_{0.055}Fe_{1.945}$ (*martensite*) sesuai JCPDF 00-044-1290 dengan sistem kristal *tetragonal,* yaitu pada 2θ = 44.6096 dengan bidang kristal (110) dan 2θ = 82.2340 dengan bidang kristal (211).

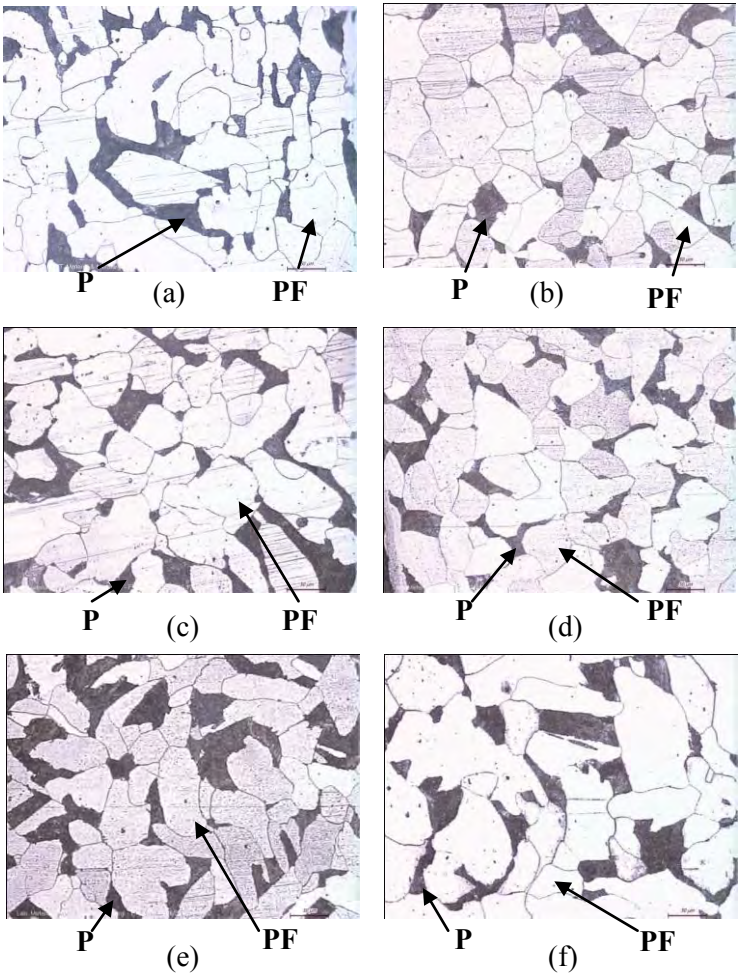
Secara keseluruhan, hasil XRD spesimen baja API 5L *grade* B tanpa *copperizing quenching* menunjukkan *peak* yang teridentifikasi sebagai fase *bainite,* sedangkan spesimen baja API 5L *grade* B *copperizing* dan *copperizing* dengan *post-heat quenching* menunjukkan *peak* yang teridentifikasi sebagai fase *martensite.* Hal tersebut menandakan bahwa penambahan tembaga sebagai unsur paduan ke dalam baja melalui metode *copperizing* menggeser kurva transformasi baja ke kanan sehingga dengan pendinginan *quenching* media air dapat terbentuk fase *martensite* pada baja hasil *copperizing* (Messler, 1999). Semua unsur paduan, kecuali *cobalt,* menggeser kurva transformasi baja ke kanan (Suherman, 1999). Selain itu, terdapat pula *peak* Cu pada spesimen baja API 5L *grade* B dengan pendinginan *quenching*. *Peak* Cu tersebut berasal dari lapisan Cu yang terdapat pada permukaan baja sesuai dengan hasil pengamatan makro spesimen pada sub bab 4.1.1.

4.3 Hasil Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan menggunakan etsa 2% Nital dan pada daerah tepi masing-masing spesimen. Aspek-aspek yang dianalisis pada pengamatan struktur mikro adalah bentuk fase, bentuk butir, dan ukuran butir terhadap pengaruh waktu tahan *post-heat* dan laju pendinginan. Perbesaran yang digunakan pada pengamatan struktur mikro ini adalah 200x untuk baja dengan pendinginan *annealing* dan *normalizing* serta 500x untuk baja dengan pendinginan *quenching.* Struktur mikro yang ditampilkan dan dianalisis adalah struktur mikro baja API 5L *grade* B tanpa *copperizing, copperizing,* dan *copperizing* dengan *post-heat.*

4.3.1 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Laju Pendinginan *Annealing*

Hasil pengamatan struktur mikro spesimen baja API 5L *grade* B dengan laju pendinginan *annealing* adalah sebagai berikut:



Gambar 4.10 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.

Gambar 4.10 diatas menunjukkan struktur mikro bagian tepi spesimen baja API 5L *grade* B pendinginan *annealing*. Gambar 4.10 (a) menunjukkan struktur mikro spesimen tanpa *copperizing*. Pada gambar tersebut fase yang terlihat adalah *polygonal ferrite* (PF)*/equiaxed ferrite* yang berwarna terang dan *pearlite* (P) yang berwarna gelap pada batas butir *polygonal ferrite*. Luas butir *ferrite* rata-rata pada spesimen tanpa *copperizing* adalah 20558.503 μm.

Gambar 4.10 (b) menunjukkan struktur mikro spesimen *copperizing* 10 menit. Pada gambar tersebut fase yang terlihat adalah *polygonal ferrite/equiaxed ferrite* yang berwarna terang dan *pearlite* yang berwarna gelap pada batas butir *polygonal ferrite*. Luas butir *ferrite* rata-rata pada spesimen tanpa *copperizing* adalah 7150.4336 μm.

Gambar 4.10 (c) menunjukkan struktur mikro spesimen *copperizing* 10 menit *post-heat* 5 menit. Pada gambar tersebut fase yang terlihat adalah *polygonal ferrite/equiaxed ferrite* yang berwarna terang dan *pearlite* yang berwarna gelap pada batas butir *polygonal ferrite*. Luas butir *ferrite* rata-rata pada spesimen tanpa *copperizing* adalah 8091.052 μm.

Gambar 4.10 (d) menunjukkan struktur mikro spesimen *copperizing* 10 menit *post-heat* 10 menit. Pada gambar tersebut fase yang terlihat adalah *polygonal ferrite/equiaxed ferrite* yang berwarna terang dan *pearlite* yang berwarna gelap pada batas butir *polygonal ferrite*. Luas butir *ferrite* rata-rata pada spesimen tanpa *copperizing* adalah 9881.96 μm.

Gambar 4.10 (e) menunjukkan struktur mikro spesimen *copperizing* 10 menit *post-heat* 15 menit. Pada gambar tersebut fase yang terlihat adalah *polygonal ferrite/equiaxed ferrite* yang berwarna terang dan *pearlite* yang berwarna gelap pada batas butir *polygonal ferrite*. Luas butir *ferrite* rata-rata pada spesimen tanpa *copperizing* adalah 10885.964 μm.

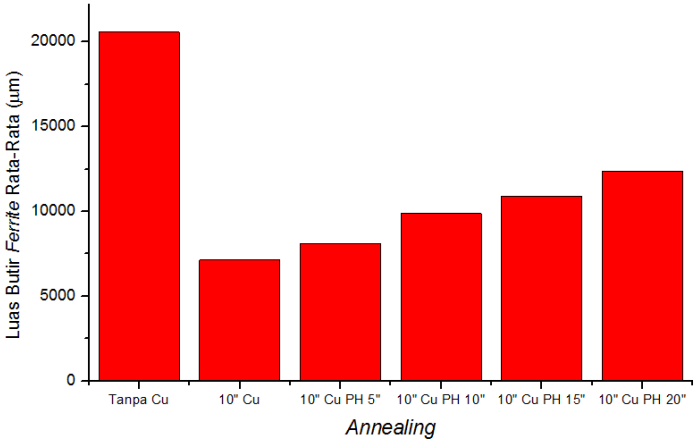
Gambar 4.10 (f) menunjukkan struktur mikro spesimen *copperizing* 10 menit *post-heat* 20 menit. Pada gambar tersebut fase yang terlihat adalah *polygonal ferrite/equiaxed ferrite* yang

berwarna terang dan *pearlite* yang berwarna gelap pada batas butir *polygonal ferrite*. Luas butir *ferrite* rata-rata pada spesimen tanpa *copperizing* adalah 12382.868 µm.

Analisis ukuran butir *ferrite* dilakukan dengan menggunakan metode *Abrams Three-Circle Procedure*. Hasil perhitungan ukuran butir *ferrite* untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel dan grafik berikut:

Tabel 4.1 Hasil Perhitungan Luas Butir *Ferrite* Rata-Rata Spesimen Baja API 5L *Grade* B Dengan Laju Pendinginan *Annealing*

Spesimen	**Luas Rata-Rata Butir *Ferrite* (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



Gambar 4.11 Grafik Hasil Perhitungan Luas Rata-Rata Butir *Ferrite* Spesimen Baja API 5L *Grade* B Dengan Laju Pendinginan *Annealing*

. 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*. *Polygonal ferrite* disebut juga sebagai *equiaxed ferrite* yang merupakan *proeutectoid ferrite,* yaitu fasa *ferrite* yang terbentuk sebelum reaksi *eutectoid* pada baja karbon rendah. *Polygonal ferrite* terbentuk pada temperatur tinggi saat transformasi *austenite* ke *ferrite* berlangsung dengan laju pendinginan lambat. Butir *ferrite* tersebut terbentuk pada batas butir *austenite* dan tumbuh membesar dengan arah menjauhi batas butir *austenite* untuk membentuk butir yang *equiaxed.* (Krauss, 2005)

Pengaruh penambahan tembaga pada baja melalui proses *copperizing* terhadap struktur mikro baja API 5L *grade* B *annealing* adalah adanya pengecilan/penghalusan ukuran butir *ferrite.* Pada tabel 4.1 diatas dapat dilihat bahwa luas butir *ferrite* rata-rata sebelum *copperizing* adalah 20558.503µm, sedangkan setelah *copperizing* adalah 7150.4336 µm. Data tersebut menunjukkan adanya pengecilan/penghalusan oleh tembaga yang larut dalam baja dan sesuai dengan pernyataan Ghosh (2008) bahwa penambahan tembaga sebagai unsur paduan ke dalam baja menghaluskan butir *ferrite.*

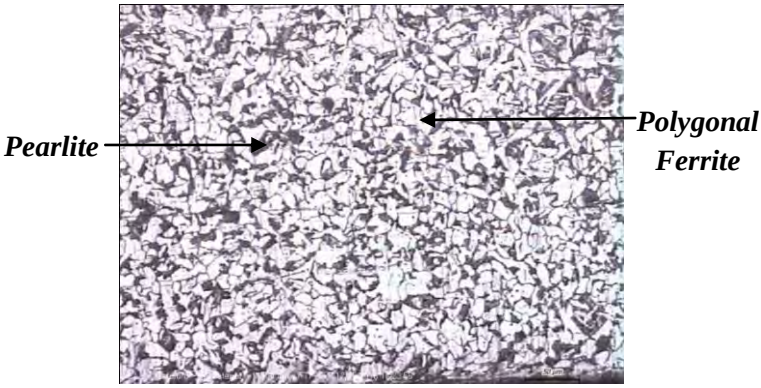
Mekanisme penghalusan butir *ferrite* oleh tembaga pada baja adalah sebagai berikut: Tembaga yang ditambahkan ke dalam baja larut dalam *ferrite* membentuk larutan padat substitusional pada temperatur kamar. Selain itu, tembaga menurunkan temperatur transformasi *austenite* ke *ferrite* saat pendinginan baja dari temperatur austenitisasi (Avazkonandeh, 2009). Pernyataan tersebut sesuai dengan Ghosh (2008) dan Elwazri (2007) yang juga menyatakan bahwa penambahan tembaga ke dalam baja menurunkan temperatur transformasi *austenite* ke *ferrite* dan menyebabkan penghalusan butir *ferrite.* Penurunan temperatur transformasi *austenite* ke *ferrite* saat pendinginan baja dari temperatur austenitisasi menyebabkan berkurangnya waktu untuk pertumbuhan butir *ferrite* saat

transformasi *austenite* ke *ferrite* berlangsung sehingga didapat butir *ferrite* yang halus saat transformasi selesai (Syarif, 2010).

Pengaruh waktu tahan *post-heat* pada struktur mikro baja API 5L *grade* B *annealing* adalah adanya peningkatan ukuran butir *ferrite.* Pada tabel 4.1 dan gambar 4.11 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^{o}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 (Klaric, 2009).

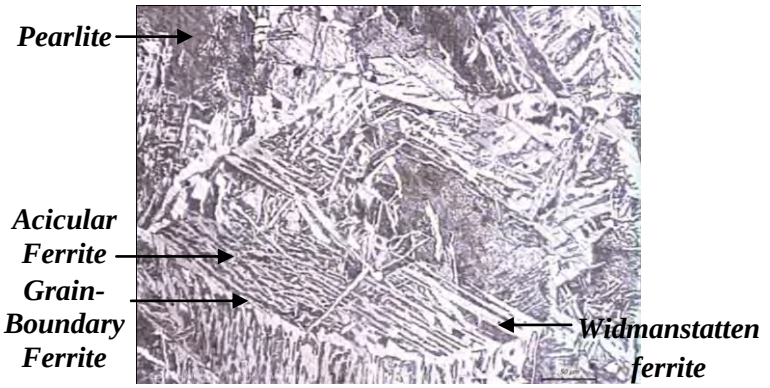
4.3.2 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Laju Pendinginan *Normalizing*

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



Gambar 4.12 Hasil Pengambilan Struktur Mikro Bagian Tepi Baja API 5L *grade* B Tanpa *Copperizing* pendinginan *normalizing* dengan perbesaran 200x

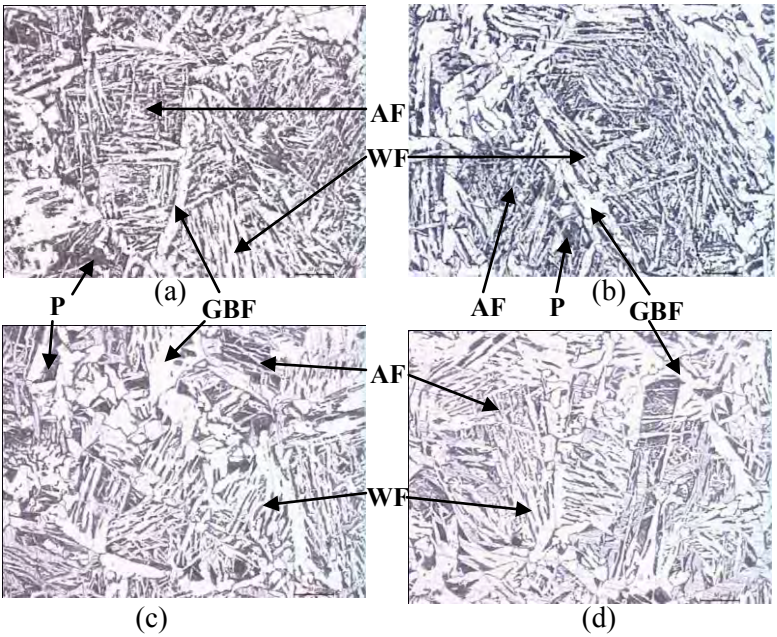
Gambar 4.12 diatas menunjukkan struktur mikro bagian tepi spesimen tanpa *copperizing.* Pada gambar tersebut fase yang terlihat adalah *polygonal ferrite/equiaxed ferrite* yang berwarna terang dan *pearlite* yang berwarna gelap pada batas butir *polygonal ferrite. Polygonal ferrite* pada gambar 4.12 di atas sesuai dengan pernyataan Krauss (2005) tentang morfologi *polygonal ferrite,* yaitu berbutir halus, terang dan berwarna putih serta butir *ferrite*-nya yang *equiaxed* dipisahkan oleh batas butir yang kontinyu.



Gambar 4.13 Hasil Pengambilan Struktur Mikro Bagian Tepi Baja API 5L *grade* B 10 menit *copperizing* pendinginan *normalizing* dengan perbesaran 200x

Gambar 4.13 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. Grain boundary ferrite* disebut juga *allotriomorphic ferrite,* merupakan fase berupa lapisan *ferrite* kontinyu yang mengikuti kontur dari batas butir *austenite.* (Bhadeshia dan Svensson, 1993). *Widmanstatten ferrite* merupakan fase *ferrite* yang memiliki morfologi berupa plat memanjang dengan butir yang besar berwarna putih (Krauss, 2005). *Acicular ferrite* merupakan *fase ferrite* yang memiliki

morfologi plat memanjang dengan butir yang halus berwarna putih. *Pearlite* pada struktur mikro gambar 4.13 ditunjukkan oleh daerah yang berwarna gelap (Ghomashchi, 2015).



Gambar 4.14 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"

Gambar 4.14 diatas menunjukkan struktur mikro bagian tepi spesimen *copperizing* 10 menit dengan variasi waktu tahan *post-heat.* Gambar 4.14 (a) menunjukkan struktur mikro spesimen dengan waktu tahan *post-heat* 5". Pada gambar tersebut fase yang terlihat adalah *grain boundary ferrite* (GBF)*, widmanstatten ferrite* (WF)*, acicular ferrite* (AF)*,* dan *pearlite* (P)*. Grain boundary ferrite* disebut juga *allotriomorphic ferrite,* merupakan fase berupa lapisan *ferrite* kontinyu yang mengikuti kontur dari

batas butir *austenite.* (Bhadeshia dan Svensson, 1993). *Widmanstatten ferrite* merupakan fase *ferrite* yang memiliki morfologi berupa plat memanjang dengan butir yang besar berwarna putih (Krauss, 2005). *Acicular ferrite* merupakan *fase ferrite* yang memiliki morfologi plat memanjang dengan butir yang halus berwarna putih. *Pearlite* pada struktur mikro gambar 4.14 (a) ditunjukkan oleh daerah yang berwarna gelap.

Gambar 4.14 (b) menunjukkan struktur mikro spesimen dengan waktu tahan *post-heat* 10". Pada gambar tersebut fase yang terlihat adalah *grain boundary ferrite, widmanstatten ferrite, acicular ferrite,* dan *pearlite. Grain boundary ferrite* disebut juga *allotriomorphic ferrite,* merupakan fase berupa lapisan *ferrite* kontinyu yang mengikuti kontur dari batas butir *austenite.* (Bhadeshia dan Svensson, 1993). *Widmanstatten ferrite* merupakan fase *ferrite* yang memiliki morfologi berupa plat memanjang dengan butir yang besar berwarna putih (Krauss, 2005). *Acicular ferrite* merupakan *fase ferrite* yang memiliki morfologi plat memanjang dengan butir yang halus berwarna putih. *Pearlite* pada struktur mikro gambar 4.14 (b) ditunjukkan oleh daerah yang berwarna gelap.

Gambar 4.14 (c) menunjukkan struktur mikro spesimen dengan waktu tahan *post-heat* 15". Pada gambar tersebut fase yang terlihat adalah *grain boundary ferrite, widmanstatten ferrite, acicular ferrite,* dan *pearlite. Grain boundary ferrite* disebut juga *allotriomorphic ferrite,* merupakan fase berupa lapisan *ferrite* kontinyu yang mengikuti kontur dari batas butir *austenite.* (Bhadeshia dan Svensson, 1993). *Widmanstatten ferrite* merupakan fase *ferrite* yang memiliki morfologi berupa plat memanjang dengan butir yang besar berwarna putih (Krauss, 2005). *Acicular ferrite* merupakan *fase ferrite* yang memiliki morfologi plat memanjang dengan butir yang halus berwarna putih. *Pearlite* pada struktur mikro gambar 4.14 (c) ditunjukkan oleh daerah yang berwarna gelap.

Gambar 4.14 (d) menunjukkan struktur mikro spesimen dengan waktu tahan *post-heat* 20". Pada gambar tersebut fase

yang terlihat adalah *grain boundary ferrite, widmanstatten ferrite, acicular ferrite,* dan *pearlite. Grain boundary ferrite* disebut juga *allotriomorphic ferrite,* merupakan fase berupa lapisan *ferrite* kontinyu yang mengikuti kontur dari batas butir *austenite.* (Bhadeshia dan Svensson, 1993). *Widmanstatten ferrite* merupakan fase *ferrite* yang memiliki morfologi berupa plat memanjang dengan butir yang besar berwarna putih (Krauss, 2005). *Acicular ferrite* merupakan *fase ferrite* yang memiliki morfologi plat memanjang dengan butir yang halus berwarna putih. *Pearlite* pada struktur mikro gambar 4.14 (d) ditunjukkan oleh daerah yang berwarna gelap.

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. Gambar 4.12 menunjukkan struktur mikro baja API 5L *grade* B tanpa *copperizing normalizing* berupa *polygonal ferrite* dan *pearlite* berbutir halus, sedangkan gambar 4.13 menunjukkan struktur mikro baja API 5L *grade* B *copperizing normalizing* berupa fase *pearlite* dan fase *ferrite* dengan morfologi yang berbeda-beda, yaitu *grain boundary ferrite, widmanstatten ferrite (ferrite side plates),* dan *acicular ferrite.* Hal tersebut menandakan bahwa penambahan tembaga sebagai unsur paduan ke dalam baja akan menggeser kurva transformasi baja ke kanan (dapat dilihat pada gambar 2.4) sehingga dengan laju pendinginan yang sama *(normalizing)* akan menghasilkan struktur mikro dengan fase yang berbeda pada baja *copperized* (Messler, 1999). Semua unsur paduan, kecuali *cobalt,* menggeser kurva transformasi baja ke kanan (Suherman, 1999). Selain itu, fase *widmanstatten ferrite* dan *acicular ferrite* merupakan fase yang terbentuk dengan laju pendinginan yang cepat pada baja (Krauss, 2005). Munculnya fase *widmanstatten ferrite* dan *acicular ferrite* pada stuktur mikro baja API 5L *grade* B *copperizied normalizing* semakin memperkuat pernyataan bahwa tembaga sebagai unsur paduan dalam baja menggeser kurva transformasi baja ke kanan (dapat dilihat pada gambar 2.4)

sehingga dengan pendinginan *normalizing* dapat muncul fase *widmanstatten ferrite* dan *acicular ferrite* pada baja.

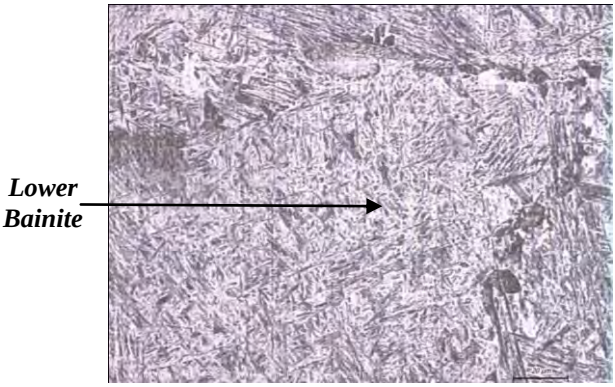
Pada gambar 4.13, terlihat fase *grain boundary ferrite* berupa lapisan *ferrite* kontinyu yang mengikuti kontur dari batas butir *austenite.* Fase tersebut merupakan fase yang pertama kali terbentuk saat pendinginan baja dari temperatur austenit sehingga fase *grain boundary ferrite* disebut juga sebagai *polygonal primary ferrite* (Ghomashchi, 2015). Penambahan tembaga sebagai unsur paduan kedalam baja menurunkan temperatur transformasi *austenite* ke *ferrite.* Hal tersebut menyebabkan berkurangnya waktu untuk pertumbuhan butir *grain boundary ferrite* sehingga didapat fase *grain boundary ferrite* dengan butir yang tipis. Selain itu, penambahan tembaga ke dalam baja juga mengurangi jumlah fase *ferrite* yang terbentuk pada temperatur tinggi (seperti: *grain boundary ferrite,* akibat penurunan temperatur transformasi *austenite* ke *ferrite*) dan meningkatkan jumlah fase *acicular ferrite* pada baja (Avazkonandeh, 2009). Pernyataan tersebut sesuai dengan gambar 4.13 yang menunjukkan fase *acicular ferrite* pada baja *copperized* jika dibandingkan dengan gambar 4.12 (struktur mikro baja *un-copperized*) yang tidak menunjukkan adanya fase *acicular ferrite.*

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. Gambar 4.14 (a-d) menunjukkan struktur mikro baja API 5L *grade* B *normalizing* dengan variasi waktu tahan *post-heat.* Dari gambar tersebut secara visual terlihat jumlah fase *widmanstatten ferrite* bertambah seiring dengan peningkatan waktu tahan *post-heat* baja. Data tersebut sesuai dengan pernyataan Bodnar dan Hansen (1994) yang menyatakan bahwa jumlah fase *widmanstatten ferrite* pada baja meningkat seiring dengan meningkatnya ukuran butir *austenite.* Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu tahan *post-heat* pada temperatur 1100^{o}C (temperatur austenit) menyebabkan butir *austenite* mendapat energi untuk tumbuh *(grain growth)* menjadi

semakin besar (Klaric, 2009) sehingga apabila didinginkan dengan laju pendinginan *normalizing* maka terbentuk fase *widmanstatten ferrite* dengan jumlah yang semakin banyak seiring dengan bertambahnya waktu tahan *post-heat.*

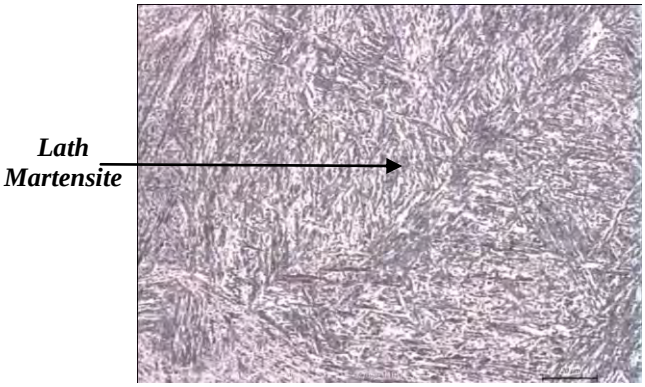
4.3.3 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Laju Pendinginan *Quenching*

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



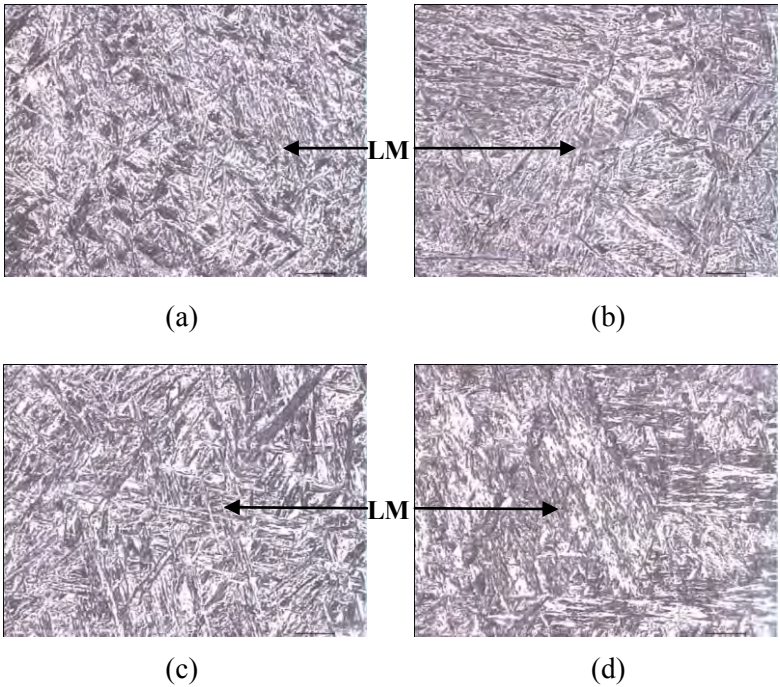
Gambar 4.15 Hasil Pengambilan Struktur Mikro Bagian Tepi Baja API 5L *grade* B Tanpa *Copperizing* Pendinginan *Quenching* Dengan Perbesaran 500x

Gambar 4.15 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* (ASM *Metals Handbook* Vol. 9, 2004)



Gambar 4.16 Hasil Pengambilan Struktur Mikro Bagian Tepi Baja API 5L *grade* B *Copperizing* Pendinginan *Quenching* Dengan Perbesaran 500x

Gambar 4.16 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. "Grup" tersebut dinamakan *packet* pada struktur mikro *lath martensite* (ASM *Metals Handbook* Vol. 9, 2004). Pernyataan tersebut sesuai dengan gambar 4.16 diatas yang secara visual menunjukkan terdapat beberapa daerah *(packet) lath martensite* dengan orientasi arah yang berbeda-beda antara satu *packet* dengan *packet* lainnya.



Gambar 4.17 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 4.17 diatas menunjukkan struktur mikro bagian tepi spesimen *copperizing quenching* dengan variasi waktu tahan *post-heat.* Gambar 4.17 (a) menunjukkan struktur mikro spesimen dengan waktu tahan *post-heat* 5". Pada gambar tersebut fase yang terlihat adalah *lath martensite* (LM).

Gambar 4.17 (b) menunjukkan struktur mikro spesimen dengan waktu tahan *post-heat* 10". Pada gambar tersebut fase yang terlihat adalah *lath martensite* (LM).

Gambar 4.17 (c) menunjukkan struktur mikro spesimen dengan waktu tahan *post-heat* 15". Pada gambar tersebut fase yang terlihat adalah *lath martensite* (LM).

Gambar 4.17 (d) menunjukkan struktur mikro spesimen dengan waktu tahan *post-heat* 20". Pada gambar tersebut fase yang terlihat adalah *lath martensite* (LM).

Secara keseluruhan, struktur mikro spesimen *copperizing quenching* dengan variasi waktu tahan *post-heat* menunjukkan fase yang sama dengan spesimen *copperizing* quenching pada gambar 4.16, yaitu *lath martensite.* Pada struktur mikro *lath martensite,* jarum-jarum *martensite* yang berwarna hitam cenderung mengelompok membentuk suatu "grup" dengan orientasi arah yang sama. "Grup" tersebut dinamakan *packet* pada struktur mikro *lath martensite* (ASM *Metals Handbook* Vol. 9, 2004).

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.* Berdasarkan hasil pengamatan struktur mikro dan XRD, fase baja tanpa *copperizing quenching* adalah *lower bainite,* sedangkan baja *copperizing quenching* memiliki fase *lath martensite.* 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 (Messler, 1999). Semua unsur paduan, kecuali *cobalt,* menggeser kurva transformasi baja ke kanan (Suherman, 1999).

Pengaruh waktu tahan *post-heat* pada struktur mikro baja API 5L *grade* B *quenching* adalah bertambahnya ukuran jarum-jarum *martensite* menjadi semakin besar seiring dengan meningkatnya waktu tahan *post-heat.* Gambar 4.17 (a-d) menunjukkan struktur mikro baja API 5L *grade* B *quenching* dengan variasi waktu tahan *post-heat.* Dari gambar tersebut

secara visual terlihat ukuran jarum-jarum *martensite* yang semakin membesar seiring dengan bertambahnya waktu tahan *post-heat.* Selain itu, jarum-jarum *martensite* pada spesimen *copperizing* dengan variasi waktu tahan *post-heat* secara visual terlihat lebih kasar (berukuran besar) jika dibandingkan dengan jarum-jarum *martensite* pada spesimen *copperizing* tanpa *post-heat.* Data tersebut sesuai dengan pernyataan Prawoto (2012) yang menyatakan bahwa ukuran jarum-jarum *martensite* semakin membesar seiring dengan peningkatan ukuran butir *austenite* saat temperatur austenitisasi sebelum *quenching.* Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu tahan *post-heat* pada temperatur 1100^{o}C (temperatur austenit) menyebabkan butir *austenite* mendapat energi untuk tumbuh *(grain growth)* menjadi semakin besar (Klaric, 2009) sehingga apabila didinginkan dengan laju pendinginan *quenching* maka terbentuk fase *martensite* dengan ukuran jarum-jarum *martensite* yang semakin besar pula.

4.4 Pengujian Kekerasan *Vickers*

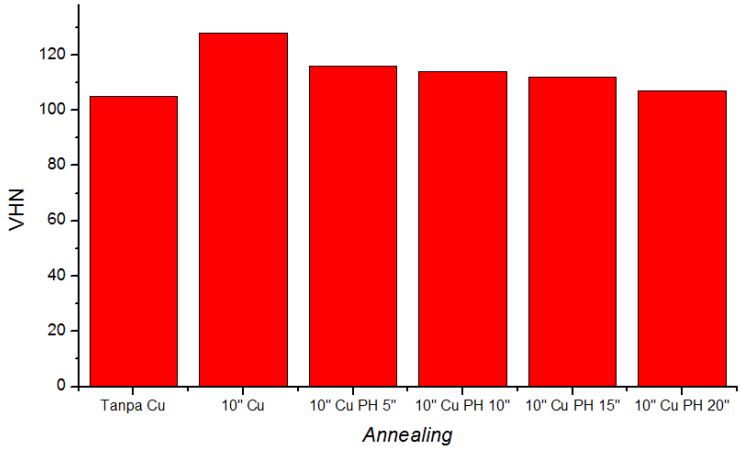
Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui kekerasan dari spesimen tanpa *copperizing, copperizing,* dan *copperizing* dengan *post-heat.* Uji kekerasan menggunakan *vickers hardness* dengan indentor piramida sisi empat terbalik yang memiliki sudut puncak antara dua sisi yang saling berhadapan 136^{o}, terbuat dari intan dengan pembebanan sebesar 30 kgf sesuai dengan ASTM E92. Pengujian ini dilakukan di tiga titik pada bagian tepi penampang melintang spesimen. Hasil pengujian ditunjukkan pada tabel 4.2, 4.3, dan 4.4.

4.4.1 Pengujian Kekerasan *Vickers* Spesimen Dengan Laju Pendinginan *Annealing*

Tabel 4.2 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

Tabel 4.2 menunjukkan hasil uji kekerasan *vickers* spesimen baja API 5L *grade* B dengan laju pendinginan *annealing*. Hasil pada tabel tersebut di-representasikan pada gambar grafik berikut:



Gambar 4.18 Hasil Pengujian *Vickers Hardness* Spesimen Baja API 5L *Grade* B Laju Pendinginan *Annealing* Dengan Pembebanan 30 kgf

Dari tabel 4.2 dan gambar 4.18 terlihat bahwa nilai kekerasan spesimen baja API 5L *grade* B *annealing* meningkat setelah proses *copperizing.* Akan tetapi, nilai kekerasan tersebut menurun seiring dengan peningkatan waktu tahan *post-heat.* Nilai kekerasan tertinggi pada spesimen baja API 5L *grade* B *annealing* dicapai oleh spesimen *copperizing* 10 menit, yaitu 128 VHN, sedangkan nilai kekerasan terendah dicapai oleh spesimen tanpa *copperizing,* yaitu 105 VHN.

Peningkatan kekerasan pada spesimen *copperizing annealing* disebabkan karena penambahan tembaga dalam baja. Tembaga merupakan unsur paduan yang larut dalam *ferrite* membentuk larutan padat substitusional (Avazkonandeh, 2008). Unsur paduan yang larut dalam *ferrite* akan menaikkan kekuatan dan kekerasan *ferrite* sehingga kekuatan dan kekerasan baja pun meningkat (Suharman, 1999). Evans (1990) juga menyatakan bahwa tembaga dapat meningkatkan kekerasan baja dengan cara membentuk larutan padat pada baja. Selain itu, Ghosh (2008) menyatakan bahwa tembaga yang larut dalam baja akan menghaluskan butir *ferrite.* Butir *ferrite* yang halus tersebut meningkatkan kekerasan baja. Pernyataan tersebut sesuai dengan struktur mikro spesimen *copperizing annealing* yang menunjukkan butir *ferrite* yang lebih halus dari spesimen tanpa *copperizing annealling* sehingga kekerasannya meningkat.

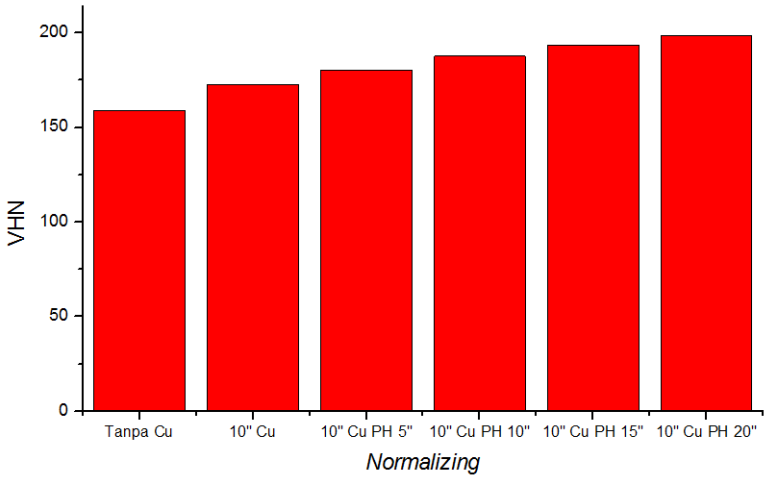
Penurunan kekerasan pada spesimen *copperizing annealing* dengan variasi waktu tahan *post-heat* disebabkan karena adanya pertumbuhan butir *austenite* saat perlakuan *post-heat* berlangsung sehingga didapat *ferrite* dengan ukuran butir yang semakin besar seiring bertambahnya waktu tahan *post-heat. Ferrite* dengan ukuran butir yang semakin besar menyebabkan semakin berkurangnya nilai kekerasan baja.

4.4.2 Pengujian Kekerasan *Vickers* Spesimen Dengan Laju Pendinginan *Normalizing*

Tabel 4.3 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

Tabel 4.3 menunjukkan hasil uji kekerasan *vickers* spesimen baja API 5L *grade* B dengan laju pendinginan *normalizing*. Hasil pada tabel tersebut di-representasikan pada gambar grafik berikut:



Gambar 4.19 Hasil Pengujian *Vickers Hardness* Spesimen Baja API 5L *Grade* B Laju Pendinginan *Normalizing* Dengan Pembebanan 30 kgf

Dari tabel 4.3 dan gambar 4.19 terlihat bahwa nilai kekerasan spesimen baja API 5L *grade* B *normalizing* meningkat setelah proses *copperizing.* Peningkatan kekerasan juga terjadi seiring dengan peningkatan waktu tahan *post-heat.* Nilai kekerasan tertinggi pada spesimen baja API 5L *grade* B *normalizing* dicapai oleh spesimen *copperizing* 10 menit *post-heat* 20 menit, yaitu 198.33 VHN, sedangkan nilai kekerasan terendah dicapai oleh spesimen tanpa *copperizing,* yaitu 159 VHN.

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 (Bodnar dan Hansen, 1994). Selain itu, *acicular ferrite* juga dapat meningkatkan kekerasan baja karena *acicular ferrite* lebih keras daripada *polygonal ferrite* (Avazkonandeh, 2008). Selain itu, peningkatan kekerasan baja juga disebabkan oleh mekanisme *solid solution strengthening* akibat adanya tembaga yang larut dalam *ferrite* membentuk larutan padat substitusional (Avazkonandeh, 2008).

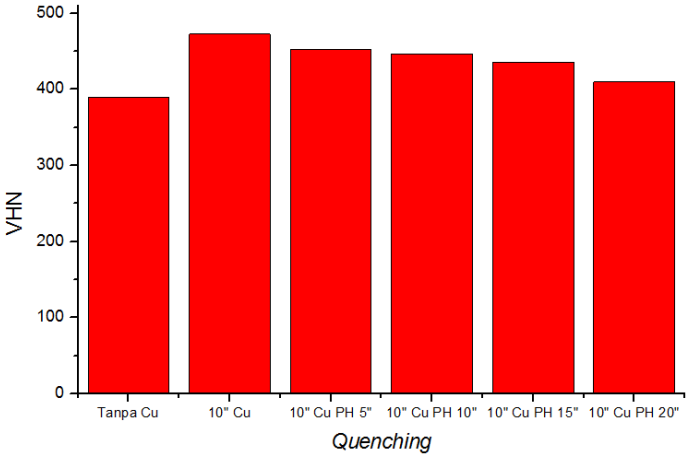
Peningkatan kekerasan pada spesimen *copperizing normalizing* dengan variasi waktu tahan *post-heat* disebabkan karena peningkatan jumlah fase *widmanstatten ferrite* pada baja akibat pertumbuhan butir *austenite* saat perlakuan *post-heat* berlangsung. Gambar 4.14 (a-d) menunjukkan struktur mikro baja API 5L *grade* B *normalizing* dengan variasi waktu tahan *post-heat.* Dari gambar tersebut secara visual terlihat jumlah fase *widmanstatten ferrite* bertambah seiring dengan peningkatan waktu tahan *post-heat* baja. Menurut Bodnar dan Hansen (1994), nilai kekerasan baja semakin meningkat seiring dengan peningkatan jumlah fase *widmanstatten ferrite* pada baja.

4.4.3 Pengujian Kekerasan *Vickers* Spesimen Dengan Laju Pendinginan *Quenching*

Tabel 4.4 Hasil Pengujian *Vickers Hardness* Spesimen Baja API 5L *Grade* B Laju Pendinginan *Quenching* 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

Tabel 4.4 menunjukkan hasil uji kekerasan *vickers* spesimen baja API 5L *grade* B dengan laju pendinginan *quenching*. Hasil pada tabel tersebut di-representasikan pada gambar grafik berikut:



Gambar 4.20 Hasil Pengujian *Vickers Hardness* Spesimen Baja API 5L *Grade* B Laju Pendinginan *Quenching* Dengan Pembebanan 30 kgf

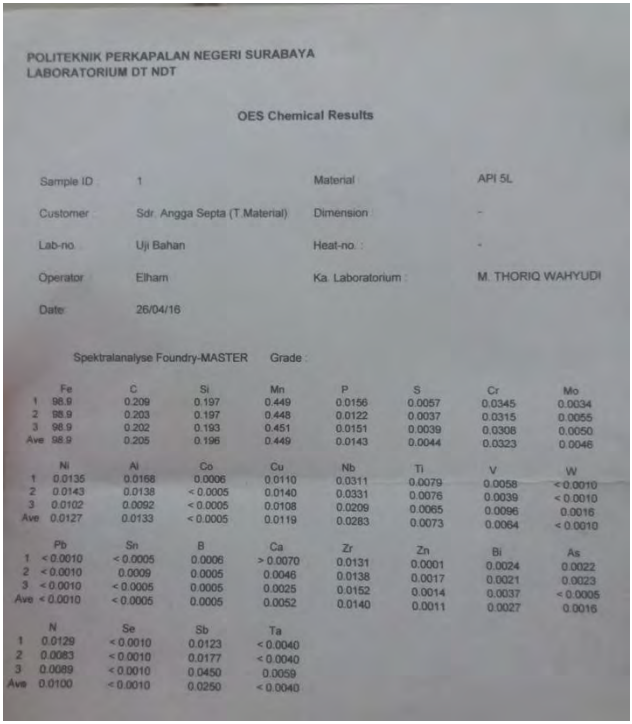
Dari tabel 4.4 dan gambar 4.20 terlihat bahwa nilai kekerasan spesimen baja API 5L *grade* B *quenching* meningkat setelah proses *copperizing.* Akan tetapi, nilai kekerasan tersebut menurun seiring dengan peningkatan waktu tahan *post-heat.* Nilai kekerasan tertinggi pada spesimen baja API 5L *grade* B *quenching* dicapai oleh spesimen *copperizing* 10 menit, yaitu 472.67 VHN, sedangkan nilai kekerasan terendah dicapai oleh spesimen tanpa *copperizing,* yaitu 389.33 VHN.

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.* Penambahan tembaga sebagai unsur paduan pada baja akan menggeser kurva transformasi baja ke kanan sehingga terjadi pembentukan fase *lath martensite* pada baja *copperizing* dengan laju pendinginan *quenching* media air (Messler, 1999). Semua unsur paduan, kecuali *cobalt,* menggeser kurva transformasi baja ke kanan (Suherman, 1999).

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 (Prawoto, 2011).

LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil pengujian komposisi OES API 5L *Grade* B



POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID :	1	Material :	API 5L
Customer :	Sdr. Angga Septa (T.Material)	Dimension :	-
Lab-no. :	Uji Bahan	Heat-no. :	-
Operator :	Elham	Ka. Laboratorium :	M. THORIQ WAHYUDI
Date :	26/04/16		

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	98.9	0.209	0.197	0.449	0.0156	0.0057	0.0345	0.0034
2	98.9	0.203	0.197	0.448	0.0122	0.0037	0.0315	0.0055
3	98.9	0.202	0.193	0.451	0.0151	0.0039	0.0308	0.0050
Ave	98.9	0.205	0.196	0.449	0.0143	0.0044	0.0323	0.0046

	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0.0135	0.0168	0.0006	0.0110	0.0311	0.0079	0.0058	< 0.0010
2	0.0143	0.0138	< 0.0005	0.0140	0.0331	0.0076	0.0039	< 0.0010
3	0.0102	0.0092	< 0.0005	0.0108	0.0209	0.0065	0.0096	0.0016
Ave	0.0127	0.0133	< 0.0005	0.0119	0.0283	0.0073	0.0064	< 0.0010

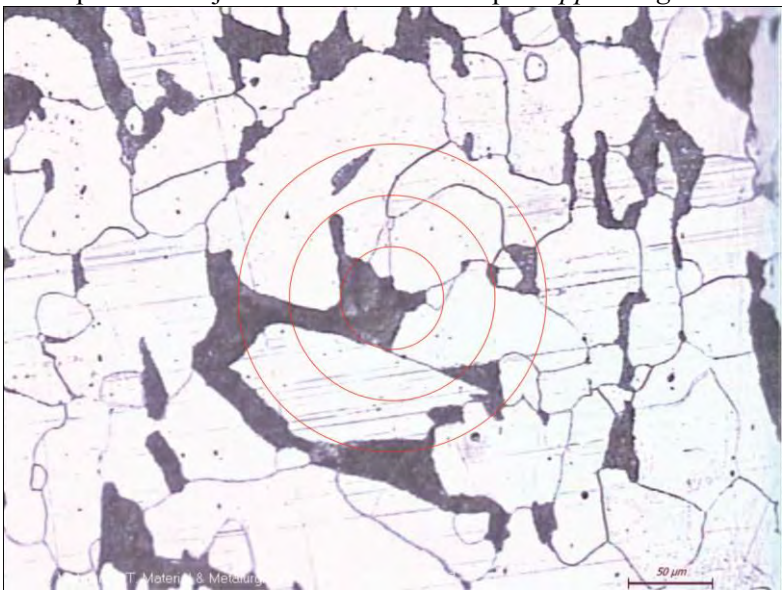
	Pb	Sn	B	Ca	Zr	Zn	Bi	As
1	< 0.0010	< 0.0005	0.0006	> 0.0070	0.0131	0.0001	0.0024	0.0022
2	< 0.0010	0.0009	0.0005	0.0046	0.0138	0.0017	0.0021	0.0023
3	< 0.0010	< 0.0005	0.0005	0.0025	0.0152	0.0014	0.0037	< 0.0005
Ave	< 0.0010	< 0.0005	0.0005	0.0052	0.0140	0.0011	0.0027	0.0016

	N	Se	Sb	Ta
1	0.0129	< 0.0010	0.0123	< 0.0040
2	0.0083	< 0.0010	0.0177	< 0.0040
3	0.0089	< 0.0010	0.0450	0.0059
Ave	0.0100	< 0.0010	0.0250	< 0.0040

I. Perhitungan Ukuran Butir Ferrite (Abrams Three-Circle Procedure)

1. Spesimen Baja API 5L *Grade* B Laju Pendinginan *Annealing*

- Spesimen Baja API 5L *Grade* B Tanpa *Copperizing*



Gambar 1. Struktur Mikro Baja API 5L *Grade* B *Annealing* Perbesaran 200x

Nα= 17
Vα= 86.275%
M = 200
L = 500

Keterangan:

Nα= Jumlah perpotongan segmen garis lingkaran dengan butir *ferrite*
Vα= Fraksi volume fase *ferrite*
M = Perbesaran gambar
L = Panjang garis uji

- Menghitung Panjang Rata-Rata Perpotongan

$$L\alpha = \frac{V\alpha \times L/M}{N\alpha}$$

$$L\alpha = \frac{0.86275 \times 500/200}{17}$$

$$L\alpha = 0.1269 \text{ mm}$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)
  G = {-6.643856 ($\log_{10} L\alpha$) - 3.288}
  G = {-6.643856 ($\log_{10} 0.1269$) - 3.288}
  G = 2.6685

  Berdasarkan ASTM E112 dan metode interpolasi, dapat diperoleh luas butir sebagai berikut:

  Interpolasi:

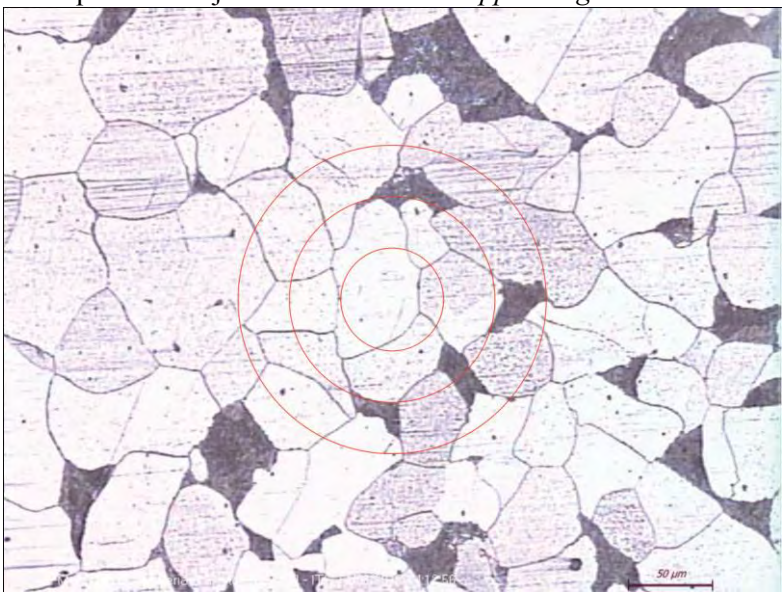
$$\frac{2.6685 - 2.5}{3.0 - 2.5} = \frac{x - 22810}{16129 - 22810}$$

$$\frac{0.1685}{0.5} = \frac{x - 22810}{-6681}$$

$$-1125.7485 = 0.5x - 11405$$

$$x = 20558.503 \ \mu m^2$$

- Spesimen Baja API 5L *Grade* B *Copperizing* 10”



Gambar 2. Struktur Mikro Baja API 5L *Grade* B *Copperizing* 10” *Annealing* Perbesaran 200x

Nα= 30
Vα= 89.172%
M = 200
L = 500

Keterangan:
Nα= Jumlah perpotongan segmen garis lingkaran dengan butir *ferrite*
Vα= Fraksi volume fase *ferrite*
M = Perbesaran gambar
L = Panjang garis uji

- Menghitung Panjang Rata-Rata Perpotongan

$$L\alpha = \frac{V\alpha \times L/M}{N\alpha}$$

$$L\alpha = \frac{0.89172 \times 500/200}{30}$$

$$L\alpha = 0.0748\ mm$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)
  G = {-6.643856 ($\log_{10} L\alpha$) - 3.288}
  G = {-6.643856 ($\log_{10} 0.0748$) - 3.288}
  G = 4.1936

  Berdasarkan ASTM E112 dan metode interpolasi, dapat diperoleh luas butir sebagai berikut:

  Interpolasi:

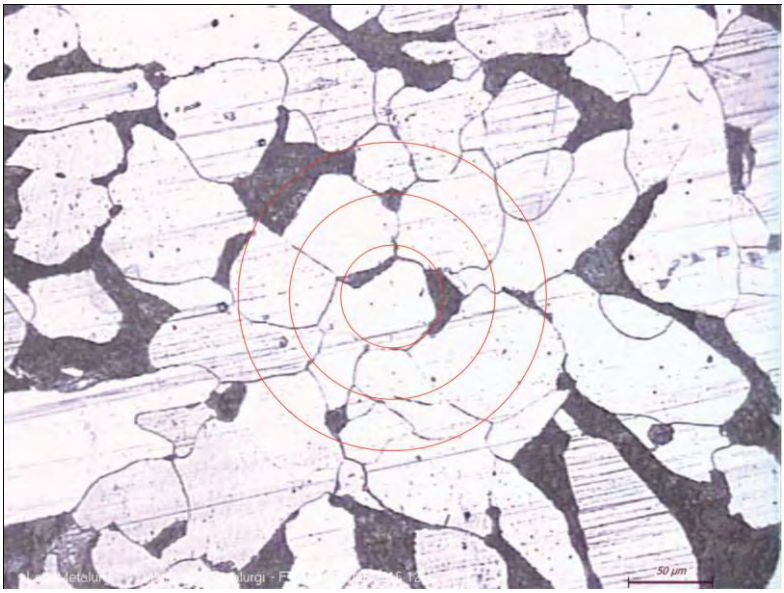
$$\frac{4.1936 - 4.0}{4.5 - 4.0} = \frac{x - 8065}{5703 - 8065}$$

$$\frac{0.1936}{0.5} = \frac{x - 8065}{-2362}$$

$$-457.2832 = 0.5x - 4032.5$$

$$x = 7150.4336\ \mu m^2$$

- Spesimen Baja API 5L *Grade* B *Copperizing* 10" *Post-Heat* 5"



Gambar 3. Struktur Mikro Baja API 5L *Grade* B *Copperizing* 10" *Post-Heat* 5" *Annealing* Perbesaran 200x

Nα= 27
Vα= 86.527%
M = 200
L = 500

Keterangan:
Nα= Jumlah perpotongan segmen garis lingkaran dengan butir *ferrite*
Vα= Fraksi volume fase *ferrite*
M = Perbesaran gambar
L = Panjang garis uji

- Menghitung Panjang Rata-Rata Perpotongan

$$L\alpha = \frac{V\alpha \times L/M}{N\alpha}$$

$$L\alpha = \frac{0.86527 \times 500/200}{27}$$

$$L\alpha = 0.0801 \text{ mm}$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)
  G = {-6.643856 ($\log_{10} L\alpha$) - 3.288}
  G = {-6.643856 ($\log_{10} 0.0801$) - 3.288}
  G = 3.9961

  Berdasarkan ASTM E112 dan metode interpolasi, dapat diperoleh luas butir sebagai berikut:

  Interpolasi:

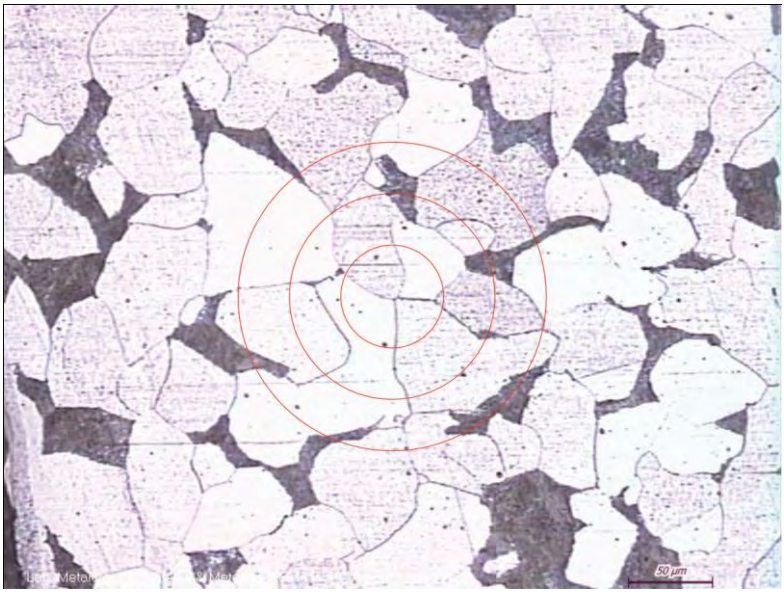
$$\frac{3.9961 - 3.5}{4.0 - 3.5} = \frac{x - 11405}{8065 - 11405}$$

$$\frac{0.4961}{0.5} = \frac{x - 11405}{-3340}$$

$$-1656.974 = 0.5x - 5702.5$$

$$x = 8091.052 \ \mu m^2$$

- Spesimen Baja API 5L *Grade* B *Copperizing* 10" *Post-Heat* 10"



Gambar 4. Struktur Mikro Baja API 5L *Grade* B *Copperizing* 10" *Post-Heat* 10" *Annealing* Perbesaran 200x

Nα= 24
Vα= 84.384%
M = 200
L = 500

Keterangan:
Nα= Jumlah perpotongan segmen garis lingkaran dengan butir *ferrite*
Vα= Fraksi volume fase *ferrite*
M = Perbesaran gambar
L = Panjang garis uji

- Menghitung Panjang Rata-Rata Perpotongan

$$L\alpha = \frac{V\alpha \times L/M}{N\alpha}$$

$$L\alpha = \frac{0.84384 \times 500/200}{24}$$

$$L\alpha = 0.0879\ mm$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)
  G = {-6.643856 ($\log_{10} L\alpha$) - 3.288}
  G = {-6.643856 ($\log_{10} 0.0879$) - 3.288}
  G = 3.7280

  Berdasarkan ASTM E112 dan metode interpolasi, dapat diperoleh luas butir sebagai berikut:

  Interpolasi:

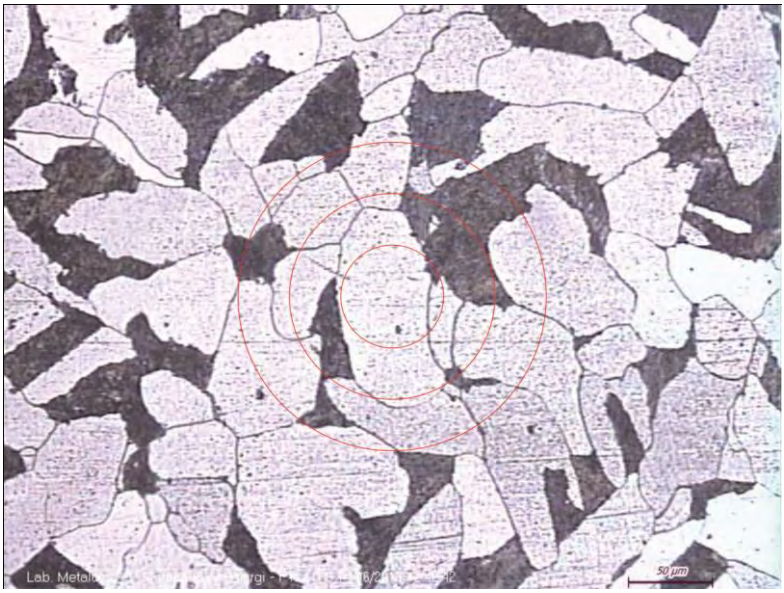
$$\frac{3.7280 - 3.5}{4.0 - 3.5} = \frac{x - 11405}{8065 - 11405}$$

$$\frac{0.228}{0.5} = \frac{x - 11405}{-3340}$$

$$-761.52 = 0.5x - 5702.5$$

$$x = 9881.96\ \mu m^2$$

- Spesimen Baja API 5L *Grade* B *Copperizing* 10" *Post-Heat* 15"



Gambar 5. Struktur Mikro Baja API 5L *Grade* B *Copperizing* 10" *Post-Heat* 15" *Annealing* Perbesaran 200x

Nα= 20
Vα= 74.083%
M = 200
L = 500

Keterangan:
Nα= Jumlah perpotongan segmen garis lingkaran dengan butir *ferrite*
Vα= Fraksi volume fase *ferrite*
M = Perbesaran gambar
L = Panjang garis uji

- Menghitung Panjang Rata-Rata Perpotongan

$$L\alpha = \frac{V\alpha \text{ x } L/M}{N\alpha}$$

$$L\alpha = \frac{0.74083 \text{ x } 500/200}{20}$$

$$L\alpha = 0.0926 \text{ mm}$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)
  G = {-6.643856 ($\log_{10} L\alpha$) - 3.288}
  G = {-6.643856 ($\log_{10} 0.0926$) - 3.288}
  G = 3.5777

  Berdasarkan ASTM E112 dan metode interpolasi, dapat diperoleh luas butir sebagai berikut:

  Interpolasi:

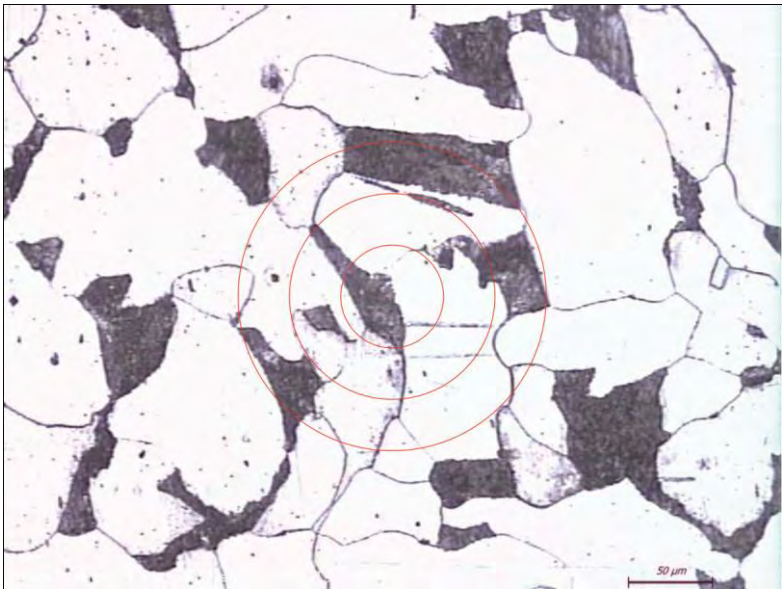
$$\frac{3.5777 - 3.5}{4.0 - 3.5} = \frac{x - 11405}{8065 - 11405}$$

$$\frac{0.0777}{0.5} = \frac{x - 11405}{-3340}$$

$$-259.518 = 0.5x - 5702.5$$

$$x = 10885.964 \ \mu m^2$$

- Spesimen Baja API 5L *Grade* B *Copperizing* 10" *Post-Heat* 20"



Gambar 4. Struktur Mikro Baja API 5L *Grade* B *Copperizing* 10" *Post-Heat* 20" *Annealing* Perbesaran 200x

Nα= 21
Vα= 82.799%
M = 200
L = 500

Keterangan:
Nα= Jumlah perpotongan segmen garis lingkaran dengan butir *ferrite*
Vα= Fraksi volume fase *ferrite*
M = Perbesaran gambar
L = Panjang garis uji

- Menghitung Panjang Rata-Rata Perpotongan

$$L\alpha = \frac{V\alpha \times L/M}{N\alpha}$$

$$L\alpha = \frac{0.82799 \times 500/200}{21}$$

$$L\alpha = 0.0986 \text{ mm}$$

- Menentukan Nilai Grain Size (G)
  G = {-6.643856 ($\log_{10} L\alpha$) - 3.288}
  G = {-6.643856 ($\log_{10} 0.0986$) - 3.288}
  G = 3.3965

  Berdasarkan ASTM E112 dan metode interpolasi, dapat diperoleh luas butir sebagai berikut:

  Interpolasi:

$$\frac{3.3965 - 3.0}{3.5 - 3.0} = \frac{x - 16129}{11405 - 16129}$$

$$\frac{0.3965}{0.5} = \frac{x - 16129}{-4724}$$

$$-1873.0660 = 0.5x - 8064.5$$

$$x = 12382.868 \ \mu m^2$$

II. Perhitungan Fraksi Volume *Ferrite* Pada Spesimen Baja API 5L *Grade* B *Annealing*

- Tanpa *copperizing*

Results

File Edit Font Results

	Area	%Area
1	541450	86.275

- *Copperizing* 10 menit

Results

File Edit Font Results

	Area	%Area
1	243960	89.172

- *Copperizing* 10 menit *post-heat* 5 menit

Results

File Edit Font Results

	Area	%Area
1	259368	86.527

- *Copperizing* 10 menit *post-heat* 10 menit

Results

File Edit Font Results

	Area	%Area
1	304964	84.384

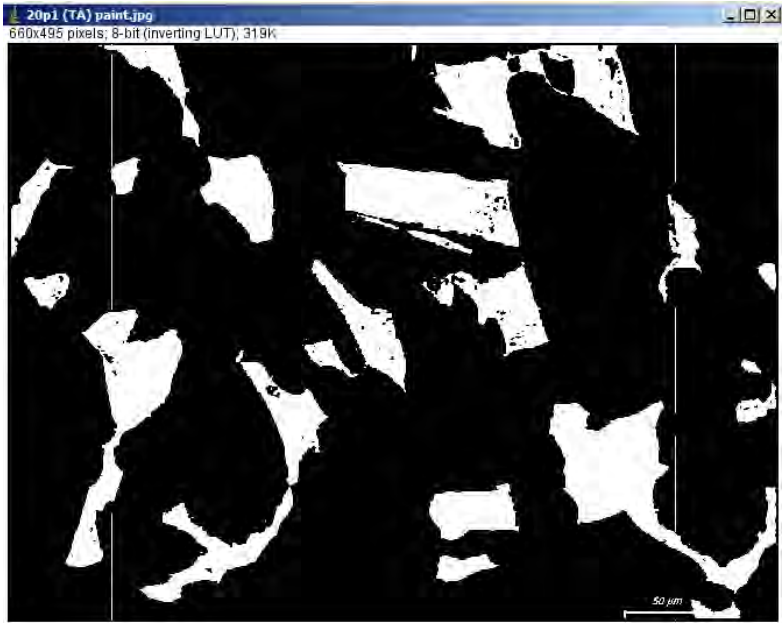
- *Copperizing* 10 menit *post-heat* 15 menit

Results

File Edit Font Results

	Area	%Area
1	243960	74.083

- *Copperizing* 10 menit *post-heat* 20 menit



Results

File Edit Font Results

	Area	%Area
1	326700	82.799

Analisis Hasil Pengujian XRD

1. Baja API 5L *grade* B Tanpa *Copperizing (Annealing)*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.6576	677.52	0.2342	2.02920	100.00
64.9723	53.84	0.5353	1.43538	7.95
82.2973	81.91	0.5353	1.17161	12.09

2θ	JCPDF	2θ Standar	Unsur	hkl	FWHM
44.6576	01-87-0721	44.677	Fe	110	0.2342
64.9723	01-87-0721	65.028	Fe	200	0.5353
82.2973	01-87-0721	82.342	Fe	211	0.5353

2. Baja API 5L *grade* B *Copperizing* 10 menit *Annealing*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.3070	236.34	0.1171	2.08930	70.19
44.7241	336.73	0.2676	2.02634	100.00
50.4247	48.03	0.2676	1.80982	14.26
82.4710	41.31	0.6691	1.16958	12.27

2θ	JCPDF	2θ Standar	Unsur	hkl	FWHM
43.3070	03-065-9026	43.341	Cu	111	0.1171
44.7241	01-87-0721	44.677	Fe	110	0.2676
50.4247	03-065-9026	50.479	Cu	200	0.2676
82.4710	01-87-0721	82.533	Fe	211	0.6691

3. Baja API 5L *grade* B *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 5 menit *Annealing*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.3281	206.32	0.1673	2.08833	38.44
44.6487	536.66	0.2342	2.02958	100.00
50.4561	37.17	0.4015	1.80877	6.93
65.1825	61.73	0.3346	1.43126	11.50
82.3568	58.62	0.5353	1.17091	10.92

2θ	JCPDF	2θ Standar	Unsur	hkl	FWHM
43.3281	01-071-4610	43.291	Cu	111	0.1673
44.6487	01-087-0721	44.677	Fe	110	0.2342
50.4561	01-071-4610	50.419	Cu	200	0.4015
65.1825	01-087-0721	65.166	Fe	200	0.3346
82.3568	01-087-0721	82.344	Fe	211	0.5353

4. Baja API 5L *grade* B *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 10 menit *Annealing*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.8031	81.08	0.2676	2.11273	27.22
44.1881	297.86	0.2676	2.04966	100.00
64.5476	16.59	0.8029	1.44380	5.57
82.0363	33.24	0.8029	1.17467	11.16

2θ	JCPDF	2θ Standar	Unsur	hkl	FWHM
42.8031	01-071-4610	43.291	Cu	111	0.2676
44.1881	01-085-1410	44.354	Fe	110	0.2676
64.5476	01-085-1410	64.528	Fe	200	0.8029
82.0363	01-085-1410	81.657	Fe	211	0.8029

5. Baja API 5L *grade* B *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 15 menit *Annealing*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.2720	141.50	0.1673	2.09091	39.55
44.6019	357.83	0.2342	2.03161	100.00
50.3432	56.24	0.2007	1.81256	15.72
65.1681	23.13	0.6691	1.43154	6.46
74.2524	22.52	0.8029	1.27729	6.29
82.3174	50.42	0.5353	1.17138	14.09

2θ	JCPDF	2θ Standar	Unsur	hkl	FWHM
43.2720	01-071-4610	43.291	Cu	111	0.1673
44.6019	03-065-4899	44.663	Fe	110	0.2342
50.3432	01-071-4610	50.419	Cu	200	0.2007
65.1681	03-065-4899	65.008	Fe	200	0.6691
74.2524	01-071-4610	74.078	Cu	220	0.8029
82.3174	03-065-4899	82.318	Fe	211	0.5353

6. Baja API 5L *grade* B *Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 20 menit *Annealing*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.6584	516.50	0.3011	2.02917	100.00
64.8309	22.96	0.6691	1.43817	4.45
82.3858	47.79	0.6691	1.17058	9.25

2θ	JCPDF	2θ Standar	Unsur	hkl	FWHM
44.6584	01-087-0721	44.677	Fe	110	0.3011
64.8309	01-087-0721	65.028	Fe	200	0.6691
82.3858	01-087-0721	82.344	Fe	211	0.6691

7. Baja API 5L *grade B* Tanpa *Copperizing (Normalizing)*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.7131	841.61	0.2342	2.02681	100.00
65.1623	33.06	0.8029	1.43165	3.93
82.4713	91.03	0.6691	1.16958	10.82

2θ	JCPDF	2θ Standar	Unsur	hkl	FWHM
44.7131	01-87-0721	44.677	Fe	110	0.2342
65.1623	01-87-0721	65.028	Fe	200	0.8029
82.4713	01-87-0721	82.342	Fe	211	0.6691

8. Baja API 5L *grade B Copperizing* 10 menit Tanpa *Post-Heat (Normalizing)*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.9672	69.41	0.5353	2.10503	22.54
44.4733	307.92	0.3011	2.03718	100.00
82.1558	28.30	0.8029	1.17327	9.19

2θ	JCPDF	2θ Standar	Unsur	hkl	FWHM
42.9672	01-071-4610	43.291	Cu	111	0.5353
44.4733	01-87-0721	44.677	Fe	110	0.3011
82.1558	01-87-0721	82.344	Fe	211	0.8029

9. Baja API 5L *grade B Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 5 menit *(Normalizing)*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.9558	53.66	0.8029	2.10557	14.17
44.5321	378.80	0.1004	2.03463	100.00
64.8747	50.89	0.4015	1.43730	13.43
82.2605	75.51	0.2676	1.17204	19.93

2θ	**JCPDF**	**2θ Standar**	**Unsur**	**hkl**	**FWHM**
42.9558	01-071-4610	43.291	Cu	111	0.8029
44.5321	01-87-0721	44.677	Fe	110	0.1004
64.8747	01-87-0721	65.028	Fe	200	0.4015
82.2605	01-87-0721	82.344	Fe	211	0.2676

10. Baja API 5L *grade B Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 10 menit *(Normalizing)*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.3054	214.32	0.2342	2.08938	64.36
44.6501	332.99	0.2676	2.02952	100.00
50.4580	84.88	0.2007	1.80871	25.49
65.0495	18.63	0.8029	1.43386	5.59
82.2557	39.83	0.4015	1.17210	11.96
89.9625	23.71	0.8029	1.09063	7.12

2θ	JCPDF	2θ Standar	Unsur	hkl	FWHM
43.3054	01-071-4610	43.291	Cu	111	0.2342
44.6501	01-87-0721	44.677	Fe	110	0.2676
50.4580	01-071-4610	50.419	Cu	200	0.2007
65.0495	01-87-0721	65.028	Fe	200	0.8029
82.2557	01-87-0721	82.344	Fe	211	0.4015
89.9625	01-071-4610	89.871	Cu	311	0.8029

11. Baja API 5L *grade B Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 15 menit *(Normalizing)*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.3147	120.63	0.1673	2.08895	16.89
44.6840	714.00	0.2676	2.02806	100.00
65.3304	39.86	0.8029	1.42838	5.58
82.4162	93.75	0.6691	1.17022	13.13

2θ	JCPDF	2θ Standar	Unsur	hkl	FWHM
43.3147	01-071-4610	43.291	Cu	111	0.1673
44.6840	01-87-0722	44.765	Fe	110	0.2676
65.3304	01-87-0722	65.166	Fe	200	0.8029
82.4162	01-87-0722	82.533	Fe	211	0.6691

12. Baja API 5L *grade B Copperizing* 10 menit *Post-Heat* 20 menit *(Normalizing)*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.2978	274.95	0.1673	2.08972	70.06
44.6677	392.45	0.3346	2.02877	100.00
50.5101	71.75	0.2342	1.80696	18.28
82.3777	35.03	0.5353	1.17067	8.93
90.0207	24.37	0.8029	1.09007	6.21

2θ	**JCPDF**	**2θ Standar**	**Unsur**	**hkl**	**FWHM**
43.2978	03-065-9026	43.341	Cu	111	0.1673
44.6677	03-065-4899	44.663	Fe	110	0.3346
50.5101	03-065-9026	50.479	Cu	200	0.2342
82.3777	03-065-4899	82.318	Fe	211	0.5353
90.0207	03-065-9026	89.997	Cu	311	0.8029

13. Baja API 5L *grade B* Tanpa *Copperizing Quenching*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.7198	93.67	0.2676	2.02652	100.00
82.2772	15.73	0.8029	1.17185	16.80

2θ	**JCPDF**	**2θ Standar**	**Unsur**	**hkl**	**FWHM**
44.7198	00-006-0696	44.674	Fe	110	0.2676
82.2772	00-006-0696	82.335	Fe	211	0.8029

14. Baja API 5L *grade B Copperizing* 10" Tanpa *Post-Heat Quenching*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.2644	120.90	0.1004	2.09126	46.52
44.5906	259.86	0.1673	2.03210	100.00
50.3387	20.80	0.8029	1.81271	8.01

2θ	**JCPDF**	**2θ Standar**	**Unsur**	**hkl**	**FWHM**
43.2644	01-071-4611	43.167	Cu	111	0.1004
44.5906	00-044-1290	44.803	$C_{0.055}Fe_{1.945}$	110	0.1673
50.3387	01-071-4611	50.271	Cu	200	0.8029

15. Baja API 5L *grade B Copperizing* 10" *Post-Heat* 5" *Quenching*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.2774	267.74	0.1171	2.09066	100.00
44.6623	257.99	0.1673	2.02900	96.36
50.3787	60.89	0.2676	1.81136	22.74
82.1937	24.20	0.8029	1.17282	9.04

2θ	JCPDF	2θ Standar	Unsur	hkl	FWHM
43.2774	01-071-4611	43.167	Cu	111	0.1171
44.6623	00-044-1290	44.803	$C_{0.055}Fe_{1.945}$	110	0.1673
50.3787	01-071-4611	50.271	Cu	200	0.2676
82.1937	00-044-1290	82.164	$C_{0.055}Fe_{1.945}$	211	0.8029

16. Baja API 5L *grade B Copperizing* 10" *Post-Heat* 10" *Quenching*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.3217	113.70	0.1673	2.08863	70.75
44.6406	160.70	0.4684	2.02994	100.00
50.4041	42.41	0.3346	1.81051	26.39
89.9849	15.38	0.8029	1.09041	9.57

2θ	JCPDF	2θ Standar	Unsur	hkl	FWHM
43.3217	01-071-4611	43.167	Cu	111	0.1673
44.6406	00-044-1290	44.803	$C_{0.055}Fe_{1.945}$	110	0.4684
50.4041	01-071-4611	50.271	Cu	200	0.3346
89.9849	01-071-4611	89.557	Cu	311	0.8029

17. Baja API 5L *grade B Copperizing* 10" *Post-Heat* 15" *Quenching*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.3968	116.95	0.2007	2.08519	59.47
44.5928	196.64	0.4684	2.03200	100.00
50.4469	25.55	0.8029	1.80908	12.99
82.1296	30.79	0.8029	1.17358	15.66

2θ	**JCPDF**	**2θ Standar**	**Unsur**	**hkl**	**FWHM**
43.3968	01-071-4611	43.167	Cu	111	0.2007
44.5928	00-044-1290	44.803	$C_{0.055}Fe_{1.945}$	110	0.4684
50.4469	01-071-4611	50.271	Cu	200	0.8029
82.1296	00-044-1290	82.164	$C_{0.055}Fe_{1.945}$	211	0.8029

18. Baja API 5L *grade B Copperizing* 10" *Post-Heat* 20" *Quenching*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.2153	437.68	0.0612	2.09179	100.00
44.6096	268.25	0.1673	2.03127	61.29
50.3641	117.46	0.2676	1.81185	26.84
74.1425	60.97	0.4015	1.27891	13.93
82.2340	26.79	0.8029	1.17235	6.12
90.0575	28.05	0.9368	1.08972	6.41

2θ	**JCPDF**	**2θ Standar**	**Unsur**	**hkl**	**FWHM**
43.2153	01-071-4611	43.167	Cu	111	0.0612
44.6096	00-044-1290	44.803	$C_{0.055}Fe_{1.945}$	110	0.1673
50.3641	01-071-4611	50.271	Cu	200	0.2676
74.1425	01-074-5520	73.843	Cu	220	0.4015
82.2340	00-044-1290	82.164	$C_{0.055}Fe_{1.945}$	211	0.8029
90.0575	01-071-4611	89.557	Cu	311	0.9368

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 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*.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Pemakaian *furnace* dengan temperatur stabil saat proses *copperizing* dan perlakuan *post-heat*.
2. Penggunaan bata tahan api dan filamen pemanas yang tahan temperatur tinggi serta *crucible graphite* yang tidak mudah terabrasi oleh temperatur tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

_____. 1990. *ASM Metals Handbook Vol. 1 10th Edition: Properties and Selection Irons, Steels, and High Performance Alloys*. Ohio: ASM International.

_____. 1990. *ASM Metals Handbook Vol. 2 10th Edition: Properties and Selection Non-Ferrous Alloys and Special Purpose Mate.* Ohio: ASM International.

_____. 1992. *ASM Metals Handbook Vol. 3: Alloy Phase Diagrams*. Ohio: ASM International

_____. 2001. *Alloying: Understanding The Basics*. Ohio: ASM International.

Avner, Sidney H. 1982. *Introduction to Physical Metallurgy*. New York: McGraw-Hill Book Company.

Bodnar, R. L. 1994. *Effects of Austenite Grain Size and Cooling Rate on Widmanstatten Ferrite Formation in Low Alloy Steels*.

Bramfitt, B. L dan Arlan O. Benscoter. 2002. *Metallographer's Guide*. USA: ASM International.

Butrymowicz, Daniel B., John R. Manning, dan Michael E. Read. 1976. *Diffusion in Copper and Copper Alloys Part IV. Diffusion in Systems Involving Elements of Group VIII.*

Callister, William D. dan David G. Rethwisch. 2010. *Materials Science and Engineering Eight Edition: An Introduction*. USA: John Wiley & Sons, Inc.

Callister, William D. 2001. *Fundamentals of Materials Science and Engineering Fifth Edition*. USA: John Wiley & Sons, Inc.

Elwazri, A. M.; A. Fatehi; J. Calvo; D. Bai; S. Yue. 2008. *Analysis of Copper Effect on Microstructures and Mechanical Properties in Microalloyed Steels*. ISIJ International, Vol. 48, No. 1, pp. 107-113

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.

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.

Hough, R. R dan R. Rolls. 1971. *Copper Diffusion in Iron During High-Temperature Tensile Creep.* Metallurgical Transactions Vol. 2.

Klaric, Stefanija. 2009. *The Influence of Austenizing Parameters On The Grain Size of Hypoeutectoid Steel.*

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.

Krauss, George. 2005. *Steels: Processing, structure, and performance*. ASM International

Kundig, K.J.A. & Cowie, J.G., 2006. Chapter 4: Copper and Copper Alloys. In Kutz, M. *Mechanical Engineers' Handbook: Materials and Mechanical Design, Volume 1, Third Edition*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. pp.117-220

Kurniasari, Indri Astuti. 2008. *Studi Pengaruh Kadar Kromium Terhadap Kekerasan Lapisan Hasil Hot Dip Galvanizing Pada Baja Dari Spons Bijih Besi Laterit.* Jakarta: Universitas Indonesia.

Llewellyn, D. T dan R. C. Hudd. 1998. *Steel: Metallurgy & Applications Third Edition*. London: Reed Educational and Professional Publishing Ltd.

Messler, Jr. 1999. *Principles of Welding*. John Wiley & Sons: New York

Molleda, F., J. Mora, J. R. Molleda, E. Carrillo, E. Mora, dan B. G. Mellor. 2008. *Copper coating of carbon steel by a*

furnace brazing process using brass as the braze. Elsevier

Prawoto, Y. 2011. *Effect of Prior Austenite Grain Size on The Morphology and Mechanical Properties of Martensite in Medium Carbon Steel*.

Schreder, Tabb. 2007. *Metal Machining and Processes*. University of Toledo.

Suherman, W. 2001. *Perlakuan Panas*. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.

Suherman, W. 2003. *Ilmu Logam I*. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.

Suherman, W. 1999. *Ilmu Logam II*. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.

Surdia, Tata dan Shinroku Saito. 1999. *Pengetahuan Bahan Teknik*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita

Totten, George E. 2006. *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*. New York: Taylor & Francis Group, LLC.

Vicky, Widia Anggia. 2016. *Pengaruh Temperatur Solution Treatment dan Aging Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan Copperized-AISI 1006*. Surabaya: ITS.

Xu, Yourong; Deying Wang; Qi Jin; Yijian Zhou. 1993. *Diffusion Behaviour of Fe-Cu Interface of Copper Brazed Double-wall Steel Tubes*. J.Mater.Sci.Technol., Vol.9

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS

Penulis bernama lengkap Angga Septa Soetrisno yang lahir di Tangerang pada tanggal 9 September 1994. Penulis pernah menjalankan pendidikan formal di SD Citra Islami Tangerang, SMP Citra Islami Tangerang, dan SMA Negeri 1 Kabupaten Tangerang. Penulis merupakan mahasiswa aktif Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS tahun masuk 2012.

Selama menjalankan pendidikan di kampus ITS Surabaya, penulis berpartisipasi aktif dalam organisasi mahasiswa, yaitu Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS (HMMT FTI-ITS) sebagai Staf Departemen Dalam Negeri HMMT FTI-ITS 2013/2014 dan Wakil Internal Ketua HMMT FTI-ITS 2014/2015. Penulis juga aktif di Perhimpunan Mahasiswa Metalurgi dan Material Se-Indonesia (PM3I) sebagai staf Divisi Keprofesian PM3I 2013/2014. Kegiatan perkuliahan diakhiri dengan melakukan penelitian yang dijadikan Tugas Akhir dengan judul "**Pengaruh Waktu Tahan *Post-Heat* Dan Laju Pendinginan Proses *Copperizing* Terhadap Struktur Mikro Dan Kekerasan *Copperized*-API 5L Grade B".**

Alamat penulis saat ini adalah Jalan Raya Serang Km. 25 Mess PT. SRKI A.IV/2 Balaraja Tangerang Banten. Nomer telepon yang dapat dihubungi adalah 089682223548 atau alamat email anggaseptas1994@gmail.com.