



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMBUATAN *GRINDING BALL* DARI MATERIAL *WHITE CAST IRON* DENGAN PENAMBAHAN *CHROMIUM*,
MOLYBDENUM, *VANADIUM*, DAN *BORON* SEBAGAI UNSUR
PADUAN PEMBENTUK KARBIDA**

TESIS

**FAJAR NURJAMAN
1006787602**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMBUATAN *GRINDING BALL* DARI MATERIAL *WHITE CAST IRON* DENGAN PENAMBAHAN *CHROMIUM*,
MOLYBDENUM, *VANADIUM*, DAN *BORON* SEBAGAI UNSUR
PADUAN PEMBENTUK KARBIDA**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik

**FAJAR NURJAMAN
1006787602**

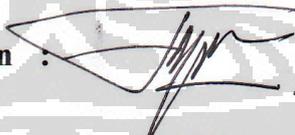
**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar**

Nama : Fajar Nurjaman

NPM : 1006787602

Tanda Tangan : 

Tanggal : Juli 2012

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Fajar Nurjaman
NPM : 1006787602
Program Studi : S-2 Teknik Metalurgi dan Material
Judul Tesis : Pembuatan *Grinding Ball* dari Material *White Cast Iron* dengan Penambahan *Chromium, Molybdenum, Vanadium,* dan *Boron*, sebagai Unsur Paduan Pembentuk Karbida

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik, pada Program Studi S-2 Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing 1 : Prof. Dr.-Ing. Ir. Bambang Suharno (.....)
Pembimbing 2 : Dr. Ir. Myrna Ariati Mochtar M.S. (.....)
Penguji 1 : Dr. Ir. Winarto, M. Sc (.....)
Penguji 2 : Dr. Ir. Sri Harjanto (.....)

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : Juli 2012

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah S.W.T yang telah memberikan rahmat, hidayat, kelancaran serta kemudahan, sehingga saya dapat menyelesaikan tesis ini sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik Program Studi S-2 Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa berbagai pihak telah turut membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam menjalani proses kuliah maupun dalam rangka penyusunan tesis ini, oleh karena itu saya ingin mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Prof. Dr-Ing. Ir. Bambang Suharno selaku pembimbing tesis I dan Dr. Ir. Myrna Ariati Mochtar M.S. selaku pembimbing tesis II, yang telah bersedia meluangkan waktu, tenaga dan pikirannya untuk membimbing pengerjaan tesis ini hingga selesai.
2. Dr. Ir. Sri Harjanto dan Dr. Ir. Winarto, M. Sc, yang telah memberikan banyak masukan untuk penyempurnaan tesis ini.
3. Kementerian Riset dan Teknologi, khususnya Panitia Pengelola Karyasiswa Ristek Angkatan 2010, yang telah memberikan beasiswa pendidikan Pasca Sarjana kepada saya, hingga saya dapat menempuh kuliah dan meraih gelar Magister Teknik di Program Studi S-2 Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
4. Ir. Adil Jamali, M.Sc., yang telah mengenalkan saya kepada ilmu metalurgi dan berbagai teknologi pengolahan mineral sehingga membuat saya tertarik untuk mempelajari ilmu tersebut.
5. Ir. Suharto, MT., selaku Kepala UPT Balai Pengolahan Mineral Lampung, LIPI yang telah memberikan dukungan moral serta memberikan ijin kepada saya untuk menggunakan berbagai fasilitas kantor dalam pengerjaan tesis ini.
6. Zulkifli Ijlas, A.Md, Anton Sapto H., ST., Marsas Nurbaiti, A. Md., Achmad Shofie, ST., Marsudi, Mudawir, Jufri, Supendi, Mamat, selaku pegawai UPT Balai Pengolahan Mineral Lampung, LIPI yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini.

7. Dadang Suhendar, Yulia Ningrum, Dedi Wuryanto, Rohimah, selaku orang tua yang selalu memberikan dukungan serta lantunan doa kepada Ananda dalam menyelesaikan studi ini.
8. “For My Lovely Family”, Mirra A.Md dan Narafa Khairunnisa (Lala), terima kasih atas dukungan, semangat serta pengorbanannya selama menjalani proses studi ini.
9. Segenap dosen dan karyawan DTMM-UI, yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu, saya mengucapkan terima kasih atas semua ilmu yang insya Allah akan bermanfaat bagi masa depan saya nanti.
10. Rekan-rekan seperjuangan (S2 Metalurgi-UI, angkatan 2010): Nanang “Ukin” Masruchin, Hary Olya, Ismadi, Giri Wahyu Alam, Rahmad Indra, Rahayu, “Yayuk” K. A, dan rekan-rekan lainnya.

Akhir kata, saya berharap Allah S.W.T akan membalas semua kebaikan pihak-pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini dapat membawa manfaat serta dapat memberikan kontribusi kepada pengembangan dunia ilmu pengetahuan.

Depok, Juli 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Fajar Nurjaman
NPM : 1006787602
Program Studi : S-2 Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Pembuatan *Grinding Ball* dari Material *White Cast Iron*
dengan Penambahan *Chromium, Molybdenum, Vanadium, dan Boron,*
sebagai Unsur Paduan Pembentuk Karbida**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan. Mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis /pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : Juli 2012

Yang menyatakan


(Fajar Nurjaman)

ABSTRAK

Nama : Fajar Nurjaman
Program Studi : S-2 Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pembuatan *Grinding Ball* dari Material *White Cast Iron* dengan Penambahan *Chromium, Molybdenum, Vanadium,* dan *Boron*, sebagai Unsur Paduan Pembentuk Karbida

Grinding ball merupakan salah satu komponen dalam mesin *ball mill* yang berfungsi untuk menggerus batuan mineral menjadi partikel yang sangat halus (100-300 mesh). Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh penambahan unsur paduan berupa khromium, molibdenum, vanadium, dan boron terhadap sifat-sifat mekanik *grinding ball* terbuat dari material *high chromium white cast iron*, serta pengaruh volume karbida primer, karbida sekunder, dan austenit sisa terhadap ketahanan aus produk *grinding ball*.

Pembuatan *grinding ball* berukuran Ø50 mm dilakukan dengan menggunakan teknik pengecoran logam dengan menggunakan tungku induksi. Berikut ini adalah komposisi kimia dari masing-masing *grinding ball* dalam penelitian ini: 2,18C - 13Cr - 1.38Mo; 1.94C - 13.1Cr - 1.29Mo - 1.307V; 1.89C - 13.1Cr - 1.32Mo - 1.361V - 0.00051B; 2.12C - 16.5Cr - 1.55Mo. Proses perlakuan panas dilakukan terhadap material tersebut berupa: (1) *subcritical heat treatment* (700°C, 1 jam) dengan pendinginan udara atmosfer, (2) *hardening* (950°C, 5 jam) dengan pendinginan udara paksa, (3) *tempering* (250°C, 1 jam) dengan pendinginan udara atmosfer. Karakterisasi untuk mengetahui sifat-sifat mekanik dan struktur mikro dari material tersebut dilakukan melalui beberapa pengujian diantaranya adalah analisa komposisi kimia (*Optical Electron Spectroscopy/OES*), uji kekerasan (*Brinell/ASTM E-10*), uji impak (*Charpy/ASTM E-23*), analisa struktur mikro (mikroskop optik, SEM, XRD), dan uji ketahanan aus/*wear rates (laboratory ball mill unit)*.

Dari hasil penelitian diperoleh bahwa penambahan khromium, molibdenum, vanadium, dan boron memberikan peningkatan yang signifikan terhadap nilai kekerasan dan ketahanan aus pada material *high chromium white cast iron*. Nilai ketahanan aus *grinding ball* yang tinggi dimiliki oleh material dengan komposisi 1.89C - 13.1Cr - 1.32Mo - 1.361V - 0.00051B (*as-cast*) dan 2.12C - 16.5Cr - 1.55Mo (*as-tempered*), dimana nilai ketahanan aus material tersebut lebih baik dibandingkan dengan *grinding ball* impor asal China dan India. Ketahanan aus yang tinggi pada material tersebut diakibatkan oleh nilai kekerasan dan ketangguhan yang berimbang, besarnya kandungan volume karbida primer dan sekunder dalam matriks martensit, rendahnya kandungan austenit sisa, serta morfologi karbida primer dan sekunder yang halus.

Kata kunci: *grinding ball*, karbida primer, karbida sekunder, austenit sisa perlakuan panas, ketahanan aus.

ABSTRACT

Name : Fajar Nurjaman
Study Program : S-2 Metallurgy and Materials Engineering
Title : The Manufacture of Grinding Ball from White Cast Iron
Material with The Addition of Chromium, Molybdenum,
Vanadium, and Boron as The Carbide Forming Elements.

Grinding ball is one of the components in the ball mill unit to grind the minerals rock into very fine particles (100-300 mesh). The purpose of this research are to investigate the effect of alloying elements, such as chromium, molybdenum, vanadium, and boron on the mechanical properties of grinding ball which is made from high chromium white cast iron, and to investigate the effect of primary and secondary carbide volume fraction and also retained austenite volume on the wear resistance of grinding ball.

The manufacturing of Ø50 mm grinding ball was conducted by using the iron casting process. The following are the chemical composition of the grinding ball's materials in this research: 2.18 C-13 Cr- 1.38 Mo; 1.94 C-13.1 Cr-1.29Mo-1.307 V; 1.89 C-13.1Cr-1.32 Mo-1.361 V-0.00051B; 2.12 C-16.5 Cr-1.55 Mo. The heat treatment process were conducted into those materials include: (1) Subcritical heat treatment (700 ° C, 1 h) with atmospheric air cooling , (2) Hardening (950°C, 5 hours) with forced air cooling, and (3) Tempering (250°C, 1 hour) with atmospheric air cooling. Materials characterization was conducted to find out the mechanical properties and micro structure of those materials by using a few testing methods, there were: chemical analysis (Optical Electron Spectroscopy/OES), hardness testing (Brinell/ASTM E-10), impact testing (Charpy/ASTM E-23), micro structure analysis (optical microscope, SEM, XRD), and wear resistance/wear rates testing (laboratory ball mill unit).

From the results, the addition of alloying elements, such as chromium, vanadium, molybdenum and boron provided a significant improvement on the hardness and wear resistance of high chromium white cast iron. The high wear resistance was owned by the material with 1.89 C-13.1Cr-1.32 Mo-1.361 V-0.00051B (as-cast) and 2.12 C-16.5 Cr-1.55 Mo (as-tempered), which were better than grinding ball's material from China and India. It was caused by a good combination between hardness and toughness, higher primary and secondary carbide volume fraction in martensitic matrix, lower retained austenite volume, and finer structure of primary and secondary carbide.

Keywords : grinding ball, primary carbide, secondary carbide, retained austenite, heat treatment, wear resistance.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	4
1.5 Keterbaruan (<i>State of The Art</i>) penelitian	5
1.6 Hipotesis	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Teknologi Pembuatan <i>Grinding Ball</i> dari Material Besi/Baja	8
2.1.1 Teknologi pembuatan <i>grinding ball</i> pada material baja	10
2.1.2 Teknologi pembuatan <i>grinding ball</i> pada material besi	11
2.1.3 Desain simulasi pengecoran (<i>casting design simulation</i>) dalam pembuatan <i>grinding ball</i>	12
2.2 Spesifikasi Material Besi/Baja untuk Aplikasi Tahan Gesek	14
2.2.1 <i>Manganese steel</i>	14
2.2.2 <i>Low alloy cast steel</i>	15
2.2.3 <i>Pearlitic chrom moly steel</i>	16
2.2.4 <i>Quenched and tempered steel</i>	17
2.2.5 <i>High chromium white cast iron</i>	18
2.3 Alat dan Metode Pengujian untuk Ketahanan Aus	19
2.3.1 <i>Rubber wheel test</i>	19
2.3.2 <i>Pin (on Disc) Test</i>	20
2.3.3 <i>Wet sand abrasion factor test</i>	21
2.3.4 <i>Ball mill abrasion test</i>	22
2.4 <i>High Chromium White Cast Iron</i> dan Aplikasinya sebagai <i>Grinding Ball</i>	23

2.5	<i>Mechanical Properties of High Chromium White Cast Iron</i>	24
2.5.1	Kekerasan (<i>hardness</i>)	24
2.5.2	Ketangguhan (<i>toughness</i>)	25
2.5.3	Ketahanan aus (<i>wear resistance</i>)	25
2.6	Struktur Mikro <i>High Chromium White Cast Iron</i>	26
2.6.1	Karbida primer dan eutektik pada <i>high chromium white cast iron</i>	28
2.6.2	Karbida sekunder dan martensit pada <i>high chromium white cast iron</i>	31
2.6.3	Austenit sisa pada <i>high chromium white cast iron</i>	33
2.7	Unsur-Unsur Paduan pada <i>High Chromium White Cast Iron</i>	34
2.8	Spesifikasi <i>High Chromium White Cast Iron</i> sebagai <i>Grinding Ball</i> ..	35

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1	Karakterisasi <i>Grinding Ball</i> asal China dan India	38
3.2	Desain Simulasi Pengecoran <i>Grinding Ball</i>	38
3.3	Proses Pembuatan <i>Grinding Ball</i> dengan Metode Pengecoran Logam	43
3.4	Proses Perlakuan Panas Terhadap Produk <i>Grinding Ball</i>	45
3.5	Uji Karakterisasi <i>Grinding Ball</i> Hasil Penelitian	46
3.5.1	Analisa komposisi kimia	46
3.5.2	Uji kekerasan	46
3.5.3	Uji impak	46
3.5.4	Analisa struktur mikro	47
3.6	Uji <i>Wear Rates Grinding Ball</i> dalam <i>Laboratory Ball Mill Unit</i>	48
3.7	Analisa Tekno Ekonomi Pembuatan <i>Grinding Ball</i>	51

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Karakteristik <i>Grinding Ball</i> Impor (India dan Cina)	52
4.2	Proses Pembuatan <i>Grinding Ball</i>	55
4.2.1	Desain <i>gating system</i>	55
4.2.2	Desain simulasi pengecoran <i>grinding ball</i>	56
a.	Parameter desain simulasi pengecoran	56
b.	Desain Simulasi pengecoran	58
c.	Optimalisasi desain simulasi pengecoran	64
4.3	Produk <i>Grinding Ball</i> Hasil Penelitian	66
4.4	Karakteristik <i>Grinding Ball</i> Hasil Penelitian	66
4.4.1	Pengaruh penambahan unsur Cr, Mo, V, dan B terhadap nilai kekerasan dan ketangguhan <i>high chromium white cast iron</i> ASTM A532-Tipe IIA dan ASTM A532-Tipe IIB pada kondisi <i>as-cast</i>	67

a.	Pengaruh unsur khrom (Cr)	70
b.	Pengaruh unsur molybdenum (Mo)	71
c.	Pengaruh unsur vanadium (V)	73
d.	Pengaruh unsur boron (B)	76
4.4.2	Pengaruh perlakuan panas terhadap nilai kekerasan dan ketangguhan <i>high chromium white cast iron</i>	78
a.	<i>Subcritical heat treatment</i>	79
b.	<i>Hardening</i> (austenisasi dan <i>quenching</i>)	81
c.	<i>Tempering</i>	85
4.5	Uji Kehandalan (<i>Wear Rates</i>) <i>Grinding Ball</i>	88
4.5.1	Media abrasif	89
4.5.2	Uji <i>wear rates grinding ball</i> impor dalam <i>laboratory ball mill unit</i>	91
4.5.3	Uji <i>wear rates grinding ball</i> hasil penelitian dalam <i>laboratory ball mill unit</i>	92
a.	Pengaruh nilai kekerasan dan ketangguhan	93
b.	Pengaruh karbida primer dan eutektik	95
c.	Pengaruh karbida sekunder	98
d.	Pengaruh intensitas austenit sisa	100
4.6	Seleksi Material <i>High Chromium White Cast Iron</i> Hasil Penelitian sebagai Produk <i>Grinding Ball</i>	101
4.7	Nilai Ekonomis <i>Grinding Ball</i> Hasil Penelitian	103
4.7.1	Harga pokok produksi (HPP)	103
4.7.2	Rasio nilai ekonomis produk <i>grinding ball</i> hasil penelitian terhadap <i>grinding ball</i> impor	104
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	106
5.2	Saran	107
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		
		112

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Data pabrik semen di Indonesia.....	2
Tabel 2.1	<i>Austenitic manganese steel</i> (ASTM 128)	15
Tabel 2.2	<i>Low alloy cast steel</i> (ASTM A27)	15
Tabel 2.3	<i>Pearlitic chrome moly steels</i>	16
Tabel 2.4	<i>Quenched and tempered steel</i>	17
Tabel 2.5	<i>High chromium white cast iron</i>	18
Tabel 2.6	Data uji ketahanan aus dari <i>high chromium white cast iron</i>	26
Tabel 2.7	Karakteristik <i>grinding ball</i>	36
Tabel 2.8	Klasifikasi material <i>grinding ball</i> SII-0789-83 (SNI-1069)	37
Tabel 4.1	Komposisi kimia produk <i>grinding ball</i> impor	52
Tabel 4.2	Parameter dan konstanta untuk desain <i>gating system</i>	55
Tabel 4.3	Dimensi untuk desain <i>gating system</i>	56
Tabel 4.4	Nilai <i>yield</i> untuk masing-masing desain awal	63
Tabel 4.5	Komposisi kimia produk <i>grinding ball</i> hasil penelitian	67
Tabel 4.6	Hasil analisa XRF bijih besi <i>hematite</i> (abrasif).....	89
Tabel 4.7	Nilai kekerasan dan ketahanan aus produk <i>grinding ball</i> hasil penelitian	94
Tabel 4.8	Volume karbida primer produk <i>grinding ball</i>	97
Tabel 4.9	Volume fraksi karbida sekunder	98
Tabel 4.10	Volume austenit sisa pada sampel <i>grinding ball</i> uji <i>wear rates</i>	101
Tabel 4.11	Resume sifat-sifat mekanik dan struktur mikro dari <i>high</i> <i>chromium white cast iron</i> hasil penelitian	102
Tabel 4.12	Rincian tekno ekonomi dari <i>grinding ball</i> sampel D per 500 Kg produk	104
Tabel 4.13	Rincian tekno ekonomi dari <i>grinding ball</i> sampel E per 500 Kg produk	104

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	(a) <i>Ball mill unit</i> , (b) <i>Grinding ball</i> dalam <i>ball mill unit</i>	8
Gambar 2.2	Skema Proses Pembuatan Material Besi dan Baja	9
Gambar 2.3	Proses pembuatan <i>grinding ball</i> (a) Bahan baku, (b) <i>heating rod before forging</i> , (c) <i>forging and quenching</i> , (d) pengecekan nilai kekerasan, (e) <i>Packing</i>	11
Gambar 2.4	Skema proses pembuatan <i>grinding ball</i> dari material besi (tuang), (a) <i>Expendable mold</i> untuk <i>grinding ball</i> sebanyak 2000 buah.....	12
Gambar 2.5	Simulasi proses pengecoran logam dengan Solidcast TM :(a) simulasi fluid flow, (b) simulasi solidifikasi	13
Gambar 2.6	<i>Dry sand rubber wheel test (SAE test method model)</i>	20
Gambar 2.7	<i>Wet sand rubber wheel test (SAE test method model)</i>	20
Gambar 2.8	<i>Pin (on disc) test</i> (a) konvensional, (b) modern, (c) dimensi spesimen <i>pin</i> dan disc	21
Gambar 2.9	<i>Wet Sand Abrasion Factor test</i>	22
Gambar 2.10	<i>Laboratory ball mill unit (coal charge:16 Kg, total ball charge: 132Kg, Speed: 31 rpm)</i>	22
Gambar 2.11	(a) Struktur mikro <i>high chromium white cast iron</i> , (b) pengaruh unsur karbon terhadap ketangguhan <i>high chromium white cast iron</i> (15% Cr)	25
Gambar 2.12	Diagram fasa <i>high chromium white cast iron</i> : (a) 10% Cr, (b) 15% Cr, (c) 20% Cr, (d) 25% Cr; L: <i>liquid</i> , γ : austenit, α : ferrit, K ₁ : (Fe,Cr) ₂₃ C ₆ , K ₂ : (Fe,Cr) ₇ C ₃	27
Gambar 2.13	Struktur mikro <i>high chromium white cast iron</i> , (a) SEM: bentuk <i>hexagonal rod</i> , (b) TEM: rongga pada M ₇ C ₃ <i>carbide</i> yang diisi oleh matriks	29
Gambar 2.14	Struktur mikro <i>high chromium white cast iron</i> , (a) <i>Primary carbide</i> M ₇ C ₃ (b) <i>Eutectic Carbide</i> M ₇ C ₃	30
Gambar 2.15	Tahapan pembentukan karbida sekunder pada <i>high chromium white cast iron</i> pada temperatur austenisasi 900 °C: (a) 20 menit, (b) 1 jam, (c) 2 jam, (d) 8 jam.....	32
Gambar 2.16	Struktur mikro <i>high chromium grinding ball</i> (a) <i>surface of grinding ball</i> , (b) <i>center of grinding ball</i>	36
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	39
Gambar 3.2	Skema <i>gating system</i> dalam sebuah cetakan	40
Gambar 3.3	Dimensi utama <i>gating system</i> dalam penelitian: (a) <i>pouring basin and sprue</i> , (b) <i>runner</i> , (c) <i>gates</i>	41
Gambar 3.4	Skema desain <i>gating system grinding ball</i> dalam penelitian ini	43
Gambar 3.5	Pembuatan <i>grinding ball</i> dengan metode pengecoran logam	44
Gambar 3.6	Diagram perlakuan panas <i>grinding ball</i> hasil penelitian	45
Gambar 3.7	Alat uji karakterisasi produk <i>grinding ball</i> : (a) <i>brinell hardness tester</i> , (b) spesimen uji kekerasan	46
Gambar 3.8	Alat uji karakterisasi produk <i>grinding ball</i> : (a) <i>alat uji impak</i> , (b) spesimen uji impak	47
Gambar 3.9	Ilustrasi penghitungan volume fraksi karbida dengan metode titik	48

Gambar 3.10	Diagram uji <i>wear rates</i> produk <i>grinding ball</i> hasil penelitian	50
Gambar 4.1	Nilai kekerasan produk <i>grinding ball</i> impor	52
Gambar 4.2	Struktur mikro (a), (b) <i>grinding ball</i> impor asal India; (c), (d) <i>grinding ball</i> asal Cina (etsa nital 3% dan FeCl ₃)	53
Gambar 4.3	Analisa XRD produk <i>grinding ball</i> impor asal India dan Cina.....	54
Gambar 4.4	Parameter awal simulasi: (a) material, (b) <i>flow</i> , (c) <i>cooling curve</i> , (d) <i>mold</i> /cetakan pasir, (e) <i>pour time</i> , (f) <i>heat transfer coefficient</i>	58
Gambar 4.5	Desain <i>gating system</i> pada pembuatan <i>grinding ball</i> : (a) tanpa <i>vent air</i> , (b) dengan <i>vent air</i> Ø6 mm, (c) dengan <i>vent air</i> Ø15.5 mm	59
Gambar 4.6	<i>Solidification time</i> dalam simulasi proses pengecoran logam.....	60
Gambar 4.7	<i>Temperature gradient</i> dalam simulasi proses pengecoran logam	61
Gambar 4.8	<i>Niyama Criterion</i> dalam simulasi proses pengecoran logam	62
Gambar 4.9	Optimalisasi parameter simulasi.....	64
Gambar 4.10	Optimalisasi simulasi desain 2	65
Gambar 4.11	(a) Desain 1 dengan <i>pouring temperature</i> 1450 °C, (b) Desain 2 dengan <i>pouring temperature</i> 1480 °C	66
Gambar 4.12	Nilai kekerasan pada kondisi <i>as-cast</i> dari produk <i>grinding ball</i> hasil penelitian.....	68
Gambar 4.13	Nilai energy impak pada kondisi <i>as-cast</i> dari produk <i>grinding ball</i> hasil penelitian.....	68
Gambar 4.14	Struktur mikro kondisi <i>as-cast</i> dari produk <i>grinding ball</i> hasil penelitian: (a-b) Sampel B, (b-c) Sampel C, (d-e) Sampel D, (f-g) sampel E (etsa nital 3% dan FeCl ₃)	70
Gambar 4.15	Hasil analisa SEM-EDS kondisi <i>as-cast</i> sampel C	72
Gambar 4.16	Pengaruh unsur molibdenum terhadap <i>hardenability</i> dari material <i>high chromium white cast iron</i>	73
Gambar 4.17	Struktur mikro kondisi <i>as-cast</i> dari produk <i>grinding ball</i> : (a) Bedolla, et.al.: 2.58C-16.9Cr-1.98Mo-1.98V (b) Sample D: 1.94C - 13.1Cr - 1.29Mo - 1.31V	74
Gambar 4.18	Hasil analisa XRD sampel C dan E pada kondisi <i>as-cast</i>	75
Gambar 4.19	Hasil analisa SEM-EDS kondisi <i>as-cast</i> sampel D	77
Gambar 4.20	Hasil analisa XRD sampel D pada kondisi <i>as-cast</i>	77
Gambar 4.21	Nilai kekerasan produk <i>grinding ball</i> hasil penelitian pada kondisi <i>as-heat treated</i>	78
Gambar 4.22	Nilai energi impak produk <i>grinding ball</i> hasil penelitian pada kondisi <i>as-cast</i> dan <i>as-tempered</i>	79
Gambar 4.23	Struktur mikro kondisi <i>as-subcritical</i> dari produk <i>grinding ball</i> hasil penelitian: (a-b) Sampel B, (b-c) Sampel C, (d-e) Sampel D, (f-g) Sampel E (nital 3% dan FeCl ₃)	80
Gambar 4.24	Analisa XRD sampel E pada kondisi <i>as-cast</i> dan <i>as-quenched</i>	82
Gambar 4.25	Struktur mikro kondisi <i>as-quenched</i> dari produk <i>grinding ball</i> hasil penelitian: (a-b) Sampel B, (b-c) Sampel C, (d-e) Sampel D, (f-g) Sampel E (Nital 3% dan FeCl ₃)	83
Gambar 4.26	Analisa XRD sampel B, D, dan E pada kondisi <i>as-quenched</i>	84
Gambar 4.27	Struktur mikro kondisi <i>as-tempered</i> dari produk <i>grinding ball</i> hasil penelitian: (a-b) Sampel B, (b-c) Sampel C, (d-e) Sampel D, (f-g) Sampel E (Nital 3% dan FeCl ₃)	86
Gambar 4.28	Analisa XRD sampel E pada kondisi <i>as-quenched</i> dan <i>as-tempered</i>	86

Gambar 4.29	Hasil analisa XRD sampel B, C, dan E pada kondisi <i>as-tempered</i>	87
Gambar 4.30	Hasil analisa XRD sampel D dan E pada kondisi <i>as-tempered</i>	87
Gambar 4.31	Hasil analisa SEM dan EDX bijih besi hematite (abrasif)	90
Gambar 4.32	Hasil uji <i>wear rates</i> terhadap <i>grinding ball impor</i> dalam <i>laboratory ball mill unit</i>	92
Gambar 4.33	Hasil uji <i>wear rates grinding ball</i> hasil penelitian dalam <i>laboratory ball mill unit</i>	93
Gambar 4.34	Morfologi karbida : (a) eutektik (sampel C) , (b) primer (sampel B), pada <i>high chromium white cast iron</i>	96
Gambar 4.35	Morfologi karbida sekunder pada produk <i>grinding ball</i> : (a) Sampel B, (b) Sampel C, (c) Sampel E	99
Gambar 4.36	Struktur mikro: (a) sampel B <i>as-tempered</i> , (b) sampel C <i>as-tempered</i> , (c) sampel D <i>as-cast</i> , (d) sampel E <i>as-tempered</i>	102



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	<i>License File</i> untuk Penggunaan SolidCast™	112
Lampiran 2	Desain 1 (Casting Design Simulation)	113
Lampiran 3	Desain 2 (Casting Design Simulation)	114
Lampiran 4	Desain 3 (Casting Design Simulation)	115
Lampiran 5	<i>Secondary Carbide Volume Fraction</i> : Sampel B	116
Lampiran 6	<i>Secondary Carbide Volume Fraction</i> : Sampel C	118
Lampiran 7	<i>Secondary Carbide Volume Fraction</i> : Sampel E	120
Lampiran 8	Analisa XRD: <i>Grinding Ball Ex-India</i>	122
Lampiran 9	Analisa XRD: <i>Grinding Ball Ex-China</i>	124
Lampiran 10	Analisa XRD: Sampel C <i>As-Cast</i>	126
Lampiran 11	Analisa XRD: Sampel D <i>As-Cast</i>	129
Lampiran 12	Analisa XRD: Sampel E <i>As-Cast</i>	131
Lampiran 13	Analisa XRD: Sampel B <i>As-Quench</i>	134
Lampiran 14	Analisa XRD: Sampel D <i>As-Quench</i>	136
Lampiran 15	Analisa XRD: Sampel E <i>As-Quench</i>	138
Lampiran 16	Analisa XRD: Sampel B <i>As-Tempered</i>	140
Lampiran 17	Analisa XRD: Sampel C <i>As-Tempered</i>	142
Lampiran 18	Analisa XRD: Sampel D <i>As-Tempered</i>	144
Lampiran 19	Analisa XRD: Sampel E <i>As-Tempered</i>	146

BAB 1

PENDAHULUAN

Pengolahan mineral (*mineral processing*) merupakan suatu upaya untuk meningkatkan nilai tambah dari suatu mineral, baik dengan metode peleburan, ekstraksi, maupun benefisiasi. Salah satu tahapan terpenting dalam pengolahan mineral adalah *size reduction*, dimana pada tahapan ini batuan mineral berbentuk bongkah digerus dengan menggunakan sebuah alat/mesin hingga diperoleh produk batuan mineral berukuran 100-300 *mesh*.

Ada beberapa jenis peralatan yang digunakan untuk menggerus batuan mineral dalam industri pengolahan mineral, diantaranya: (1) *Jaw crusher*, (2) *Disc mill*, (3) *Hammer mill*, dan (4) *Ball mill*. Umumnya *jaw crusher* digunakan untuk menggerus bongkahan batuan mineral (berukuran \varnothing 10-20 cm) hingga menjadi berukuran \varnothing 2-3 cm, sedangkan *disc mill* dan *hammer mill* digunakan untuk menggerus batuan mineral berukuran \varnothing 2-3 cm hingga menjadi berukuran 60-100 *mesh*, sedangkan *ball mill* digunakan untuk menggerus batuan mineral berukuran \varnothing 2-3 cm hingga menjadi berukuran 100-300 *mesh*. *Ball mill* merupakan salah satu alat yang banyak digunakan pada industri pengolahan mineral, seperti bijih tembaga, bijih emas, bijih besi dan semen.

Pada penelitian ini akan dilakukan suatu kajian mengenai pembuatan *grinding ball* lokal sebagai *grinding media* dalam *ball mill unit*, meliputi komposisi material, proses perlakuan panas/*heat treatment*, serta melakukan serangkaian analisa terhadap karakteristik dari *grinding ball* hasil penelitian untuk mengetahui: (1) pengaruh volume fraksi *primary* dan *secondary carbide* serta (2) pengaruh intensitas martensit dan austenit sisa/*retained austenite* terhadap nilai *wear rates*/ketahanan aus dari berbagai komposisi material *grinding ball* hasil penelitian.

1.1 LATAR BELAKANG PENELITIAN

Ball mill merupakan sebuah alat yang umumnya digunakan untuk proses penggerusan batuan mineral, hal ini dikarenakan alat tersebut memiliki kemampuan untuk menghasilkan butiran halus (*fine particulate*) berukuran 300

mesh (10-300 μm) hingga skala nano. Mesin *ball mill* umumnya terdiri dari sebuah drum/silinder yang berputar dengan kecepatan yang rendah, dimana di dalamnya terdapat sejumlah bola-bola (*grinding ball*) yang berfungsi sebagai penggerus. Umumnya *grinding ball* dan batuan mineral tersebut berjumlah 50% dari volume drum tersebut. Mekanisme penggerusan yang dilakukan oleh *grinding ball* dalam mesin *ball mill* melibatkan tiga buah gaya, diantaranya gaya impact, gaya robek (*chipping*) dan gaya gesek ^[1]. *Grinding ball* merupakan komponen terpenting dalam mesin *ball mill*, dimana komponen ini menderita beban gesek dan impact yang sangat tinggi sehingga menyebabkan performa bola ini dibatasi oleh umur pakai dari komponen tersebut. Umur pakai *grinding ball* yang tinggi dapat diperoleh dengan cara melakukan pemilihan material yang tepat dengan sifat-sifat mekanik seperti nilai kekerasan (*hardness*) dan ketangguhan (*toughness*) yang optimal.

Industri semen merupakan salah satu industri pengguna mesin *ball mill* yang digunakan untuk menggerus bahan baku semen, seperti kalsium karbonat (batu kapur), silika, alumina oksida dan besi oksida, dimana pemakaian energi listrik untuk proses penggerusan adalah sebesar 60-70% dari total energi listrik yang digunakan. Besarnya pemakaian energi listrik ini menunjukkan bahwa proses penggerusan memegang peranan yang sangat penting dalam proses produksi dalam industri semen. Oleh karena itu perhatian khusus perlu diberikan pada komponen penggerus, terutama *grinding ball*.

Tabel 1.1 Data pabrik semen di Indonesia ^[2]

No.	Nama Industri	Kapasitas (ton/Tahun)
1	PT.Indocement Tunggal Prakarsa (Semen Tigaroda)	15.600.000
2	PT.Semen Baturaja Persero (Semen Baturaja)	1.250.000
3	PT.Semen Padang (Semen Padang)	5.240.000
4	PT.Semen Gresik (Semen Gresik)	8.520.000
5	PT.Semen Bosowa (Semen Bosowa)	3.000.000
6	PT. Lafarge Cement Indonesia (Semen Andalas)	1.800.000
7	PT.Semen Cibinong (Holchim)	9.700.000
8	PT. Semen Tonasa	3.480.000
Kapasitas Total per Tahun		48.590.000

Hingga tahun 2010, di Indonesia telah terdapat delapan buah pabrik semen yang tersebar di beberapa propinsi, dan Tabel 1.1 di atas berisikan kedelapan industri semen tersebut beserta jumlah kapasitas produksi semen yang dihasilkan.

Hingga saat ini seluruh industri semen di Indonesia menggunakan *grinding ball* impor^[3], sebagai contoh adalah PT. Semen Holchim dan PT. Semen Baturaja, yang menggunakan *grinding ball* dari perusahaan asal India. Jika diasumsikan nilai *wear rates* dari *grinding ball* sebesar 100 gr/ton semen^[4], maka kebutuhan seluruh industri semen lokal akan *grinding ball* saat ini adalah 4859 ton/tahun atau Rp. 75,314 milyar/tahun (dengan harga *grinding ball* sebesar Rp. 15.500/Kg mengacu pada harga *grinding ball* impor asal India).

Oleh karena itu, untuk mengurangi ketergantungan industri nasional terhadap penggunaan *grinding ball* impor, maka perlu dilakukan sebuah kajian penelitian mengenai pembuatan *grinding ball* lokal yang memiliki kualitas yang menyerupai *grinding ball* impor, selain itu kajian mengenai tekno ekonomi terhadap *grinding ball* hasil penelitian juga perlu dilakukan untuk dijadikan acuan oleh para industri yang ingin bergerak di bidang pembuatan *grinding ball* ini.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Ketergantungan industri pengolahan mineral terhadap *grinding ball* impor masih sangat tinggi, hal ini dikarenakan belum adanya industri pembuatan *grinding ball* di dalam negeri yang dapat memproduksi *grinding ball* yang sesuai dengan standar internasional, maupun kualitas produk *grinding ball* dalam negeri yang menyerupai kualitas *grinding ball* impor.

Peningkatan terhadap kualitas produk *grinding ball* diantaranya dapat dilakukan melalui pemilihan material yang tepat serta penggunaan beberapa unsur paduan yang dapat meningkatkan sifat-sifat mekanik dari *grinding ball* tersebut, seperti khromium (Cr), molibdenum (Mo), vanadium (V), dan boron (B), dimana unsur-unsur tersebut merupakan unsur paduan pembentuk karbida (primer, eutektik, dan karbida sekunder) yang sangat kuat, sehingga mampu meningkatkan kekerasan dan ketahanan gesek pada material besi/baja. Selain itu, peningkatan sifat-sifat mekanik berupa kombinasi antara ketangguhan dan kekerasan yang baik terhadap material *grinding ball* juga dapat dilakukan melalui serangkaian metode

perlakuan panas, untuk memperoleh struktur martensit, karbida sekunder dan sedikit austenit sisa.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini secara umum bertujuan untuk memperoleh *grinding ball* dengan kualitas menyerupai *grinding ball* impor. Adapun tujuan khusus dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membandingkan nilai ketahanan aus serta karakteristik produk *grinding ball* hasil penelitian dengan produk *grinding ball* impor.
2. Mempelajari pengaruh unsur-unsur paduan pembentuk karbida (khromium, molibdenum, vanadium, dan boron) terhadap karakteristik material *high chromium white cast iron*.
3. Mempelajari pengaruh struktur mikro (karbida primer, karbida sekunder, austenit sisa) dan sifat-sifat mekanik (kekerasan dan ketangguhan) terhadap nilai ketahanan aus dari material *high chromium white cast iron*.

1.4 RUANG LINGKUP PENELITIAN

Pada penelitian ini akan dilakukan proses pembuatan *grinding ball* dari material besi cor putih paduan khrom tinggi (*high chromium white cast iron*). Ruang lingkup yang akan diteliti dalam penelitian ini meliputi desain simulasi pembuatan *grinding ball*, proses manufaktur/pembuatan *grinding ball*, pengujian karakteristik, uji kehandalan *grinding ball* dalam *laboratory ball mill unit*, serta analisa tekno ekonomi untuk produk *grinding ball*.

Desain simulasi pembuatan *grinding ball* dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak (*software*) program simulasi pengecoran logam, yaitu *SolidCastTM*, dimana hal ini bertujuan untuk memperoleh dimensi dan bentuk *gating system* serta parameter proses pengecoran logam yang tepat untuk meminimalisasi terjadinya cacat, seperti *shrinkage* dan *porosity*. Selain itu, desain simulasi ini juga bertujuan untuk memperoleh nilai *yield* yang optimal sehingga akan memberikan dampak nilai ekonomis yang signifikan terhadap proses manufaktur *grinding ball*.

Proses pembuatan *grinding ball* meliputi proses pengecoran logam dengan menggunakan cetakan berupa pasir cetak dengan perekat *bentonite*, selanjutnya dilakukan proses perlakuan panas terhadap *grinding ball* hasil pengecoran logam tersebut berupa: *subcritical heat treatment*, *hardening* (austenisasi dilanjutkan dengan *quenching*), dan *tempering*.

Uji karakteristik yang dilakukan terhadap produk *grinding ball* berupa uji kekerasan, uji impak, dan struktur mikro. Untuk uji kehandalan dilakukan dengan mengukur ketahanan aus (*wear rates*) dari *grinding ball* untuk menggerus bijih besi (*hematite*) dalam sebuah *laboratory ball mill unit*.

1.5 KETERBARUAN (*STATE OF THE ART*) PENELITIAN

Wear rates atau nilai keausan adalah laju pengurangan dimensi/berat pada suatu material akibat beban gesek. Hal ini merupakan faktor biaya yang sangat penting dalam proses pengolahan mineral ^[5]. Data yang diperoleh dari negara Amerika Serikat (*National Material Advisory Board*) mengenai penggunaan energi listrik pada *grinding process* di tahun 1981 mencapai 32 milyar dollar per tahun. Industri semen merupakan sebuah industri dimana pemakaian energi listrik untuk proses penggerusan adalah sebesar 60-70% dari total energi listrik yang digunakan. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *ball mill unit* dalam industri semen sangatlah besar, bahkan pada sebuah pembangkit tenaga listrik di negara Brazil (tahun 2007), pemakaian *grinding ball* pada mesin *pulverizer* untuk menggerus batubara, menghabiskan *grinding ball* yang terbuat dari baja karbon sebanyak 120 ton/bulan atau mencapai nilai sebesar 2.3 juta *US dollar* per tahunnya ^[6].

Saat ini pemilihan material *high chromium white cast iron* (ASTM A532) sebagai *grinding ball* telah banyak dilakukan, hal ini dikarenakan material tersebut memberikan hasil performa/*wear rates* yang jauh lebih baik dibandingkan *forge steel* (EN-31) dan *cast hyper steel* ^[7] serta baja paduan rendah/*low alloys steel ball* ^[8-9].

Peningkatan sifat-sifat mekanik terhadap *high chromium white cast iron* diantaranya dilakukan melalui penambahan unsur pembentuk karbida seperti Mo, W, V, dan Co, dimana hal ini bertujuan untuk meningkatkan nilai kekerasan

(ketahanan aus/*wear rates*) dan ketangguhan dari *grinding ball* ^[10-11]. Nilai kekerasan dari suatu material sangat ditentukan oleh persentase volume karbida serta matriks dalam struktur mikro material tersebut, semakin tinggi volume karbida dalam suatu material maka semakin tinggi pula nilai kekerasan dan ketahanan aus dari material tersebut ^[12], selain itu karbida yang berada dalam matriks martensit akan memberikan *wear rates* yang lebih baik, bila dibandingkan dengan karbida yang berada pada matriks austenit dan pearlit ^[6].

Peningkatan sifat mekanik terhadap *high chromium white cast iron* juga dapat dilakukan melalui proses perlakuan panas, dimana untuk memperoleh *grinding ball* dengan nilai ketahanan aus yang rendah, material tersebut haruslah memiliki struktur mikro berupa karbida (primer, eutektik dan sekunder) dalam matriks martensit dengan sedikit austenit sisa. Keberadaan austenit sisa dalam jumlah besar sangat tidak dikehendaki, hal ini dikarenakan dapat berdampak negatif terhadap ketahanan aus dari *grinding ball*. Untuk mendapatkan struktur mikro dengan sedikit austenit sisa, umumnya dilakukan dengan menggunakan metode perlakuan panas berupa *deep cryogenic treatment/subzero heat treatment* ^[13] atau *subcritical heat treatment* ^[14].

Hingga saat ini, penambahan unsur paduan pada material material *high chromium white cast iron* (ASTM A532), yaitu kombinasi antara molibdenum, vanadium dan boron terhadap peningkatan ketahanan aus dari *grinding ball* masih belum banyak dipelajari. Oleh karena itu dalam penelitian ini akan dipelajari mengenai pengaruh penambahan unsur-unsur paduan tersebut terhadap sifat-sifat mekanik dan performa dari *grinding ball*, selain itu juga dipelajari mengenai pengaruh dari beberapa unsur paduan tersebut di atas terhadap pembentukan karbida sekunder (*secondary carbide*), struktur martensit serta austenit sisa setelah melalui serangkaian proses perlakuan panas pada produk *grinding ball* hasil penelitian ini.

1.6 HIPOTESIS

Penambahan unsur-unsur paduan pembentuk karbida, seperti molibdenum (Mo), vanadium (V) dan boron (B) pada material *high chromium white cast iron* akan memberikan dampak yang signifikan terhadap sifat-sifat mekanik diantaranya adalah kekerasan, ketangguhan, dan ketahanan aus dari material

tersebut. Peningkatan nilai kekerasan dan ketahanan aus tersebut diakibatkan oleh pembentukan senyawa karbida diantaranya adalah: M_7C_3 [(Fe,Cr) $_7C_3$], M_2C [Mo_2C], MC [VC], dan $M_{23}C_6$ [(Fe,Cr) $_{23}(B,C)_6$].

Selain penambahan unsur paduan, serangkaian proses perlakuan panas berupa *subcritical heat treatment*, *hardening* (austenisasi dan *quenching*), serta *tempering* akan meningkatkan sifat-sifat mekanik dari material *high chromium white cast iron*. Peningkatan nilai kekerasan dan ketahanan aus melalui proses perlakuan panas diperoleh akibat terbentuknya struktur martensit dan karbida sekunder. Selain itu terbentuknya struktur austenit sisa akibat proses *hardening* akan berdampak positif terhadap nilai ketangguhan dari material *high chromium white cast iron*.

Kombinasi yang tepat antara nilai kekerasan dan ketangguhan dari material *high chromium white cast iron* dalam aplikasinya sebagai produk *grinding ball* akan memberikan nilai ketahanan aus yang baik atau nilai *wear rates* yang rendah.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

Ball mill, pertama kali diciptakan pada akhir abad ke-19, dimana mesin ini bekerja tanpa menggunakan *grinding media* (*self mill*), dan pada pertengahan abad ke-20, German dan Amerika mulai mengembangkan *ball mill* untuk keperluan pengolahan mineral dengan menggunakan *grinding media* berupa bola-bola besi/baja atau *grinding ball* (Gambar 2.1) .



Gambar 2.1 (a) *Ball mill unit* , (b) *Grinding ball* dalam *ball mill unit* ^[15-16]

Berdasarkan prinsip kerjanya, proses penggerusan batuan mineral oleh *grinding ball* di dalam *ball mill unit* melibatkan mekanisme abrasi/gesek dan dampak. Oleh karena itu material *grinding ball* harus memiliki sifat-sifat mekanik berupa kekerasan dan ketangguhan yang tinggi.

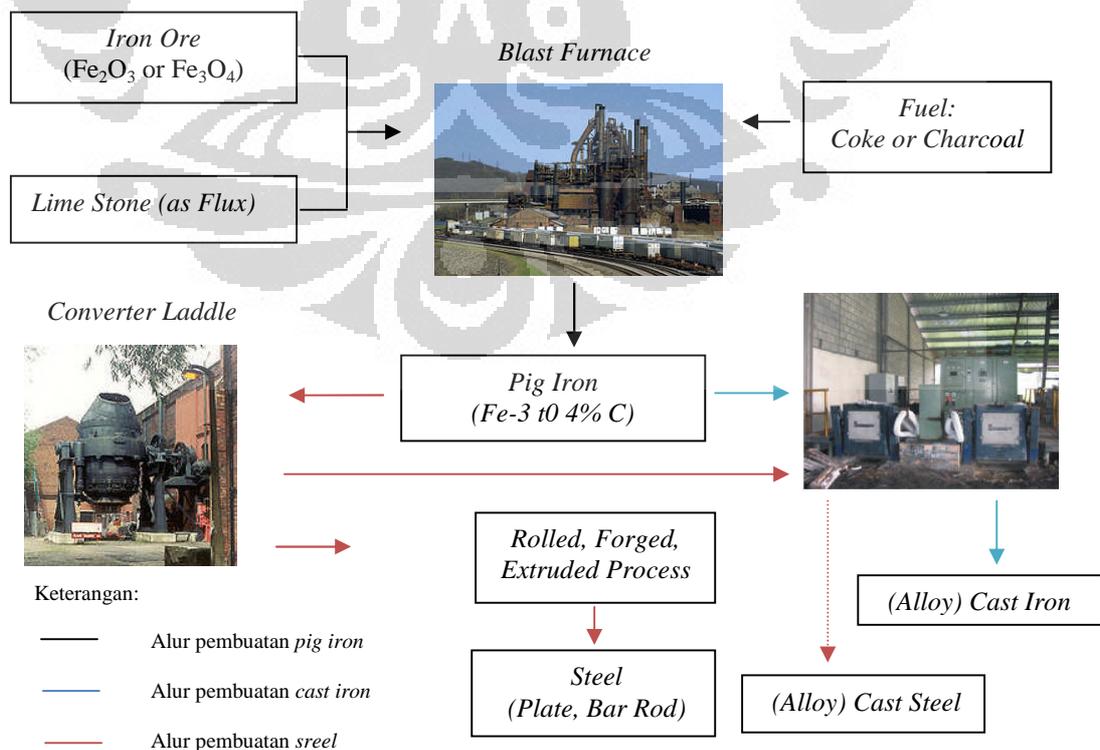
Material besi/baja merupakan salah satu material yang banyak digunakan dalam komponen mesin, salah satunya adalah sebagai material *grinding ball*, hal ini dikarenakan material tersebut memiliki kekuatan, kekerasan, serta ketangguhan yang cukup baik. Berikut akan diuraikan secara singkat mengenai teknologi pembuatan *grinding ball* dari material besi/baja.

2.1 TEKNOLOGI PEMBUATAN *GRINDING BALL* DARI MATERIAL BESI DAN BAJA

Besi dan baja adalah salah satu material yang paling populer dan banyak dijumpai dalam kehidupan sehari-hari, bahkan konsumsi/pemakaian baja oleh

sebuah negara menjadi parameter utama untuk mengukur tingkat kemajuan dalam negara tersebut. Besi dan baja merupakan material paduan Fe (besi) dan C (karbon), dimana keduanya dibedakan oleh kandungan unsur karbon yang terkandung di dalamnya, dimana kandungan karbon pada material baja berkisar 0.008-2.11% C, dan lebih dari 2.11% C untuk material besi. Unsur karbon pada material besi dan baja memiliki peran yang sangat penting terhadap karakteristik dari material tersebut, dimana semakin tinggi kandungan unsur karbon pada kedua material tersebut, maka kekerasannya akan semakin meningkat, namun ketangguhannya akan semakin menurun.

Pembuatan material besi dan baja dilakukan melalui proses peleburan (*smelting*), dimana bahan baku yang digunakan dalam proses pembuatan besi dan baja adalah bijih besi dengan kandungan unsur besi di dalam bijih minimal 59%, bersama dengan kapur sebagai pengikat kotoran/*slag* dimasukkan ke dalam tanur tiup (*blast furnace*) dengan bahan bakar berupa kokas atau arang kayu, dimana bijih besi (*hematite-Fe₂O₃* atau *magnetite-Fe₃O₄*) akan tereduksi menjadi Fe, dan mencair pada temperatur 1400 °C, produk keluaran dari tanur tiup dikenal dengan istilah besi kasar (*pig iron*), dengan kandungan karbon pada besi sebesar 3-4%, dan kandungan unsur pengotor seperti sulfur dan posfor yang relatif masih tinggi.



Gambar 2.2 Skema proses pembuatan material besi dan baja

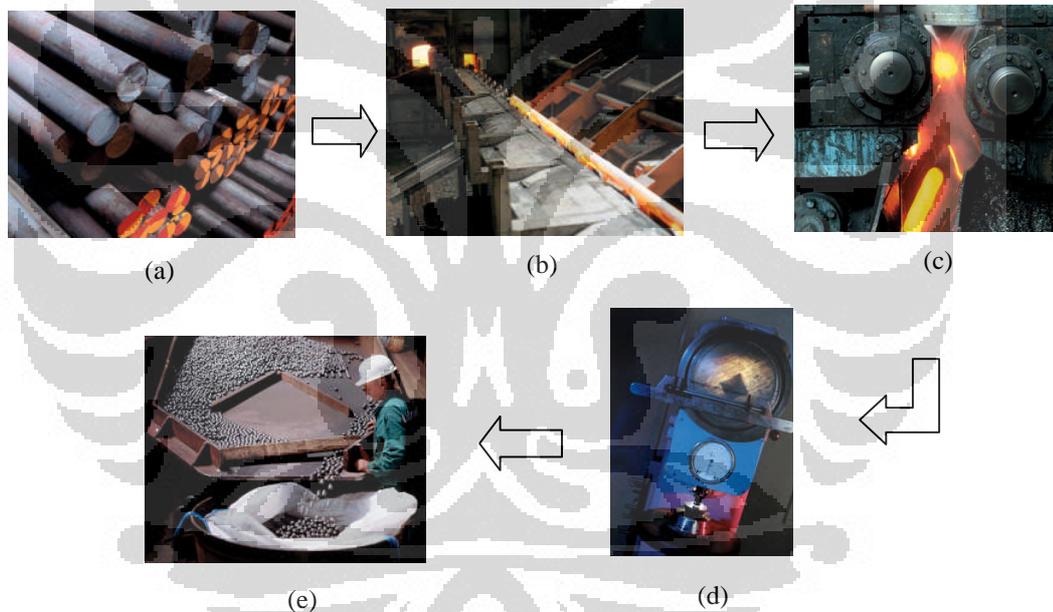
Seperti yang tampak pada Gambar 2.2 di atas, proses pembuatan material besi dan baja memiliki alur yang berbeda. Pada proses pembuatan material baja, dilakukan pemurnian dan pengurangan kandungan unsur karbon dalam *pig iron*, yaitu dengan menggunakan *ladle converter* (salah satu jenisnya adalah tungku *Bessemer*), dipanaskan hingga mencair kemudian kedalamnya ditiupkan oksigen, sehingga unsur karbon dan pengotor lainnya akan teroksidasi, selanjutnya logam cair (*hot metal*) tersebut dibentuk menjadi lembaran plat atau baja profil melalui proses *rolling*, *forging* atau *extruding*, selain itu material baja yang telah diproses dalam *ladle converter* juga dapat dimasukkan/dilebur kembali ke dalam tungku induksi untuk ditambahkan berbagai unsur paduan ke dalam material baja, dan selanjutnya dituang ke dalam bentuk cetakan (*cast steel*). Sedangkan untuk proses pembuatan material besi, *pig iron* yang dihasilkan oleh *blast furnace* kemudian dilebur kembali ke dalam tungku induksi untuk ditambahkan beberapa unsur paduan ke dalamnya kemudian dituang ke dalam bentuk cetakan.

Material baja memiliki sifat mampu tuang yang moderat namun memiliki mampu bentuk yang baik, sehingga proses pembentukan baja melalui proses *metal forming* (*rolling*, *forging* dan *extruding*) lebih banyak dilakukan, sebaliknya material besi memiliki sifat mampu tuang (*castability*) yang baik dan mampu bentuk yang buruk, sehingga proses manufaktur terhadap material ini sering dilakukan dengan metode pengecoran logam, sehingga material tersebut lebih dikenal dengan istilah besi tuang (*cast iron*).

2.1.1 Teknologi Pembuatan Grinding Ball pada Material Baja

Pembuatan *grinding ball* pada material baja umumnya dilakukan dengan menggunakan proses *metal forming*, yaitu metode *forging*, karena material baja memiliki sifat mampu tuang yang buruk. Selain itu proses *forging* memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan proses pengecoran (*casting*), diantaranya adalah dengan mekanisme *forging* terjadi proses penguatan (*strengthening method*) berupa *grain size strengthening*, selain itu dengan mekanisme *forging* juga dapat meniadakan porositas/rongga di dalam material, sedangkan pada proses *casting* sangat rentan terhadap terjadinya cacat rongga/*porosity* dan segregasi kimia.

Proses pembuatan *grinding ball* dengan metode *forging* dilakukan dengan menggunakan bahan baku berupa batangan baja dengan bentuk penampang lingkaran, kemudian baja tersebut dipanaskan hingga temperatur tertentu (temperatur pemanasan akan mempengaruhi kekerasan dari produk *grinding ball*), selanjutnya dilakukan *forging* dengan menggunakan *rolling mills*, bersamaan dengan proses *forging* tersebut dilakukan pula proses *quenching*, kemudian dilakukan proses *tempering* untuk mendapatkan kekuatan sesuai dengan yang diinginkan. Dan tahap akhir dari proses pembuatan *grinding ball* ini adalah pengukuran terhadap dimensi dan kekerasan dari *grinding ball* tersebut. Berikut ini adalah Gambar 2.3, yang menunjukkan tahapan-tahapan dalam proses pembuatan *grinding ball* yang terbuat dari material baja.



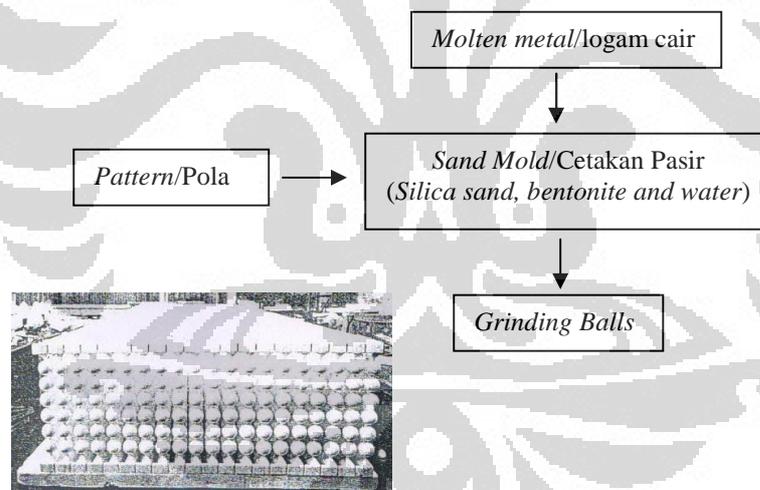
Gambar 2.3 Proses pembuatan *grinding ball* (a) Bahan baku, (b) *heating rod before forging*, (c) *forging and quenching*, (d) pengecekan nilai kekerasan, (e) *Packing* ^[17]

2.1.2 Teknologi Pembuatan *Grinding Ball* pada Material Besi

Umumnya teknologi pembuatan *grinding ball* dari material besi dilakukan dengan metode pengecoran logam, hal ini dikarenakan material besi (tuang) memiliki sifat mampu tuang (*castability*) yang sangat baik. Untuk skala produksi menengah ke bawah, proses pengecoran memiliki nilai ekonomis yang cukup baik bila dibandingkan dengan *metal forming*. Pengecoran logam merupakan suatu

proses manufaktur dimana di dalamnya terdapat proses peleburan (transformasi perubahan fasa dari *solid* menjadi *liquid*), dilanjutkan dengan proses solidifikasi (transformasi perubahan fasa dari *liquid* menjadi *solid*) dalam sebuah cetakan dengan pola tertentu. Berdasarkan pola dan cetakannya, proses pengecoran logam dibedakan menjadi beberapa jenis, diantaranya *sand mold*, *shell mold*, *plaster mold*, *expendable mold*, *permanent mold*, *investment casting*, *die casting*, dan *centrifugal casting*. Secara ekonomis, *sand mold* akan memberikan biaya (pola dan cetakan, peralatan, tenaga kerja) yang murah jika kapasitas produksi kurang dari 20 buah/jam. *Investment casting* akan memberikan nilai ekonomis yang moderat untuk kapasitas produksi <1000 buah/jam^[18].

Berikut ini adalah skema dari salah satu teknik pembuatan *grinding ball* dengan metode *sand mold*. Proses *expendable (sand) mold* digunakan untuk pembuatan *grinding ball* secara massal (2000 buah *grinding ball* per *mold*), seperti tampak pada Gambar 2.4 di bawah dimana pola cetakan terbuat dari *polystyrene (styrofoam)*.



(a)

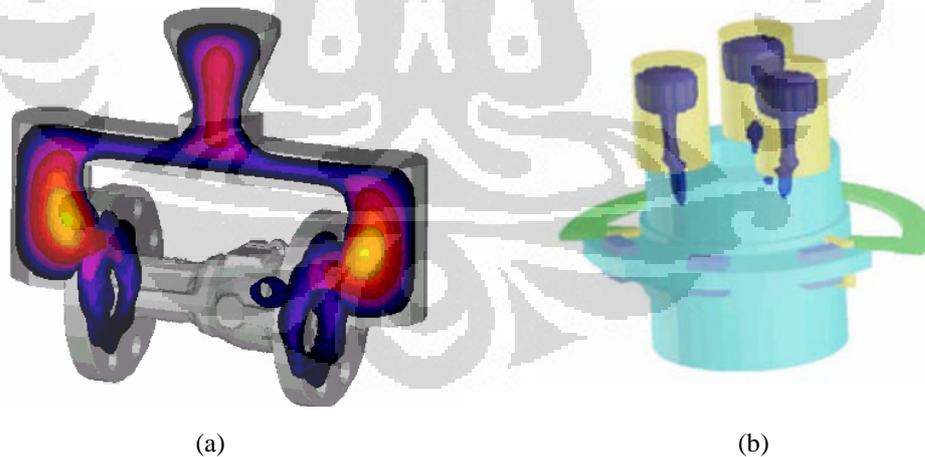
Gambar 2.4 Skema proses pembuatan *grinding ball* dari material besi (tuang), (a) *Expendable mold* untuk *grinding ball* sebanyak 2000 buah^[19].

2.1.3 Desain Simulasi Pengecoran (Casting Design Simulation) dalam Pembuatan Grinding Ball

Proses pengecoran logam sangat rentan terhadap cacat porositas maupun penyusutan (*shrinkage*), namun hal tersebut dapat diatasi dengan menggunakan

bantuan program komputer berupa simulasi pengecoran logam (*casting design simulation*) untuk menentukan dimensi serta lokasi *gating system* yang tepat serta penentuan parameter pengecoran yang tepat, seperti temperatur penuangan dan lama waktu penuangan, dimana hal ini menjadi parameter yang cukup penting untuk menghasilkan produk pengecoran logam yang bebas cacat (*sound casting*)

Simulasi pengecoran logam umumnya meliputi simulasi solidifikasi dan *fluid flow*. Simulasi solidifikasi (Gambar 2.5a) digunakan untuk mengetahui gambaran/tahapan solidifikasi logam cair dalam sebuah cetakan, dimana simulasi ini akan memberikan output berupa gradient temperatur dan keberadaan serta lokasi cacat *shrinkage* dalam sebuah produk pengecoran logam. Sedangkan simulasi *fluid flow* (Gambar 2.5b) dilakukan untuk mengetahui berbagai permasalahan dalam proses pengecoran logam pada saat logam cair dituang ke dalam cetakan, diantaranya seperti *misrun*, *gas entrapment*, *mold erosion* dan lain sebagainya, dimana permasalahan tersebut sangat ditentukan oleh berbagai parameter seperti temperatur tuang/viskositas logam cair, lama waktu penuangan, serta kecepatan laju aliran penuangan, selain itu desain *gating system* juga akan sangat berpengaruh terhadap beberapa permasalahan tersebut di atas.



Gambar 2.5 Simulasi proses pengecoran logam dengan SolidcastTM: (a) simulasi *fluid flow*, (b) simulasi solidifikasi^[20].

Saat ini penggunaan program simulasi pengecoran logam telah banyak digunakan pada industri pengecoran logam, walaupun dengan harga yang cukup mahal, namun dikarenakan program simulasi dapat menggambarkan kondisi

pegecoran logam yang sebenarnya, sehingga program ini akan menekan timbulnya produk gagal (*reject*) dalam sebuah industri pengecoran logam, selain itu program ini juga umumnya dapat mengoptimalkan nilai *yield* sehingga akan memberikan dampak terhadap nilai ekonomis dalam sebuah manufaktur produk pengecoran logam. Beberapa program simulasi yang cukup banyak digunakan dalam proses manufaktur pengecoran logam, diantaranya adalah *ZCastTM*, *ProCastTM*, dan *SolidCastTM*.

2.2 SPESIFIKASI MATERIAL BESI/BAJA UNTUK APLIKASI TAHAN GESEK

Material besi/baja merupakan material yang banyak digunakan sebagai komponen mesin untuk aplikasi ketahanan gesek dan impak yang tinggi. Hal ini dikarenakan material ini memiliki kekuatan, kekerasan, dan ketangguhan yang sangat baik. Beberapa material tersebut diantaranya adalah: 1) *Austenitic Manganese Steel*, (2) *Low Alloy Steel*, (3) *Pearlitic Chrome Moly Steel*, (4) *Quenched and Tempered Steel*, dan (5) *High Chromium White Cast Iron*. Berikut ini akan dijelaskan secara singkat mengenai kelima jenis material tersebut.

2.2.1 *Manganese Steel*

Penggunaan *manganese steel* sebagai material untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan gesek yang tinggi telah dilakukan sejak 100 tahun yang lalu, dan hingga saat ini telah terdapat sepuluh jenis material *austenitic manganese steel* yang termasuk dalam kategori ASTM A128, seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2.1 di bawah.

Manganese steel (ASTM A128) merupakan material dengan kekuatan yang rendah namun memiliki ketangguhan yang sangat tinggi, dengan tegangan luluh 40-50 ksi dan nilai kekerasan 240 BHN (23 HRC), dan nilai ketangguhan 100 ft-lb. Material ini memiliki struktur mikro berupa austenit yang memiliki kisi kristal *face centered cubic* (FCC) dengan penguatan interstisi berupa atom karbon dan substitusi berupa atom mangan. Material ini dapat digunakan pada aplikasi beban gesek yang tinggi dikarenakan kemampuan *work hardening* yang cukup baik, dimana nilai kekerasannya dapat meningkat dari 240 BHN menjadi 500 BHN, hal ini disebabkan struktur austenit yang memiliki 12 *slip system* dan deformasi.

Umumnya material ini digunakan sebagai komponen *jaw crusher*, dinding pelapis (*liner*) serta *grinding ball* pada mesin *ball mill* [8].

Tabel 2.1 *Austenitic manganese steel* (ASTM 128) [19]

Identification		Chemistry (% wt)							Properties		
Spec	Grade	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	P	HDN BHN	CVN (ft-lb)	
ASTM A128	A	1.05-1.35	11.0 min	1.00 max					160	114	
	B1	0.90-1.05	11.5-14.0	1.00 max							
	B2	1.05-1.20	11.5-14.0	1.00 max							
	B3	1.12-1.28	11.5-14.0	1.00 max							
	B4	1.20-1.35	11.5-14.0	1.00 max					0.07	190	
	C	1.05-1.35	11.5-14.0	1.00 max		1.5-2.5			Max	31	
	D	0.70-1.30	11.5-14.0	1.00 max	3.0-4.0						
	E1	0.70-1.30	11.5-14.0	1.00 max			0.9-1.2			185	74
	E2	1.05-1.45	11.5-14.0	1.00 max			1.8-2.1				
	F	1.05-1.35	6.0-8.0	1.00 max			0.9-1.2			160	38

2.2.2 Low Alloy Cast Steel

Low alloy cast steel atau baja tuang paduan rendah, dikategorikan ke dalam ASTM A27, memiliki sifat ketahanan aus yang cukup baik, dimana umumnya material ini banyak digunakan sebagai roda gigi. Material ini memiliki struktur mikro berupa ferrit dan 30% pearlit, dengan sifat-sifat mekanik sebagai berikut: tegangan luluh 40 ksi, tegangan tarik 70 ksi, dan nilai ketangguhan 30 ft-lb. Berikut ini adalah Tabel 2.2 yang menunjukkan komposisi kimia serta sifat-sifat mekanik dari beberapa kelas ASTM A27.

Tabel 2.2 *Low alloy cast steel* (ASTM A27) [19]

Identification		Chemistry (% wt)								Properties	
Spec	Grade	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	S	P	HDN BHN	CVN (ft-lb)
ASTM A27(a)	60-30	0.3	0.6	0.8	0.5	0.5	0.25	0.06	0.05	131-187	15-30
	65-35	0.3	0.7	0.8	0.5	0.5	0.25	0.06	0.05	131-187	15-30
	70-36	0.35	0.7	0.8	0.5	0.5	0.25	0.06	0.05	131-187	15-30
	70-40	0.25	1.2	0.8	0.5	0.5	0.25	0.06	0.05	131-187	15-30

Material ini umumnya mendapat perlakuan panas berupa normalisasi, *quenching*, dan *tempering*, hal ini dilakukan untuk meningkatkan nilai kekerasan, yaitu hingga mencapai 600 BHN (58 HRC). Nilai kekerasan pada bagian

permukaan material tersebut umumnya dapat ditingkatkan lagi dengan menggunakan metode *nitriding* maupun karburisasi.

2.2.3 Pearlitic Chrome Moly Steels

Sesuai dengan namanya, *pearlitic chrome moly steel* memiliki struktur mikro berupa perlit, yaitu berupa fasa ferit dan kabadia sementit (Fe_3C) yang tersusun secara bergantian/berlapis-lapis. Struktur mikro ini diperoleh setelah melalui proses perlakuan panas berupa austenisasi yang dilanjutkan dengan pendinginan udara (*air cooling*). Komposisi kimia serta sifat-sifat mekanik dari material ini dapat dilihat pada Tabel 2.3 di bawah ini.

Tabel 2.3 *Pearlitic chrome moly steels* ^[19].

Identification		Chemistry (% wt)								Properties	
Spec	Grade	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	S	P	HDN BHN	CVN (ft-lb)
None	Low C	0.55	0.6	0.3	0	2	0.3	0	0	275	7.0-10.0
		0.65	0.9	0.7	0.2	2.5	0.4	0.03	0.03	325	
None	Med C	0.65	0.6	0.3	0	2	0.3	0	0	321	6.0-9.0
		0.75	0.9	0.7	0.2	2.5	0.4	0.03	0.03	363	
None	High C	0.75	0.6	0.3	0	2	0.3	0	0	350	5.0-8.0
		0.85	0.9	0.7	0.2	2.5	0.4	0.03	0.03	400	

Second phase atau yang kita kenal dengan istilah *secondary carbide* dalam struktur mikro dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan suatu material ^[11]. Keberadaan kabadia sementit (Fe_3C) sebesar 11% dari fraksi volume struktur mikro, menyebabkan material ini memiliki tegangan luluh dan tarik yang cukup tinggi, yaitu 90 ksi dan 150 ksi, serta memiliki nilai kekerasan yang cukup tinggi yaitu sebesar 310 BHN (33 HRC), namun keberadaan kabadia pula yang menyebabkan material ini memiliki ketangguhan yang jauh lebih rendah dibandingkan *austenitic manganese steel* dan *low alloy cast steel*. Sama seperti halnya dengan *austenitic manganese steel*, material ini juga mengalami peningkatan nilai kekerasan setelah dilakukan *work hardening*, yaitu menjadi 480 BHN (50 HRC). Proses penguatan, berupa *work hardening* ini terjadi ketika material tersebut mengalami beban dampak dan gesek pada saat proses penggerusan dalam mesin penggerus. Material ini sering sekali digunakan sebagai *grinding*

ball atau pun dinding (*liner*) pada mesin *ball mill* dikarenakan harganya yang relatif murah serta proses perlakuan panas yang tidak terlalu rumit.

2.2.4 *Quenched and Tempered Steel*

Material *quenched and tempered steel*, merupakan material yang didesain untuk memperoleh sifat-sifat mekanik berupa kombinasi yang baik antara kekuatan, ketangguhan, dan kekerasan atau ketahanan gesek melalui sebuah mekanisme perlakuan panas. Perlakuan panas yang dilakukan umumnya berupa austenisasi pada temperatur 870-1040 °C, yang kemudian dilanjutkan dengan proses pendinginan cepat (*quenching*) dengan menggunakan media pendingin berupa oli, air, atau udara paksa untuk memperoleh struktur martensit atau bainit dengan nilai kekerasan mencapai 615 BHN (58 HRC). Struktur martensit dengan kisi kristal berbentuk *body center tetragonal* tidak memiliki bidang *slip system*, sehingga material ini memiliki sifat keras yang sangat tinggi namun getas atau dengan kata lain ketangguhan dari material ini sangat rendah sekali. Berikut ini adalah Tabel 2.4 yang memberikan data komposisi dari material *quenched and tempered steel* beserta jenis media *quench* yang digunakan pada material tersebut.

Untuk memperbaiki sifat ketangguhan dari material ini umumnya dilakukan proses perlakuan panas lanjutan berupa *tempering* pada temperatur 175-650 °C, tergantung pada sifat mekanik yang akan diinginkan. Saat ini penggunaan material *austenitic manganese steel* telah banyak digantikan oleh material *quenched and tempered steel*, khususnya pada *gyratory crushing unit* yang berukuran besar.

Tabel 2.4 *Quenched and tempered steel* ^[19].

<i>Element</i>	<i>Total Range</i>	<i>Normal Quenchant Used (% wt)</i>		
		<i>Water</i>	<i>Oil</i>	<i>Air</i>
C	0.1-0.6%	0.4% max	0.6% max	0.3% max
Cr	12% max	3% max	3-12% max	12% max
Mn	0.3-1.5%		Added as needed for hardenability	
Ni	2% max		Added as needed for hardenability	
Mo	1% max		Added as needed for hardenability	

2.2.5 High Chromium White Cast Iron

Besi cor putih atau *white cast iron* merupakan material besi yang memiliki sifat mekanik berupa kekerasan yang tinggi, sehingga umumnya banyak digunakan sebagai komponen material dengan ketahanan gesek yang cukup baik. Sifat-sifat mekanik yang dimiliki oleh material ini disebabkan oleh struktur mikro berupa karbida yang tersebar diantara matriks ferrit, pearlit atau austenit, sehingga material ini memiliki nilai kekerasan yang sangat baik namun getas.

Tabel 2.5 High chromium white cast iron ^[19].

Identification		Chemistry (% wt)						Hardness (BHN) As cast/heat treat
Spec	Grade	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	
	I-A	2.8-3.6	2.0 max	0.08 max	3.3-5.0	1.4-4.0	1.0 max	550/650
	I-B	2.4-3.0	2.0 max	0.08 max	3.3-5.0	1.4-4.0	1.0 max	550/650
	I-C	2.5-3.7	2.0 max	0.08 max	4.0 max	1.0-2.5	1.0 max	550/650
ASTM	I-D	2.5-3.6	2.0 max	2.0 max	4.5-7.0	7.0-11.0	1.5 max	550/650
A532	II-A	2.0-3.3	2.0 max	1.5 max	2.5 max	11.0-14.0	3.0 max	550/650
	II-B	2.0-3.3	2.0 max	1.5 max	2.5 max	14.0-18.0	3.0 max	550/650
	II-D	2.0-3.3	2.0 max	1.0-2.2	2.5 max	18.0-23.0	3.0 max	550/650
	III-A	2.0-3.3	2.0 max	1.5 max	2.5 max	23.0-30.0	3.0 max	550/650

High chromium white cast iron merupakan besi cor putih dengan kandungan khrom yang tinggi, dimana khrom yang berperan sebagai penghalang terbentuknya grafit pada material besi cor (*cast iron*), selain itu khrom merupakan salah satu unsur pembentuk karbida yang cukup kuat, dimana unsur-unsur pembentuk karbida umumnya akan memberikan sifat kekerasan yang tinggi, dan memberikan ketahanan gesek yang sangat baik. *High chromium white cast iron*, termasuk dalam kategori ASTM A532, yang terbagi ke dalam 8 kelas dengan kandungan khrom dan nikel yang berbeda-beda, seperti yang tampak pada Tabel 2.5 di atas. Penambahan unsur nikel dalam material ini berperan untuk meningkatkan nilai ketangguhan dari material tersebut, sehingga diperoleh material yang keras namun tangguh.

High chromium white cast iron merupakan material tahan gesek yang memiliki ketahanan terhadap beban abrasif terbaik diantara material besi/baja lainnya, namun material tersebut memiliki nilai ketangguhan (*fracture toughness*)

yang sangat rendah dan cenderung bersifat getas/*brittle*. Penambahan unsur khrom hingga 20 % dapat memperbaiki nilai *fracture toughness* dari material tersebut, selain itu kandungan khrom yang tinggi juga dapat meningkatkan ketahanan korosi dari material *high chromium white cast iron* ^[19].

Aplikasi dari material *high chromium white cast iron* banyak digunakan pada industri semen dan pengolahan mineral, diantaranya adalah sebagai komponen *chute liner, rod and ball mill liner, grinding ball, dan slurry pump*.

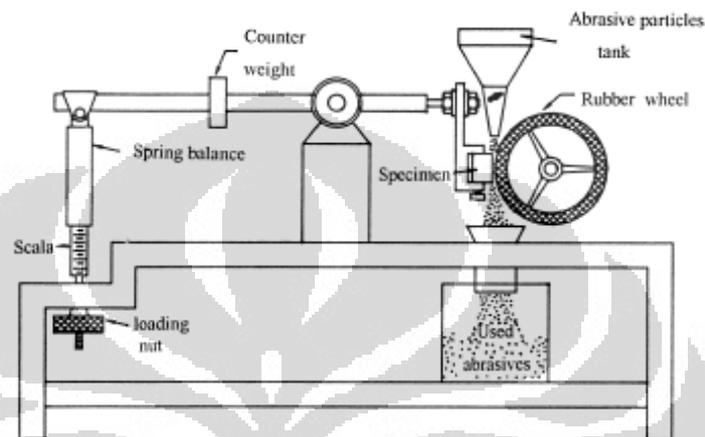
2.3 ALAT DAN METODE PENGUJIAN UNTUK KETAHANAN AUS

Ketahanan aus (*wear resistance*) merupakan salah satu sifat mekanik yang sangat penting dalam material tahan gesek, dimana sifat mekanik tersebut menjadi salah satu penentu umur pakai dari material tahan gesek. Pengujian ketahanan aus (*screening test for wear resistance*), khususnya pada beberapa material tahan gesek yang telah disebutkan di atas, harus memperhatikan kondisi aktual dari mekanisme gaya gesek yang bekerja terhadap material/komponen tersebut, sehingga alat uji ketahanan aus yang digunakan dapat dijadikan sebuah proses simulasi dari kondisi abrasi/gesekan yang sebenarnya. Dengan demikian diharapkan hasil pengujian tersebut dapat memberikan nilai ketahanan aus yang akurat. Berikut ini akan dijelaskan secara singkat mengenai beberapa alat dan metode pengujian ketahanan aus, baik yang telah terstandarisasi maupun yang tidak terstandarisasi namun lazim digunakan oleh beberapa peneliti.

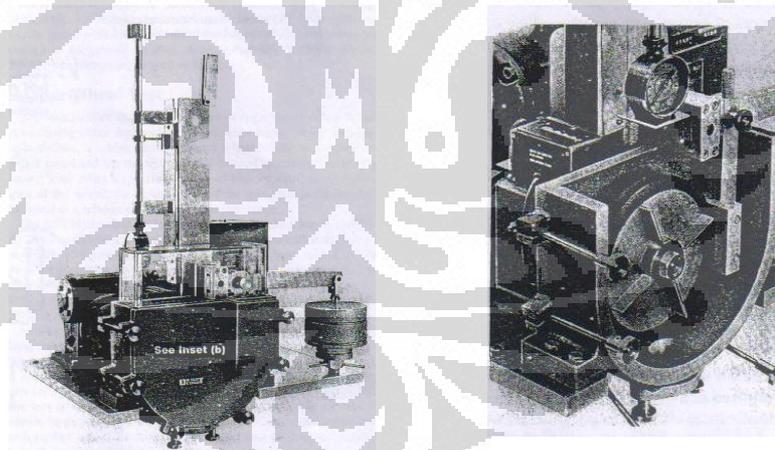
2.3.1 *Rubber Wheel Test* ^[19, 21-22]

Pengujian ketahanan aus ini dilakukan untuk kondisi *low stress abrasion*, mengacu pada ASTM standard G65 (*Conducting Dry Sand/Rubber Wheel Abrasion Test*). Alat ini terdiri dari sebuah roda, terbuat dari material logam yang dilapisi oleh karet, yang berputar dengan kecepatan 200 rpm. Pasir/*dry sand* sebagai material abrasif dialirkan ke roda yang berputar dengan laju 250/350 gram/menit. Material yang akan diuji disentuhkan ke roda tersebut dengan diberi gaya 30 lb (13.6 Kg). Proses pengujian tersebut berlangsung selama 30 menit dan nilai ketahanan aus dihitung berdasarkan volume material yang berkurang (*volume loss*) selama proses pengujian. Berikut skema dari pengujian ketahanan *aus dry sand rubber wheel test*, seperti yang tampak pada Gambar 2.6 di bawah.

Pengujian lainnya dengan kondisi yang hampir dengan pengujian di atas mengacu pada “SAE recommended practice-Wet Sand Rubber Wheel Test”, dimana material abrasif yang digunakan berupa “sand slurry”, dan pengujian berakhir setelah roda berputar selama 1000 rpm. Skema alat pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 2.7 di bawah ini.



Gambar 2.6 Dry sand rubber wheel test (SAE test method model) ^[21]

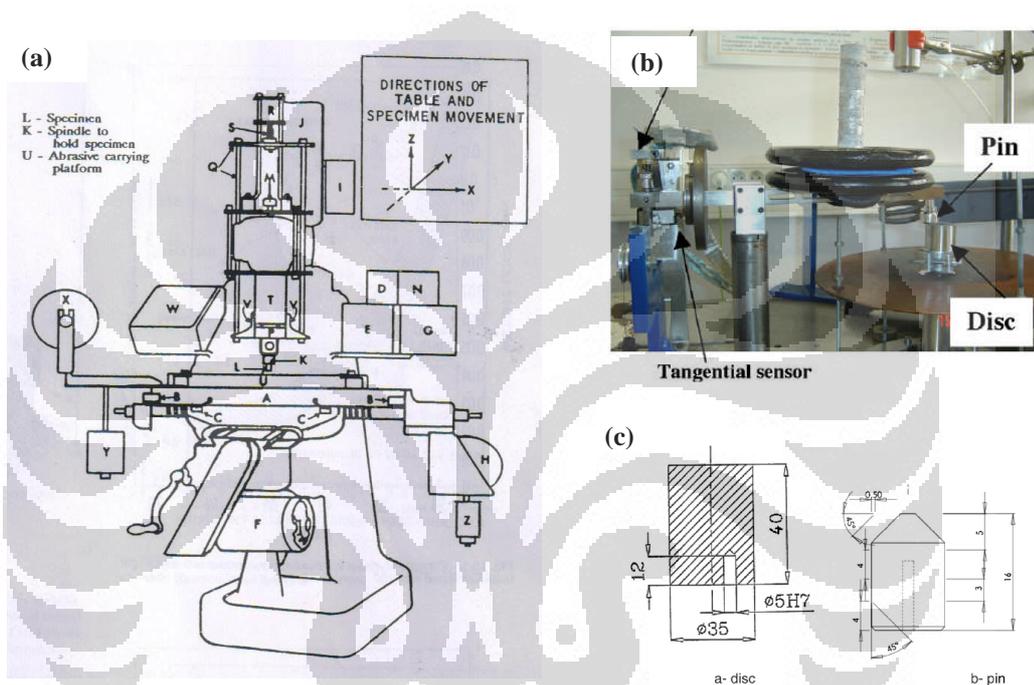


Gambar 2.7 Wet sand rubber wheel test (SAE test method model) ^[19]

2.3.2 Pin (on Disc) Test ^[21-24]

Pengujian ketahanan aus ini diperuntukkan pada komponen dengan kondisi mekanisme gesek berupa *high stress grinding abrasion*. Seperti yang tampak pada Gambar 2.8. Secara garis besar, prinsip kerja alat uji ini hampir sama dengan *vertical milling machine*, dimana pada bagian *spindle (tool steel holder)* dipasang

sebuah *pin* yang terbuat dari material yang akan diuji, dimana *pin* tersebut berukuran $\varnothing 0.25$ in (6.35 mm) yang diberi gaya sebesar 15 lb (6.8 Kg), dan secara bersamaan mengalami gerakan berputar pada porosnya dengan kecepatan 20 rpm serta bergerak maju-mundur di atas kertas abrasif. Pengujian tersebut berlangsung selama tujuh menit atau jarak tempuh pergerakan pin sebesar 504 in (128 cm), pengujian ini dilakukan berulang sebanyak dua kali. Nilai ketahanan aus diperoleh dengan menghitung *wear loss* dari *pin* tersebut.

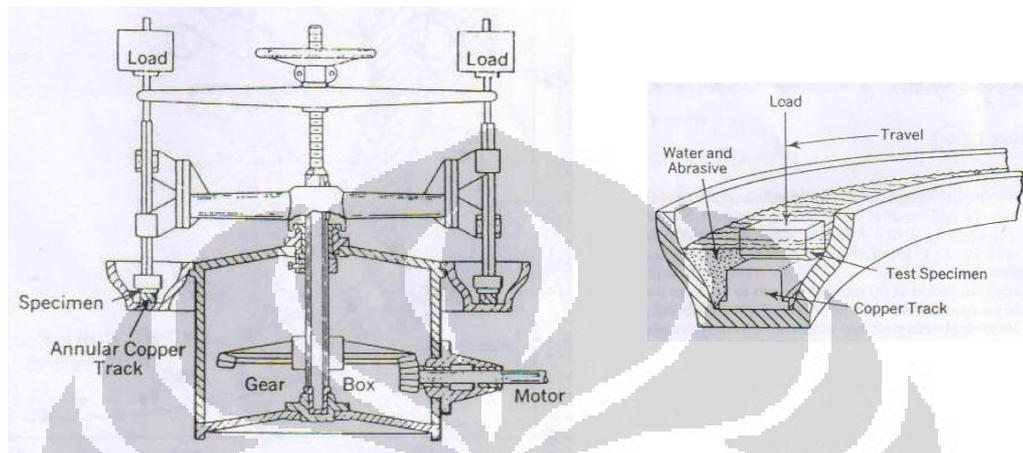


Gambar 2.8 *Pin (on disc) test* (a) konvensional ^[23], (b) modern ^[24], (c) dimensi spesimen *pin* dan *disc*

2.3.3 *Wet Sand Abrasion Factor Test* ^[25]

Pengujian ini digunakan untuk menguji ketahanan aus dari komponen/material dengan kondisi *high stress grinding abrasion*. Seperti yang tampak pada Gambar 2.9, alat ini terdiri dari sebuah lintasan bak, yang terbuat dari material tembaga, berbentuk lingkaran berisi *slurry sand* (40% *fine sand* dan 60% air). Dua buah spesimen, yaitu material yang akan diuji dan material referensi (AISI 1020) bergerak mengikuti lintasan tersebut dengan kecepatan 0.6 m/s, dimana tekanan sebesar 54 psi diberikan kepada kedua spesimen tersebut. Pengujian tersebut berlangsung selama 60 menit. Nilai ketahanan aus dihitung

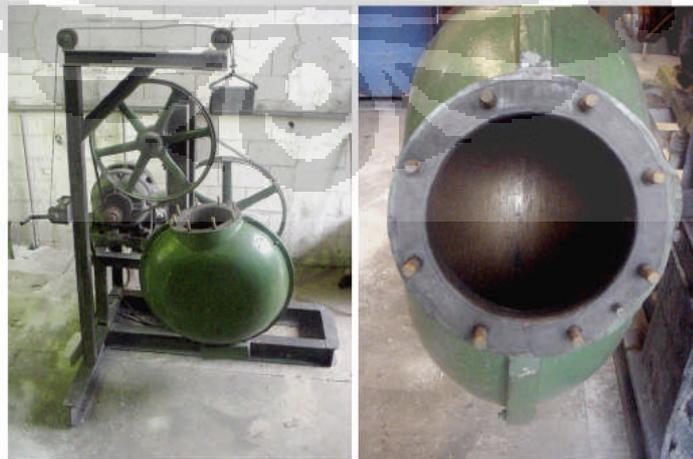
berdasarkan rasio *wear loss*, yaitu *wear loss* material uji dibagi material referensi. Semakin rendah nilai rasio tersebut, maka semakin tinggi nilai ketahanan aus dari material uji tersebut.



Gambar 2.9 *Wet Sand Abrasion Factor test* ^[25]

2.3.4 *Ball Mill Abrasion Test* ^[6-7, 9, 12, 26]

Ball mill abrasion test merupakan salah satu pengujian ketahanan aus pada kondisi *high stress grinding abrasion* serta dapat digunakan untuk kondisi mekanisme gesekan lainnya. Alat uji ini berbentuk *laboratory ball mill unit*, seperti tampak pada Gambar 2.10 di bawah.



Gambar 2.10 *Laboratory ball mill unit (coal charge: 16 Kg, total ball charge: 132Kg, Speed: 31 rpm)* ^[6].

Pengujian ini tidak memiliki standar, namun hasil pengujiannya memberikan hasil yang cukup signifikan/relevan, terutama untuk menguji ketahanan aus *grinding media* dan *liner* pada komponen *ball mill unit*. Beberapa keuntungan dari pengujian ini diantaranya adalah mekanisme gaya yang bekerja memiliki kesamaan dengan kondisi aktual serta penggunaan media abrasif yang cukup luas (dapat disesuaikan dengan kondisi aktual).

Proses pengujian dilakukan dengan memasukkan media abrasif dan *grinding media* (material yang akan diuji) ke dalam *laboratory ball mill unit*, yang berputar dengan kecepatan kritis tertentu (40-70%). Proses penggerusan dilakukan selama beberapa menit. Nilai ketahanan aus diperoleh berdasarkan nilai *wear loss/wear rates* dari material tersebut. Semakin rendah nilai *wear loss/wear rates* dari material *grinding media*, maka semakin tinggi nilai ketahanan aus dari material tersebut.

2.4 HIGH CHROMIUM WHITE CAST IRON DAN APLIKASINYA SEBAGAI GRINDING BALL

High chromium white cast iron, merupakan material besi cor putih dengan kandungan unsur khrom lebih dari 10%, dimana umumnya material ini memiliki komposisi 1.8-3.6% C dan 11-30% Cr. Material ini memiliki karakteristik berupa nilai kekerasan yang sangat tinggi, khususnya setelah diberi perlakuan panas, yaitu dapat mencapai 650-750 BHN (60-66 HRC), dengan kandungan volume karbida 15-40%.

Saat ini material *high chromium white cast iron* telah banyak digunakan sebagai material *grinding ball*, hal ini dikarenakan material ini telah menunjukkan performa ketahanan aus yang jauh lebih baik dibandingkan dari keempat material tahan gesek lainnya. Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan, diantaranya oleh Gundewar, et al. ^[7] yang menyatakan bahwa *grinding ball* dengan material *high chromium white cast iron* memiliki ketahanan aus yang jauh lebih baik dibandingkan dengan *forged steel* (EN-31) dan *cast hyper steel*. Dalam penelitian lainnya yang dilakukan oleh Chenje, et al. ^[9] juga menyatakan bahwa *grinding ball* dengan material *high chromium white cast iron* memiliki performa yang jauh

lebih baik dibandingkan dengan material *low alloy steel*, *eutectoid steel*, *cast semi steel*, dan *un-alloyed cast iron*.

Material ASTM A532, khususnya untuk tipe IIA, banyak digunakan pada industri semen sebagai material *grinding ball* dalam mesin *ball mill* untuk menggerus bahan baku semen (batu kapur, silika, alumina, dan oksida besi) hingga berukuran mesh 300. Hal ini dikarenakan selain memiliki ketahanan gesek yang sangat tinggi, material ini juga memiliki beberapa keunggulan lain, diantaranya adalah proses fabrikasi (teknik pengecoran) yang mudah serta memiliki nilai ekonomis yang baik.

2.5 MECHANICAL PROPERTIES HIGH CHROMIUM WHITE CAST IRON

High chromium white cast iron merupakan salah satu material yang digunakan untuk aplikasi tahan gesek, terutama pada industri pengolahan mineral dan alat berat. Hal ini dikarenakan material ini memiliki nilai kekerasan dan ketangguhan yang berimbang, yang disebabkan oleh morfologi karbida dalam struktur mikro material tersebut. Berikut ini akan dijelaskan mengenai beberapa *mechanical properties* dari *high chromium white cast iron*.

2.5.1 Kekerasan (Hardness)

Unsur khrom, selain berperan sebagai pencegah dalam pembentukan grafit, juga merupakan salah satu unsur pembentuk karbida yang sangat kuat, yaitu M_7C_3 atau $(Fe,Cr)_7C_3$, dengan komposisi karbida sebesar 15-40% dari volume struktur mikro, seperti yang tampak pada Gambar 2.11(a) di bawah. Karbida $(Fe,Cr)_7C_3$ memiliki nilai kekerasan yang sangat tinggi, yaitu 1500-1800 HV, dimana nilai kekerasan karbida ini jauh lebih tinggi dibandingkan dengan karbida Fe_3C pada *white cast iron*, yaitu 1000-1200 HV^[27]. Hal inilah yang membuat material ini memiliki nilai kekerasan yang sangat tinggi (650-750 BHN), seperti tampak pada Tabel 2.5.

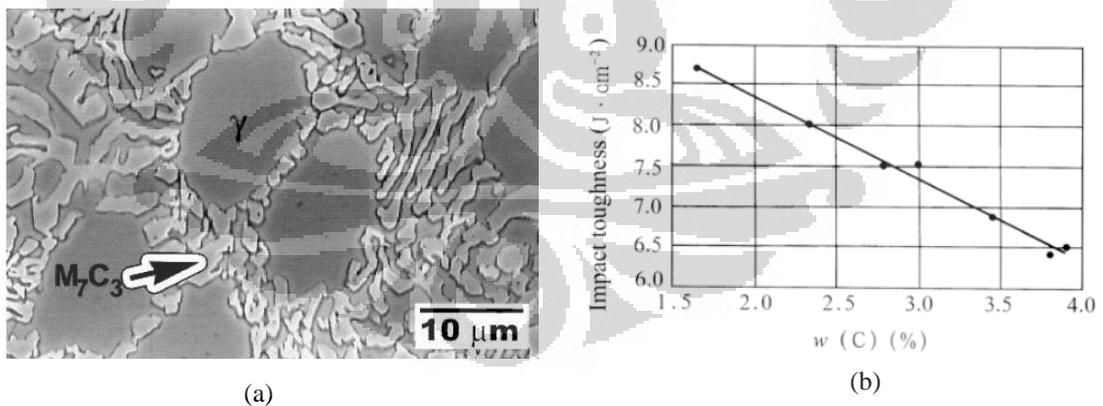
Nilai kekerasan sangat dipengaruhi oleh fraksi volume karbida/*Carbide Volume Fraction* (CVF) dalam material tersebut, dimana semakin tinggi fraksi volume karbida, maka nilai kekerasannya akan semakin meningkat pula. Jumlah volume karbida dalam *high chromium white cast iron* sangat dipengaruhi oleh kandungan karbon dan khrom dalam material tersebut, semakin tinggi kandungan

kedua unsur tersebut, maka semakin besar pula fraksi volume karbidanya. Nilai kekerasan dari material ini juga dapat ditingkatkan melalui proses perlakuan panas dengan mekanisme pembentukan struktur martensit dan karbida sekunder.

2.5.2 Ketangguhan (*Toughness*)

Kandungan khrom yang tinggi pada *high chromium white cast iron* menyebabkan karbida Fe_3C pada besi cor putih menjadi tidak stabil, dan keberadaannya digantikan oleh $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ (berupa karbida primer atau eutektik), dimana karbida $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ ini memiliki ketangguhan yang jauh lebih baik dibandingkan dengan Fe_3C pada *low alloy white cast iron* [28].

High chromium white cast iron memiliki nilai ketangguhan sebesar 6 – 9 $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$, dimana nilai ketangguhan ini sangat dipengaruhi oleh kandungan karbon dari material tersebut, seperti yang tampak pada Gambar 2.11(b) di bawah, dimana nilai ketangguhan akan semakin berkurang dengan bertambahnya kandungan karbon dalam material *high chromium white cast iron*. Selain itu peningkatan terhadap nilai ketangguhan dari material ini juga dapat dilakukan melalui penambahan beberapa unsur paduan, salah satunya melalui penambahan *Niobium* (Nb), dimana ketangguhan material 15%Cr-2%Mo meningkat sebesar 71.4% [28].



Gambar 2.11 (a) Struktur mikro *high chromium white cast iron*, (b) pengaruh unsur karbon terhadap ketangguhan *high chromium white cast iron* (15% Cr) [29-30].

2.5.3 Ketahanan Aus (*Wear Resistance*)

Ketahanan aus suatu material sangat dipengaruhi oleh nilai kekerasan dan ketangguhan. Nilai kekerasan yang rendah/ketangguhan yang tinggi akan

menyebabkan material bersifat lunak, sehingga akan memiliki ketahanan aus yang rendah. Demikian sebaliknya, nilai kekerasan yang tinggi/nilai ketangguhan yang rendah menyebabkan material bersifat rapuh/*brittle*, dan akan memiliki ketahanan aus yang rendah pula. Untuk itu, diperlukan kesetimbangan yang cukup baik, antara nilai kekerasan dan ketangguhan guna memperoleh ketahanan aus yang optimal.

Penelitian mengenai ketahanan aus dari material *high chromium white cast iron*, telah dilakukan oleh Albertin dan Sinatora^[12] dengan menguji nilai keausan dari produk *grinding ball* yang terbuat dari material tersebut dalam *ball mill unit* pada kondisi *wet milling* dengan menggunakan media abrasif berupa bijih besi *hematite*. Adapun struktur mikro dari produk *grinding ball* tersebut adalah karbida khrom dalam matriks martensit, tanpa austenit sisa.

Tabel 2. 6. Data uji ketahanan aus dari material *high chromium white cast iron*^[12]

Material		CVF (%)	Wear Loss selama 111 jam (gram)	Wear rates (gram/jam)
C (%)	Cr (%)			
1.65	12.2	13.1	11.95	0,107
2.21	15.6	20.1	10.37	0.093
2.96	18.0	28.9	9.60	0.086
3.34	20.8	38.3	8.14	0.073
3.54	25.1	40.8	10.59	0.095

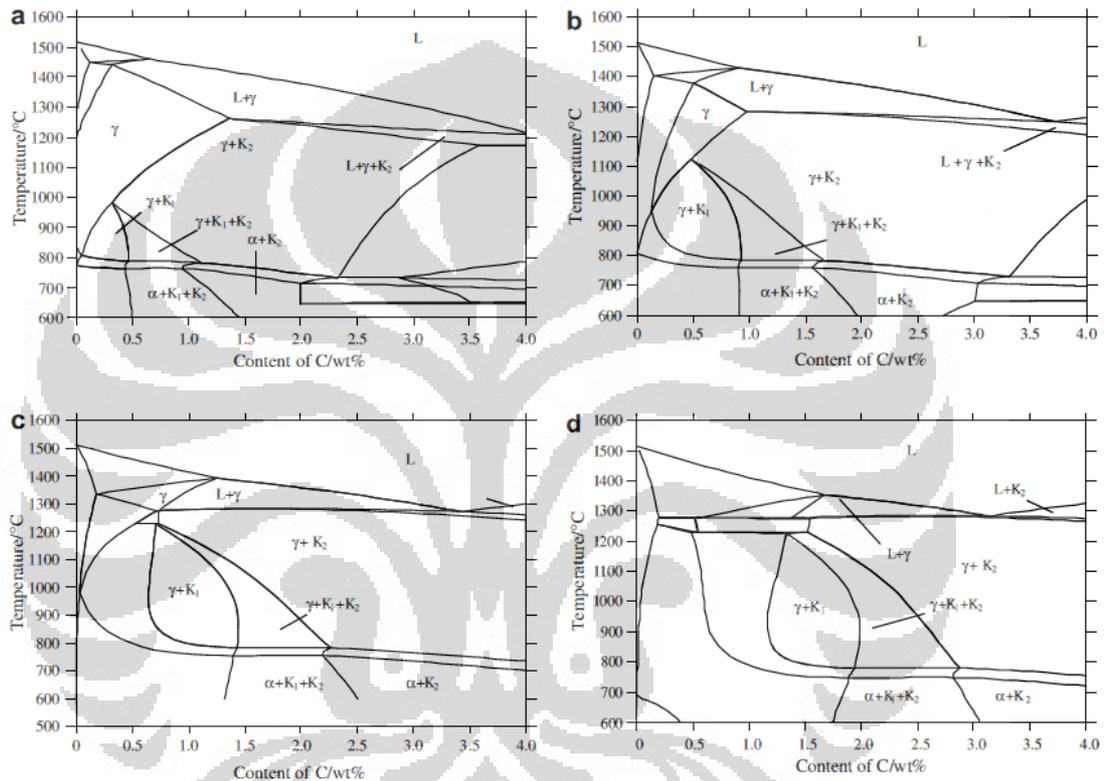
Dari hasil penelitian tersebut, seperti yang tampak pada Tabel 2.6 di atas, tampak bahwa ketahanan aus terbaik dimiliki oleh material 3.34C – 20.8Cr, dimana komposisi ini mendekati komposisi eutektik dengan kesetimbangan yang cukup baik antara kekerasan dan ketangguhan, sedangkan 3.54C – 25.1 Cr merupakan komposisi *hyper*-eutektik dengan nilai kekerasan yang sangat tinggi, namun ketangguhannya rendah, sehingga material ini memiliki nilai ketahanan aus yang rendah walaupun memiliki fraksi volume karbida yang sangat tinggi.

2.6 STRUKTUR MIKRO HIGH CHROMIUM WHITE CAST IRON

Seperti yang tampak pada Gambar 2.11(a), bahwa struktur mikro dari material *high chromium white cast iron* terdiri dari karbida chrom, M_7C_3 dengan matriks austenit atau ferrit (dalam kondisi *as-cast*). Kandungan khrom yang tinggi pada material ini menyebabkan karbida Fe_3C pada besi cor putih menjadi tidak

stabil, dan keberadaannya digantikan oleh $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ (karbida primer) dan M_{23}C_6 atau $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ (karbida sekunder), seperti yang tampak pada diagram fasa *high chromium white cast iron* di bawah (Gambar 2.12).

Berdasarkan kandungan karbon dan khrom, maka struktur mikro dari *high chromium white cast iron* dikelompokkan menjadi tiga jenis, yaitu: *Eutectic Alloys*, *Hypoeutectic Alloys*, dan *Hypereutectic Alloys*.



Gambar 2.12 Diagram fasa *high chromium white cast iron*: (a) 10% Cr, (b) 15% Cr, (c) 20% Cr, (d) 25% Cr; L: liquid, γ : austenit, α : ferrit, K_1 : $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$, K_2 : $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ ^[31].

Eutectic alloys, dimana proses solidifikasi terjadi pada sebuah titik temperatur tertentu dengan kandungan karbon tertentu pula, yang dikenal dengan istilah komposisi eutektik. Komposisi eutektik sangat ditentukan oleh komposisi khrom dalam material tersebut seperti yang tampak pada diagram fasa *high chromium white cast iron*, dimana titik eutektik akan semakin bergeser ke arah kiri dengan bertambahnya unsur khrom dalam material tersebut. Struktur mikro dari *eutectic alloys* terdiri dari karbida eutektik dalam matriks (austenit/ferrit). *Hypoeutectic Alloys*, struktur ini memiliki kandungan karbon yang lebih rendah dari titik eutektik, dimana proses solidifikasi diawali dengan pembentukan dendrit

dari matriks (austenit) pada rentang temperatur solidifikasi tertentu hingga mencapai temperatur eutektik, kemudian dilanjutkan dengan pembentukan struktur eutektik. *Hypereutectic Alloys*, struktur ini memiliki kandungan karbon yang lebih tinggi dari titik eutektik, dimana proses solidifikasi diawali dengan pembentukan karbida primer, M_7C_3 , berbentuk *hexagonal rod*.

Menurut Hinckley, et al. ^[27], dalam material *high chromium white cast iron* terdapat beberapa reaksi transformasi fasa/struktur mikro yang sangat berpengaruh terhadap sifat-sifat mekanik, khususnya kekerasan dan ketahanan aus dari material tersebut, diantaranya adalah:

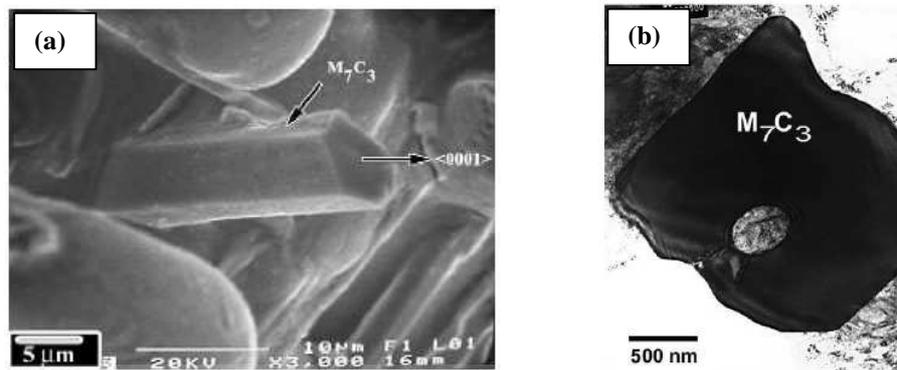
- ❖ Pembentukan karbida primer dan eutektik (M_7C_3), serta austenit pada *hypereutectic* dan *hypoeutectic alloys*.
- ❖ Presipitasi karbida sekunder melalui proses perlakuan panas pada temperatur tertentu.
- ❖ Transformasi austenit menjadi martensit melalui proses pendinginan cepat
- ❖ Pembentukan austenit sisa melalui pendinginan cepat.

Berikut ini akan diuraikan mengenai pengaruh struktur mikro, yaitu karbida primer dan eutektik, karbida sekunder, martensit, serta austenit sisa terhadap sifat-sifat mekanik, terutama kekerasan dan ketahanan gesek dari material *high chromium white cast iron*.

2.6.1 Karbida Primer dan Eutektik pada High Chromium White Cast Iron

Peran unsur khrom pada material *high chromium white cast iron* adalah untuk membentuk karbida yang stabil dan keras, yaitu M_7C_3 atau $(Fe,Cr)_7C_3$. Karbida ini memiliki struktur kristal berupa *hexagonal closed packed*, dengan bentuk struktur mikro berupa tiga dimensi *hexagonal rod*, seperti yang tampak pada Gambar 2.13(a) di bawah.

Karbida M_7C_3 , memiliki ketangguhan yang relatif jauh lebih baik dibandingkan dengan Fe_3C dikarenakan struktur *hexagonal rod* dari karbida M_7C_3 tidaklah *massive*, melainkan terdapat rongga pada bagian tengah yang diisi oleh matriks, seperti yang tampak pada Gambar 2.13(b).



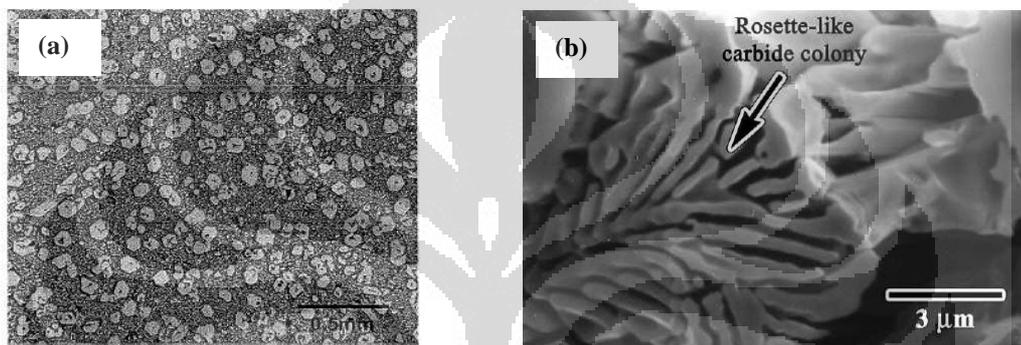
Gambar 2.13 Struktur mikro *high chromium white cast iron*, (a) SEM: bentuk *hexagonal rod*, (b) TEM: rongga pada M_7C_3 carbide yang diisi oleh matriks ^[32].

Solidifikasi karbida M_7C_3 pada *high chromium white cast iron* dibedakan menjadi dua macam, yaitu (1) M_7C_3 sebagai karbida primer pada *hypereutectic alloys*, dan (2) karbida eutektik pada *hypereutectic* dan *hypoeutectic alloys* melalui reaksi eutektik.

Karbida Primer (Primary Carbide) pada *hypereutectic alloys* memiliki bentuk struktur *hexagonal rod* berupa karbida tunggal tanpa cabang, seperti yang tampak pada Gambar 2.13(a) dan 2.14(a). Karbida primer memiliki nilai kekerasan yang sangat tinggi namun ketangguhannya sangat rendah, seperti tampak pada Gambar 2.11(b), bahwa semakin tinggi nilai kandungan karbon pada *high chromium white cast iron* maka semakin buruk ketangguhan dari material tersebut. Namun seperti yang tampak pada Gambar 2.12, bahwa titik eutektik juga sangat dipengaruhi oleh kandungan khrom pada material tersebut, dimana semakin tinggi kandungan khrom maka titik eutektik akan bergeser ke kiri, atau titik eutektik akan memiliki kandungan karbon yang semakin rendah, sehingga umumnya untuk memperoleh kekerasan serta ketangguhan yang tinggi dari material tersebut pada kondisi *hypereutectic* dilakukan melalui penambahan unsur khrom yang relatif lebih besar, yaitu 20-30% Cr. Namun dengan semakin tingginya kandungan khrom dalam material tersebut maka *hypereutectic alloys* relatif jauh lebih mahal dibandingkan dengan *hypoeutectic alloys*. Selain itu, menurut Powell, et al. ^[33], bahwa *hypereutectic high chromium white cast iron* dapat dianalogikan sebagai *fibrous composite*, dimana karbida M_7C_3 dengan bentuk *hexagonal rod* dianalogikan sebagai *fibrous* yang terletak dalam sebuah

matriks yang jauh lebih lunak, sehingga hal tersebut menyebabkan material ini memiliki nilai ketangguhan yang sangat baik.

Karbida Eutektik (*Eutectic carbide*), merupakan karbida M_7C_3 dengan bentuk struktur *hexagonal rod* yang memiliki banyak cabang (*rosette likes*), seperti yang tampak pada Gambar 2.14(b) di bawah ini. *Hypoeutectic alloys* memiliki kandungan karbon yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan *hypereutectic alloys* sehingga *hypoeutectic alloys* ini memiliki ketangguhan yang jauh lebih baik.



Gambar 2. 14 Struktur mikro *high chromium white cast iron*, (a) *Primary carbide* M_7C_3 (b) *Eutectic Carbide* M_7C_3 [32-33].

Penelitian mengenai pengaruh volume karbida (karbida primer dan eutektik) terhadap ketahanan gesek dari material *high chromium white cast iron* telah dilakukan oleh Albertin dan Sinatora. [12], dimana semakin besar volume karbida maka semakin tinggi pula ketahanan gesek dari material tersebut. Menurut Zhou [28] serta Breyer dan Walmag [34] bahwa jumlah karbida khrom (karbida primer dan eutektik) pada material *high chromium white cast iron* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini :

$$\text{Carbide Volume Fraction (\%)} = w(C)12.33\% + w(Cr)0.55\% - 15.2\% \quad \dots \dots \quad (2.1)$$

Dari persamaan tersebut tampak bahwa peran unsur karbon memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap volume karbida dibandingkan dengan unsur khrom.

2.6.2 Karbida Sekunder dan Martensit pada material *High Chromium White Cast Iron*

Keberadaan karbida sekunder (*secondary carbide*) dalam matriks pada material *high chromium white cast iron* dapat memberikan peningkatan yang signifikan terhadap nilai kekerasan dan ketahanan gesek dari material tersebut, mekanisme ini disebut *precipitation hardening*. Karbida sekunder dapat berupa M_7C_3 atau $M_{23}C_6$ tergantung dari komposisi khrom pada *high chromium white cast iron*, dimana M_7C_3 akan terbentuk pada material dengan kandungan 15-20% Cr, sedangkan $M_{23}C_6$ akan terbentuk bila kandungan khrom >25%.

Pembentukan karbida sekunder dalam *high chromium white cast iron* sangat dipengaruhi oleh proses perlakuan panas, hal ini berbeda dengan karbida primer dan eutektik, dimana karbida tersebut tidak akan terpengaruh baik morfologi maupun kuantitasnya oleh proses perlakuan panas.

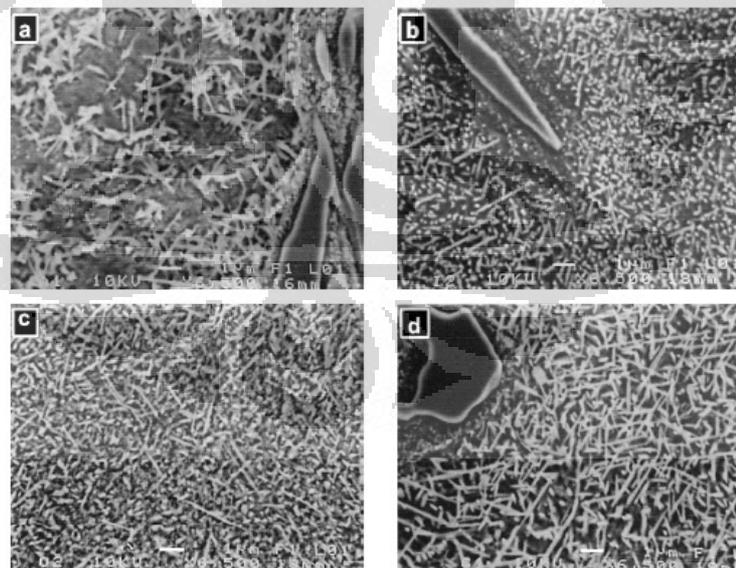
Austenisasi atau destabilisasi merupakan salah satu mekanisme pembentukan karbida sekunder pada material tersebut, dimana material dipanaskan hingga melampaui temperatur A_1 kemudian didinginkan secara cepat dalam kondisi udara terbuka. Mekanisme pembentukan karbida sekunder dalam material *high chromium white cast iron* sangat dipengaruhi oleh kelarutan unsur khrom dalam matriks pada kondisi *as-cast*, dimana jumlah unsur khrom terlarut dalam matriks dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut^[28]:

$$\text{fraksi massa khrom di matriks} = 1.95 \times (C^r/C)\% - 2.47\% \quad \dots \dots (2.2)$$

Ketika proses austenisasi berlangsung, unsur khrom dalam matriks akan bereaksi dengan karbon membentuk senyawa karbida di dalam matriks, sehingga kandungan karbon dalam matriks akan berkurang dan memudahkan matriks (austenit) bertransformasi menjadi martensit pada saat proses pendinginan cepat. Martensit merupakan struktur yang sangat keras (550 BHN), dimana nilai kekerasan ini melampaui nilai kekerasan struktur lainnya seperti ferrit (100 BHN), austenit (369 BHN), dan bainit (469 BHN). Hal ini menyebabkan struktur martensit dalam *high chromium white cast iron* juga akan memberikan kontribusi yang cukup signifikan terhadap nilai kekerasan dari material tersebut. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Albertin dan Sandra^[6], bahwa

karbida khrom dalam matriks martensit memberikan ketahanan gesek yang jauh lebih baik bila dibandingkan dengan karbida khrom dalam matriks austenit.

Pembentukan karbida sekunder, terutama dalam hal morfologi dan volume fraksi, sangat dipengaruhi oleh temperatur serta waktu tahan pada proses austenisasi. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Bedolla, et al. [30], bahwa volume karbida sekunder tertinggi pada material 2.58C-17Cr-2Mo-2V diperoleh pada temperatur austenisasi 900 °C selama 8 jam yaitu sebesar 27 %, dimana nilai ini jauh lebih baik bila dibandingkan pada temperatur austenisasi 1000 °C dan 1150 °C, yaitu 21 % dan 2%. Pada temperatur rendah (900 °C) kemampuan austenit untuk melarutkan karbon sangatlah rendah, sehingga sejumlah karbon akan bereaksi dengan khrom membentuk karbida sekunder. Sebaliknya pada temperatur tinggi, austenit mampu melarutkan karbon dalam jumlah yang cukup besar, sehingga karbon yang akan bereaksi dengan khrom akan semakin sedikit dan karbida yang akan terbentuk pun akan semakin sedikit pula. Sedangkan pengaruh waktu tahan terhadap morfologi karbida, dimana semakin lama waktu tahan maka ukuran karbida akan semakin besar (*coarsening*).



Gambar 2.15 Tahapan pembentukan karbida sekunder dari material *high chromium white cast iron* pada temperatur austenisasi 900 °C: (a) 20 menit, (b) 1 jam, (c) 2 jam, (d) 8 jam [30].

Seperti yang tampak pada Gambar 2.15 di atas, dimana pada temperatur 900 °C, karbida sekunder memiliki ukuran sebesar 120 nm pada 2 jam pertama dan membesar menjadi 300 nm pada 6 jam berikutnya, hal ini disebabkan oleh terjadinya dissolusi (penggabungan) antar karbida ^[30]. Karbida sekunder yang halus dan tersebar merata (*fine secondary carbide*) dalam matriks akan memberikan kombinasi yang sangat baik antara kekerasan dan ketangguhan jika dibandingkan dengan karbida sekunder yang kasar (*coarsed secondary carbide*).

2.6.3 Austenit Sisa pada *High Chromium White Cast Iron*

Austenit sisa (*retained austenite*) adalah sejumlah austenit yang tidak berubah menjadi martensit setelah melalui proses austenisasi dan pendinginan cepat atau *quenching*. Salah satu penyebab terbentuknya austenit sisa adalah akibat proses *quenching* yang tidak mencapai *Martensite Finish* (M_f) pada diagram CCT (*Continuous Cooling Temperature*), hal ini bisa diakibatkan oleh rendahnya temperatur M_f (dibawah temperatur kamar), selain itu ada beberapa faktor lain penyebab terbentuknya austenit sisa, diantaranya adalah:

- ❖ Kandungan karbon yang terlalu tinggi, menyebabkan kelarutan karbon dalam austenit menjadi besar, sehingga austenit akan sulit bertransformasi menjadi martensit.
- ❖ Temperatur austenisasi yang terlalu tinggi, dapat menyebabkan kemampuan austenit untuk melarutkan karbon ke dalamnya menjadi semakin tinggi.
- ❖ Unsur paduan, seperti nikel dan mangan, yang merupakan penstabil austenit.

Sama seperti halnya austenit, austenit sisa juga memiliki keuletan yang tinggi serta bersifat lunak. Dalam material *high chromium white cast iron*, austenit sisa dalam jumlah yang sangat besar tidaklah diinginkan, hal ini dikarenakan dapat mengurangi ketahanan aus dari material tersebut. Namun keberadaan austenit dalam jumlah tertentu diperlukan untuk memberikan kontribusi terhadap ketangguhan dari material tersebut, selain itu keberadaan austenit sisa halus (*fine retained austenite*) dalam matriks martensit (temper) juga dapat meningkatkan nilai ketahanan *fatigue* dari material besi dan baja ^[35].

Ada beberapa cara untuk menghitung kandungan austenit sisa dalam matriks martensit pada material besi dan baja, diantaranya adalah dengan menggunakan metallografi kuantitatif dan *X-Ray Diffractometer* (XRD). Untuk metallografi kuantitatif, keakuratan dari austenit sisa dibatasi jika kandungannya lebih dari 10% dalam matriks martensit, namun dengan analisa XRD akan diperoleh keakuratan yang lebih baik untuk kandungan austenit sisa kurang dari 10%, bahkan hingga 0.5%. Untuk menghitung kandungan austenit sisa dengan menggunakan analisa XRD (dengan menggunakan sinar radiasi Cr-K α dan Mo-K α) mengacu pada ASTM E-975. Namun untuk penggunaan XRD dengan sinar radiasi Cu-K α , maka nilai *Integrated Intensity* dari austenit sisa dan martensit dikalikan dengan faktor koreksi, dimana austenit sisa dengan kisi kristal [200] dan [202], masing-masing dihitung berdasarkan pada persamaan (2.3) dan (2.4) di bawah ^[36].

$$Vol (\%)[200] = (int. RA \times 0.572) / \{(int. RA \times 0.572) + Int. Martensite\} \quad \dots (2.3)$$

$$Vol (\%)[202] = (int. RA \times 0.388) / \{(int. RA \times 0.388) + Int. Martensite\} \quad \dots (2.4)$$

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Fujita ^[37] dan Hou, et al. ^[38], bahwa keberadaan austenit sisa dalam material tahan gesek dapat memberi kontribusi terhadap ketangguhan dari material tersebut, dan austenit sisa sebesar 20% akan memberikan hasil yang optimal (ketahanan aus dan ketangguhan) pada *high chromium white cast iron*. Namun hal ini bertolak belakang dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Albertin dan Sinatora ^[12], dimana *grinding ball* dengan material *high chromium white cast iron* akan memiliki nilai ketahanan aus maksimum dengan matriks *fully martensite* tanpa austenit sisa. Dengan demikian penelitian terhadap pengaruh austenit sisa terhadap *grinding ball* masih perlu dilakukan untuk memperoleh data yang akurat, terutama mengenai pengaruh austenit sisa terhadap ketahanan aus dari *grinding ball*.

2.7 UNSUR-UNSUR PADUAN PADA HIGH CHROMIUM WHITE CAST IRON

Untuk meningkatkan sifat-sifat mekanik, seperti kekerasan, ketangguhan, dan *hardenability* dari material *high chromium white cast iron* dapat dilakukan

dengan cara menambahkan unsur-unsur paduan ke dalam material tersebut, diantaranya adalah molibdenum, vanadium, dan boron.

Molibdenum (Mo), berperan untuk meningkatkan kekerasan serta *hardenability* dari material *high chromium white cast iron*. Peningkatan terhadap nilai kekerasan sangat dipengaruhi oleh pembentukan karbida molibdenum, dimana sebanyak 50% fraksi massa molibdenum dalam besi cor putih akan membentuk karbida Mo_2C , dan sebesar 25% dari fraksi massa akan bergabung dengan karbida khrom M_7C_3 menjadi $(\text{Fe,Cr,Mo})_7\text{C}_3$. Sedangkan peningkatan *hardenability* sangat dipengaruhi oleh larutnya molibdenum di dalam matriks sebesar 25% dari fraksi massa molibdenum dalam material tersebut. Selain itu molibdenum juga berperan dalam menekan pertumbuhan pearlit.

Vanadium (V), merupakan unsur pembentuk karbida yang sangat kuat, baik *primary carbide* maupun *secondary carbide*, serta berperan untuk meningkatkan derajat/laju pembekuan. Dalam jumlah yang sangat kecil (0.1-0.5% berat), vanadium dapat berperan sebagai *grain refinement* (penghalus butir). Penambahan vanadium juga akan meningkatkan temperatur pembentukan martensit (*Martensite Start/Ms*) sehingga dapat menyebabkan terbentuknya struktur martensit dalam kondisi *as-cast*.

Boron (B), Kelarutan *boron* dalam austenit pada material besi/baja sangat terbatas (0.003% berat), namun hal tersebut dapat meningkatkan *hardenability* dari material tersebut^[39]. Kelebihan boron dalam struktur austenit juga akan mengakibatkan pembentukan boron karbida pada batas butir yang akan memberikan efek terhadap peningkatan kekerasan dari material tersebut. Penambahan boron pada *high chromium white cast iron* ditujukan untuk meningkatkan ketahanan aus dari material tersebut^[21], tanpa mengurangi ketangguhan secara signifikan melalui pembentukan *boride*, yaitu $\text{Fe}_{23}(\text{C,B})_6$ ^[14].

2.8 SPESIFIKASI HIGH CHROMIUM WHITE CAST IRON SEBAGAI GRINDING BALL

High chromium white cast iron dapat diaplikasikan sebagai material *grinding ball*, dikarenakan memiliki karakteristik yang dipersyaratkan, yaitu keras namun tangguh. Kekerasan dari material ini disebabkan oleh keberadaan karbida khrom, yaitu M_7C_3 , sedangkan ketangguhan sangat ditentukan oleh komposisi dan

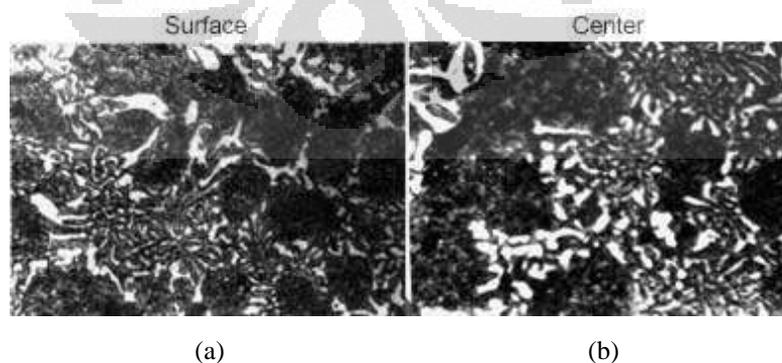
distribusi dari karbida eutektik dari material tersebut. Berikut ini adalah Tabel 2.7 yang menjelaskan tentang karakteristik dan sifat-sifat mekanik dari *grinding ball*.

Keberadaan struktur mikro berupa austenit sisa dan pearlit dalam jumlah banyak tidak diinginkan dalam matriks *grinding ball*, karena struktur ini memiliki nilai kekerasan yang rendah dan rentan terhadap deformasi plastis sehingga akan mengurangi ketahanan aus dari material tersebut.

Grinding ball diharuskan memiliki matriks martensit, dikarenakan struktur ini memiliki nilai kekerasan yang jauh lebih tinggi dibandingkan struktur lainnya (ferrit, austenit, pearlit, dan bainit). Gambar 2.16 menunjukkan struktur mikro dari salah satu produk *grinding ball* impor asal Jepang (Toyo, *Grinding Ball*), dimana daerah yang berwarna hitam pada gambar struktur mikro tersebut adalah martensit dengan nilai kekerasan 60-66 HRC, sedangkan daerah yang berwarna putih adalah karbida *chrom* ($(FeCr)_7C_3$ (*eutectic carbide*)) dengan nilai kekerasan 70-77 HRC

Tabel 2.7 Karakteristik *grinding ball* ^[40]

<i>Kekerasan</i>	500-600 BHN atau 60-65 HRC (<i>Optional</i>) Nilai kekerasan diukur pada tiga titik secara acak pada permukaan <i>grinding ball</i>
<i>Struktur Mikro</i>	Terdiri dari banyak karbida dalam matriks martensit, bainit. Keberadaan austenit sisa seminimal mungkin dan tidak boleh terdapat struktur pearlit dan grafit.



Gambar 2.16 Struktur mikro *high chromium grinding ball* (a) *surface of grinding ball*, (b) *center of grinding ball* ^[40].

Menurut Standar Industri Indonesia, yaitu SII-0789-83 (SNI-1069) dinyatakan bahwa persyaratan untuk kekerasan *grinding ball* yang tidak mengandung khrom untuk jenis tempa 506 BHN, Ni-Hard 500 BHN, besi cor putih 415 BHN, baja paduan 400 BHN. Berikut di bawah ini adalah Tabel 2.8 yang memuat komposisi serta persyaratan kekerasan minimal untuk masing-masing material tersebut.

Tabel 2. 8 Klasifikasi material *grinding ball* menurut SII-0789-83 (SNI-1069) ^[41]

Klasifikasi		Komposisi						
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu
Besi Cor	Cil	< 3.74	< 1.8	< 0.50	< 1.71	-	-	-
	Tempa	2.38-2.65	-	-	0.25-2.53	-	-	-
	Khrom Tinggi	2.2-3.2	0.4-1.0	0.4-1.0	14.0-20.0	-	0.05	-
	<i>Ni-Hard</i>	2.8-3.2	0.3-0.7	0.4-0.6	1.8-2.0	3.2-4.4	-	-
Baja	Baja Paduan	0.30-0.85	0.15-0.35	0.15-1.00	-	2.4	0.37	0.15
	Baja Karbon	0.5-0.85	0.15-0.30	0.20-0.90	-	-	-	-

Klasifikasi		BHN (min)	HRC (min)
Besi Cor	Cil	415	43
	Tempa	506	52
	Khrom Tinggi	600	59
	<i>Ni-Hard</i>	500	53
Baja	Baja Paduan	400	47
	Baja Karbon	262	25

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Seperti yang tampak pada Gambar 3.1 di bawah, bahwa diagram alir penelitian ini diawali dengan karakterisasi *grinding ball* impor yang akan digunakan sebagai *benchmark* dalam penelitian ini, yang kemudian dilanjutkan dengan pembuatan *grinding ball* dengan variasi penambahan unsur-unsur paduan pembentuk karbida (khromium, molibdenum, vanadium, dan boron). Berikut ini akan diuraikan secara rinci mengenai tahapan-tahapan dalam penelitian ini.

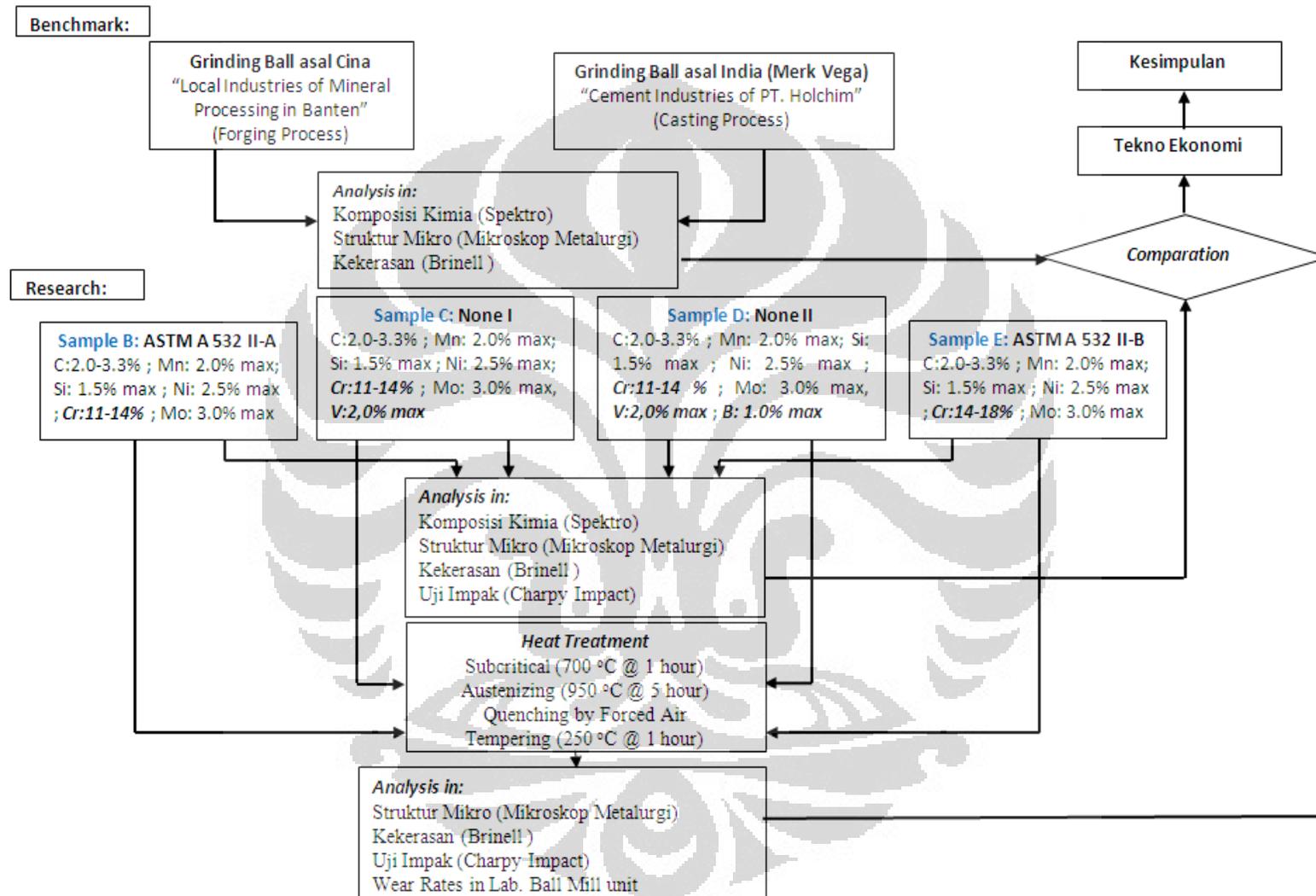
3.1 KARAKTERISASI *GRINDING BALL* ASAL CHINA DAN INDIA

Dalam penelitian ini digunakan dua buah *grinding ball* impor sebagai *benchmark*, yaitu *grinding ball* asal India dan China. *Grinding ball* asal India terbuat dari material *high chromium white cast iron* dan diproduksi dengan metode pengecoran logam (*casting process*), sedangkan *grinding ball* asal China terbuat dari material *high carbon-low alloy steel* dan diproduksi dengan metode pembentukan logam (*forging*).

Uji karakterisasi yang dilakukan terhadap *grinding ball* impor asal China dan India, meliputi: analisa komposisi kimia, uji kekerasan, serta analisa struktur mikro. Salah satu tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat *grinding ball* dengan kualitas yang hampir sama dengan kualitas *grinding ball* impor. Oleh karena itu *grinding ball* impor dengan karakteristik terbaik, akan dijadikan sebagai *benchmark* dalam penelitian ini.

3.2 DESAIN SIMULASI PROSES PEMBUATAN *GRINDING BALL*

Desain proses pembuatan *grinding ball* dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan simulasi program komputer, hal ini dilakukan untuk meminimalisasi terjadinya cacat pada saat proses manufaktur/pengecoran logam seperti penyusutan (*shrinkage*) dan rongga (*porosity*). Proses simulasi ini diawali dengan perhitungan manual untuk perancangan saluran masuk (*gating system*) ke dalam cetakan *grinding ball*, selanjutnya hasil perhitungan tersebut dituangkan ke dalam bentuk gambar, kemudian proses penuangan logam cair ke dalam cetakan

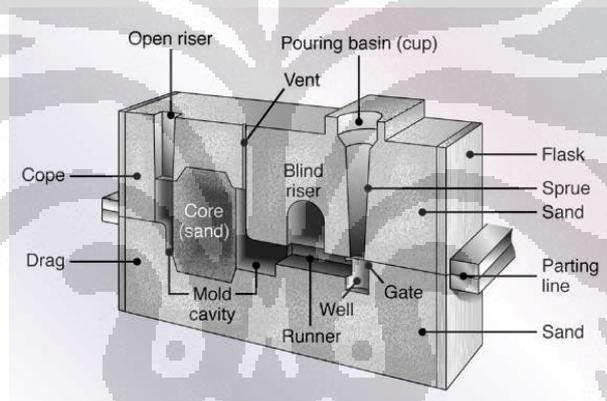


Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

melalui saluran masuk atau “*gating system*” tersebut disimulasikan dengan menggunakan program simulasi pengecoran logam, yaitu *SolidCastTM*.

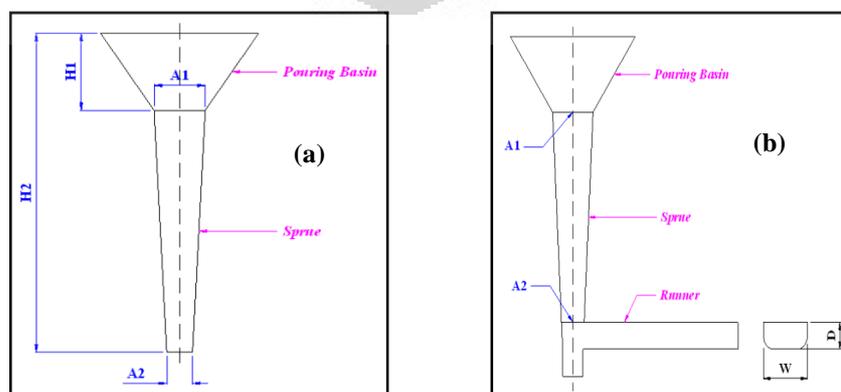
(*Lisensi program SolidCastTM ini diperoleh secara resmi dari Finite Solution Incorporated secara trial untuk satu bulan melalui Mr. Jeff Meredith, sebagai Trainee Staff resmi SolidCastTM, seperti yang dapat di lihat Lampiran 1*)

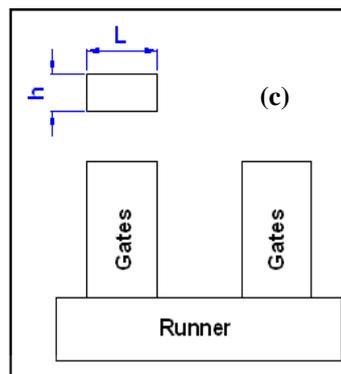
Gating system merupakan saluran masuk logam cair pada sebuah cetakan benda kerja, dimana saluran masuk (*gating system*) ini sangat berperan untuk mencegah terjadinya cacat produk pada proses pengecoran logam, seperti penyusutan (*shrinkage*), porositas (*gas entrapment*), *misrun*, *cold shut*, dan lain sebagainya. Secara garis besar, bagian-bagian dari *gating system* dapat dilihat pada Gambar 3.2 di bawah ini.



Gambar 3.2 Skema *gating system* dalam sebuah cetakan ^[18].

Berikut ini akan diuraikan secara rinci mengenai desain *gating system* yang akan digunakan dalam proses pembuatan *grinding ball* pada penelitian ini.





Gambar 3.3 Dimensi utama *gating system* dalam penelitian: (a) *pouring basin and sprue*, (b) *runner*, (c) *gates*

Pouring Basin dan Sprue, seperti yang tampak pada Gambar 3.3(a) di atas, merupakan saluran masuk yang pertama kali akan dilewati oleh logam cair. Pada gambar tersebut terdapat beberapa dimensi penting, diantaranya A_1 , A_2 , H_1 , dan A_2 , yang dapat diperoleh melalui serangkaian persamaan berikut di bawah.

Dimensi Choked area (A_2) ditentukan melalui persamaan berikut ini:

$$A_2 = \frac{W}{d \cdot t \cdot C \cdot \sqrt{2 g H}} \dots\dots\dots (3.1)$$

Dimana: W = berat benda cor keseluruhan (Kg); d = massa jenis/*density* logam cair (Kg/m^3); C = efisiensi proses; H = ketinggian benda cor (m); t = laju penuangan/*pouring time* (s); g = percepatan gravitasi (9.8 m/s^2).

Dalam proses pengecoran logam, untuk material *high chromium white cast iron* dengan kandungan 2.2% C, dimana kandungan karbon tersebut mendekati material baja karbon tinggi, maka laju penuangan/*pouring time* (t) untuk material tersebut dapat ditentukan oleh persamaan sebagai berikut ^[42]:

$$t = k\sqrt{W} \dots\dots\dots (3.2)$$

Untuk material baja nilai $k = 1.2 - 0.4$ untuk benda cor $< 100 \text{ lb}$ (45 Kg), sehingga untuk material besi cor 2.2% C, diasumsikan nilai $k = 1.2$

Dimensi H_2 (tinggi total *sprue* dan *pouring basin*), sangat ditentukan oleh jenis kondisi aliran logam cair dalam cetakan, dimana logam cair tersebut diharuskan berada dalam kondisi campuran antara laminar-turbulen, yaitu dengan nilai *Reynold Number* (Re) berkisar 2000-20.000, sehingga dengan demikian untuk mengetahui kecepatan aliran dari logam cair berdasarkan nilai *Reynold Number* tersebut dapat ditentukan dari persamaan berikut di bawah ini.

$$V = \frac{Re \cdot \mu}{\rho \cdot D_2} \dots\dots\dots (3.3)$$

Dimana: V = kecepatan aliran fluida (logam cair) pada A_2 (m/s); Re = *Reynold number*; μ = viskositas dinamik ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); D_2 = diameter penampang A_2 (m). Dengan menggunakan persamaan *Bernouli*, maka besarnya nilai H_2 dapat diperoleh dari persamaan berikut ini:

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_2} \dots\dots\dots (3.4)$$

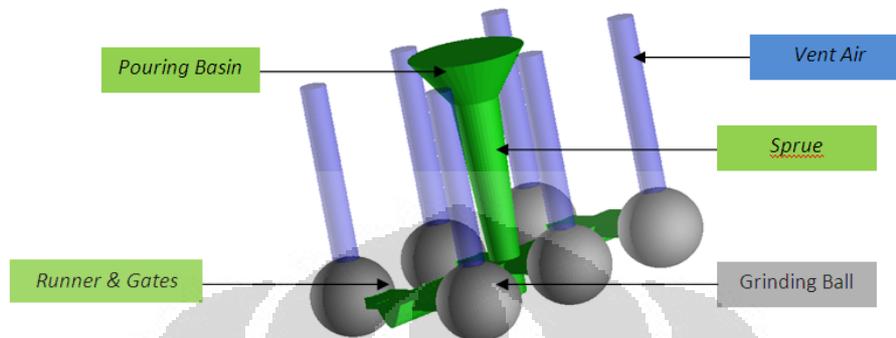
Dimensi A_1 dan H_1 , dapat diperoleh melalui perbandingan dimensi tinggi dan diameter *sprue*, seperti yang ditunjukkan oleh persamaan berikut ini ^[18].

$$\frac{A_1}{A_2} = \sqrt{\frac{H_2}{H_1}} = 2 \dots\dots\dots (3.5)$$

Runner and Gates, seperti yang tampak pada Gambar 3.3(b), dimana aliran logam cair yang berasal dari *sprue* akan masuk kedalam *runner*, kemudian didistribusikan menuju beberapa *gates* dan selanjutnya akan dialirkan ke dalam cetakan produk. Untuk material *high carbon steel*, perbandingan luas penampang antara *choke area* (A_2), *runner* (A_{runner}), dan *gates* (A_{gates}) adalah 1: 2 : 1.5 ^[42], dimana $W > D$ untuk *runner*, dan $l > h$ untuk *gates*.

(Air) vent, seperti yang terdapat pada Gambar 3.2, berfungsi untuk mencegah timbulnya porositas akibat *gas entrapment* pada produk. Pada penelitian ini, dimensi *air vent* akan diperoleh melalui metode *trial and error* dengan menggunakan program simulasi *SolidCast*TM.

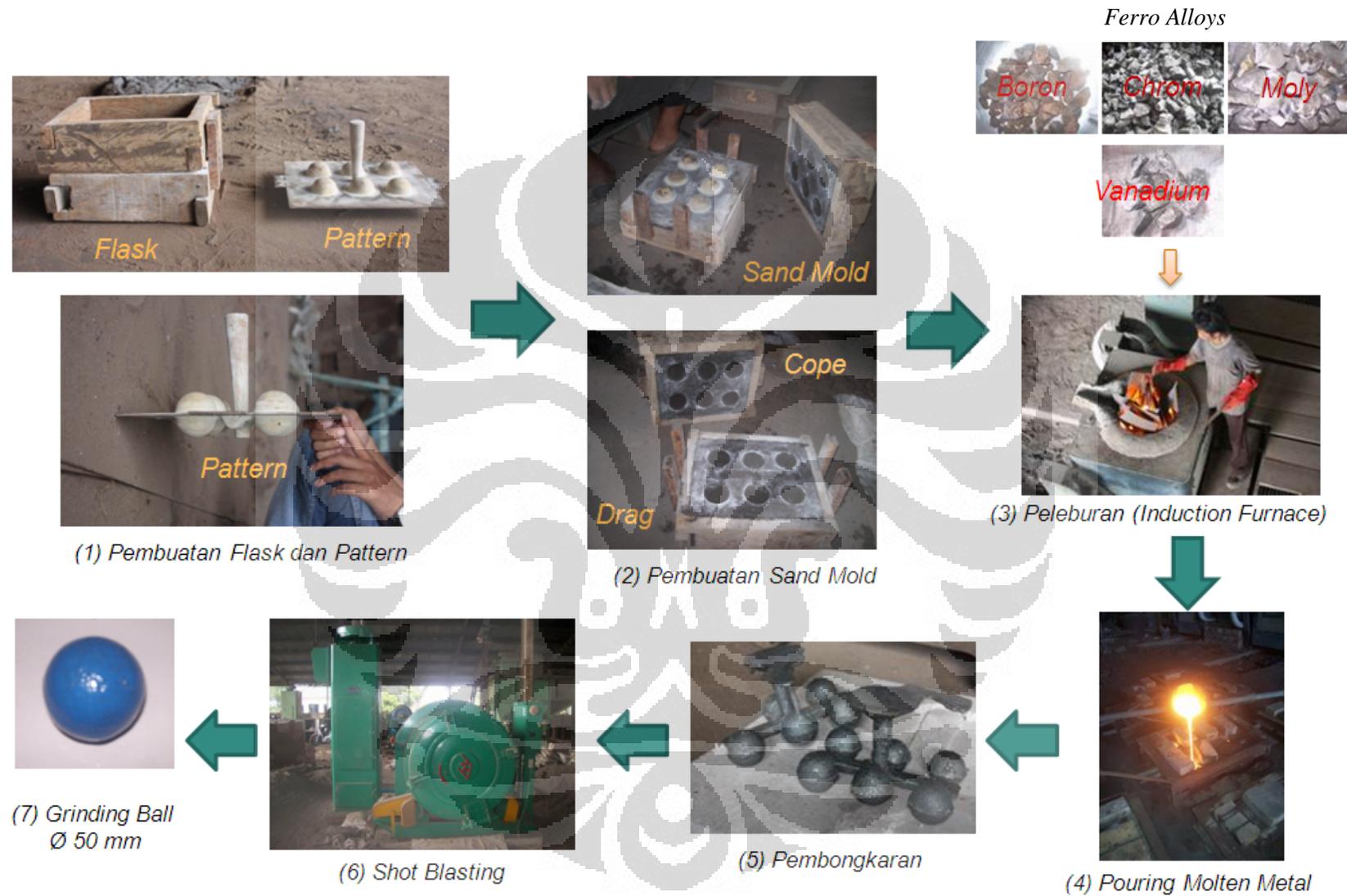
Berikut ini adalah skema desain *gating system* dalam penelitian ini yang akan digunakan dalam proses simulasi yang selanjutnya akan diaplikasikan dalam proses pengecoran logam.



Gambar 3.4 Skema desain *gating system grinding ball* dalam penelitian ini

3.3 PROSES PEMBUATAN *GRINDING BALL* DENGAN METODE PENGECORAN LOGAM

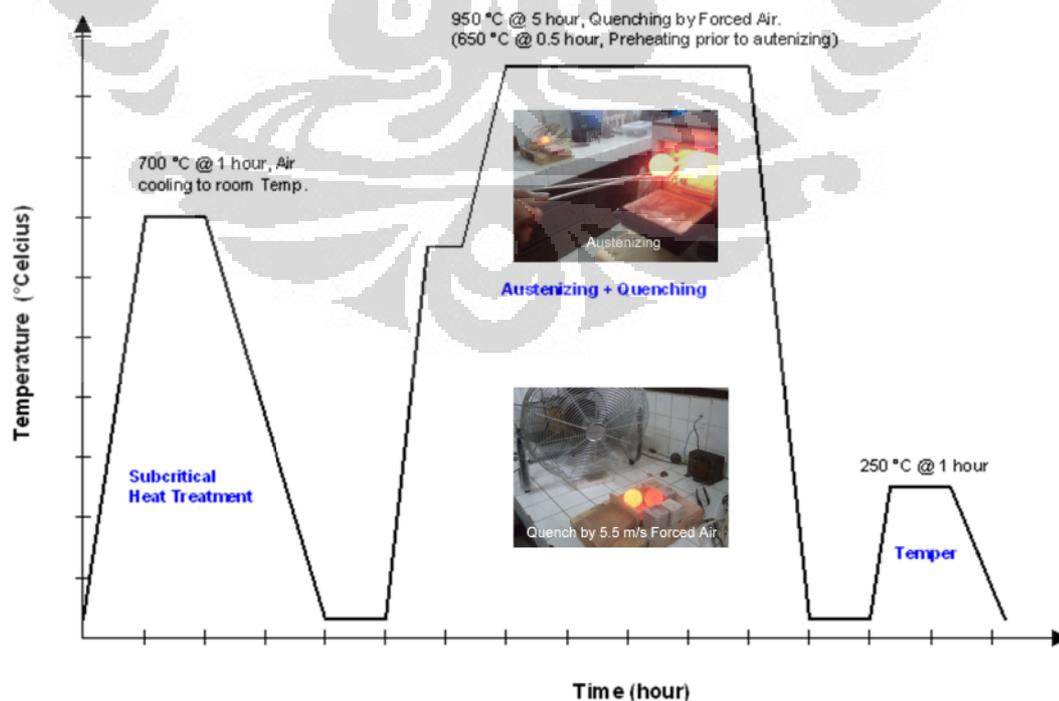
Proses pembuatan *grinding ball*, seperti yang tampak pada Gambar 3.5, terbagi ke dalam empat tahapan yaitu: (1) ***pembuatan pola (pattern)***, pola terbuat dari kayu keras, dimana pola ini terdiri dari *gating system* dan *grinding ball* berukuran $\text{Ø}50$ mm, dimana keduanya terbagi menjadi dua bagian (*parting line*), (2) ***pembuatan cetakan***, menggunakan pasir cetak (*sand mold*), dimana pasir kuarsa ($96\% \text{SiO}_2$) sebanyak 92% dicampur dengan perekat berupa bentonit sebanyak 5% dan air sebanyak 3% diaduk dalam sebuah mesin *double screw mixer* selama kurang lebih 15 menit. Cetakan ini terdiri dari dua buah *flask (cope and drag)*, kemudian pasir cetak dan pola dipadatkan dalam masing-masing *flask* tersebut, (3) ***proses peleburan***, bahan baku berupa *scrap* besi dan unsur-unsur paduan (*ferro chrom, ferro molybdenum, ferro vanadium, ferro boron*) dilebur menggunakan tungku induksi dengan kapasitas 500 Kg/heat. (4) ***proses pembongkaran cetakan***, setelah logam cair dengan komposisi seperti pada Gambar 3.1 (Sampel B, C, D, dan E) dituang ke dalam cetakan dan membeku, selanjutnya dilakukan pembongkaran cetakan, dimana benda cor dipisahkan dari pasir cetak dan dibersihkan dengan menggunakan mesin *shot blasting*.



Gambar 3.5 Pembuatan *grinding ball* dengan metode pengecoran logam

3.4 PROSES PERLAKUAN PANAS TERHADAP PRODUK *GRINDING BALL*

Grinding ball dalam penelitian ini akan diberi perlakuan panas, seperti tampak pada Gambar 3.6, yaitu berupa *subcritical heat treatment*, *hardening (austenizing and quenching)*, dan *tempering* untuk memperoleh struktur martensit dengan sedikit austenit sisa. ***Subcritical heat treatment*** dilakukan pada temperatur 700 °C selama 1 jam, proses ini bertujuan untuk mengubah austenit sisa yang terbentuk saat solidifikasi pada proses *casting* menjadi struktur pearlit, dimana austenit sisa yang terbentuk dari proses *casting* akan menjadi lebih stabil ketika dilakukan proses austenisasi dan *quenching*, sehingga struktur tersebut tidak akan berubah menjadi martensit, melainkan tetap menjadi austenit (sisa). ***Hardening***, merupakan proses *heat treatment* berupa austenisasi dan *quenching*, bertujuan untuk memperoleh struktur (matriks) martensit. Austenisasi dilakukan pada temperatur 950 °C selama 5 jam (sebelumnya dilakukan *preheating* pada temperatur 650 °C selama 30 menit), yang kemudian didinginkan secara cepat dengan menggunakan aliran udara paksa dengan kecepatan udara 5.5 m/s. ***Tempering***, dilakukan pada temperatur 250 °C selama 1 jam, bertujuan untuk memperbaiki ketangguhan dari material tersebut.



Gambar 3.6 Diagram perlakuan panas produk *grinding ball* hasil penelitian

3.5 Uji Karakterisasi *GRINDING BALL* HASIL PENELITIAN

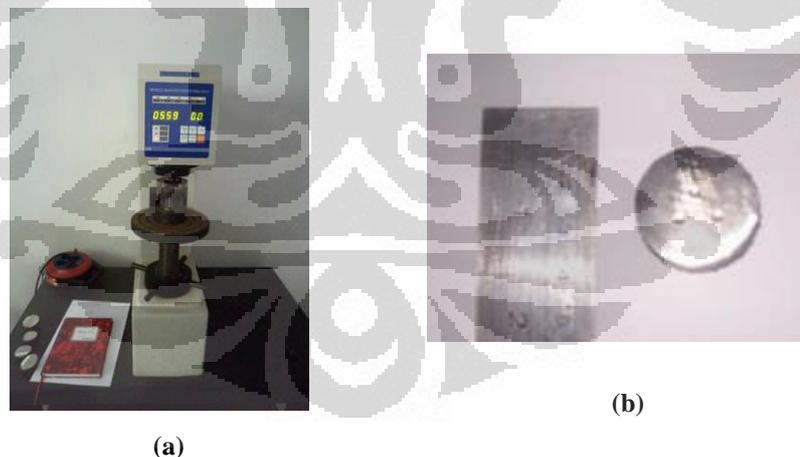
Uji karakteristik yang dilakukan terhadap produk *grinding ball* impor dan hasil penelitian diantaranya adalah sebagai berikut:

3.5.1 Analisa komposisi kimia

Analisa komposisi kimia dilakukan dengan menggunakan alat *Optical Electron Spectrometer-OES* (ASTM A-751)

3.5.2 Uji kekerasan

Uji kekerasan dengan menggunakan alat uji kekerasan *brinell hardness tester* (ASTM E-10), seperti yang tampak pada Gambar 3.7(a) di bawah, dengan menggunakan *indenter* bola baja \varnothing 10 mm dengan beban sebesar 3000 Kg, dengan waktu penjejakan selama 15 detik. Spesimen untuk uji kekerasan berukuran \varnothing 15 mm x 10 mm, seperti yang tampak pada Gambar 3.7 (b). Uji kekerasan dilakukan terhadap produk *grinding ball* untuk tiap-tiap sampel pada kondisi *as-cast*, *as-subcritical*, *as-quenched* dan *as-tempered*. Nilai kekerasan dari hasil pengujian tersebut diperoleh dari nilai rerata terhadap 3 buah lokasi penjejakan dari tiap-tiap sampel.

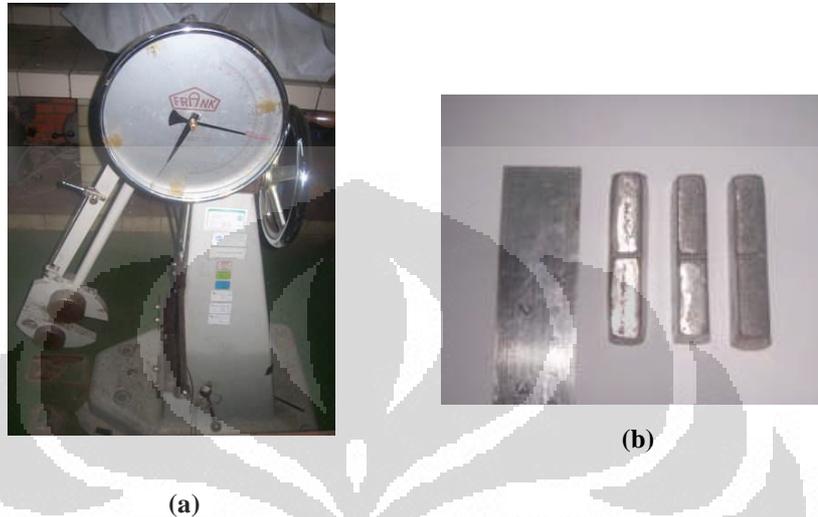


Gambar 3.7 Alat uji karakterisasi produk *grinding ball*: (a) *brinell hardness tester*, (b) spesimen uji kekerasan

3.5.3 Uji Impak

Uji impak dilakukan dengan menggunakan alat uji impak (*charpy*), dengan sampel uji mengacu pada ASTM E-23, seperti yang tampak pada Gambar 3.8 di

bawah. Uji impak dilakukan terhadap tiap-tiap sampel pada kondisi *as-tempered* sebanyak 3 buah, dimana nilai impak diperoleh dengan mengambil nilai rerata dari tiga buah sampel uji tersebut.



Gambar 3.8 Alat uji karakterisasi produk *grinding ball*: (a) alat uji impak, (b) spesimen uji impak

3.5.4 Analisa struktur mikro

Analisa struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik (ASTM E-340), XRD, SEM dan EDS.

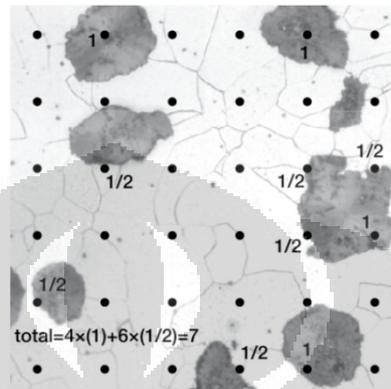
Mikroskop Optik, analisa ini bertujuan untuk mengetahui struktur mikro/fasa dari matriks material *grinding ball* dan juga volume fraksi presipitat/karbida (karbida sekunder). Untuk penghitungan volume karbida dilakukan dengan menggunakan metode titik. Persamaan untuk menentukan volume fraksi karbida dengan menggunakan metode titik adalah sebagai berikut:

$$\% Vol. Karbida = \frac{(A \times 1) + (B \times 0.5)}{P_o} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

Dimana, A= jumlah karbida yang terkena tepat pada titik uji; B = jumlah karbida yang menyinggung titik uji; Po = jumlah titik uji.

Pada perhitungan volume karbida dalam penelitian ini digunakan 100 titik/*grid*, dimana penghitungan dilakukan pada gambar struktur mikro dari foto

SEM dengan perbesaran 10.000 x dan penghitungan dilakukan pada 4 buah lokasi berbeda pada foto yang sama (**Lampiran 5-8**). Sehingga volume karbida dihitung berdasarkan nilai rerata dari ke empat lokasi tersebut. Berikut adalah ilustrasi metode perhitungan metalografi kuantitatif dengan metode titik.



Gambar 3.9 Ilustrasi penghitungan volume fraksi karbida dengan metode titik^[43].

Adapun spesimen yang digunakan berukuran Ø15 mm x 10 mm. Proses preparasi yang dilakukan meliputi *grinding*, *polishing*, dan *etching*. Untuk proses *etching* digunakan etsa nital 3% dan FeCl₃.

XRD (*X-Ray Diffractometer*) digunakan untuk identifikasi fasa dalam struktur mikro dan mengetahui kandungan austenit sisa. Adapun parameter dari uji XRD yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Sinar radiasi: Cu-K α
- 2 θ range : 10 – 80 derajat
- Scan speed : 2 derajat/menit

SEM (*Secondary Electron Microscope*) dan **EDS** (*Energy Dispersive Electroscopy*) untuk mengidentifikasi serta mengetahui komposisi unsur pembentuk senyawa karbida pada *grinding ball* tersebut.

3.6 UJI WEAR RATES GRINDING BALL DALAM LABORATORY BALL MILL UNIT

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa terdapat empat buah metode pengujian yang umumnya digunakan untuk menguji ketahanan aus dari

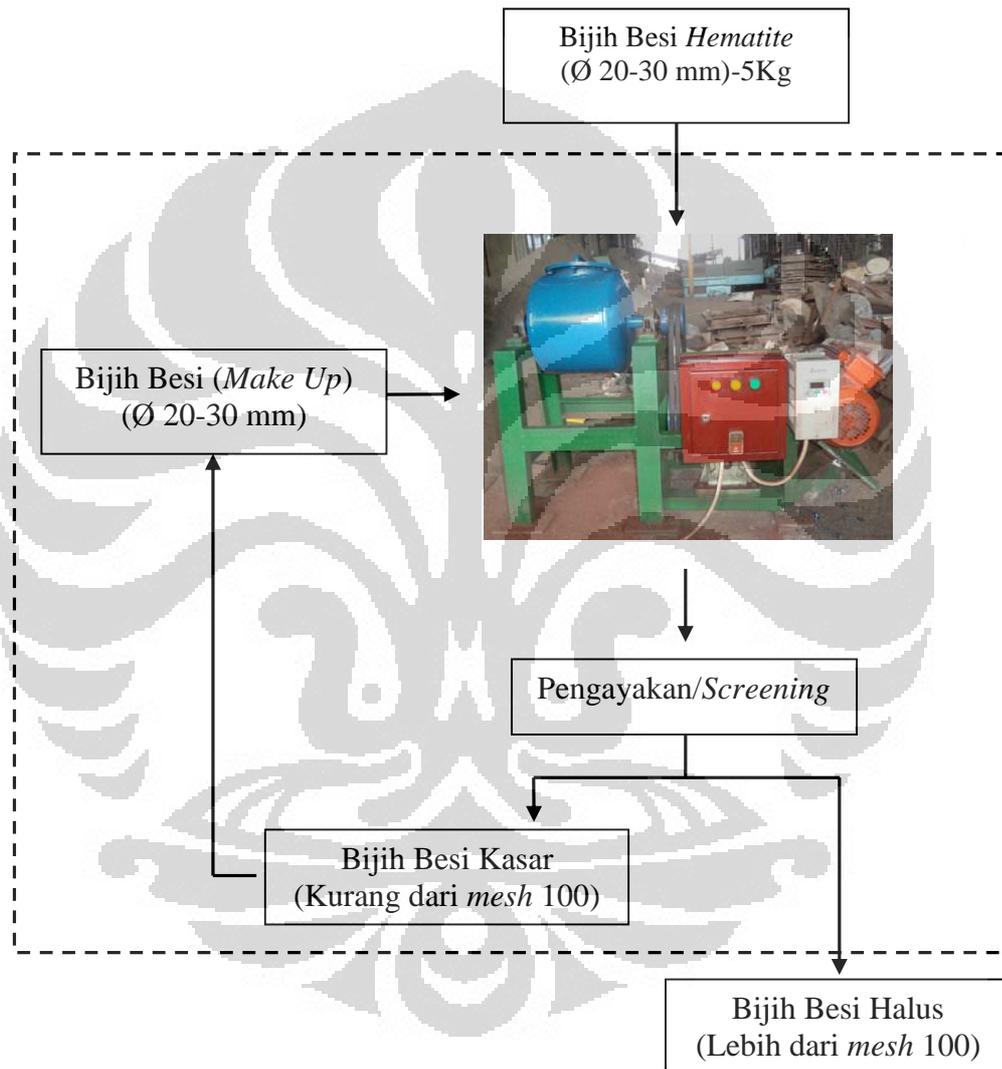
suatu material tahan gesek, salah satunya adalah *high chromium white cast iron*. Khusus untuk aplikasi material *high chromium white cast iron* sebagai produk *grinding ball*, pengujian ketahanan aus produk *grinding ball* dengan metode *ball mill abrasion test (laboratory ball mill unit)* telah banyak dilakukan^[6-7, 9, 12], dimana pengujian ini akan memberikan nilai ketahanan aus mendekati nilai aktual pada penggunaan *grinding ball* dalam *ball mill unit* dikarenakan pengujian tersebut memiliki kondisi (mekanisme abrasif) yang sama dengan kondisi pada *ball mill unit* yang sebenarnya/skala industri^[26].

Perbandingan pengujian ketahanan aus dari produk *grinding ball* terhadap dua jenis metode pengujian yang berbeda telah dilakukan, yaitu *ball mill abrasion test* dan *pin on disc test*^[6], dimana keduanya memberikan hasil yang berbeda. Pada *ball mill abrasion test*, nilai ketahanan aus terbaik diperoleh dari material *high chromium white cast iron* pada kondisi matriks martensit, sebaliknya nilai ketahanan aus terbaik pada *pin on disc test* diperoleh pada kondisi matriks austenit. Nilai ketahanan aus dari *ball mill abrasion test* menunjukkan nilai ketahanan aus yang hampir sama ketika material tersebut berupa produk *grinding ball* digunakan dalam *ball mill unit* pada skala industri.

Dengan demikian pada penelitian ini dilakukan pengujian ketahanan aus dengan menggunakan metode *ball mill abrasion test*, dimana nilai ketahanan aus diperoleh dari nilai *wear rates* yang diukur berdasarkan pengurangan berat dari *grinding ball* akibat gesekan/abrasi yang timbul pada saat proses penggerusan dalam mesin *ball mill*. Pada penelitian ini, *wear rates* diukur dengan cara meletakkan *grinding ball* dalam *laboratory ball mill unit* untuk menggerus material abrasif berupa batuan mineral, yaitu bijih besi (*hematite*).

Seperti yang tampak pada Gambar 3.10 di bawah, proses penggerusan dilakukan dengan memasukkan bijih besi sebanyak 5 Kg ke dalam *ball mill unit* yang berisikan 14 buah *grinding ball* (hasil penelitian), dimana proses penggerusan tersebut berlangsung selama 6 jam, kemudian dilakukan penimbangan terhadap tiap-tiap *grinding ball*. Bijih besi yang telah digerus kemudian di ayak dan dipisahkan menjadi dua jenis ukuran yaitu kurang dan lebih dari mesh 100. Selanjutnya bijih besi yang berukuran kurang dari mesh 100 (bijih besi kasar) akan ditambahkan dengan bijih besi berukuran Ø 20-30 mm (*make up*)

untuk kemudian digerus kembali. Proses penggerusan tersebut secara berulang selama enam kali. *Grinding ball* tersebut secara keseluruhan akan mengalami proses penggerusan sebanyak 48 jam, dan dilakukan penimbangan terhadap *grinding ball* tiap 6 jam untuk mengetahui pengurangan berat yang terjadi terhadap *grinding ball*.



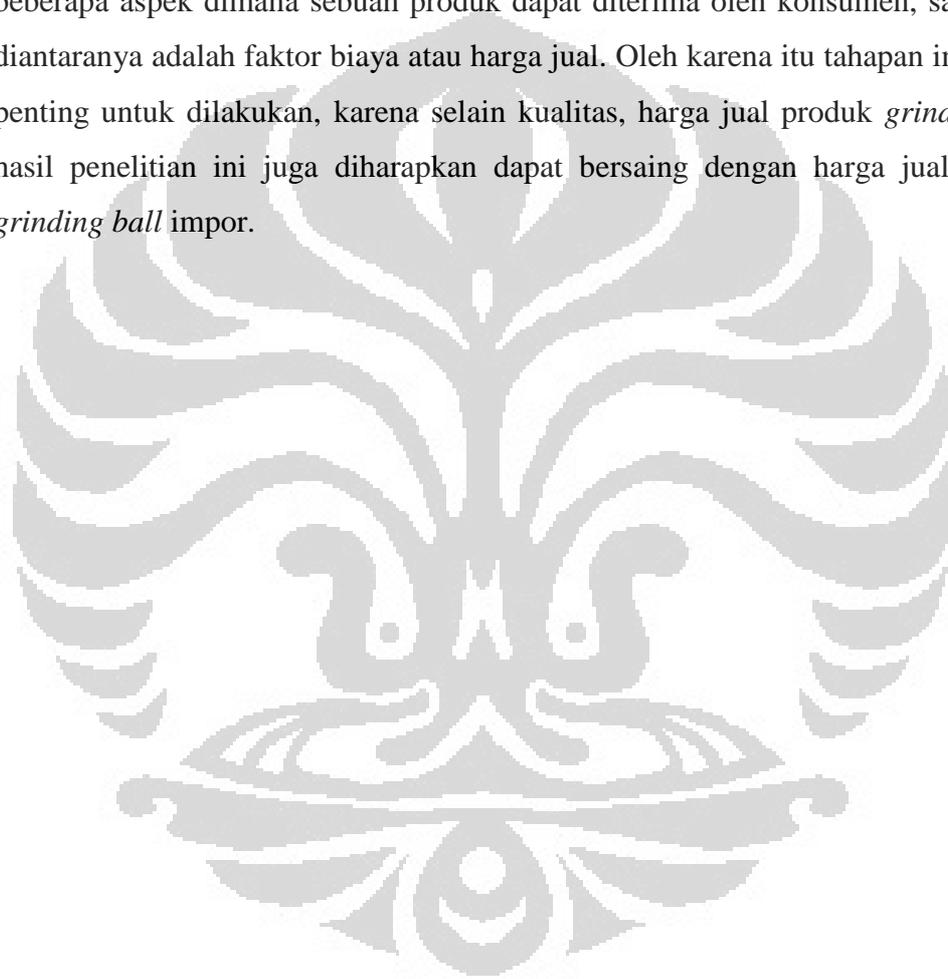
Gambar 3.10 Diagram uji *wear rates* produk *grinding ball* hasil penelitian

Adapun spesifikasi dan dimensi dari *laboratory ball mill unit* yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari sebuah drum berukuran $\text{Ø}300 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ yang terbuat dari plat baja (*mild steel plate*) setebal 8 mm, yang diputar oleh sebuah motor listrik (2 HP, 1450 rpm) melalui mekanisme transmisi *pulley*

dan *v-belt*, sehingga diperoleh putaran drum sebesar 46 Rpm (60% kecepatan kritis). Pada uji *wear rates* tersebut akan digunakan sebanyak 14 buah *grinding ball* berukuran $\varnothing 50$ mm dalam *laboratory ball mill unit*.

3.7 ANALISA TEKNO EKONOMI PEMBUATAN *GRINDING BALL*

Keberhasilan sebuah produk *grinding ball*, tidak hanya dilihat dari kualitasnya yang baik, namun juga harus dapat diterima oleh konsumen. Ada beberapa aspek dimana sebuah produk dapat diterima oleh konsumen, salah satu diantaranya adalah faktor biaya atau harga jual. Oleh karena itu tahapan ini sangat penting untuk dilakukan, karena selain kualitas, harga jual produk *grinding ball* hasil penelitian ini juga diharapkan dapat bersaing dengan harga jual produk *grinding ball* impor.



BAB 4

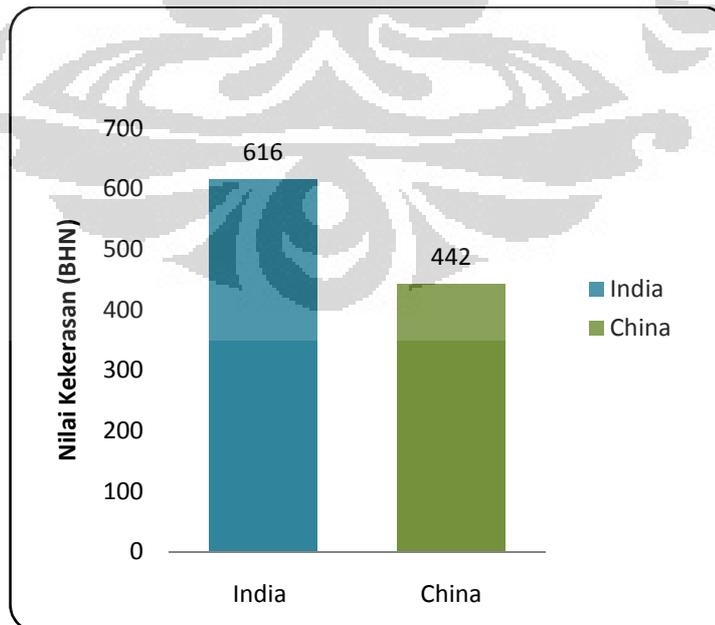
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 KARAKTERISTIK *GRINDING BALL* IMPOR (INDIA DAN CHINA)

Berdasarkan hasil uji komposisi kimia dari produk *grinding ball* impor dengan menggunakan alat OES (*Optical Electron Spectroscopy*), seperti yang tampak pada Tabel 4.1 di bawah, bahwa produk *grinding ball* impor asal India termasuk ke dalam kategori material *high chromium white cast iron* (ASTM A532-Tipe IIB), sedangkan untuk produk *grinding ball* asal China termasuk ke dalam kategori material *high carbon - low alloy steel*.

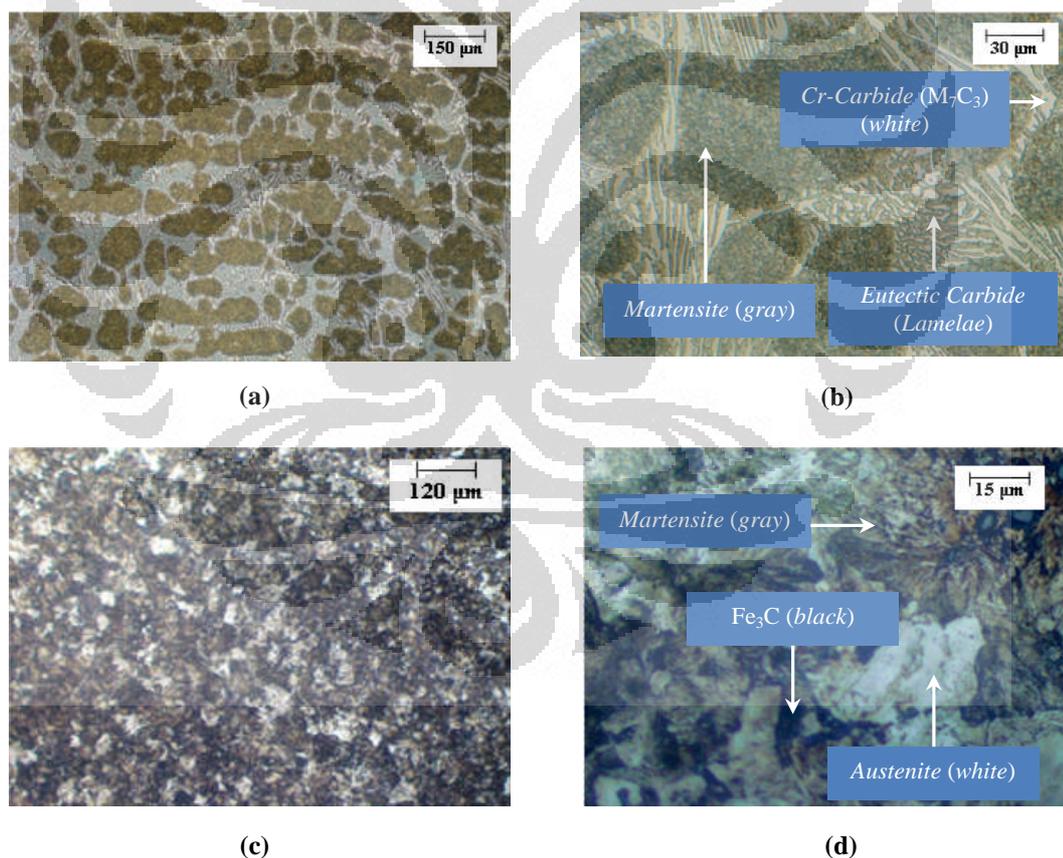
Tabel 4. 1. Komposisi kimia produk *grinding ball* impor

Unsur	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe	Standard
Kadar (%)	<i>Grinding Ball asal India</i>										ASTM A532-Type IIB
	2.23	0.314	0.07	0.134	0.431	0.132	14.1	0.078	0.043	Bal.	
	<i>Grinding Ball asal China</i>										Low Alloy Steel
	0.839	0.331	0.042	0.035	0.522	0.073	0.678	0.012	0.249	Bal.	



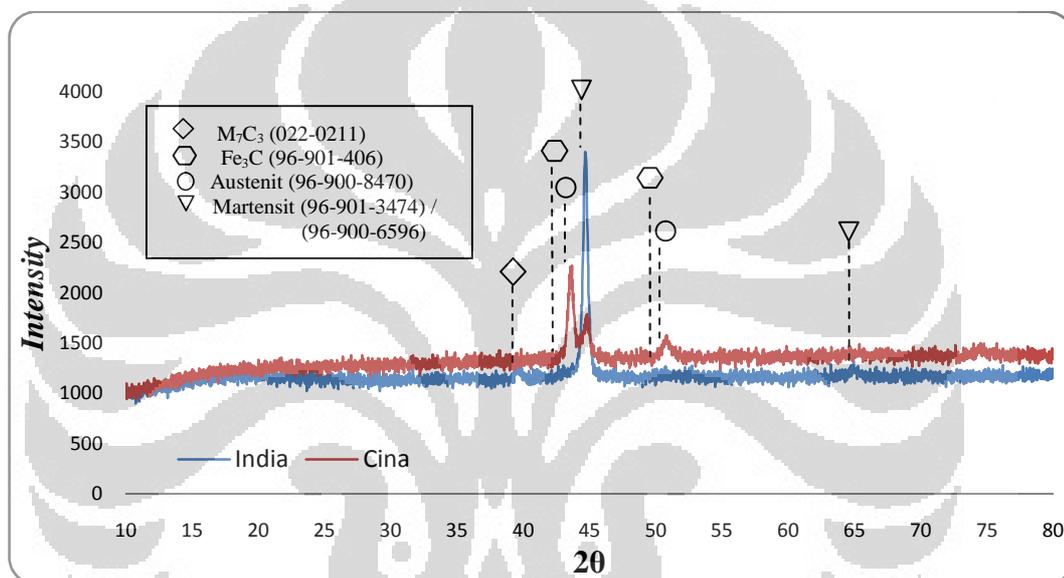
Gambar 4.1 Nilai kekerasan produk *grinding ball* impor

Dari hasil uji kekerasan dengan menggunakan alat uji kekerasan *brinell*, seperti yang tampak pada Gambar 4.1, bahwa produk *grinding ball* impor asal India memiliki nilai kekerasan yang jauh lebih tinggi, yaitu 616 BHN, dibandingkan dengan produk *grinding ball* impor asal China, yaitu 442 BHN. Hal ini dikarenakan produk *grinding ball* impor asal India memiliki struktur mikro yang terdiri dari karbida khrom M_7C_3 atau $(Fe,Cr)_7C_3$ dalam matriks martensit dengan sedikit austenit sisa, sedangkan produk *grinding ball* impor asal China memiliki struktur mikro berupa Fe_3C diantara matriks martensit dan austenit sisa, seperti tampak pada Gambar 4.2, dimana nilai kekerasan $(Fe,Cr)_7C_3$ pada *grinding ball* impor asal india, yaitu 1500-1800 HV, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan nilai kekerasan Fe_3C pada *grinding ball* impor asal China, yaitu 1000-1200 HV.



Gambar 4.2 Struktur mikro (a), (b) *grinding ball* impor asal India; (c), (d) *grinding ball* asal China (etsa nital 3% dan $FeCl_3$).

Selain keberadaan karbida, struktur martensit juga memberikan efek yang cukup signifikan terhadap nilai kekerasan dari suatu material, dimana struktur martensit memiliki nilai kekerasan yang jauh lebih tinggi, yaitu 600 BHN, dibandingkan dengan struktur ferrit (100 BHN), dan austenit (220 BHN), sehingga semakin besar kandungan/intensitas martensit, maka semakin tinggi nilai kekerasan dari suatu material. Seperti yang tampak dari hasil analisa XRD (Gambar 4.3) bahwa intensitas martensit dari produk *grinding ball* impor asal India jauh lebih tinggi dibandingkan produk *grinding ball* asal China.



Gambar 4.3 Analisa XRD produk *grinding ball* impor asal India dan China (**Lampiran 8-9**)

Selain itu, intensitas austenit sisa pada produk *grinding ball* impor asal india jauh lebih sedikit dibandingkan dengan produk *grinding ball* impor asal China. Austenit sisa bersifat lunak, sehingga keberadaannya dalam suatu material (besi/baja) akan memberikan dampak negatif terhadap nilai kekerasan, namun akan memberikan dampak positif terhadap nilai ketangguhan. Pada material untuk aplikasi ketahanan gesek, perlu dihindari keberadaan austenit sisa dalam jumlah yang cukup banyak, karena austenit yang bersifat lunak akan memberikan ketahanan terhadap gesekan/abrasif yang rendah atau dengan kata lain nilai *wear rates* dari material tersebut akan menjadi tinggi.

Dari hasil analisa karakteristik *grinding ball* impor tersebut, maka *grinding ball* impor asal India, yang terbuat dari material *high chromium white cast iron*,

akan dijadikan sebagai *benchmark* dalam penelitian ini, dikarenakan *grinding ball* tersebut memberikan nilai kekerasan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan *grinding ball* impor asal India, selain itu berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya menyatakan bahwa material *high chromium white cast iron* akan memberikan ketahanan aus yang jauh lebih tinggi (*wear rates* yang rendah) dibandingkan dengan material *forge steel* dan *low alloy steel* [7-8].

Dengan demikian maka pembuatan *grinding ball* pada penelitian ini mengacu pada komposisi *grinding ball* impor (Tabel 4.1), yaitu *high chromium white cast iron* (ASTM A-532) dengan melakukan penambahan unsur molibdenum (Mo), vanadium (V), dan boron (B).

4.2 PROSES PEMBUATAN GRINDING BALL

4.2.1 Desain Gating System

Desain simulasi proses pembuatan *grinding ball* diawali dengan melakukan perhitungan matematis untuk menentukan dimensi dari *gating system* (saluran masuk) pada pola cetakan *grinding ball* menggunakan persamaan (3.1) hingga persamaan (3.5) dengan menggunakan beberapa parameter dan konstanta, seperti yang tampak pada Tabel 4.2 di bawah.

Tabel 4.2 Parameter dan konstanta untuk desain *gating system*

No.	Parameter	Indeks	Satuan	Nilai	Keterangan
1	Berat benda cor	W	Kg	3.8705	6 buah <i>grinding ball</i>
2	<i>Density hot metal</i>	$\rho_{(1450^{\circ}\text{C})}$	Kg/m ³	6840.76	Cast iron
3	Efisiensi proses	C	-	0.8	Asumsi
4	Tinggi benda cor	H	m	0.16	-
5	Percepatan gravitasi	g	m/s ²	9.8	-
6	<i>Reynold Number</i>	Re	-	7500	Laminar-Turbulen
7	Viskositas Dinamik	μ	m ² /s	5.5×10^{-7}	-

Dengan menggunakan parameter-parameter seperti yang tampak pada Tabel 4.2 di atas, maka diperoleh dimensi-dimensi untuk *gating system* sebagai berikut, seperti tampak pada Tabel 4.3 di bawah ini.

Tabel 4.3 Dimensi untuk desain *gating system*

No.	Parameter	Indeks	Satuan	Nilai
1	Laju penuangan	t	detik	3.5
2	<i>Pouring Basin dan Sprue</i>	A ₁	m ²	0.00068
		A ₂	m ²	0.00014
		H ₁	mm	30.226
		H ₂	mm	120.9
3	<i>Runner</i>	w	mm	9.82
		D	mm	11.18
4	<i>Gates</i>	h	mm	8.31
		l	mm	25.4

Berdasarkan dimensi-dimensi tersebut (beberapa diantaranya dilakukan pembulatan angka dimensi) maka diperoleh desain *gating system* seperti tampak pada **Lampiran 2**, sedangkan untuk dimensi *vent air* diperoleh melalui *trial and error* dalam proses simulasi dengan menggunakan desain *gating system* seperti yang tampak pada **Lampiran 3 dan 4**.

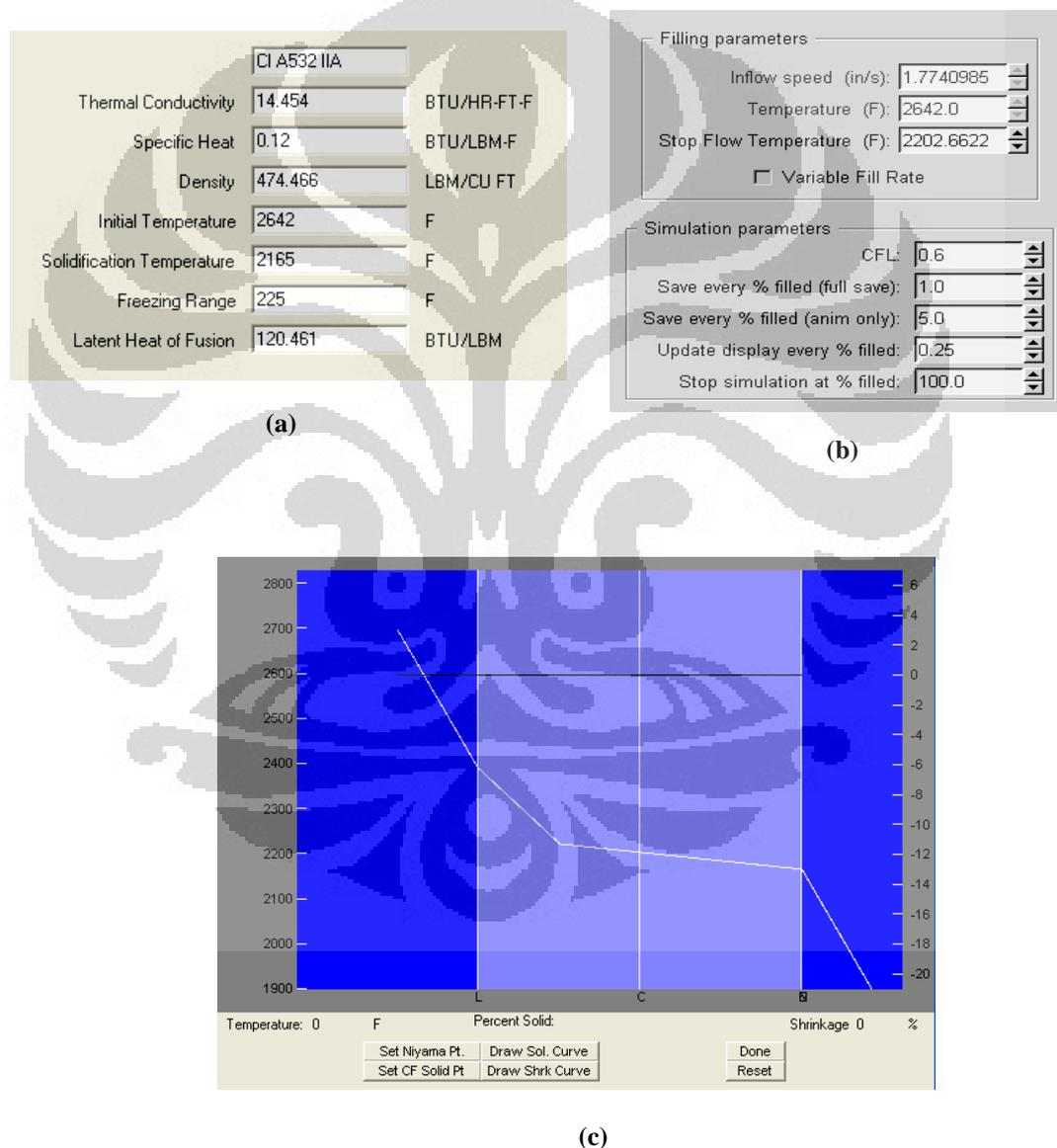
4.2.2 Simulasi Pembuatan *Grinding Ball*

a. Parameter Simulasi Pengecoran Logam

Simulasi proses pembuatan *grinding ball* dengan menggunakan *software* simulasi pengecoran logam, yaitu *SolidCast*TM, bertujuan untuk meminimalisasi terjadinya cacat berupa porositas/*shrinkage* terhadap produk *grinding ball*, dimana keberadaan cacat tersebut dalam produk *grinding ball* dapat berdampak negatif terhadap sifat-sifat mekanik pada produk tersebut. Selain itu, proses simulasi juga ditujukan untuk mengoptimalkan nilai *yield* pada proses pengecoran logam, dimana nilai *yield* didefinisikan sebagai berat produk dibagi dengan berat total logam (cair) yang dituang ke dalam cetakan. Berikut ini (Gambar 4.4) adalah parameter awal dari *database* material ASTM A532 (*high chromium white cast iron*) dalam *SolidCast*TM yang digunakan dalam simulasi ini.

Pada proses simulasi tersebut, terjadi sedikit perbedaan nilai parameter dengan hasil perhitungan matematis pada laju penuangan/*pouring time*, yaitu pada Gambar 4.4(e), dimana pada proses simulasi tersebut memiliki nilai dua kali lebih

besar (7 detik) dibandingkan dengan hasil perhitungan matematis (3.5 detik). Hal ini ditujukan untuk mencegah terjadinya erosi pasir cetak oleh logam cair akibat laju penuangan yang terlalu cepat. Seperti yang tampak pada persamaan (3.2) di atas, bahwa laju penuangan ditentukan oleh dua faktor, yaitu konstanta (k) dan berat benda cor. Besarnya nilai konstanta tersebut memiliki rentang yang cukup tinggi dan diperoleh melalui beberapa hasil eksperimen, sehingga sangat sulit untuk memperoleh nilai yang akurat untuk konstanta tersebut.



Material Name	Silica Sand		Material Type	Normal Mold
InitialTemp	80	F		
Thrm Cond	0.341	BTU/HR-FT-F		
Spc Ht	0.257	BTU/LBM-F		
Density	95	LBM/CU FT		

(d)

Ambient Temperature	90	F
Pour Time	7	sec

(e)

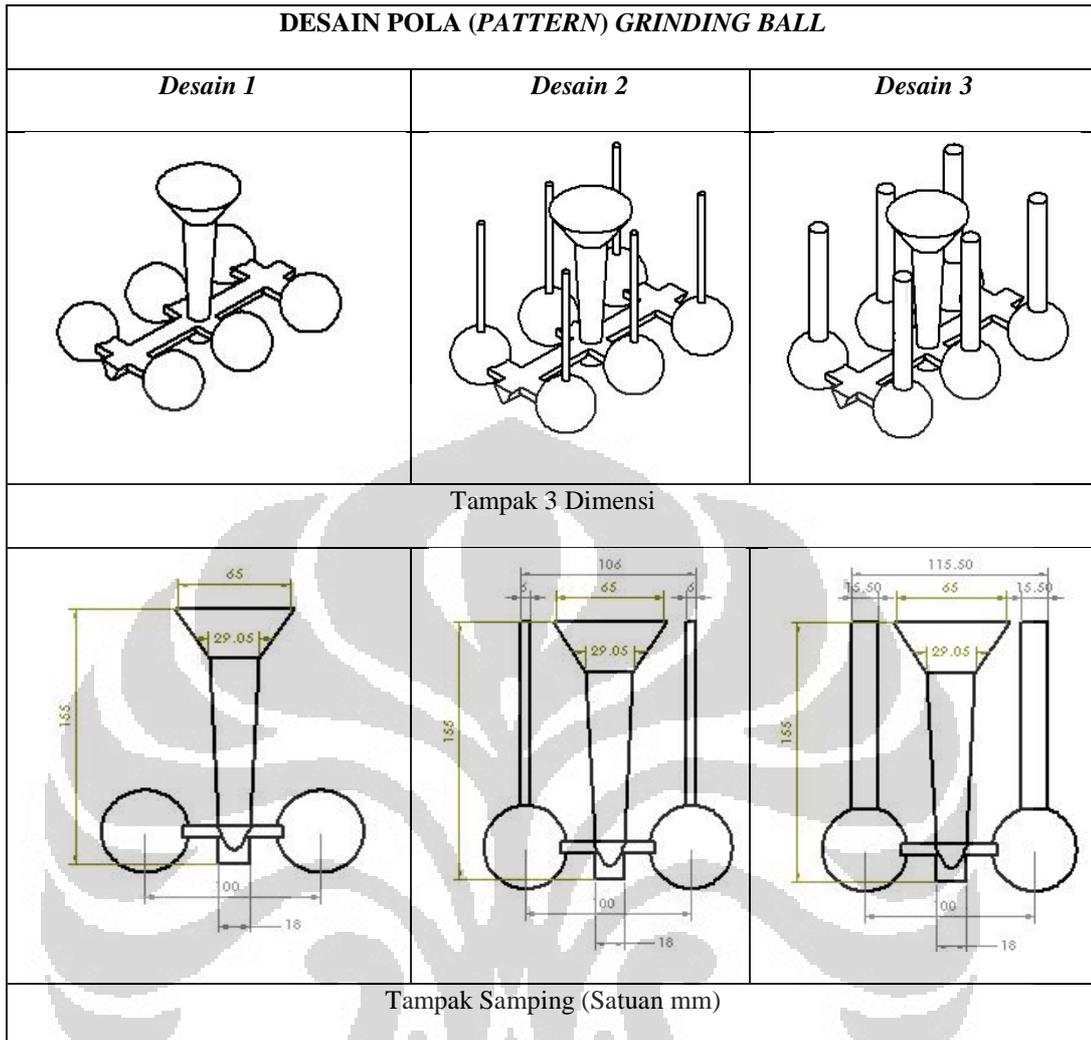
External Heat Transfer Coefficient	1.5	BTU/HR-SQ FT-F
<input type="checkbox"/> Use Internal Heat Transfer Coefficients		
Casting Material	Riser Material	
Riser Material	Ambient	
Ambient	Silica Sand	
Silica Sand		
		0 BTU/HR-SQ FT-F

(f)

Gambar 4.4 Parameter awal simulasi: (a) material, (b) flow, (c) cooling curve, (d) mold/cetakan pasir, (e) pour time, (f) heat transfer coefficient

b. Simulasi Pengecoran Logam

Berikut ini (Gambar 4.5) adalah hasil proses simulasi terhadap desain *gating system* dari produk *grinding ball*, yaitu Desain 1 serta beberapa modifikasi terhadap desain tersebut untuk memperoleh produk *grinding ball* tanpa cacat (*sound casting product*), yaitu dengan melakukan penambahan *vent air* pada *gating system* tersebut, yaitu Desain 2 dan Desain 3.

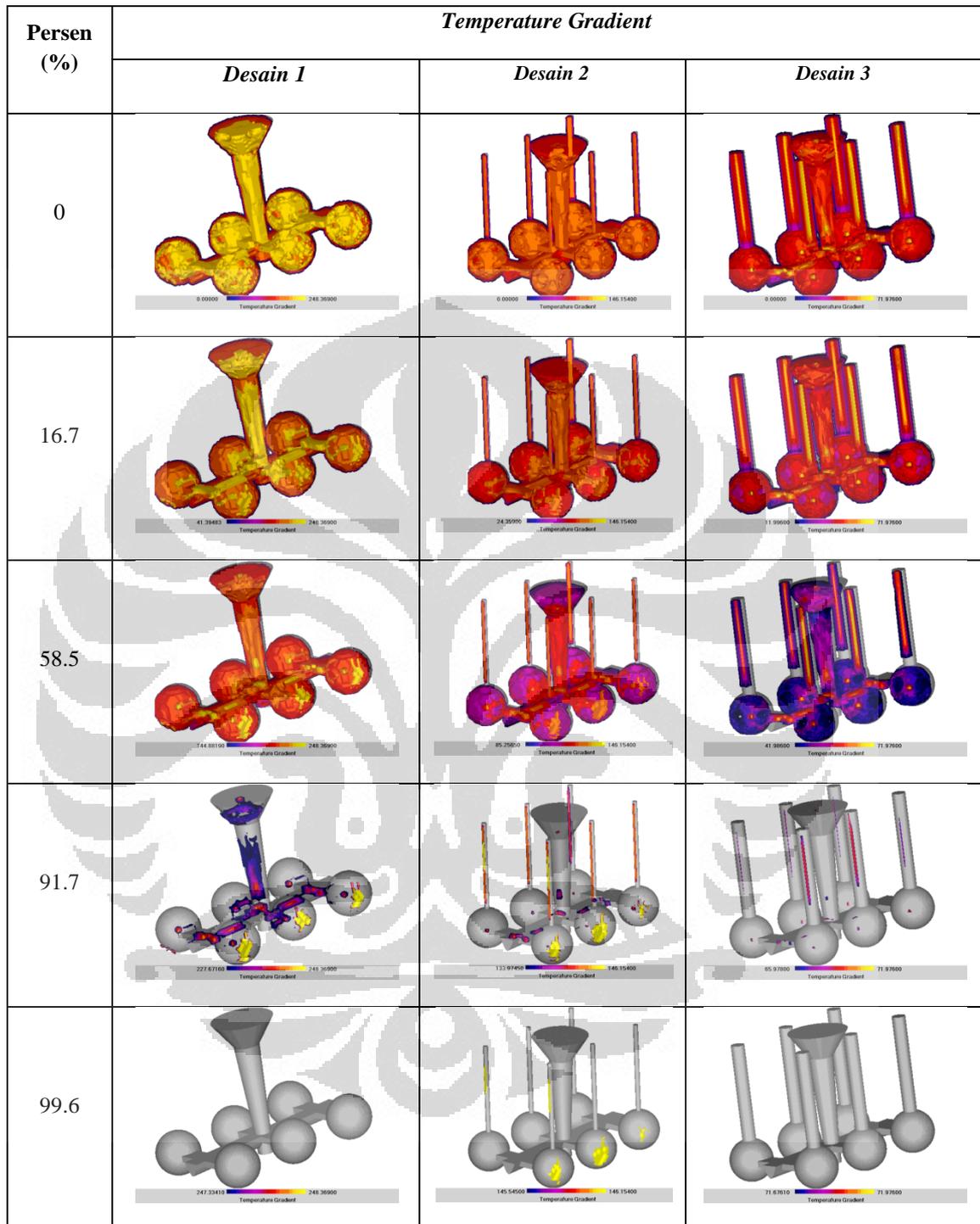


Gambar 4.5 Desain *gating system* pada pembuatan *grinding ball*: (a) tanpa *vent air*, (b) dengan *vent air* Ø6 mm, (c) dengan *vent air* Ø15.5 mm

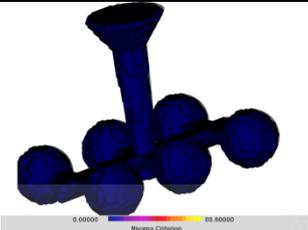
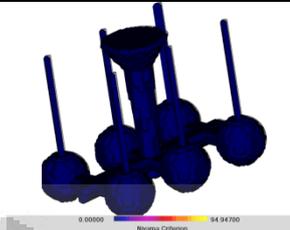
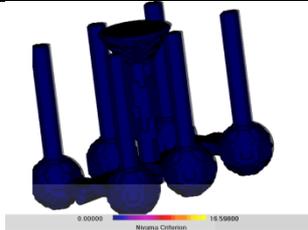
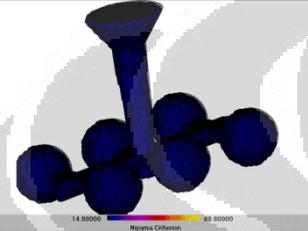
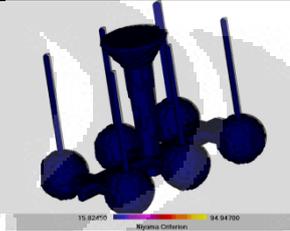
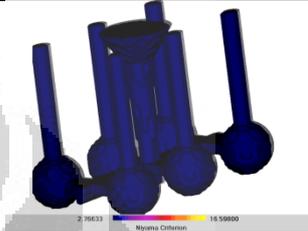
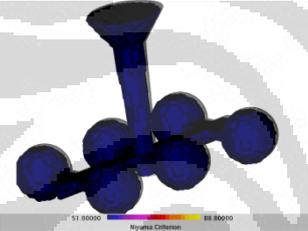
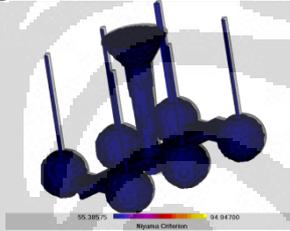
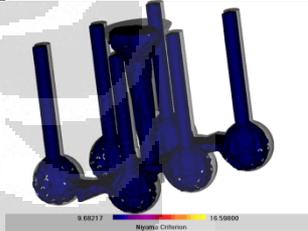
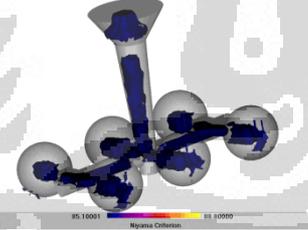
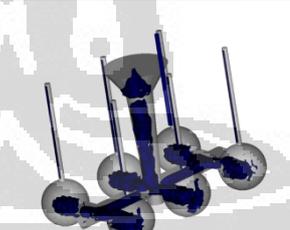
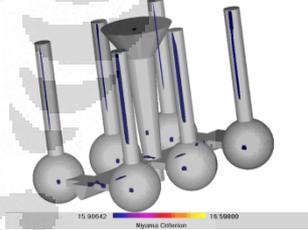
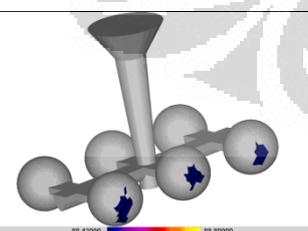
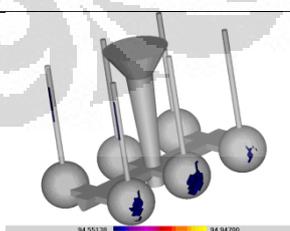
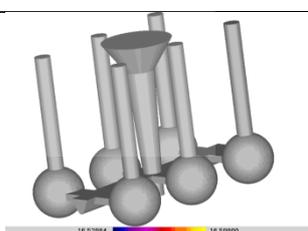
Dan berikut ini adalah hasil proses simulasi pengecoran logam dengan menggunakan ketiga desain di atas, dimana analisa terhadap proses simulasi akan ditekankan pada waktu pembekuan (*solidification time*), temperatur gradien (*gradient temperature*), dan *niyama criterion*. *Solidification time* akan memberikan gambaran terhadap tahapan-tahapan solidifikasi versus waktu, sedangkan *temperature gradient* dan *niyama criterion* sangat erat kaitannya terhadap pembentukan cacat, seperti *shrinkage* dan *porosity*.

Time (s)	<i>Solidification Time</i>		
	<i>Desain 1</i>	<i>Desain 2</i>	<i>Desain 3</i>
1			
2			
3			
4			
5			

Gambar 4.6 *Solidification time* dalam simulasi proses pengecoran logam



Gambar 4.7 *Temperature gradient* dalam simulasi proses pengecoran logam

Persen (%)	<i>Niyama Criterion</i>		
	<i>Desain 1</i>	<i>Desain 2</i>	<i>Desain 3</i>
0			
6.7			
58.3			
95.8			
99.6			

Gambar 4.8 *Niyama Criterion* dalam simulasi proses pengecoran logam

Dari hasil simulasi desain awal menggunakan *software SolidCast™*, seperti tampak pada Gambar 4.6, dimana dari ketiga desain tersebut memiliki kecenderungan solidifikasi yang sama, dimana solidifikasi berawal dari bagian dengan volume terkecil, yaitu *sprue* dan *runner*, kemudian berlanjut pada produk *grinding ball*, dan bagian paling akhir yang akan mengalami solidifikasi adalah *pouring basin*. Penambahan *vent air* (pada Desain 2) serta penambahan diameter/volume *vent air* (pada Desain 3) tidak memberikan perbedaan waktu solidifikasi secara signifikan, dimana rentang waktu proses solidifikasi adalah 5-7 detik.

Dari hasil simulasi terhadap *temperature gradient*, tampak bahwa penambahan *vent air* dan volume *vent air* berdampak positif terhadap pengurangan *temperature gradient*, seperti yang tampak pada gambar 4.7, dimana lokasi dengan *temperature gradient* yang terlalu tinggi sangat rentan terhadap timbulnya cacat, seperti *shrinkage* dan porositas.

Cacat *shrinkage* dan porositas dalam simulasi ini diidentifikasi dengan menggunakan *niyama criterion*, seperti yang tampak pada Gambar 4.8 dalam baris terakhir, dimana cacat tersebut ditandai dengan noktah berwarna biru. Dari hasil simulasi tampak bahwa keberadaan *vent air* memberikan dampak yang sangat positif untuk memperoleh produk *grinding ball* yang bebas cacat. Dari hasil simulasi tersebut, volume *vent air* sebesar $1.89 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ (luas penampang *vent air* dengan $\text{Ø}15.5 \text{ mm}$) pada Desain 3 menghasilkan proses pengecoran produk *grinding ball* yang bebas cacat (*sound casting*).

Namun dengan semakin bertambahnya volume *vent air*, maka nilai *yield* akan semakin rendah/buruk, seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 4.4 berikut ini.

Tabel 4.4 Nilai *yield* untuk masing-masing desain awal

No. Desain	Berat Produk (Kg)	Berat Gating System (Kg)	Berat Vent Air (Kg)	Berat Total (Kg)	Nilai Yield (%)
1	2.97	1.31	0	4.28	69.39
2	2.97	1.31	0.115	4.395	67.58
3	2.97	1.31	1.06	5.34	55.65

Walaupun hasil dari Desain 3 memberikan hasil pengecoran yang tanpa cacat, namun karena terlalu rendahnya nilai *yield* dari desain tersebut, maka perlu dilakukan suatu optimalisasi dari desain tersebut, diantaranya dengan mengubah beberapa parameter dalam desain awal di atas.

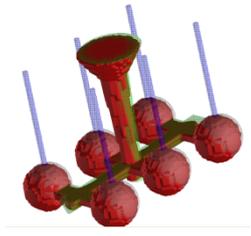
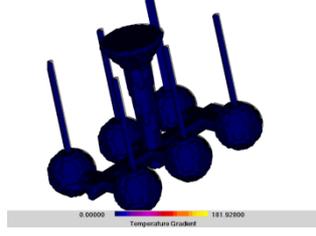
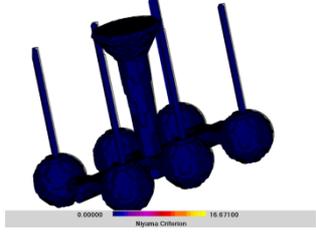
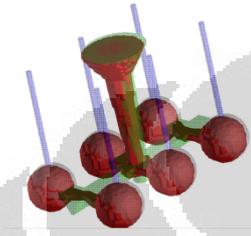
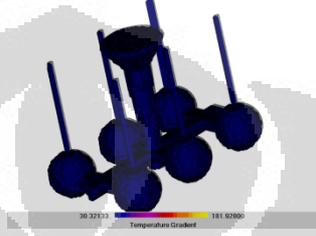
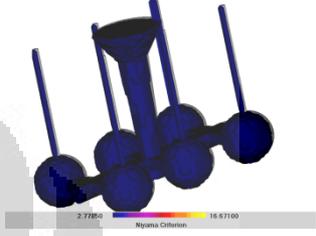
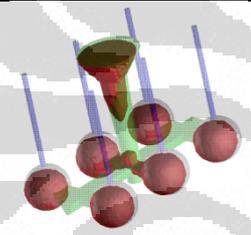
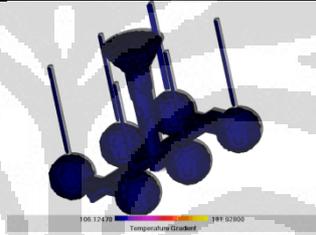
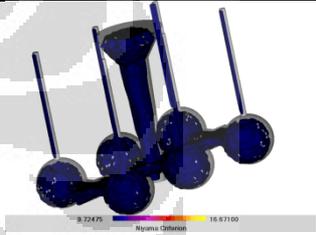
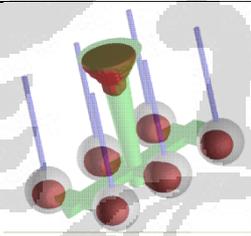
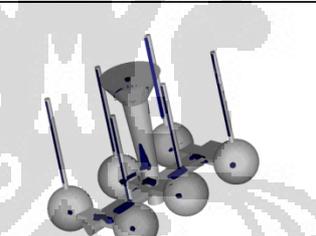
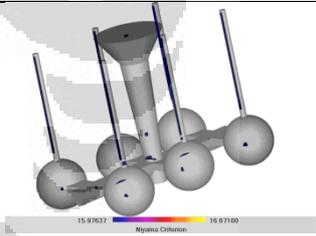
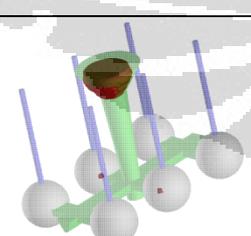
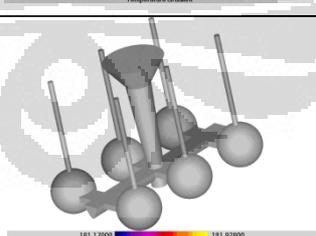
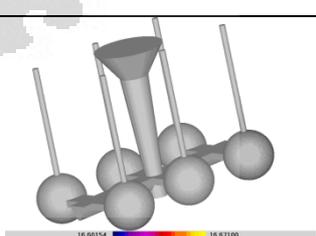
c. Optimalisasi Simulasi Proses Pengecoran Logam

Seperti yang telah diuraikan dalam penjelasan sebelumnya, bahwa keberadaan *vent air* memberikan kontribusi positif untuk menghasilkan produk *grinding ball* yang bebas cacat. Oleh karena itu, pada bagian ini akan dilakukan optimalisasi terhadap Desain 2, dengan nilai *yield* cukup tinggi (67.58%). Material *high chromium white cast iron* (ASTM A532) merupakan material dengan tingkat solidifikasi yang cukup tinggi/cepat, oleh karena itu temperatur awal/penuangan logam cair ke dalam cetakan akan menjadi parameter yang sangat penting, maka dari itu untuk mengoptimalkan Desain 2 di atas dilakukan dengan mengubah parameter temperatur penuangan (*initial/pouring temperature*) menjadi 1480 °C (2696 F) seperti yang tampak pada Gambar 4.9 di bawah ini.

	CI A532 IIA	
Thermal Conductivity	14.454	BTU/HR-FT-F
Specific Heat	0.12	BTU/LBM-F
Density	474.466	LBM/CU FT
Initial Temperature	2696	F
Solidification Temperature	2155	F
Freezing Range	225	F
Latent Heat of Fusion	120.461	BTU/LBM

Gambar 4.9 Optimalisasi parameter simulasi

Berikut ini adalah hasil proses simulasi berupa *solidification time*, *temperature gradient*, serta *niyama criterion* dari Desain 2 menggunakan parameter di atas. Dari hasil proses simulasi tersebut, seperti tampak pada Gambar 4.10 di bawah, khususnya pada *niyama criterion* tidak ditemukannya cacat pada kondisi akhir (baris terakhir) dalam simulasi tersebut, sehingga dapat dinyatakan bahwa pengubahan *initial temperature* dari 1450 °C (2642 F) menjadi 1480 °C (2696 F) cukup signifikan untuk menghasilkan produk *grinding ball* tanpa cacat .

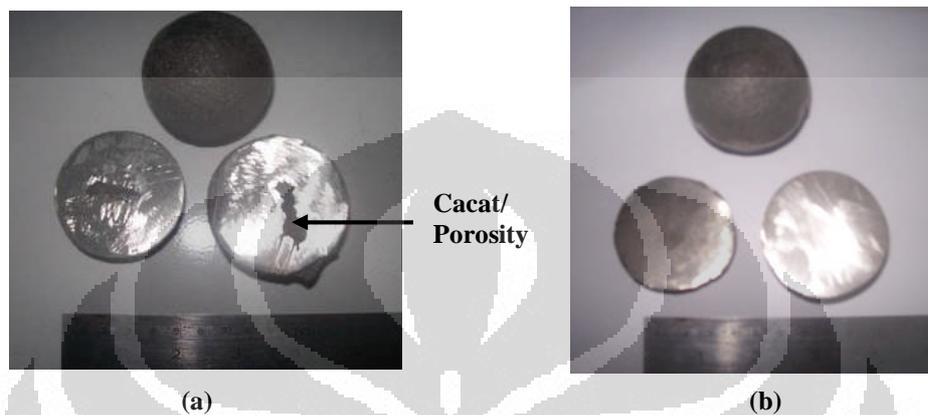
S / (%)	Simulasi Desain 2		
	<i>Solidification Time</i>	<i>Temperature Gradient</i>	<i>Niyama Criterion</i>
1/0			
2/16.7			
3/58.3			
4/91.7			
5/99.6			

Gambar 4.10 Optimalisasi simulasi desain 2

Dengan demikian parameter di atas (Gambar 4.10) akan dijadikan acuan sebagai proses pembuatan *grinding ball* dengan metode pengecoran dalam penelitian ini.

4.3 PRODUK *GRINDING BALL* HASIL PENELITIAN

Dari hasil simulasi tersebut kemudian selanjutnya dilakukan proses pengecoran logam dengan menggunakan desain dan parameter tersebut di atas. Berikut adalah foto dari produk *grinding ball* untuk beberapa desain dan parameter dari simulasi di atas.



Gambar 4.11 (a) Desain 1 dengan *pouring temperature* 1450 °C, (b) Desain 2 dengan *pouring temperature* 1480 °C

Dari kedua gambar tersebut, tampak bahwa *grinding ball*, pada Gambar 4.11 (a), dengan Desain 1 dan menggunakan parameter *pouring temperature* 1450 °C memberikan produk *grinding ball* dengan cacat rongga/*porosity* pada bagian tengah dalam bola, dimana hal ini sesuai dengan simulasi yang telah dilakukan di atas, yaitu pada Gambar 4.8 (Desain 1) di atas. Sedangkan pada Gambar 4.11 (b) tampak bahwa produk *grinding ball* tidak memiliki cacat, dimana hal tersebut sesuai dengan hasil simulasi yang telah dilakukan, seperti tampak pada Gambar 4.10, dimana produk *grinding ball* dengan Desain 2 dan parameter *pouring temperature* 1480 °C akan menghasilkan produk *grinding ball* tanpa cacat (*sound casting product*).

4.4 KARAKTERISTIK *GRINDING BALL* HASIL PENELITIAN

Dalam penelitian ini telah dilakukan pembuatan empat buah jenis *grinding ball* yang terbuat dari material *high chromium white cast iron* dengan komposisi *hypoeutectic* dengan penambahan unsur khromium (Cr), molibdenum (Mo), vanadium (V), dan boron (B) kedalam material tersebut dengan kandungan yang

berbeda untuk tiap-tiap jenis *grinding ball*. Berikut ini adalah hasil analisa komposisi kimia dari keempat jenis *grinding ball* dengan menggunakan OES (*Optical Electron Spectroscopy*).

Tabel 4.5 Komposisi kimia produk *grinding ball* hasil penelitian

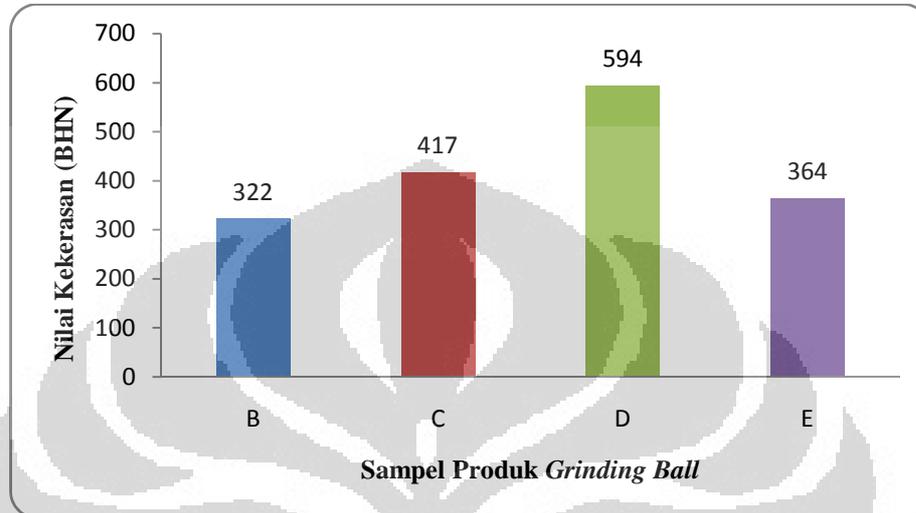
Unsur	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	V	B	Fe
Kadar (%)	Sampel B (ASTM A532-Tipe IIA)											
	2.18	0.719	0.12	0.4	0.697	0.448	13	1.38	0.055	-	-	Bal.
	Sampel C (ASTM A532-Tipe IIA + Vanadium)											
	1.94	0.725	0.12	0.18	0.621	0.491	13.1	1.29	0.057	1.307	-	Bal.
	Sampel D (ASTM A532-Tipe IIA + Vanadium + Boron)											
	1.89	0.698	0.12	0.179	0.637	0.451	13.1	1.32	0.057	1.361	0.00051	Bal.
	Sampel E (ASTM A532-Tipe IIB)											
2.12	0.382	0.12	0.4	0.526	0.589	16.5	1.55	0.061	-	-	Bal.	

Dari Tabel 4.5 di atas, tampak bahwa komposisi pada sampel B termasuk ke dalam kategori ASTM A532-Tipe IIA, sedangkan sampel E termasuk ke dalam kategori ASTM A532-Tipe IIB. Penambahan unsur vanadium dan boron dilakukan terhadap material ASTM A532-Tipe IIA, seperti yang tampak pada sampel C dan D. Masing-masing produk *grinding ball* memiliki kandungan molibdenum berkisar antara 1.3-1.5%, hal ini berbeda dengan komposisi produk *grinding ball* impor asal India yang memiliki kandungan molibdenum kurang dari 1%, dimana penambahan unsur molibdenum pada *grinding ball* hasil penelitian tersebut bertujuan untuk menghindari pembentukan fasa pearlit yang bersifat lunak, selain itu unsur molibdenum juga berperan untuk meningkatkan *hardenability* dari masing-masing material *grinding ball* hasil penelitian.

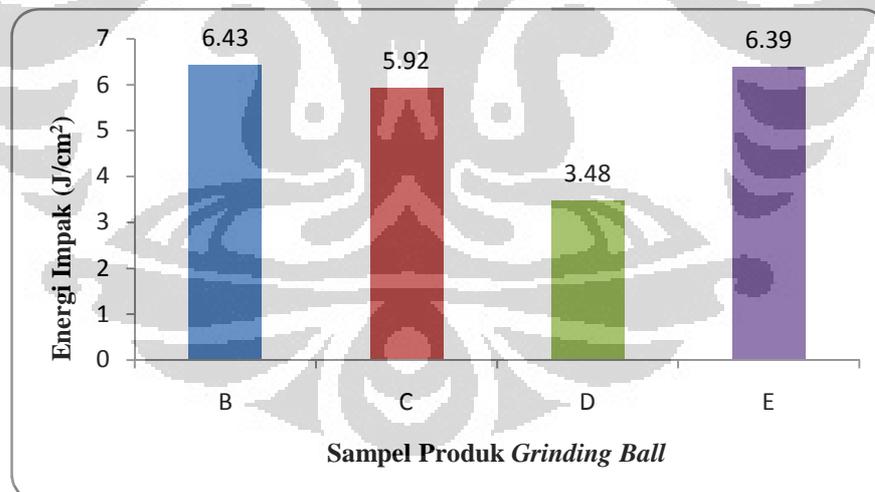
4.4.1 Pengaruh Penambahan Unsur Cr, Mo, V, dan B terhadap Nilai Kekerasan dan Ketangguhan High Chromium White Cast Iron ASTM A532-Tipe IIA dan ASTM A532-Tipe IIB pada Kondisi As-Cast

Unsur khromium, molibdenum, vanadium, dan boron merupakan unsur paduan pembentuk karbida, dimana unsur-unsur tersebut akan berikatan dengan senyawa karbon dalam logam (besi/baja) membentuk senyawa M_xC_y , dimana senyawa ini akan memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap nilai

kekerasan dan ketangguhan dari suatu material. Berikut ini adalah hasil penelitian mengenai nilai kekerasan dan ketangguhan dari sampel B, C, D, dan E dengan penambahan unsur paduan tersebut di atas, yang ditunjukkan dalam bentuk grafik batang pada Gambar 4.12 dan 4.13 di bawah ini.



Gambar 4.12 Nilai kekerasan pada kondisi *as-cast* dari produk *grinding ball* hasil penelitian

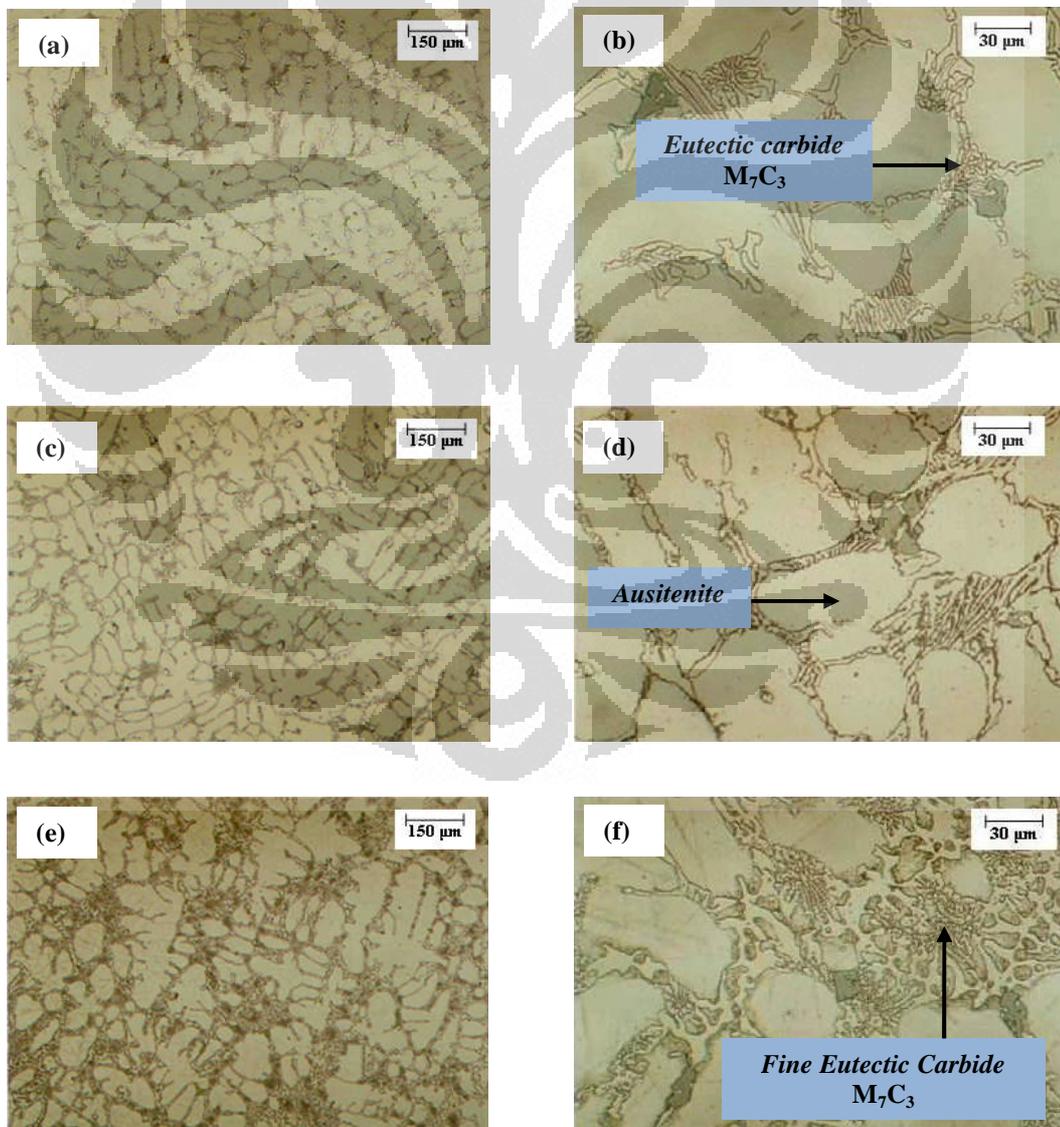


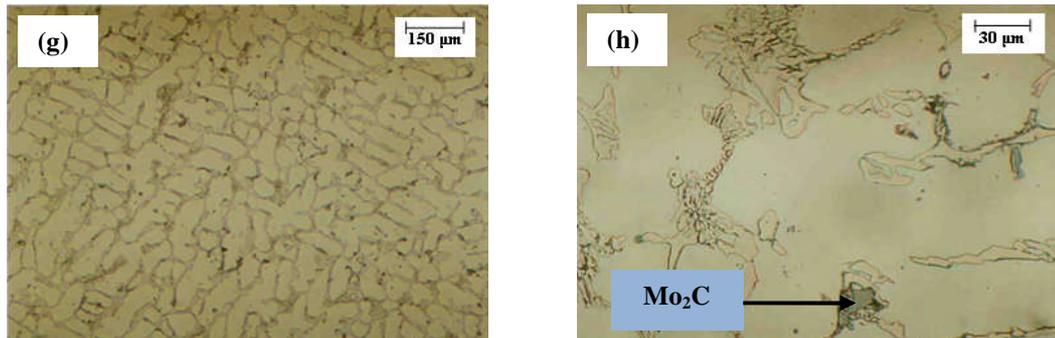
Gambar 4.13 Nilai energi impact pada kondisi *as-cast* dari produk *grinding ball* hasil penelitian

Dari hasil penelitian, seperti tampak pada Gambar 4.12 di atas tampak bahwa nilai kekerasan pada kondisi *as-cast* dari masing-masing material produk *grinding ball* mengalami peningkatan nilai kekerasan seiring dengan penambahan unsur paduan pembentuk karbida tersebut di atas. Sedangkan untuk nilai

ketangguhan, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.13 di atas, dimana nilai ketangguhan memiliki kecenderungan semakin berkurang dengan penambahan beberapa unsur paduan pembentuk karbida tersebut. Kedua hasil penelitian ini sangat sesuai dengan teori hubungan antara kekerasan dan ketangguhan, dimana hubungan antar keduanya saling berbanding terbalik.

Selain itu penambahan unsur paduan, seperti khromium, molibdenum, vanadium, dan boron juga akan memberikan struktur mikro yang berbeda-beda terhadap sampel B, C, D, dan E, seperti yang tampak pada Gambar 4.14 di bawah, dimana hal ini juga akan menentukan nilai kekerasan dan ketangguhan dari masing-masing sampel tersebut.





Gambar 4.14 Struktur mikro kondisi *as-cast* dari produk *grinding ball* hasil penelitian: (a-b) Sampel B, (b-c) Sampel C, (d-e) Sampel D, (f-g) Sampel E (etsa nital 3% dan FeCl_3)

Berikut ini akan dibahas mengenai pengaruh dari masing-masing unsur paduan pembentuk karbida (khromium, molibdenum, vanadium, dan boron) terhadap nilai kekerasan dan ketangguhan material *high chromium white cast iron* pada sampel B, C, D, dan E.

a. Pengaruh Unsur Khromium pada High Chromium White Cast Iron ASTM A532-Tipe IIA dan ASTM A532-Tipe IIB

High chromium white cast iron (1.8-3.6% C dan 11-30% Cr) merupakan material dengan karakteristik yang memiliki nilai kekerasan dan ketahanan gesek yang sangat tinggi, hal ini disebabkan oleh pembentukan senyawa karbida M_7C_3 atau $(\text{Fe,Cr, Mo})_7\text{C}_3$ yang berada diantara matriks austenit pada kondisi *as-cast*, seperti tampak pada Gambar 4.14(a, b, g, h).

Pengaruh penambahan unsur khrom terhadap peningkatan nilai kekerasan ditunjukkan oleh sampel B (ASTM A532-Tipe IIA) dan E (ASTM A532-Tipe IIB) yang memiliki kandungan khrom yang berbeda satu sama lain, dimana sampel E (16.5% Cr) memiliki nilai kekerasan yang jauh lebih tinggi, yaitu 364 BHN, dibandingkan dengan Sampel B (13.1% Cr), yaitu 322 BHN. Dari kedua sampel tersebut tampak bahwa penambahan unsur khrom sebesar 3.5% berat terhadap sampel B memberikan efek terhadap peningkatan kekerasan, seperti yang ditunjukkan oleh sampel E. Hal ini diakibatkan oleh adanya peningkatan fraksi volume karbida, seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (2.1) di atas, yaitu sebesar 18.83% dan 20.02% untuk masing-masing sampel B dan E. Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Albertin dan

Sinatora ^[12], dimana nilai kekerasan dan ketahanan aus akan semakin meningkat dengan semakin bertambahnya volume fraksi karbida hingga pada komposisi eutektik.

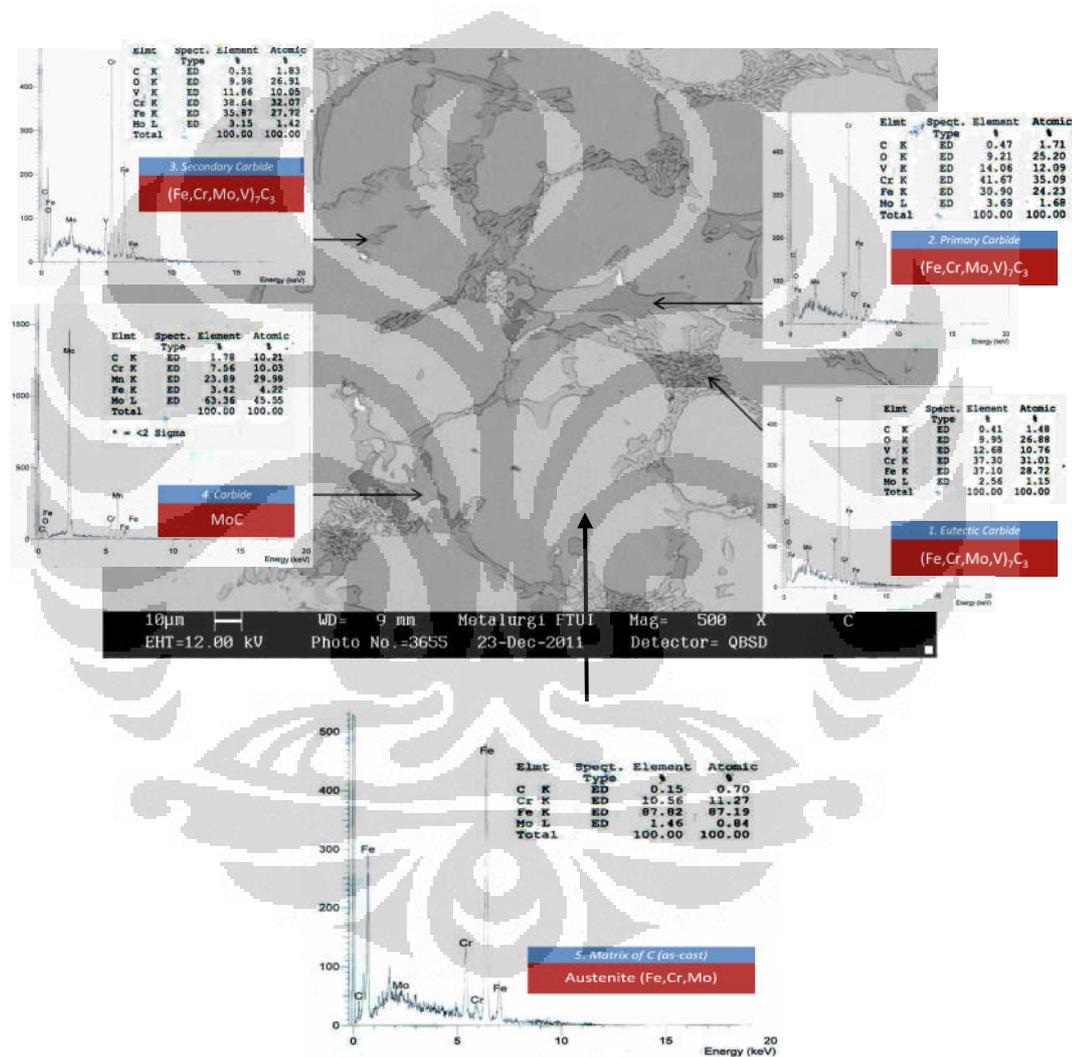
Namun penambahan unsur khrom sebesar 3.5% berat pada sampel B mengakibatkan nilai ketangguhannya semakin berkurang, yaitu 6.43 J/cm^2 menjadi 6.39 J/cm^2 (nilai ketangguhan sampel E). Dari fenomena tersebut, tampak bahwa penambahan unsur khrom pada *high chromium white cast iron* dengan komposisi *hypoeutectic* (sample B dan E) akan mengakibatkan semakin menurunnya nilai ketangguhan dari material tersebut, dimana nilai ketangguhan akan semakin berkurang dengan semakin bertambahnya fraksi volume karbida. Hal ini berbeda dengan material *high chromium white cast iron* pada komposisi *hypereutectic*, dimana penambahan unsur khrom dapat meningkatkan nilai ketangguhan material tersebut yang diakibatkan oleh pergeseran komposisi *eutectic* ke daerah sebelah kiri pada diagram fasa *high chromium white cast iron*, seperti yang tampak pada Gambar 2.12.

b. Pengaruh Unsur Molibdenum pada High Chromium White Cast Iron ASTM A532-Tipe IIA dan ASTM A532-Tipe IIB

Pengaruh unsur molibdenum terhadap peningkatan nilai kekerasan, diakibatkan oleh pembentukan senyawa Mo_2C (50% berat) diantara karbida *eutectic* M_7C_3 pada struktur mikro, yang ditunjukkan oleh warna abu-abu pada Gambar 4.14 (b,d,f,h) yang diperkuat oleh hasil analisa EDS pada Gambar 4.15 di bawah. Keberadaan senyawa Mo_2C tidak akan mempengaruhi fraksi volume karbida ^[34], namun efek peningkatan terhadap nilai kekerasan disebabkan oleh tingginya nilai kekerasan Mo_2C pada struktur mikro tersebut.

Selain itu tampak dari hasil SEM (Gambar 4.15) di bawah, terdapat sejumlah kecil karbida sekunder (*secondary carbide*) yang berada ditengah matriks dan kemungkinan terbentuk saat proses solidifikasi berlangsung akibat proses pendinginan yang berlangsung lambat dalam cetakan pasir. Karbida sekunder ditunjukkan oleh titik 3 pada Gambar 4.15 di bawah ini. Dari hasil analisa EDS, tampak bahwa karbida sekunder memiliki komposisi unsur (secara kuantitatif) yang hampir sama dengan karbida primer (titik 2), sehingga kemungkinan besar karbida sekunder merupakan senyawa karbida berupa M_7C_3 .

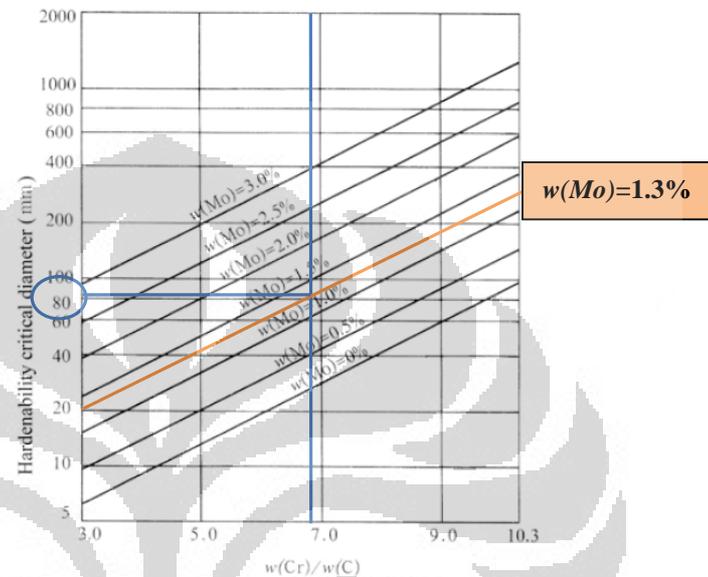
Hal ini didukung oleh hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Pearce [44], dimana pada material *high chromium white cast iron* dengan kandungan khrom kurang dari 20%, maka senyawa karbida sekunder yang terbentuk adalah M_7C_3 , sedangkan pada kandungan khrom lebih dari 20%, maka senyawa karbida yang akan terbentuk adalah $M_{23}C_6$. Hal tersebut juga diperkuat oleh diagram fasa (15% Cr) pada Gambar 2.12 (b), dimana pada diagram tersebut dengan kandungan 2.2% C maka tidak akan dijumpai senyawa karbida $M_{23}C_6$, melainkan M_7C_3 .



Gambar 4.15 Hasil analisa SEM-EDS kondisi *as-cast* sampel C

Seperti yang tampak pada Gambar 4.15 tersebut, unsur molibdenum juga larut dalam matriks (25% berat) dan karbida primer atau eutektik (25% berat) membentuk senyawa karbida kompleks, yaitu $(Fe, Cr, Mo)_7C_3$, walaupun jumlah

kelarutannya cukup kecil, namun keberadaannya dalam matriks tersebut akan memberikan efek yang cukup signifikan terhadap peningkatan *hardenability* pada material *high chromium white cast iron*, seperti yang tampak pada diagram dalam Gambar 4.16 di bawah.



Gambar 4.16 Pengaruh unsur molibdenum terhadap *hardenability* dari material *high chromium white cast iron*

Dengan mengacu pada diagram *hardenability* (Gambar 4.16) tersebut, maka dengan nilai rerata $w(Cr)/w(C)$ dari produk *grinding ball* hasil penelitian, yaitu sebesar 6.8, dan nilai rerata $w(Mo)$ adalah 1.3%, maka nilai *hardenability* diameter kritisnya adalah 80 mm. Dengan demikian untuk diameter produk *grinding ball* hasil penelitian dengan diameter 50 mm memiliki nilai dibawah diameter kritis, sehingga apabila dilakukan proses perlakuan panas, maka produk *grinding ball* tersebut akan memiliki struktur yang homogen dari permukaan hingga ke inti produk.

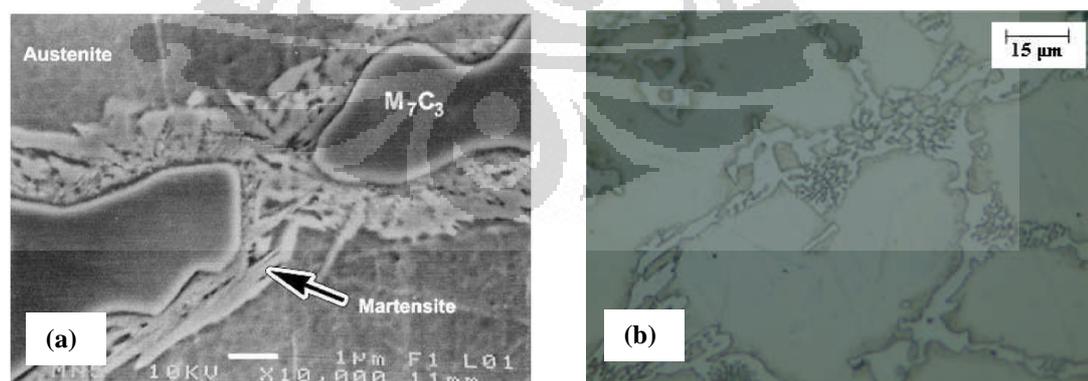
c. Pengaruh Unsur Vanadium pada High Chromium White Cast Iron ASTM A532-Tipe IIA

Penambahan unsur vanadium sebesar 1.3% berat pada material *high chromium white cast iron* ASTM A532-Tipe IIA, seperti tampak pada komposisi sampel C dan D, tidak menyebabkan terjadinya pembentukan karbida vanadium

(VC), melainkan unsur vanadium larut di dalam karbida dan matriks, seperti yang tampak pada Gambar 4.15, membentuk senyawa karbida M_7C_3 atau $(Fe, Cr, Mo, V)_7C_3$. Hasil penelitian ini juga diperkuat oleh penelitian sebelumnya, dimana senyawa VC hanya akan terbentuk pada *high chromium white cast iron* apabila kandungan vanadium dalam material tersebut minimal lebih dari 3% berat^[45].

Larutnya vanadium dalam karbida primer atau eutektik membentuk senyawa karbida kompleks, yaitu $(Fe, Cr, Mo, V)_7C_3$, yang memiliki nilai kekerasan jauh lebih tinggi dibandingkan dengan karbida $(Fe, Cr, Mo)_7C_3$, sehingga dapat memberikan efek peningkatan terhadap nilai kekerasan dari material tersebut. Hal inilah yang menyebabkan nilai kekerasan sampel C pada kondisi *as-cast*, yaitu 417 BHN, jauh lebih tinggi dibandingkan sampel B dan E.

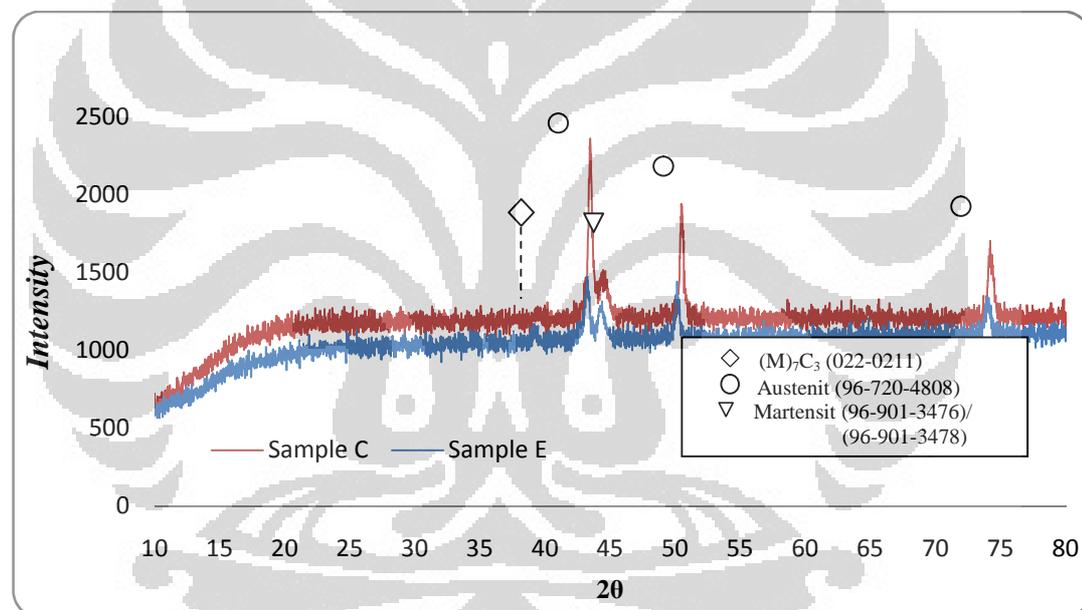
Selain itu keberadaan unsur *vanadium* dalam matriks akan memberikan peningkatan terhadap sifat *hardenability* dari material *high chromium white cast iron*^[28], dimana hal ini dapat menyebabkan meningkatnya nilai *martensite start* (Ms), sehingga struktur martensit akan muncul dalam kondisi *as-cast*. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Bedolla et al.^[32], bahwa pada material *high chromium white cast iron* dengan penambahan unsur vanadium, selain struktur karbida eutektik dan austenit, struktur martensit juga akan terbentuk pada kondisi *as-cast*, yaitu pada *interface eutectic carbide* atau *primary carbide*, seperti yang tampak pada Gambar 4.17(a) di bawah.



Gambar 4.17 (a) Struktur mikro kondisi *as-cast* dari produk *grinding ball*: (a) Bedolla, et.al.^[32]; 2.58C-16.9Cr-1.98Mo-1.98V (b) Sample D: 1.94C - 13.1Cr - 1.29Mo - 1.31V

Terbentuknya struktur martensit diakibatkan oleh unsur karbon dan khromium pada matriks yang berdifusi membentuk karbida eutektik dan karbida primer, sehingga menyebabkan karbon terlarut dalam matriks austenit disekitar *interface* akan berkurang dan memudahkan struktur austenit berubah menjadi martensit pada saat proses solidifikasi dan pendinginan secara lambat di dalam cetakan pasir. Dari hasil penelitian, struktur martensit tersebut tampak dengan jelas dari hasil pengamatan mikroskop optik pada sampel D pada kondisi *as-cast* dengan perbesaran 1000 x, seperti yang tampak pada Gambar 4.17(b) di atas.

Hal ini diperkuat oleh hasil analisa XRD pada sampel C, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.18 di bawah, dimana intensitas struktur martensit pada sampel C jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sampel E.



Gambar 4. 18 Hasil analisa XRD sampel C dan E pada kondisi *as-cast* (Lampiran 10,12)

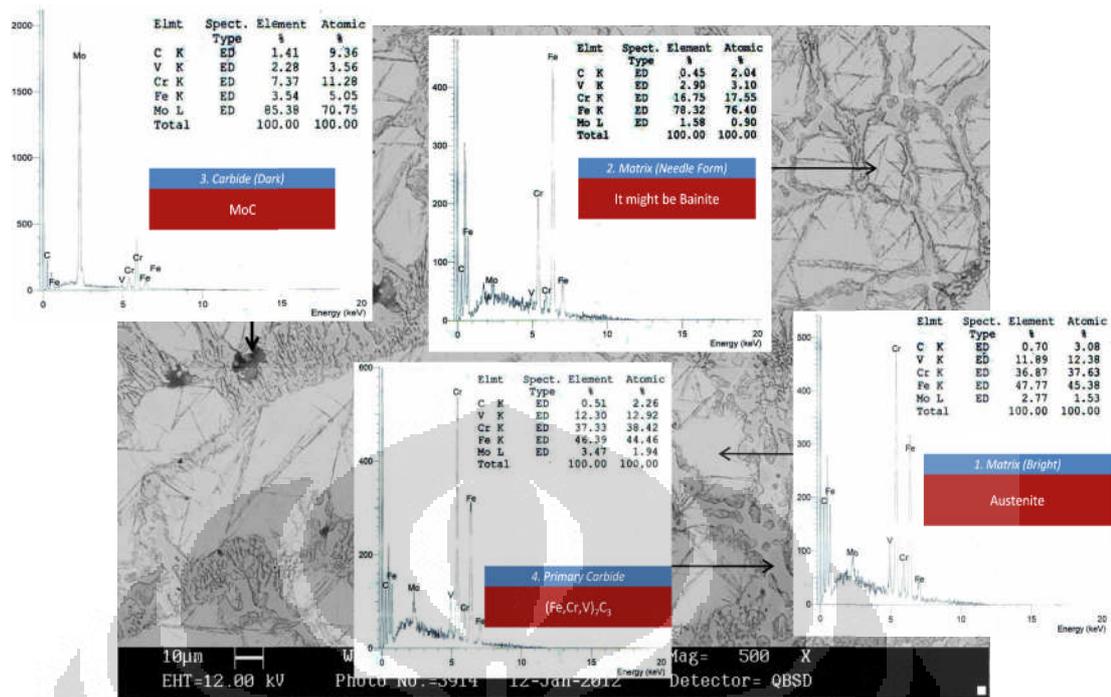
Sama seperti halnya molibdenum, penambahan unsur vanadium pada *high chromium white cast iron* tidak akan menambah fraksi volume karbida, sehingga kemungkinan besar penyebab rendahnya nilai ketangguhan sampel C, yaitu 5.92 J/cm² dibandingkan dengan sampel E adalah dikarenakan keberadaan struktur martensit dengan pada sampel C yang memiliki intensitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel E.

d. Pengaruh Unsur Boron pada High Chromium White Cast Iron ASTM A532-Tipe IIA

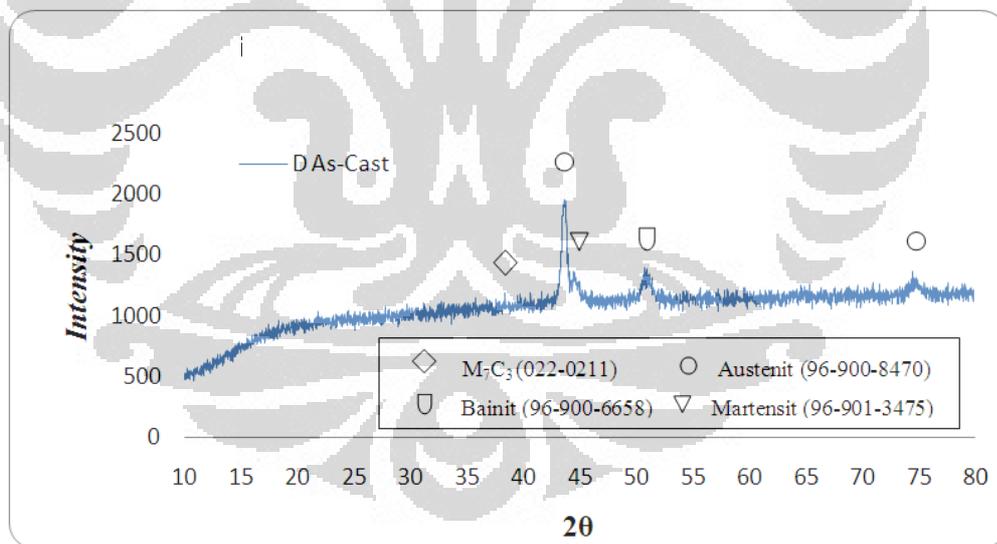
Sama seperti halnya molibdenum, unsur boron juga berperan untuk mencegah terjadinya pembentukan pearlit sehingga mampu memberikan dampak positif terhadap ketahanan aus yang cukup baik pada material *high chromium white cast iron* [46]. Perbedaan struktur mikro terjadi pada material *high chromium white cast iron* ASTM A532-Tipe IIA dengan penambahan unsur boron, seperti yang tampak pada sampel D, seperti tampak pada Gambar 4.14 (e, f), dimana struktur jarum seperti *upper bainite* tampak tersebar diantara matriks austenit. Hal ini terjadi akibat dari efek penambahan unsur vanadium dan boron secara bersamaan pada sampel D, dimana struktur bainit ini tidak dijumpai pada sampel C dengan kandungan vanadium yang sama seperti pada sampel D. Penambahan unsur vanadium dan boron secara bersamaan, ternyata dapat meningkatkan sifat *hardenability* dari material sampel D tersebut secara signifikan, sehingga mengakibatkan naiknya temperatur Ms dengan cukup tinggi dan menyebabkan munculnya *upper bainite* dalam matriks austenit pada kondisi *as-cast*, seperti yang tampak jelas dari hasil analisa SEM-EDS (Gambar 4.19) di bawah ini. Dari hasil analisa EDS, tampak bahwa struktur berbentuk jarum (bainit) tersusun dari beberapa unsur, yaitu C, V, Cr, Fe, dan Mo.

Diduga keberadaan *upper bainite* inilah yang menyebabkan tingginya nilai kekerasan sampel D, yaitu 594 BHN, menempati urutan tertinggi diantara kekerasan sampel B, C, dan E. *Upper bainite* memiliki sifat keras, namun getas, dimana ketangguhannya jauh lebih buruk jika dibandingkan dengan *lower bainite* yang memiliki struktur jauh lebih halus. Hal ini pula lah yang menyebabkan sampel D memiliki nilai ketangguhan sebesar 3.48 J/cm^2 , menempati urutan terendah diantara nilai ketangguhan sampel lainnya.

Dari hasil analisa EDS, seperti tampak pada Gambar 4.19 di bawah, unsur boron tidak dapat terdeteksi, hal ini dikarenakan sangat kecilnya kandungan unsur boron dalam sampel D tersebut, namun dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Zeytin, et al. [14], menyatakan bahwa penambahan unsur boron sebesar 0.5% pada *high chromium white cast iron* akan meningkatkan nilai kekerasan material tersebut melalui pembentukan senyawa karbida $\text{Fe}_{23}(\text{C},\text{B})_6$.



Gambar 4.19 Hasil analisa SEM-EDS kondisi *as-cast* sampel D



Gambar 4.20 Hasil analisa XRD sampel D pada kondisi *as-cast* (Lampiran 11)

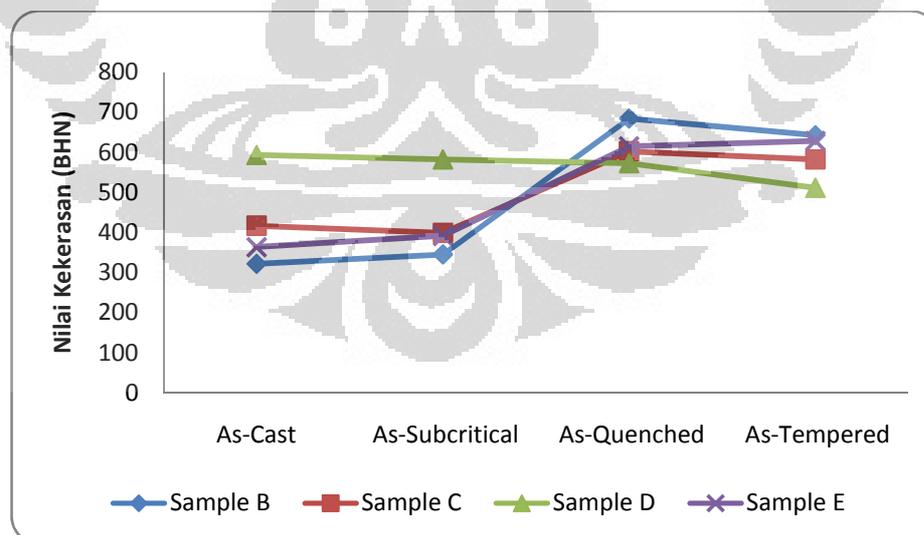
Namun dari hasil analisa XRD pada kondisi *as-cast* dari sampel D (Gambar 4.20), juga tidak ditemukan keberadaan senyawa $\text{Fe}_{23}(\text{C,B})_6$, sehingga dapat dinyatakan bahwa penambahan unsur boron sebesar 0.00051% bersamaan dengan penambahan unsur vanadium sebesar 1.361% hanya akan memberikan

peningkatan kekerasan melalui mekanisme pembentukan struktur *upper bainite* pada kondisi *as-cast*.

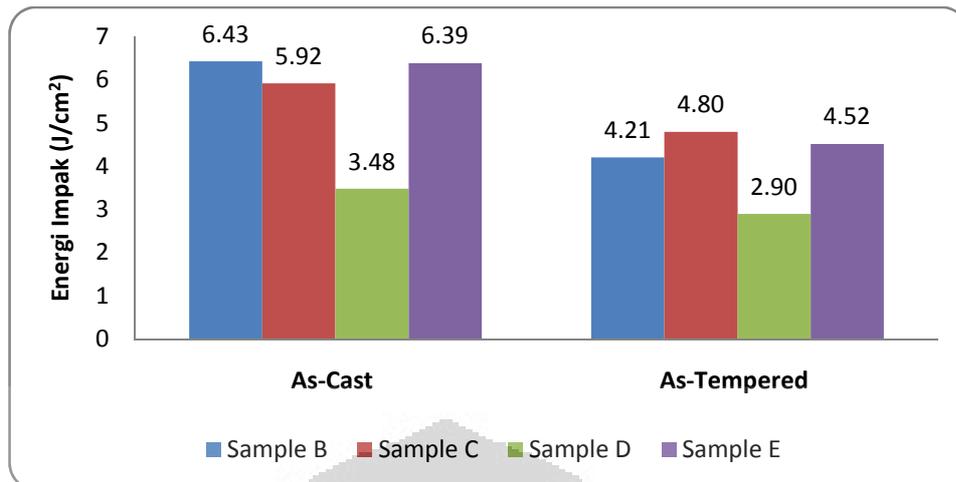
Selain itu dari Gambar 4.14(f) sebelumnya, tampak bahwa sampel D memiliki *cluster* karbida eutektik yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan sample B, C, dan E. Hal ini dikarenakan peran boron sebagai *grain refiner* membuat struktur karbida tersebut menjadi lebih halus dan hal ini juga akan memberikan kontribusi terhadap tingginya nilai kekerasan dari sampel D. Pada material besi/baja, vanadium juga dapat berperan sebagai *grain refiner* (0.1-0.5% V), namun pada sampel C, peran vanadium sebagai *grain refiner* tidak tampak, sehingga dapat dinyatakan bahwa efek boron sebagai *grain refiner* dalam *high chromium white cast iron* akan memberikan dampak yang jauh signifikan jika dibandingkan dengan unsur vanadium ^[28].

4.4.2 Pengaruh Perlakuan Panas terhadap Nilai Kekerasan dan Ketangguhan *High Chromium White Cast Iron*

Proses perlakuan panas pada *high chromium white cast iron* dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik, terutama nilai kekerasan untuk memperoleh karakteristik ketahanan gesek yang optimal.



Gambar 4. 21 Nilai kekerasan produk grinding ball hasil penelitian pada kondisi *as-heat treated*



Gambar 4.22 Nilai energi impact produk grinding ball hasil penelitian pada kondisi *as-cast* dan *as-tempered*

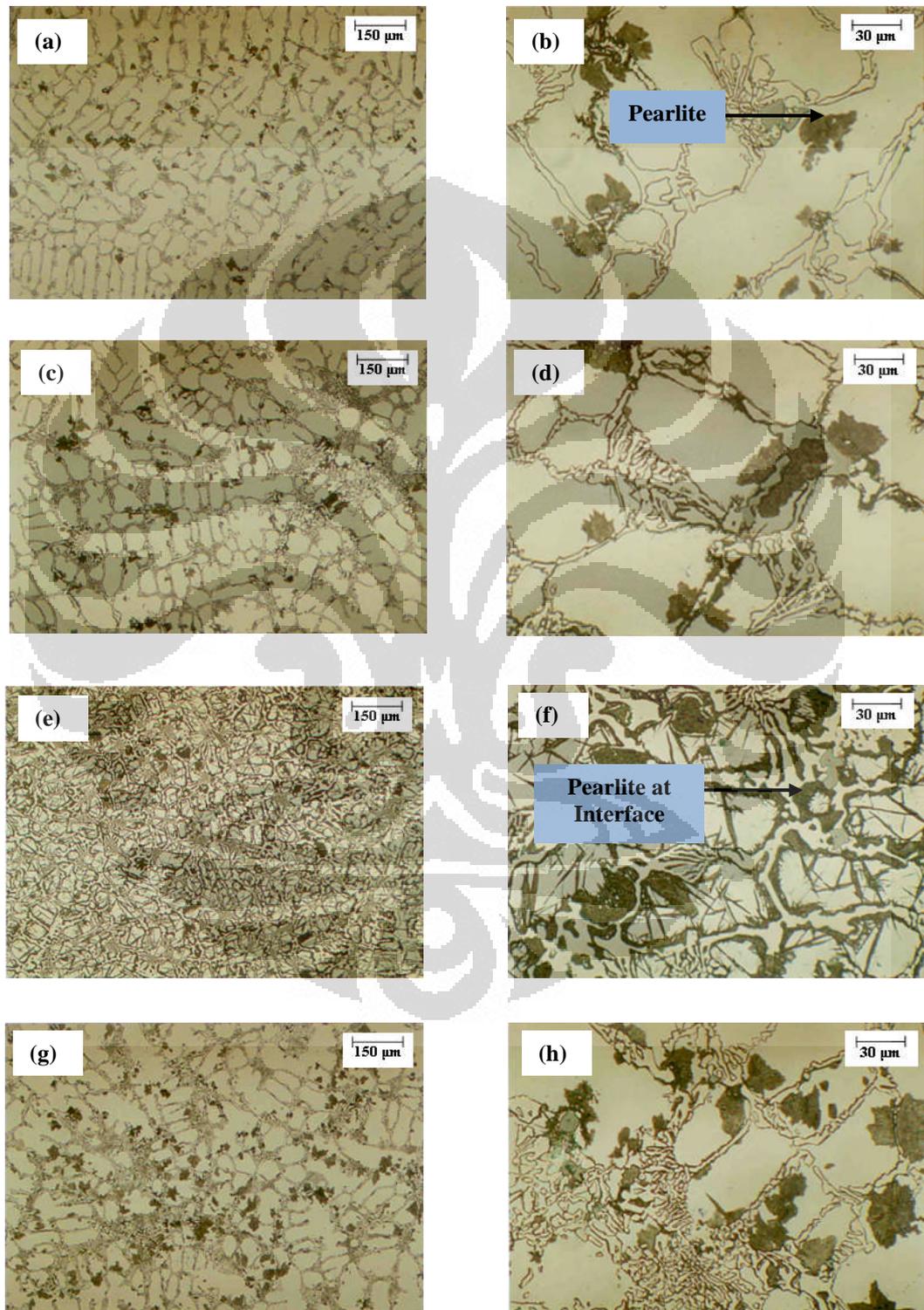
Pada penelitian ini telah dilakukan serangkaian proses perlakuan panas berupa *subcritical heat treatment*, *hardening* (austenisasi dilanjutkan dengan *quenching*), dan *tempering*. Gambar 4.21 dan 4.22 di atas adalah hasil penelitian berupa nilai kekerasan dan ketangguhan dari sampel B, C, D, dan E, setelah dilakukan serangkaian proses perlakuan panas tersebut di atas.

Berikut akan dibahas mengenai pengaruh serangkaian proses perlakuan panas tersebut terhadap *high chromium white cast iron* dalam penelitian ini.

a. Subcritical Heat Treatment

Subcritical heat treatment merupakan sebuah metode perlakuan panas yang bertujuan untuk menghilangkan austenit sisa pada material *high chromium white cast iron*, dimana proses pemanasan dilakukan pada temperatur di bawah A_1 , yaitu 500-700 °C. Pada penelitian ini telah dilakukan *subcritical heat treatment* pada kondisi *as-cast*, yaitu dengan memanaskan sampel B, C, D, dan E pada temperatur 700 °C selama 1 jam, setelah itu dilanjutkan dengan pendinginan udara terbuka (*free convection*). Berikut ini adalah Gambar 4.23, yang menunjukkan struktur mikro dari sampel B, C, D, dan E setelah dilakukan *subcritical heat treatment*.

Dari hasil penelitian, seperti tampak pada Gambar 4.21 di atas, bahwa nilai kekerasan untuk sampel B dan E sedikit mengalami peningkatan nilai kekerasan dari kondisi *as-cast* setelah diberi perlakuan *subcritical heat treatment*.



Gambar 4.23 Struktur mikro kondisi *as-subcritical* dari produk *grinding ball* hasil penelitian: (a-b) Sampel B, (b-c) Sampel C, (d-e) Sampel D, (f-g) Sampel E (nital 3% dan FeCl_3)

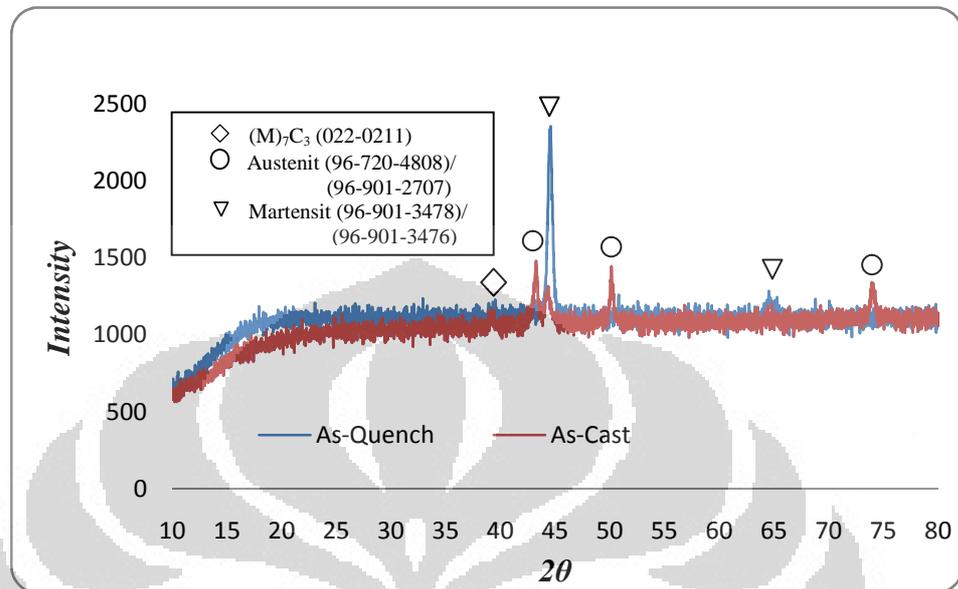
Hasil ini cukup berbeda dengan sampel C dan D, dimana nilai kekerasannya cenderung menurun. Meningkatnya nilai kekerasan dari sampel B dan E, dikarenakan terbentuknya struktur pearlit diantara matriks austenit, seperti yang tampak pada Gambar 4.23 (b, h) di atas, dimana matriks pearlit memiliki nilai kekerasan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan matriks austenit. Pada kondisi *as-cast*, *subcritical heat treatment* bertujuan untuk mengubah struktur austenit jenuh karbon yang terbentuk akibat proses solidifikasi menjadi struktur pearlit, transformasi ini sangat diperlukan sebelum dilakukan proses *hardening* (austenisasi dan *quenching*), karena apabila struktur austenit jenuh pada kondisi *as-cast* diberi perlakuan *hardening*/austenisasi, maka akan terbentuk austenit sisa yang jauh lebih stabil dari sebelumnya, dimana austenit tersebut tidak akan dengan mudah untuk bertransformasi menjadi martensit saat dilakukan proses tempering^[47]. Dari Gambar 4.23 juga tampak bahwa inti pearlit mulai terbentuk pada *interface* karbida khrom, yang kemudian tumbuh bergerak menuju matriks.

Menurunnya nilai kekerasan sampel C dan D, dikarenakan struktur martensit yang terbentuk pada *interface* karbida khrom berubah menjadi pearlit, seperti yang tampak pada Gambar 4.23(f), dimana nilai kekerasan pearlit jauh lebih rendah dibandingkan dengan martensit. Struktur martensit dengan kristal berbentuk *body centre tetragonal* (BCT) merupakan struktur yang metastabil, sehingga struktur ini dapat dengan mudah berubah menjadi struktur pearlit pada temperatur pemanasan tertentu.

b. Hardening (Austenisasi dan Quenching)

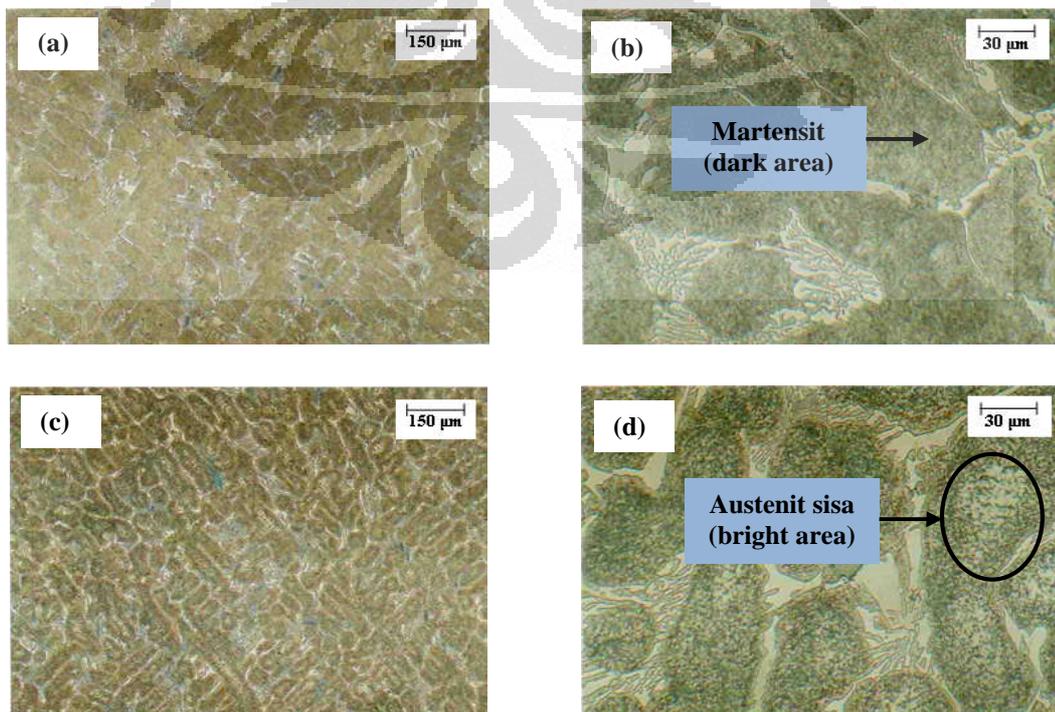
Proses (*thermal*) *hardening* merupakan proses perlakuan panas yang bertujuan untuk meningkatkan nilai kekerasan suatu material melalui pembentukan struktur martensit. Pada penelitian ini telah dilakukan proses *hardening*, meliputi proses austenisasi pada temperatur 950 °C selama 5 jam (dengan *preheating* pada temperatur 650 °C selama 30 menit) yang dilanjutkan dengan proses *quenching* dengan menggunakan udara paksa (*fan*) dengan kecepatan udara 5.5 m/s. Dari hasil penelitian (Gambar 4.21) tampak bahwa terjadi peningkatan nilai kekerasan yang cukup signifikan dari sampel B, C, dan E, tentunya hal ini disebabkan oleh terjadinya perubahan fasa matriks dari austenit

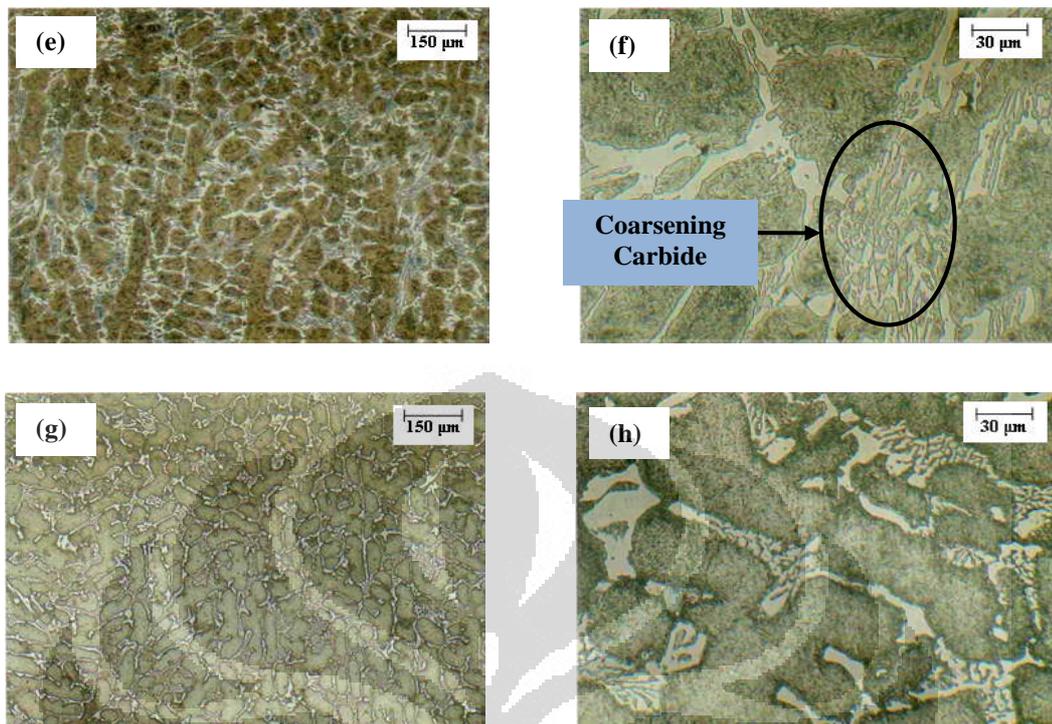
menjadi martensit seperti yang tampak jelas pada hasil analisa XRD pada sampel E di bawah ini (Gambar 4.24).



Gambar 4.24 Analisa XRD sampel E pada kondisi *as-cast* dan *as-quenched* (Lampiran 12, 15)

Hal tersebut juga diperkuat oleh hasil analisa metalografi/struktur mikro (Gambar 4.25) di bawah ini. Dari gambar tersebut juga tampak adanya struktur austenit sisa yang terlihat jelas berada diantara struktur martensit dalam matriks pada masing-masing sampel.

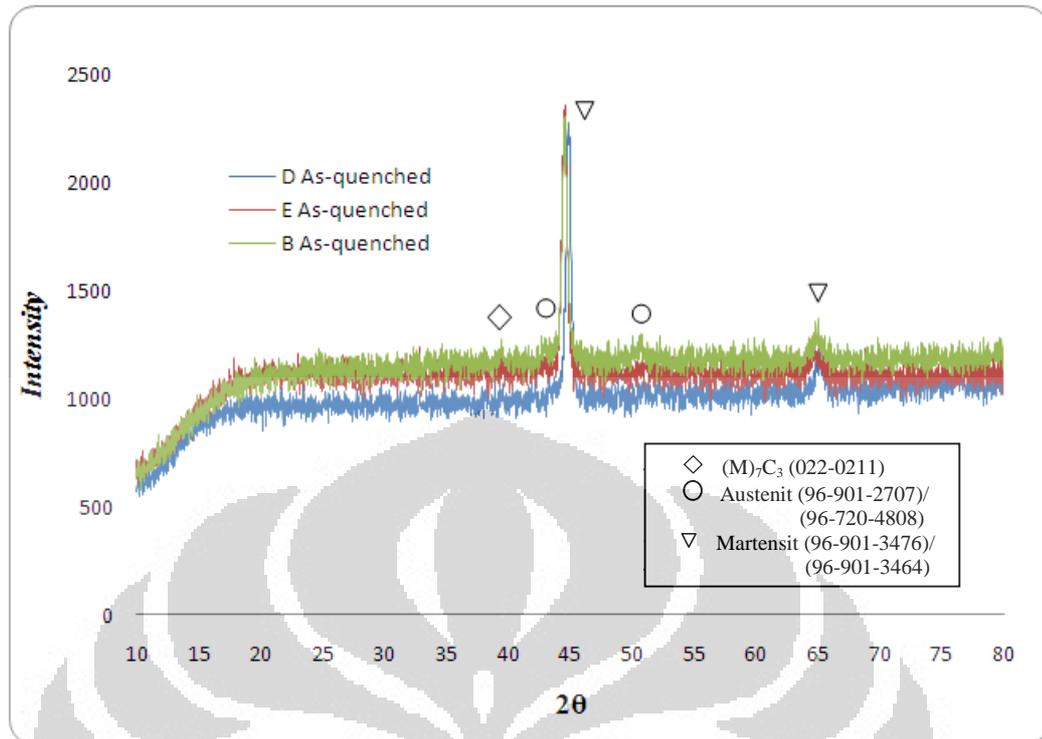




Gambar 4.25 Struktur mikro kondisi *as-quenched* dari produk *grinding ball* hasil penelitian: (a-b) Sampel B, (b-c) Sampel C, (d-e) Sampel D, (f-g) Sampel E (Nital 3% dan FeCl_3)

Keberadaan austenit sisa, yang bersifat lunak, dapat menyebabkan kekerasan yang diperoleh melalui proses *hardening* menjadi tidak maksimal. Nilai kekerasan tertinggi pada kondisi *as-quenched* dimiliki oleh sampel B, yaitu 685 BHN, dimana hal ini menunjukkan intensitas martensit dari sampel tersebut jauh lebih besar atau intensitas austenit sisa yang jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan sampel C dan E.

Sampel D memiliki nilai kekerasan *as-quenched* terendah, yaitu 573 BHN. Hal yang berbeda terjadi pada sampel D, dimana terjadi penurunan nilai kekerasan walaupun pada Gambar 4.25(f) tampak pula matriks martensit diantara karbida khrom, sehingga kemungkinan besar penurunan nilai kekerasan ini disebabkan oleh terjadinya *coarsening carbide*, seperti yang tampak pada Gambar 4.25(f) tersebut.

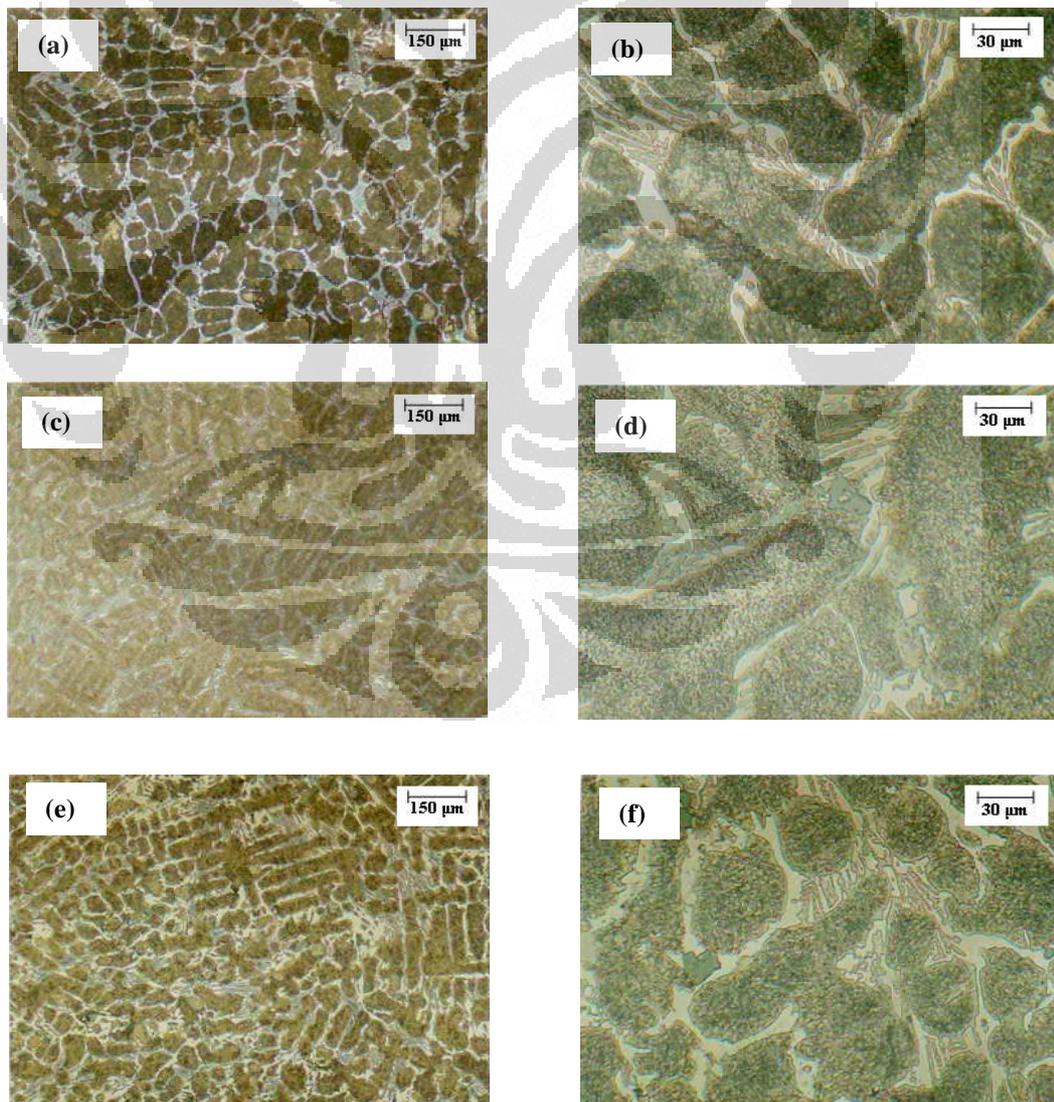


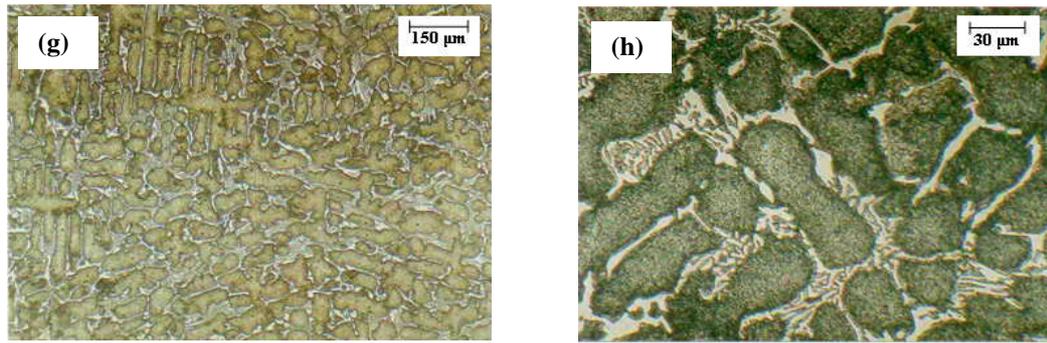
Gambar 4.26 Analisa XRD sampel B, D, dan E pada kondisi *as-quenched* (Lampiran 13-15)

Tampak dari hasil analisa XRD pada Gambar 4.26 di atas, bahwa sampel D dengan kandungan karbon serta khrom yang hampir sama dengan sampel B, ternyata memiliki intensitas karbida khrom yang jauh lebih rendah, hal ini menjadi salah satu penyebab rendahnya nilai kekerasan sampel D pada kondisi *as-quenched*. Selain adanya fenomena *coarsening carbide*, hal ini kemungkinan besar juga disebabkan oleh adanya disolusi karbida dalam sampel D. Ada beberapa hal yang dapat menyebabkan terjadinya *coarsening carbide* dan disolusi karbida, diantaranya adalah: (1) Tingginya temperatur austenisasi, dan (2) lamanya waktu tahan pada proses austenisasi. Penambahan unsur vanadium dan boron ke dalam sampel D dapat merubah karakteristik diagram fasa dari material *high chromium white cast iron*, diantaranya adalah temperatur austenisasi (A_1) dan dari fenomena disolusi karbida tersebut dapat diambil suatu kemungkinan bahwa penambahan kedua unsur tersebut dapat menurunkan temperatur austenisasi pada diagram fasa dari material tersebut. Selain itu larutnya unsur vanadium dan boron dalam karbida khrom, kemungkinan juga akan menyebabkan berubahnya karakteristik dari karbida khrom dalam material tersebut.

c. *Tempering*

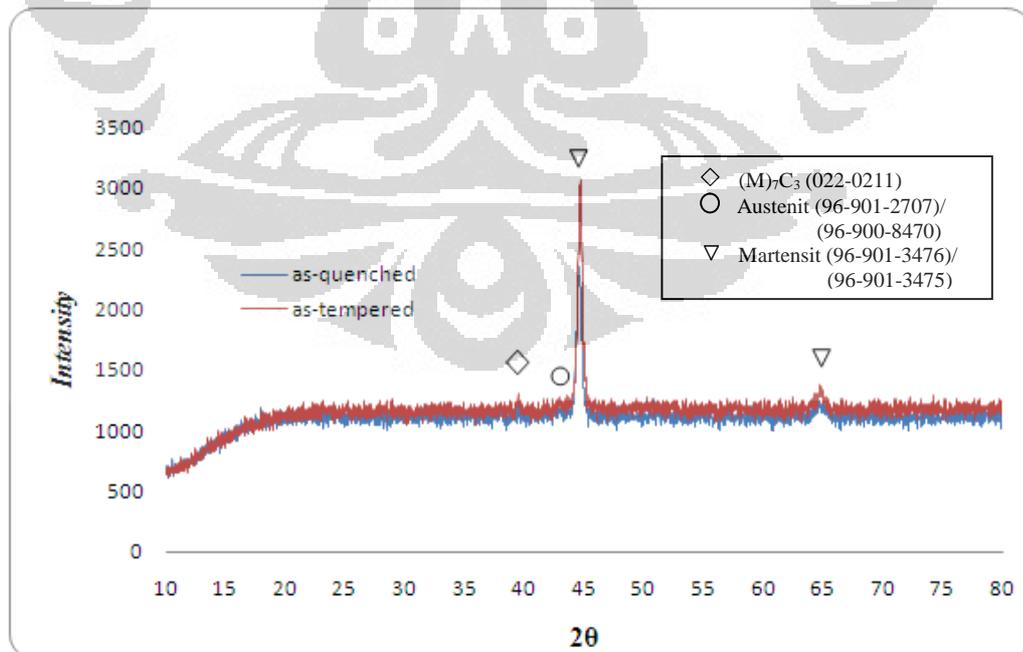
Proses *tempering* pada penelitian ini dilakukan pada temperatur 250 °C selama 1 jam, dilanjutkan dengan pendinginan udara bebas. Dari hasil penelitian, Gambar 4.21, tampak bahwa nilai kekerasan dari sampel B, C, dan D mengalami penurunan setelah diberi perlakuan *tempering*, dimana proses ini bertujuan untuk mengembalikan sifat ketangguhan material setelah diberi perlakuan *quenching* dan juga untuk menghilangkan tegangan sisa yang timbul akibat proses *quenching* tersebut, dimana tegangan sisa ini akan terus terakumulasi terutama pada saat pemakaian dalam aplikasi pembebanan, sehingga akan menimbulkan retak hingga terjadinya perpatahan^[48]. Berikut ini adalah gambar struktur mikro dari tiap-tiap sampel pada kondisi *as-tempered*.





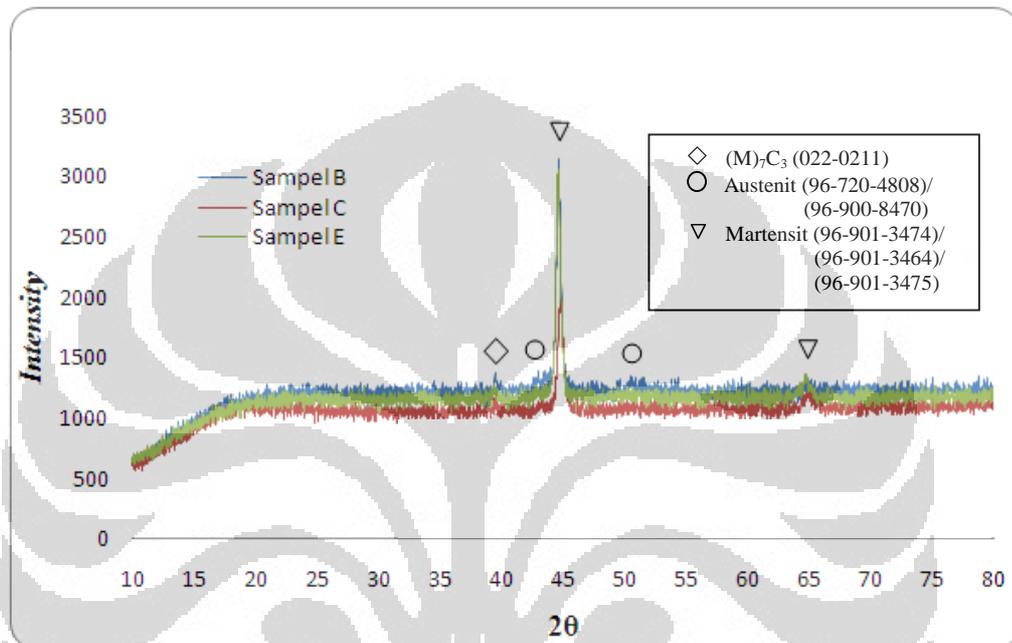
Gambar 4.27 Struktur mikro kondisi *as-tempered* dari produk *grinding ball* hasil penelitian: (a-b) Sampel B, (b-c) Sampel C, (d-e) Sampel D, (f-g) Sampel E (Nital 3% dan FeCl_3)

Dari keempat sampel tersebut, tampak sampel E mengalami sedikit kenaikan nilai kekerasan, hal ini kemungkinan disebabkan oleh adanya austenit sisa yang berubah menjadi martensit pada saat proses tempering berlangsung, seperti yang tampak pada Gambar 4.27 (h) dimana warna pada matriks tampak lebih gelap jika dibandingkan Gambar 4.25 (h). Hal ini juga diperkuat oleh analisa XRD, seperti yang tampak pada Gambar 4.28, dimana sampel E pada kondisi *as-tempered* memiliki intensitas martensit yang lebih tinggi dibandingkan pada kondisi *as-quenched*.

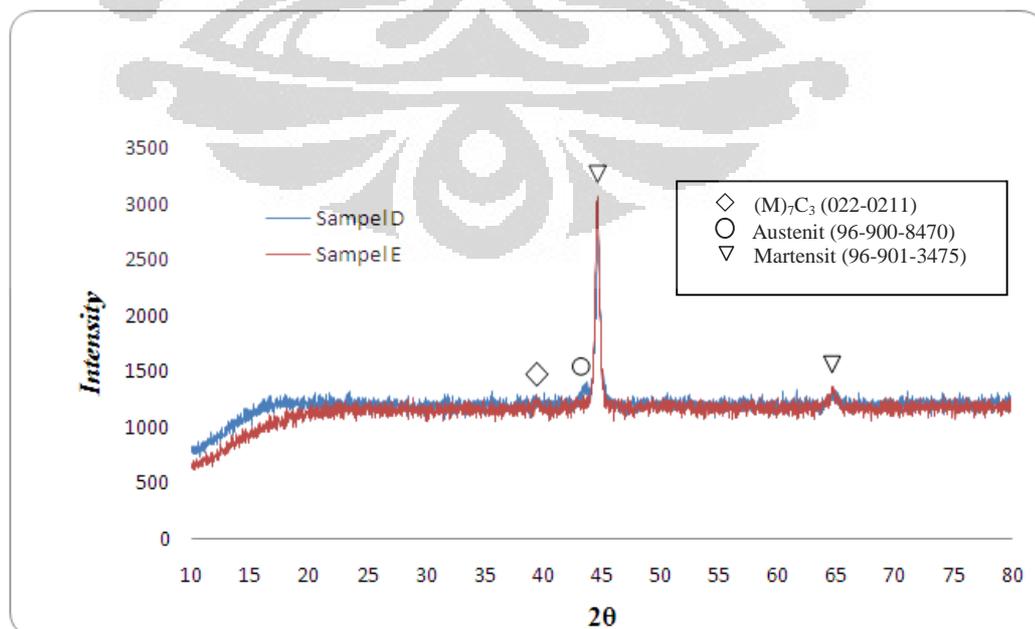


Gambar 4.28 Analisa XRD sampel E pada kondisi *as-quenched* dan *as-tempered* (Lampiran 15, 19)

Dari Gambar 4.22, tampak bahwa nilai ketangguhan dari sampel C, yaitu 4.8 J/cm² memiliki nilai tertinggi diantara keempat sampel lainnya, hal ini dikarenakan sampel C memiliki intensitas martensit yang lebih rendah dibandingkan sampel lainnya, seperti yang ditunjukkan dari hasil analisa XRD pada Gambar 4.29 di bawah ini.



Gambar 4.29 Hasil analisa XRD sampel B, C, dan E pada kondisi *as-tempered* (Lampiran 16-17, 19)



Gambar 4.30 Hasil analisa XRD sampel D dan E pada kondisi *as-tempered* (Lampiran 18-19)

Sama seperti halnya pada kondisi *as-quenched*, sampel D memiliki nilai kekerasan terendah setelah mengalami proses *as-tempered*, yaitu 512 BHN dan juga menempati urutan terendah dari nilai ketangguhan, yaitu 2.9 J/cm^2 diantara ketiga sampel lainnya. Dari hasil analisa XRD (Gambar 4.30) di atas, tampak bahwa sampel D memiliki intensitas austenit sisa yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sampel E, namun nilai ketangguhannya jauh lebih rendah dibandingkan sampel E tersebut. Rendahnya nilai ketangguhan pada sampel D ini diduga juga akibat oleh terjadinya *coarsening carbide* yang berawal dari proses austenisasi.

4.5 UJI KEHANDALAN (*WEAR RATES*) *GRINDING BALL*

Durability atau umur pakai dari sebuah komponen mesin merupakan salah satu faktor yang berpengaruh dalam menentukan estimasi biaya proses produksi serta kualitas dari produk yang dihasilkan. *Durability* komponen mesin yang rendah akan mengakibatkan terganggunya proses produksi, dikarenakan proses penggantian komponen yang rusak akan mengurangi kapasitas produksi dan hal ini akan berakibat pada semakin tingginya biaya proses produksi. Oleh karena itu komponen mesin yang terbuat dari material dengan tingkat *durability* yang tinggi menjadi salah satu dasar pemikiran para *engineer* dalam mendesain suatu komponen mesin. Uji kehandalan (*wear rates*) terhadap produk *grinding ball* impor dan hasil penelitian dilakukan dalam sebuah *laboratory ball mill unit* dengan dimensi $\text{Ø}300 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ dan kecepatan kritis 60 %. Uji *wear rates* dilakukan dengan menggunakan media abrasif berupa batuan mineral.

Dalam penelitian ini *wear rates* diukur dengan menghitung selisih berat *grinding ball* sebelum dan sesudah penggerusan batuan mineral selama 48 jam dalam *laboratory ball mill unit* dibagi dengan berat batuan mineral halus ($> \text{mesh } 100$) yang dihasilkan setelah proses penggerusan atau dengan kata lain nilai *wear rates* dinyatakan dengan satuan gram *grinding ball*/Kg produk. Dalam penelitian ini, nilai ketahanan aus terbaik ditunjukkan dengan nilai *wear rates* terendah setelah proses penggerusan.

4.5.1 Media Abrasif

Media abrasif yang digunakan dalam uji *wear rates* ini adalah bijih besi *hematite* berukuran Ø20-30 mm. Bijih besi *hematite* merupakan batuan mineral dengan senyawa kimia utama, yaitu Fe₂O₃ dan SiO₂. Batuan mineral tersebut memiliki nilai kekerasan 55 HRC ^[19] atau setara dengan nilai kekerasan matriks martensit, sehingga batuan mineral tersebut sangat tepat untuk digunakan sebagai media abrasif untuk uji *wear rates* dari material besi/baja dengan matriks martensit.

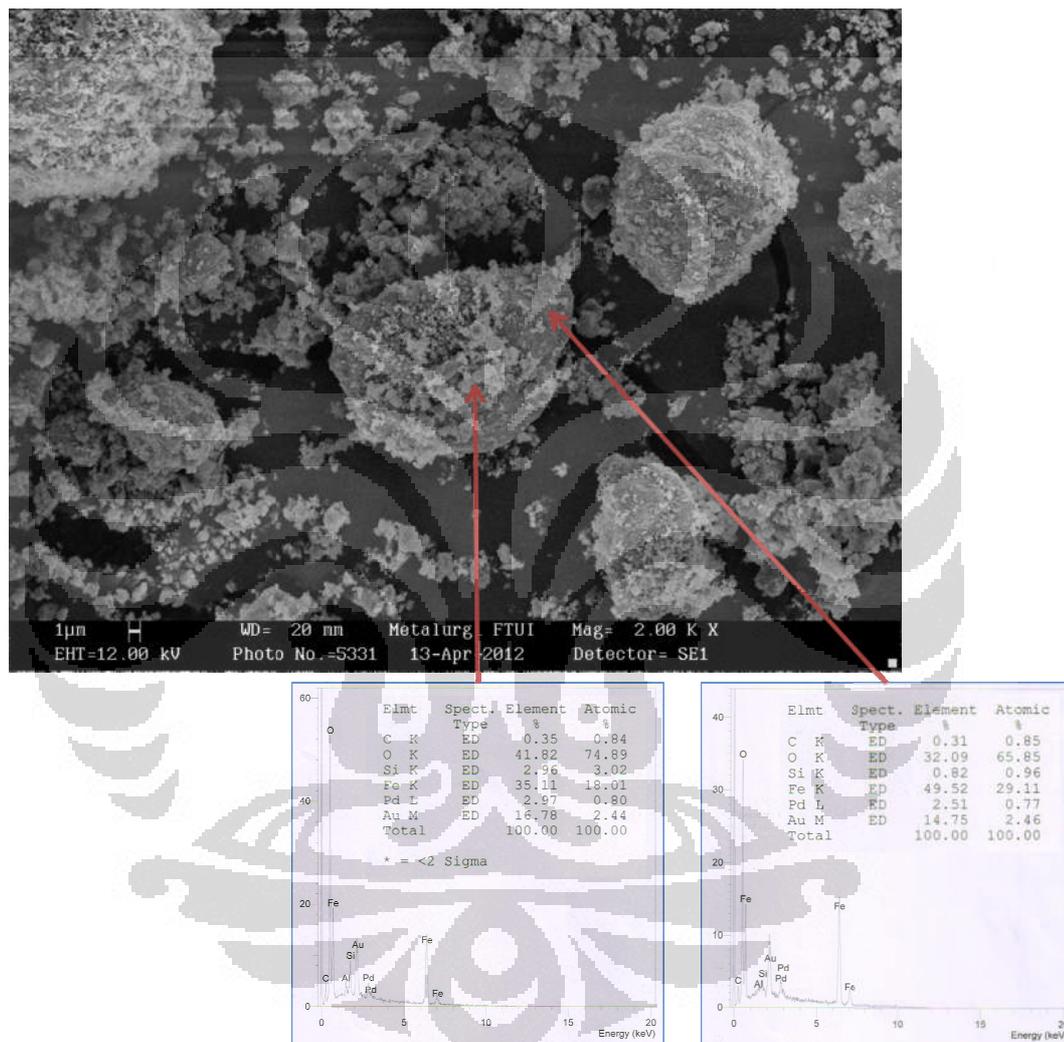
Berikut ini adalah Tabel 4.6 yang menunjukkan hasil analisa XRF dari material bijih besi (*hematite*/Fe₂O₃) yang digunakan sebagai material abrasif pada uji *wear rates* dalam penelitian ini. Dari hasil analisa tampak bahwa bijih besi *hematite* mengandung 86.42% Fe₂O₃ dan 10.28% SiO₂.

Tabel 4. 6 Hasil analisa XRF bijih besi *hematite* (abrasif)

Formula	Z	Concentration (%)	Status
Fe ₂ O ₃	26	86.42	<i>Fit Spectrum</i>
SiO ₂	14	10.28	<i>Fit Spectrum</i>
Al ₂ O ₃	13	1	<i>Fit Spectrum</i>
P ₂ O ₅	15	0.41	<i>Fit Spectrum</i>
K ₂ O	19	0.33	<i>Fit Spectrum</i>
Nd ₂ O ₃	60	0.28	<i>Fit Spectrum</i>
SO ₃	16	0.27	<i>Fit Spectrum</i>
MnO	25	0.26	<i>Fit Spectrum</i>
Cl	17	0.18	<i>Fit Spectrum</i>
Pr ₆ O ₁₁	59	0.14	<i>Fit Spectrum</i>
CeO ₂	58	0.1	<i>Fit Spectrum</i>
Cr ₂ O ₃	24	0.07	<i>Fit Spectrum</i>
CuO	29	0.05	<i>Fit Spectrum</i>
TiO ₂	22	0.05	<i>Fit Spectrum</i>
CaO	20	0.05	<i>Fit Spectrum</i>
SnO ₂	50	0.04	<i>Fit Spectrum</i>
V ₂ O ₅	23	0.02	<i>Fit Spectrum</i>
ZnO	30	0.01	<i>Fit Spectrum</i>
PbO	82	0.01	<i>Fit Spectrum</i>

Bijih besi *hematite* merupakan bahan baku untuk pembuatan material besi/baja, namun kandungan SiO₂ yang terlalu besar (lebih dari 10%) dapat

menyebabkan rendahnya efisiensi proses pembuatan besi/baja melalui metode peleburan (*smelting*). Oleh karena itu, pada umumnya sebelum dilakukan proses *smelting* terhadap batuan mineral tersebut, perlu dilakukan terlebih dahulu proses benefisi/peningkatan kadar besi oksida (Fe_2O_3) dengan cara memisahkan SiO_2 (selaku pengotor) dalam batuan mineral tersebut.



Gambar 4.31 Hasil analisa SEM dan EDX bijih besi hematite (abrasif)

Gambar 4.31 di atas adalah hasil foto SEM serta analisa EDX dari material abrasif tersebut. Dari hasil analisa SEM dan EDS tersebut, tampak bahwa silika oksida (SiO_2) menempel/melekat pada permukaan bijih besi oksida (Fe_2O_3), hal ini lah yang membuat batuan mineral tersebut memiliki sifat magnetik yang sangat rendah, sehingga hal tersebut tidak memungkinkan untuk memisahkan

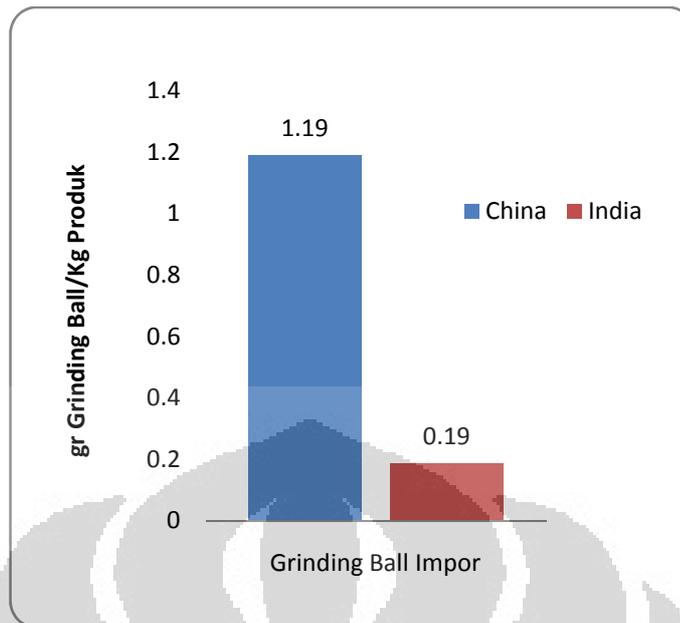
keduanya dengan menggunakan alat *magnetic separator*. Oleh karena itu untuk memisahkan SiO_2 dari permukaan bijih besi tersebut diantaranya dilakukan melalui proses penggerusan yang dilanjutkan dengan proses pencucian, diantaranya dengan metode flotasi.

Faktor lainnya yang menjadikan terpilihnya bijih besi *hematite* sebagai media abrasif dalam penelitian ini dikarenakan batuan mineral tersebut juga merupakan bahan baku untuk pembuatan semen, yaitu besi oksida dan silika oksida. Untuk itu diharapkan dengan menggunakan media abrasif tersebut dapat memberikan hasil yang representatif terhadap penggunaan *grinding ball* dalam *ball mill unit* pada industri semen.

4.5.2 Uji Wear Rates Grinding Ball Impor dalam Laboratory Ball Mill Unit

Dari hasil uji *wear rates*, seperti tampak pada Gambar 4.32, bahwa *grinding ball* impor asal India memiliki nilai *wear rates* yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan *grinding ball* impor asal China, yaitu 6.3 kali jauh lebih rendah. Hal ini menunjukkan ketahanan aus dari *grinding ball* impor asal India jauh lebih tinggi dibandingkan dengan *grinding ball* impor asal China. Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, dimana material *high chromium white cast iron* (*grinding ball* impor asal India) memiliki ketahanan aus yang lebih baik dibandingkan dengan material *low alloy steel* (*grinding ball* impor asal China). Hal ini tentunya disebabkan oleh keberadaan karbida khrom, yaitu $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$, dalam material *high chromium white cast iron* yang memiliki nilai kekerasan yang jauh lebih tinggi dibandingkan nilai kekerasan karbida besi, yaitu Fe_3C dalam material *low alloy steel*.

Saat ini harga *grinding ball* impor di pasaran memiliki kisaran Rp.15.000 - Rp. 16.000 per Kg, sedangkan untuk *grinding ball* impor asal China memiliki kisaran Rp. 8000 - Rp. 9000 per Kg. Dengan mengacu pada nilai *wear rates* di atas, maka dengan demikian produk *grinding ball* impor asal India memiliki nilai ekonomis yang jauh lebih tinggi dari *grinding ball* asal China, walaupun nilai jual *grinding ball* impor asal China dua kali lebih murah dibandingkan dengan *grinding ball* impor asal India.



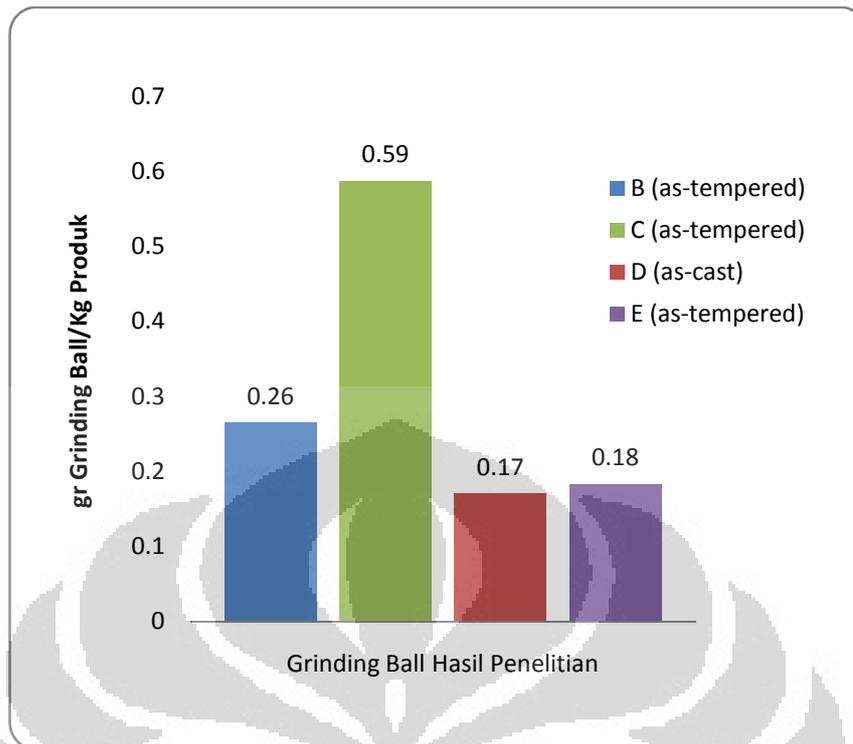
Gambar 4.32 Hasil uji *wear rates* grinding ball impor dalam *laboratory ball mill unit*

4.5.3 Uji *Wear Rates Grinding Ball* Hasil Penelitian dalam *Laboratory Ball Mill Unit*

Dari hasil uji kekerasan pada sampel D, tampak bahwa nilai kekerasan pada kondisi *as-tempered* tidak memenuhi syarat (SNI-1069) untuk diaplikasikan sebagai produk *grinding ball*, sedangkan sampel D pada kondisi *as-cast* memiliki nilai kekerasan yang hanya sedikit dibawah persyaratan untuk diaplikasikan sebagai *grinding ball*, untuk itu dalam uji *wear rates* tersebut di atas maka khusus untuk sampel D akan dilakukan pada kondisi *as-cast*. Sedangkan untuk sampel B, C, dan E, akan dilakukan pada kondisi *as-tempered*.

Berikut ini adalah hasil uji *wear rates* dari produk *grinding ball* hasil penelitian yang ditampilkan dalam bentuk diagram batang, seperti yang tampak pada Gambar 4.33 di bawah ini.

Dari hasil uji *wear rates* tersebut tampak bahwa sampel D pada kondisi *as-cast* memberikan *nilai wear rates* paling rendah diantara sampel *grinding ball* hasil penelitian lainnya (B, C, dan E) pada kondisi *as-tempered*, dengan kata lain nilai ketahanan aus sampel D pada kondisi *as-cast* lebih baik dibandingkan sampel B, C, dan E pada kondisi *as-tempered*.



Gambar 4. 33. Hasil uji *wear rates grinding ball* hasil penelitian dalam *laboratory ball mill unit*

Berikut ini akan dibahas mengenai pengaruh sifat-sifat mekanik (kekerasan dan ketangguhan) serta struktur mikro (karbida primer dan eutektik, karbida sekunder, serta austenit sisa) terhadap nilai *wear rates*/ketahanan aus dari material *high chromium white cast iron* hasil penelitian untuk diaplikasikan sebagai produk *grinding ball*.

a. Pengaruh Nilai Kekerasan dan Ketangguhan terhadap Ketahanan Aus Produk *Grinding Ball* Hasil Penelitian

Dalam Tabel 4.7, pada material *high chromium white cast iron* hasil penelitian dalam kondisi *as-tempered* (sampel B, C, dan E), tampak bahwa nilai kekerasan tidak berbanding lurus dengan nilai ketahanan aus. Hal ini dikarenakan dalam mekanisme kerja *grinding ball*, selain melibatkan gaya gesek juga melibatkan gaya impact, sehingga nilai ketangguhan dari material *grinding ball* turut memberikan kontribusi terhadap nilai ketahanan aus dari material tersebut.

Seperti yang tampak pada Tabel 4.7 di bawah, sampel E memiliki nilai kekerasan (629 BHN) lebih rendah dibandingkan sampel B (643 BHN), namun

sampel E memiliki nilai ketangguhan (4.52 J/cm^2) yang lebih baik dibandingkan sampel B (4.21 J/cm^2), dan ternyata sampel E memberikan nilai *wear rates* ($0.18 \text{ gr grinding ball/Kg abrasif}$) yang lebih rendah dibandingkan dengan sampel B ($0.26 \text{ gr grinding ball/Kg abrasif}$), atau dengan kata lain nilai ketahanan aus sampel E (ASTM A532-Tipe IIB) lebih baik dibandingkan dengan sampel B (ASTM A532-Tipe IIA). Sedangkan sampel C dengan nilai kekerasan yang jauh lebih rendah (583 BHN) dibandingkan sampel B dan E, namun memiliki nilai ketangguhan yang jauh lebih tinggi (4.8 J/cm^2) dibandingkan sampel B dan E, ternyata memberikan nilai *wear rates* ($0.56 \text{ gr grinding ball/Kg abrasif}$) yang jauh lebih tinggi dibandingkan sampel B dan E, atau dengan kata lain nilai ketahanan aus sampel C (ASTM A532-Tipe IIA + Vanadium) jauh lebih rendah dibandingkan dengan sampel B dan E.

Tabel 4.7 Nilai kekerasan dan ketahanan aus produk *grinding ball* hasil penelitian

Sampel	Nilai Kekerasan (BHN)	Nilai Ketangguhan (J/cm^2)	<i>Wear Rates</i> (gr GB/Kg abrasif)
B <i>as-tempered</i>	643	4.21	0.26
C <i>as-tempered</i>	583	4.8	0.59
D <i>as-cast</i>	594	3.48	0.17
E <i>as-tempered</i>	629	4.52	0.18

Dari keempat sampel pada Tabel 4.7, tampak bahwa sampel D (ASTM A532-Tipe IIA + Vanadium + Boron) pada kondisi *as-cast* memberikan nilai *wear rates* terendah atau ketahanan aus terbaik, dengan nilai kekerasan (594 BHN) lebih rendah dibandingkan sampel B dan E, serta memiliki nilai ketangguhan terendah (3.48 J/cm^2) diantara keempat sampel lainnya. Apabila diperhatikan, ternyata nilai kekerasan sampel D dan C (dengan kandungan karbon, khrom, molibdenum, dan vanadium yang hampir sama) tidak memiliki perbedaan yang sangat signifikan, namun nilai ketangguhan dari kedua material tersebut memiliki perbedaan yang cukup besar, dan keduanya pun memiliki perbedaan nilai *wear rates* yang cukup besar pula. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa sampel C, memiliki ketangguhan yang berlebih, sehingga memberikan sifat lunak terhadap material tersebut, sedangkan sampel D memiliki nilai kekerasan dan

ketangguhan yang berimbang/proporsional sehingga berdampak pada rendahnya nilai *wear rates* atau tingginya nilai ketahanan aus dari material tersebut.

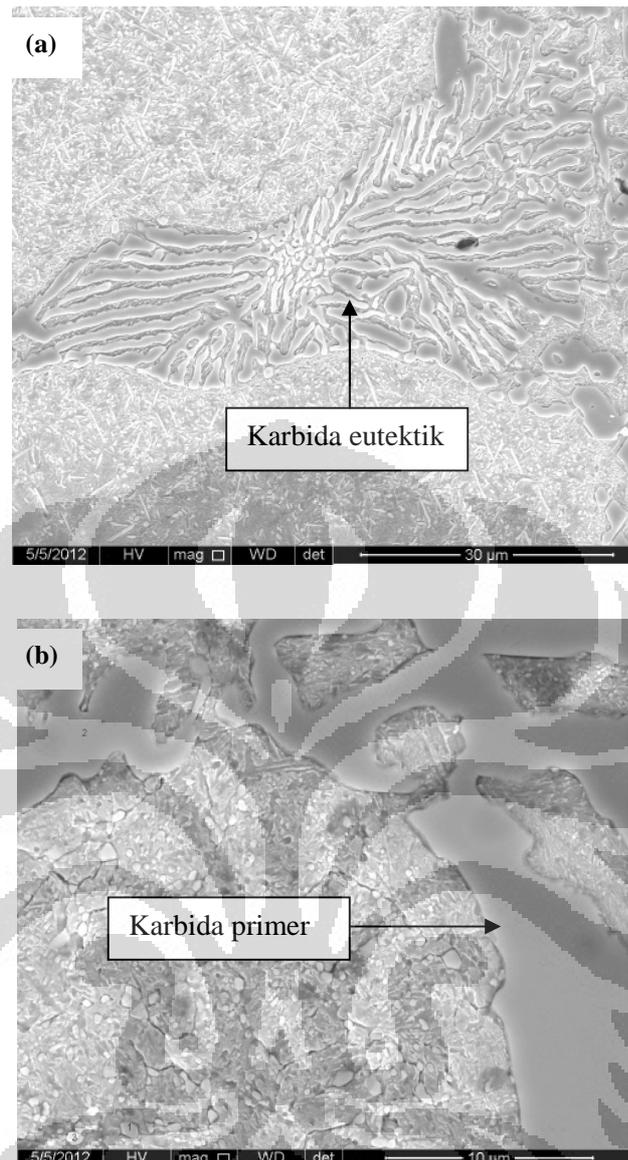
Dari pengamatan terhadap keempat sampel (B, C, D dan E) tersebut, tampak bahwa material *high chromium white cast iron* dengan nilai kekerasan yang terlalu tinggi dan memiliki nilai ketangguhan yang terlalu rendah, maka akan memberikan nilai ketahanan aus yang rendah. Hal ini dikarenakan material tersebut akan memberikan sifat getas/*brittle* sehingga tidak akan mampu menahan beban impact yang terjadi pada mekanisme kerja *grinding ball* dalam *ball mill unit*. Sedangkan material dengan nilai kekerasan yang terlalu rendah dengan nilai ketangguhan yang terlalu tinggi akan mengakibatkan nilai ketahanan aus menjadi rendah pula. Hal ini dikarenakan kedua sifat mekanik tersebut akan menyebabkan material tersebut menjadi lunak, sehingga tidak akan mampu menahan gaya gesek yang terjadi pada mekanisme kerja *grinding ball* dalam *ball mill unit*.

Oleh karena itu nilai ketahanan aus terbaik/optimal dimiliki oleh material dengan sifat kekerasan dan ketangguhan yang berimbang, sehingga mampu mengatasi beban gesek dan impact pada produk *grinding ball* dalam *ball mill unit*.

b. Pengaruh Karbida Primer dan Eutektik terhadap Ketahanan Aus Produk *Grinding Ball* Hasil Penelitian

Struktur mikro karbida khrom (M_7C_3) dengan nilai kekerasannya yang sangat tinggi akan memberikan dampak yang sangat signifikan terhadap tingginya nilai kekerasan makro dari material *high chromium white cast iron*, dan secara tidak langsung akan mempengaruhi nilai *wear rates* dari material tersebut.

Karbida primer dan eutektik (*eutectic and primary carbide*) merupakan struktur karbida yang terbentuk pada saat proses solidifikasi, dimana pada material *high chromium white cast iron*, unsur khrom akan bereaksi dengan unsur karbon membentuk senyawa M_7C_3 , dimana pada umumnya senyawa tersebut akan menempati ruang kosong (*vacancy*) pada daerah batas butir (*grain boundary*), sehingga membentuk jalinan karbida yang kontinyu. Struktur karbida yang bersifat kontinyu memberikan dampak positif terhadap nilai kekerasan namun memberikan dampak negatif terhadap beban impact, khususnya apabila terjadi retak/*crack*, dimana retak akan merambat secara kontinyu dalam karbida tersebut.



Gambar 4.34 Morfologi karbida : (a) eutektik (sampel C) , (b) primer (sampel B), pada *high chromium white cast iron*.

Morfologi dari karbida eutektik berbentuk *lamellar* dan berlapis-lapis antara karbida M_7C_3 dan matriks martensit, seperti tampak pada Gambar 4.34(a) di atas, sedangkan *primary carbide* memiliki morfologi yang *massive/solid* (tidak berbentuk *lamellar* maupun berlapis-lapis) seperti tampak pada Gambar 4.34(b) di atas. Kedua karbida tersebut memiliki peran yang cukup signifikan terhadap ketahanan aus (nilai *wear rates*) dari material *high chromium white cast iron*.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa volume fraksi karbida (primer dan eutektik) pada material *high chromium white cast iron* sangat

ditentukan oleh kandungan khrom dan karbon, seperti yang tampak dalam persamaan (2.1) di atas, sedangkan keberadaan unsur-unsur paduan dalam material tersebut seperti molibdenum, vanadium, dan boron tidak akan mempengaruhi volume fraksi dari material tersebut, selain itu volume fraksi dari karbida primer dan eutektik pada material tersebut juga tidak akan mengalami perubahan akibat proses perlakuan panas. Berikut ini adalah hasil perhitungan nilai volume fraksi karbida dari masing-masing sampel *grinding ball* dalam uji *wear rates* dengan menggunakan persamaan (2.1) di atas.

Tabel 4.8 Volume karbida primer produk *grinding ball*

Sampel	Volume Fraksi Karbida (%)	Wear Rates (gr GB/Kg abrasif)
B <i>as-tempered</i>	18.83	0.26
C <i>as-tempered</i>	15.93	0.59
D <i>as-cast</i>	15.31	0.17
E <i>as-tempered</i>	20.01	0.18
India	20.05	0.19
China	-	1.19

Dari Tabel 4.5 sebelumnya, tampak bahwa sampel B dan E memiliki kandungan unsur karbon dan molibdenum yang sama, namun memiliki kandungan unsur khrom yang berbeda, sehingga keduanya layak dibandingkan untuk mengetahui pengaruh volume karbida primer terhadap uji *wear rates*. Dari hasil uji *wear rates* (Tabel 4.8) tampak bahwa sampel E (ASTM A532-Tipe IIB) memiliki nilai *wear rates* lebih rendah dibandingkan sampel B (ASTM A532-Tipe IIA), hal ini disebabkan kandungan volume fraksi karbida dalam sampel E jauh lebih tinggi dibandingkan sampel B (Tabel 4.8). Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Albertin dan Sinatora^[12], yang menyatakan bahwa nilai ketahanan gesek dari produk *grinding ball* yang terbuat dari material *high chromium white cast iron (hypoeutectic)* berbanding lurus dengan volume fraksi karbida pada material tersebut.

Dari Tabel 4.8 di atas juga tampak bahwa *grinding ball* impor asal India memiliki volume fraksi karbida yang hampir sama dengan sampel E, namun sampel E memberikan nilai *wear rates* yang sedikit lebih rendah dibandingkan dengan *grinding ball* impor asal India. Hal ini disebabkan karena pada struktur

karbida primer sampel E terdapat struktur Mo_2C , dimana struktur karbida tersebut tidak akan mempengaruhi volume fraksi karbida namun dikarenakan nilai kekerasan karbida tersebut cukup tinggi sehingga memberikan kontribusi yang signifikan terhadap nilai *wear rates* dari material tersebut.

Sedangkan pada sampel C (ASTM A532-Tipe IIA + Vanadium) dan sampel D (ASTM A532-Tipe IIA + Vanadium + Boron), sangat sulit untuk diketahui pengaruh volume karbida primer terhadap nilai *wear rates* dari kedua sampel tersebut. Hal ini dikarenakan keberadaan unsur vanadium dan boron yang memberikan karakteristik yang berbeda pada *material high chromium white cast iron* tersebut, hal ini akan coba dijelaskan lebih lanjut pada bagian berikutnya.

c. Pengaruh Karbida Sekunder terhadap Ketahanan Aus Produk *Grinding Ball* Hasil Penelitian

Karbida sekunder (*secondary carbide*) terbentuk akibat proses perlakuan panas, dimana unsur khrom yang terlarut dalam matriks akan berdifusi dengan unsur karbon membentuk senyawa karbida dalam matriks, karbida tersebut bersifat diskontinyu dan tersebar dalam matriks, sehingga karbida sekunder memiliki dampak positif terhadap nilai kekerasan dan ketangguhan/ketahanan terhadap beban impact.

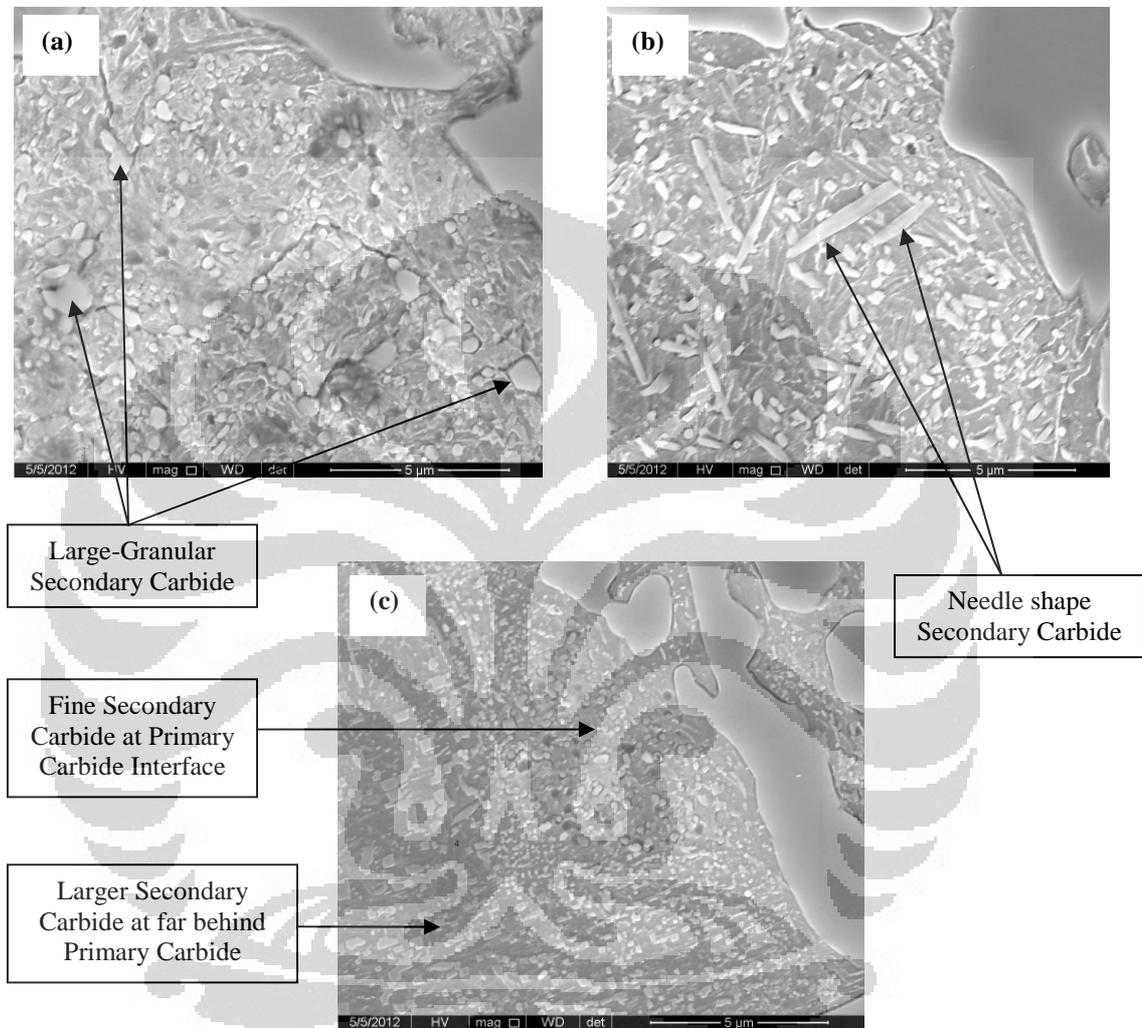
Berikut ini adalah Tabel 4.9 yang berisikan volume fraksi dari karbida sekunder yang dihitung dengan menggunakan metode metalografi kuantitatif (*point count*/ASTM E-562) dari foto struktur mikro pada **Lampiran 5-7**.

Tabel 4.9 Volume fraksi karbida sekunder

Sampel	Volume Fraksi Karbida Sekunder (%)	Cr terlarut dalam matriks (%)	<i>Wear Rates</i> (gr GB/Kg abrasif)
B <i>as-tempered</i>	8.75	9.16	0.26
C <i>as-tempered</i>	16	10.70	0.59
D <i>as-cast</i>	-	11.05	0.17
E <i>as-tempered</i>	21.75	12.71	0.18

Dari Tabel 4.9 di atas, terkecuali sampel C, tampak bahwa nilai *wear rates* berbanding terbalik dengan volume fraksi karbida sekunder, dimana semakin tinggi karbida sekunder maka semakin rendah nilai *wear rates* atau dengan kata

lain ketahanan ausnya semakin meningkat. Selain itu volume karbida sekunder juga berbanding lurus dengan jumlah kandungan khrom terlarut, dihitung berdasarkan persamaan (2.2), seperti yang tampak pada Tabel 4.9 tersebut.



Gambar 4.35 Morfologi karbida sekunder pada produk *grinding ball*: (a) Sampel B, (b) Sampel C, (c) Sampel E.

Selain memiliki perbedaan volume fraksi, ketiga sampel tersebut (B, C, dan E) juga memiliki morfologi karbida sekunder yang berbeda-beda. Seperti tampak pada Gambar 4.35 di atas, Sampel E dan B memiliki struktur karbida sekunder berbentuk bulat yang dominan, namun tampak bahwa struktur karbida sekunder pada sampel E memiliki ukuran/diameter yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan Sampel B, terutama pada daerah disekeliling karbida primer. Hal ini

menunjukkan bahwa ukuran karbida sekunder yang jauh lebih kecil dan terdispersi merata diantara matriks (martensit) akan memberikan kekuatan atau kombinasi yang cukup baik antara kekerasan dan ketangguhan, sehingga menghasilkan nilai *wear rates* yang baik pula. Sedangkan pada sampel C, struktur karbida sekunder memiliki bentuk *needle shape*/jarum yang jauh lebih dominan dibandingkan dengan struktur berbentuk bulat. Struktur karbida berbentuk jarum akan memberikan dampak negatif terhadap ketangguhan atau beban impak, dikarenakan pada kedua ujung bentuk jarum tersebut terdapat konsentrasi tegangan yang cukup tinggi, sehingga material tersebut akan bersifat getas/rapuh sehingga ketahanan terhadap *spalling resistance*-nya akan rendah. Hal ini lah yang menyebabkan tingginya nilai *wear rates* (rendahnya ketahanan aus) dari sampel C walaupun memiliki volume karbida sekunder yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sampel B.

d. Pengaruh Intensitas Austenit Sisa terhadap Ketahanan Aus Produk Grinding Ball Hasil Penelitian

Struktur austenit sisa (*retained austenite*) bersifat lunak, sedangkan martensit bersifat keras. Keberadaan keduanya dalam matriks *grinding ball* akan memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap nilai *wear rates* dari *grinding ball*.

Berikut ini adalah Tabel 4.10 yang menunjukkan volume austenit sisa pada masing-masing sampel uji *wear rates grinding ball* yang dihitung berdasarkan persamaan (2.4) di atas. Dari Tabel 4.10 di bawah, tampak bahwa sampel E dengan volume austenit sisa terendah (mendekati 0%) memberikan ketahanan aus terbaik/nilai *wear rates* terendah diantara produk *grinding ball* lainnya. Tampak dari tabel 4.10 tersebut bahwa volume austenit sisa dalam material *high chromium white cast iron* berbanding lurus dengan nilai *wear rates* atau berbanding terbalik dengan nilai ketahanan aus. Pengecualian terjadi pada sampel C, dikarenakan adanya perbedaan morfologi karbida dalam struktur material tersebut.

Dari hasil analisa tersebut (Tabel 4.10) memperkuat hasil penelitian yang dilakukan oleh Albertin dan Sinatora^[12], dimana material *high chromium white cast iron* dengan struktur mikro yang terdiri dari karbida khrom dalam matriks martensit tanpa austenit sisa akan memberikan ketahanan aus terbaik, sebaliknya

hasil penelitian tersebut membantah pernyataan Fujita ^[37] dan Hou, et al. ^[38] yang menyatakan bahwa ketahanan gesek terbaik pada material tahan gesek akan diperoleh dengan volume austenit sisa sebesar 20%.

Tabel 4. 10 Volume austenit sisa pada sampel *grinding ball* uji *wear rates*

Sampel	<i>Integrated Intensity of Retained Austenite (200)</i>	<i>Integrated Intensity of Martensite (101)</i>	<i>Volume Retained Austenite (%)</i>	<i>Wear Rates (gr GB/Kg abrasif)</i>
B <i>as-tempered</i>	2122	27667	4.20	0.26
C <i>as-tempered</i>	1004	18104	3.07	0.59
D <i>as-cast</i>	<i>no RA</i>	<i>no RA</i>	<i>no RA</i>	0.17
E <i>as-tempered</i>	<i>no Peak</i>	30790	~ 0	0.18
India	742	34961	1.20	0.19
China	3785	10585	16.98	1.19

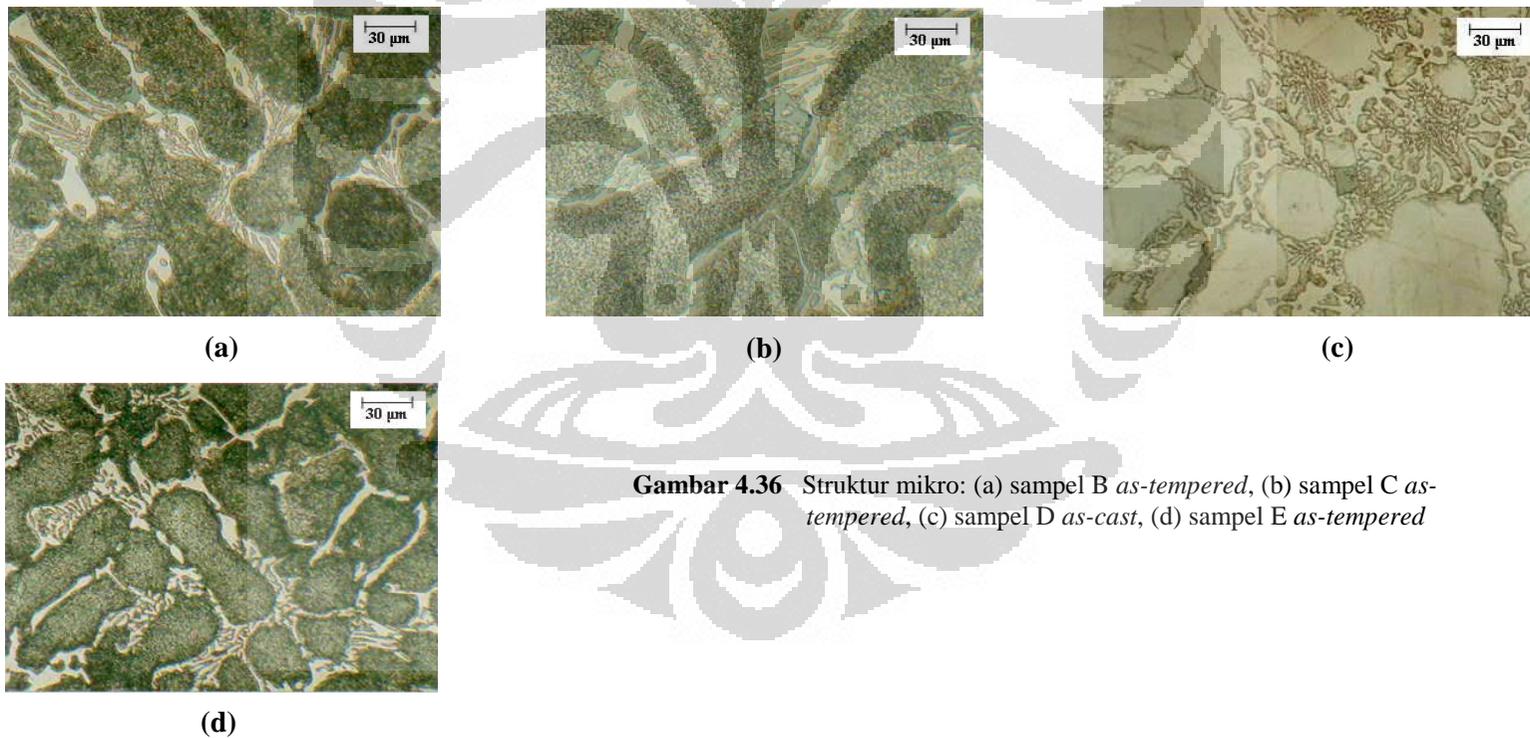
4.6 SELEKSI MATERIAL *HIGH CHROMIUM WHITE CAST IRON* HASIL PENELITIAN SEBAGAI *GRINDING BALL*

Pada bagian ini akan dibahas mengenai seleksi beberapa material *high chromium white cast iron* yang telah dihasilkan dalam penelitian ini, dengan komposisi seperti yang tampak pada Tabel 4.5. Pada halaman berikutnya terlampir Tabel 4.11, yang berisikan resume dari sifat-sifat mekanik serta struktur mikro yang dimiliki oleh material *high chromium white cast iron* tersebut di atas.

Dari tabel 4.11 tersebut, tampak bahwa nilai kekerasan sampel B dan E (*as-tempered*) melebihi standar minimum nilai kekerasan untuk produk *grinding ball* dalam SII-0789-83 (SNI-1069), sehingga kedua material tersebut memenuhi persyaratan dan layak untuk diaplikasikan sebagai produk *grinding ball*. Sampel C memiliki nilai kekerasan jauh dibawah standar yang telah ditetapkan sehingga tidak layak untuk diaplikasikan sebagai produk *grinding ball*. Sampel D memiliki nilai kekerasan mendekati nilai standar tersebut, namun dikarenakan material tersebut memiliki nilai *wear rates* yang cukup rendah (ketahanan aus yang cukup baik) maka layak dipertimbangkan untuk diaplikasikan sebagai produk *grinding ball*. Dengan demikian dari hasil penelitian ini diperoleh tiga buah material *high chromium white cast iron* yang layak untuk diaplikasikan sebagai produk *grinding ball*, yaitu sampel B, D, dan E.

Tabel 4.11 Resume sifat-sifat mekanik dan struktur mikro dari *high chromium white cast iron* hasil penelitian

Sampel	Nilai Kekerasan (BHN)	Nilai Ketangguhan (J/cm ²)	Volume Karbida Primer (%)	Volume Karbida Sekunder (%)	Volume Austenit Sisa (%)	Wear Rates (gr GB/Kg abrasif)
B <i>as-tempered</i>	643.33	4.21	18.83	8.75	4.20	0.26
C <i>as-tempered</i>	582.67	4.8	15.93	16	3.07	0.59
D <i>as-cast</i>	593.67	3.48	15.31	-	<i>no RA</i>	0.17
E <i>as-tempered</i>	628.67	4.52	20.01	21.75	~ 0	0.18



Gambar 4.36 Struktur mikro: (a) sampel B *as-tempered*, (b) sampel C *as-tempered*, (c) sampel D *as-cast*, (d) sampel E *as-tempered*

Seperti yang tampak pada Gambar 4.36 bahwa untuk sampel B dan E pada kondisi *as-tempered* memiliki struktur mikro berupa karbida M_7C_3 dalam matriks martensit, hal ini mengacu pada hasil penelitian dari Albertin dan Sandra^[6], yang menyatakan bahwa kondisi ketahanan aus dari material *high chromium white cast iron* dengan matriks martensit akan memberikan nilai ketahanan aus yang jauh lebih baik dibandingkan dengan matriks austenit. Namun, dari hasil penelitian ini ternyata sampel D dengan struktur berupa karbida/ M_7C_3 halus (*fine carbide/ M_7C_3*) diantara matriks austenit dan bainit juga memberikan ketahanan aus yang baik pula.

Dari hasil analisa *wear rates*, ternyata ketiga sampel (B, D, dan E) tersebut memiliki nilai ketahanan aus yang jauh lebih baik dibandingkan dengan *grinding ball* impor asal China. Namun apabila dibandingkan dengan *grinding ball* impor asal India, ternyata hanya sampel D dan E yang memberikan nilai *wear rates* yang sedikit lebih rendah/ ketahanan aus yang sedikit lebih baik dibandingkan *grinding ball* impor asal India. Sehingga dengan demikian kedua material tersebut dapat digunakan sebagai material untuk mensubstitusi produk *grinding ball* impor asal China dan India.

4.7 NILAI EKONOMIS GRINDING BALL HASIL PENELITIAN

Dari hasil penelitian di atas (Gambar 4.32 dan 4.33) tampak bahwa produk *grinding ball* hasil penelitian yang memiliki nilai *wear rates* lebih baik dibandingkan *grinding ball* impor asal India adalah sampel D (*as-cast*) dan sampel B (*as-tempered*). Oleh karena itu untuk menarik minat pasar pengguna *grinding ball* lokal serta *investor* dalam rangka untuk memproduksi produk *grinding ball* lokal (hasil penelitian) maka perlu dilakukan suatu kajian tekno ekonomi terhadap produk tersebut. Berikut akan dijelaskan mengenai Harga Pokok Produksi (HPP) produk *grinding ball* hasil penelitian berukuran $\varnothing 50$ mm.

4.7.1 Harga Pokok Produksi (HPP)

Penentuan harga pokok produksi dihitung berdasarkan penggunaan bahan baku, bahan habis pakai, tenaga kerja, dan konsumsi energi. Dari hasil perhitungan tersebut diperoleh bahwa HPP dari *grinding ball* untuk sampel D dan sampel E masing-masing secara berturut-turut adalah Rp. 16.700/Kg dan Rp.

14.750/Kg, dengan rincian biaya seperti yang tampak pada Tabel 4.12 dan 4. 13. HPP dari produk *grinding ball* sampel D jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sampel E dikarenakan adanya penambahan unsur vanadium dengan harga jual yang cukup mahal, walaupun pada sampel D tersebut tidak dilakukan proses perlakuan panas, dimana proses tersebut membutuh konsumsi energi yang cukup besar, seperti yang dilakukan pada produk *grinding ball* sampel E.

Tabel 4. 12 Rincian tekno ekonomi dari *grinding ball* sampel D per 500 Kg produk

No.	Jenis Biaya	Jumlah Biaya (Rp.)	Persentase Biaya (%)
1	Bahan Baku	7,496,000	89.92%
2	Konsumsi Energi	200,000	2.40%
3	Molding	160,000	1.92%
4	Tenaga Kerja	480,000	5.76%
Jumlah Biaya		8,336,000	100.00%

Tabel 4. 13 Rincian tekno ekonomi dari *grinding ball* sampel E per 500 Kg produk

No.	Jenis Biaya	Jumlah Biaya (Rp.)	Persentase Biaya (%)
1	Bahan Baku	6,387,000	86.7%
2	Konsumsi Energi	340,000	4.62%
3	Molding	160,000	2.17%
4	Tenaga Kerja	480,000	6.52%
Jumlah Biaya		7,367,000	100.00%

Namun walaupun demikian, berdasarkan hasil penelitian di atas bahwa kedua produk *grinding ball* hasil penelitian, yaitu sampel D (*as-cast*) dan E (*as-tempered*) memiliki nilai *wear rates* yang lebih rendah dibandingkan dengan produk *grinding ball* impor asal India, sehingga perlu dilakukan perhitungan nilai ekonomis yang sebenarnya dari kedua produk hasil penelitian tersebut.

4.7.2 Rasio Nilai Ekonomis Produk *Grinding Ball* Hasil Penelitian dan *Grinding Ball* Impor

Nilai ekonomis produk *grinding ball*, tidak hanya ditentukan dari nilai HPP, melainkan juga nilai *wear rates* atau umur pakai dari produk tersebut. Dengan mengacu pada nilai *wear rates grinding ball* impor (GBI), maka nilai

ekonomis untuk produk *grinding ball* hasil penelitian (GBHP), dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Nilai ekonomis (NE)} = \text{Harga Jual GBI} - \frac{\text{wear rates GBHP}}{\text{wear rates GBI}} \times \text{HPP}_{\text{GBHP}} \dots\dots\dots (4.1)$$

Dengan menggunakan persamaan (4.1) di atas, dan apabila mengacu pada harga jual *grinding ball* impor asal India saat ini, yaitu Rp. 15.500/Kg, maka untuk masing-masing sampel *grinding ball* D dan E akan memperoleh nilai ekonomis secara berturut-turut sebesar Rp. 558/Kg dan Rp. 1527/Kg..

Maka dengan mengacu nilai ekonomis tersebut di atas, maka nilai jual maksimum untuk masing-masing produk *grinding ball* hasil penelitian tersebut dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan di bawah ini.

$$\text{Harga jual maks.}_{\text{GBHP}} = \text{HPP}_{\text{GBHP}} + \text{nilai ekonomis}_{\text{GBHP}} \dots\dots\dots (4.2)$$

Dengan mengacu pada persamaan (4.2) di atas, maka harga jual maksimum *grinding ball* untuk sampel D dan sampel E secara berturut-turut adalah Rp. 17.258/Kg dan Rp. 16.277/Kg.

Tingginya HPP serta rendahnya nilai ekonomis dari produk *grinding ball* hasil penelitian tersebut dikarenakan hampir seluruh bahan baku berupa material paduan (*ferro alloys*) di impor dari luar negeri. Selain itu penggunaan unsur molibdenum serta vanadium terhadap produk *grinding ball* tersebut juga memberikan pengaruh yang sangat besar, dikarenakan harga *ferro alloys* tersebut yang relatif cukup mahal. Berbeda dengan *grinding ball* impor asal India yang tidak mengandung unsur molibdenum dalam produk *grinding ball* tersebut sehingga diperkirakan memiliki nilai ekonomis yang lebih besar dibandingkan dengan produk *grinding ball* hasil penelitian.

Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut, terutama pada sampel D untuk mensubstitusi unsur molibdenum dan vanadium dengan unsur lainnya (yang memiliki karakteristik dan peran yang sama seperti molibdenum dan vanadium dalam material *high chromium white cast iron*) yang jauh lebih murah, sehingga akan dihasilkan *grinding ball* dengan nilai ekonomis yang optimal.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

1. Material *high chromium white cast iron* dengan komposisi 16.5Cr (*as-tempered*) dan 13Cr-1.3V-0.0005B (*as-cast*), memiliki nilai ketahanan aus yang lebih baik dibandingkan dengan material *grinding ball* impor asal China dan India. Hal ini dikarenakan material 16.5Cr memiliki volume karbida primer (M_7C_3) yang lebih besar serta kandungan austenit sisa yang lebih kecil dibandingkan *grinding ball* impor, sedangkan material 13Cr-1.3V-0.0005B memiliki struktur bainit dalam matriks austenit dan karbida primer (M_7C_3) halus (*fine carbide*), dimana struktur tersebut tidak dimiliki oleh *grinding ball* impor.
2. Material *high chromium white cast iron* dengan komposisi 13Cr dan 16.5 Cr, dengan penambahan 1.3-1.5Mo memiliki struktur mikro yang terdiri dari karbida primer dan eutektik dengan komposisi (Fe, Cr, Mo_7C_3 dan Mo_2C pada kondisi *as-cast*.
3. Penambahan 1.3V dan 0.0005B pada material *high chromium white cast iron* dengan komposisi 13Cr tidak akan membentuk senyawa karbida vanadium (VC) dan karbida boron ($Fe_{23}(C,B)_6$) sebagai karbida primer maupun eutektik.
4. Nilai ketahanan aus material *high chromium white cast iron* dengan komposisi 16.5Cr lebih baik dibandingkan dengan 13Cr dikarenakan memiliki volume karbida primer dan sekunder yang lebih tinggi serta kandungan austenit sisa yang lebih sedikit.
5. Struktur karbida sekunder dipengaruhi oleh komposisi unsur paduan dalam material *high chromium white cast iron*, dimana pada komposisi 16.5Cr memiliki karbida sekunder berbentuk *fine-round shape*, sedangkan pada komposisi 13Cr memiliki karbida sekunder berbentuk *large-round shape*, dan pada komposisi 13Cr - 1.3V memiliki karbida sekunder dengan bentuk jarum/ *needle shape*, dimana ketiga material tersebut di atas secara berurutan memiliki nilai ketahanan aus tertinggi hingga ke terendah.

6. Nilai kekerasan yang tinggi akan menyebabkan material *high chromium white cast iron* bersifat getas, dan nilai ketangguhan yang tinggi akan menyebabkan material tersebut bersifat lunak, dimana keduanya memberikan dampak negatif terhadap nilai ketahanan aus. Nilai kekerasan dan ketangguhan optimal dimiliki oleh material *high chromium white cast iron* dengan komposisi 16.5Cr (*as-tempered*) dan 13Cr-1.3V-0.0005B (*as-cast*) sehingga memberikan nilai ketahanan aus yang sangat baik.

5.2 SARAN

- Perlu dilakukan suatu kajian lebih lanjut terhadap material 16.5Cr dan 13Cr-1.3V-0.0005B untuk diaplikasikan sebagai produk *grinding ball* berukuran lebih besar ($>\varnothing$ 50 mm) serta dilakukan uji ketahanan aus pada *ball mill* skala industri untuk mengetahui keakurasian hasil uji *wear rates* dalam *laboratory ball mill unit* dengan ketahanan aus pada aplikasi industri yang sebenarnya.
- Perlu dilakukan suatu kajian penelitian lebih lanjut terhadap proses perlakuan panas pada material 13Cr-1.3V-0.0005B guna memperoleh sifat-sifat mekanik serta nilai *wear rates* yang lebih baik.
- Perlu dilakukan substitusi terhadap unsur paduan yang memiliki harga relatif mahal dengan unsur paduan lainnya yang jauh lebih murah.

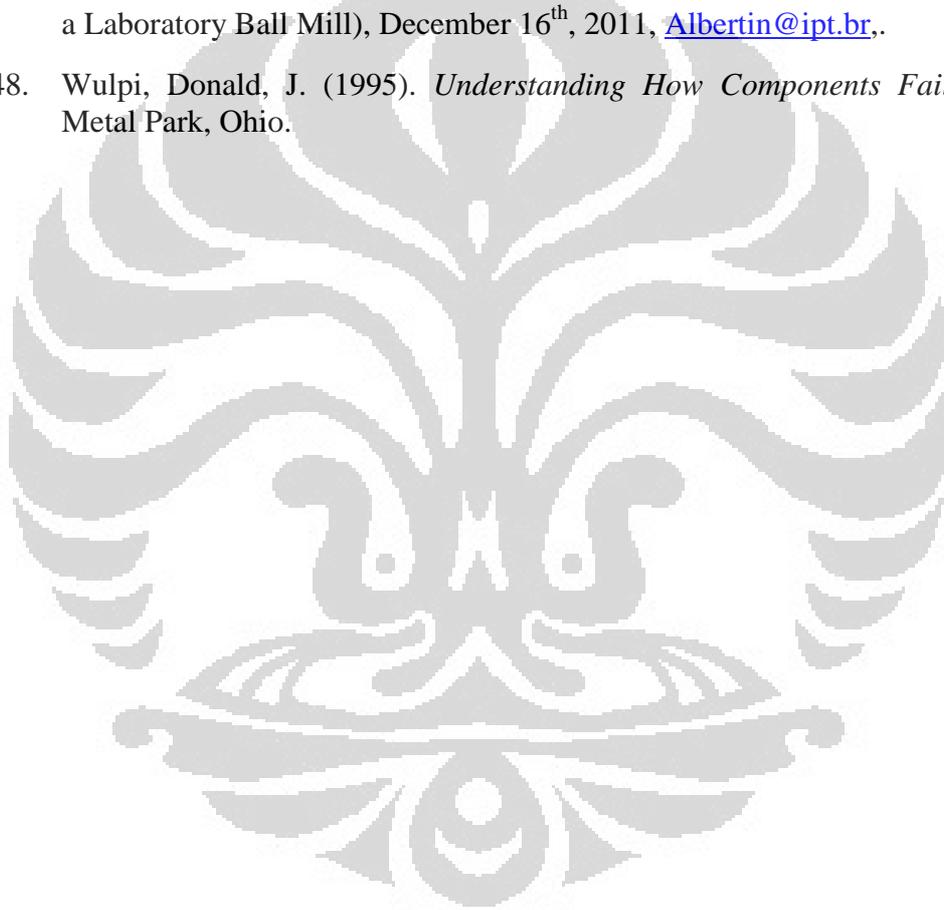
DAFTAR PUSTAKA

1. Wahjudi, D. (2000). Penelitian Optimasi Temperatur yang Mempengaruhi Kekerasan pada Pembuatan *Grinding Ball* dengan cara Hot Rolling, *Jurnal Teknik Mesin*, 2(2): 91-96.
2. Data Pabrik Semen di Indonesia. (2010). Retrieved February, 17th, 2010, from <http://www.kompas.com> .
3. Kartikasari, R., Soekrisno, R., Noer. Ilman, M., Suharno, Hestiawan, H. (2007). Karakterisasi Ball Mill Import pada Industri Semen di Indonesia, *Jurnal Teknik Mesin*, 9(1):18-24.
4. Wahyudin dan Surasno. (1997). Bola Gerus (*Grinding Ball*) dan Permasalahannya, *Berita Teknologi Bahan dan Barang Teknik*, (10): 35-40.
5. Durman, R.W. (1988). Progress in Abrasion Resistant Materials for Use in Comminution Process, *International Journal Mineral Processing*, 381-399.
6. Albertin, E., and Sandra Lucia de Moraes. (2007). Maximizing *Wear Resistance* of Balls for Grinding of Coal, *Wear*, 263: 43-47.
7. Gundewar, C. S., Natarajan, K. A., Nayak, U.B., Satyanarayana, K. (1990). Studies on Ball Wear in Grinding of Kudremukh Hematite-Magnetite Ore, *Mineral Engineering*, 3(1):207-220.
8. Si-Yong Zhao, Huai-tao Lin, Yao-Dong Zeng, Jin-Cai Lu, Zhe-Chuan Chang. (1994). The Optimal Mating of Balls and Lining Plates in Ball Mills, *Wear*, 178: 79-84.
9. Chenje, T. W., Simbi, D. J., Navara, E. (2004). Relationship between Microstructure, Hardness, Impact Toughness and Wear Performance of Selected Grinding Media for Mineral Ore Milling Operations, *Materials and Design*, 25:11-18.
10. Matsubara, Y. (2001). Solidification and abrasion wear of white cast iron alloyed with 20% carbide forming elements, *Wear*, 250: 502-510.
11. Mello, J.D.B., Polycarpou, A., A. (2010). Abrasive Wear Mechanism of Multi-Components Ferrous Alloys Abraded by Soft Fine Abrasive Particles, *Wear*, 269: 911-920.
12. Albertin, E., and Sinatora, A. (2001). Effect of Carbide Fraction and Matrix Microstructure on The Wear of Cast Iron Balls Tested in a Laboratory Ball Mill, *Wear*, 250: 492-501.
13. Hoa-Huai Liu, Jun Wang, Bao-Luo Shen, Hong-Shan Yang, Sheng-Ji Gao, and Si Jiu Huang. (2007). Effects of Deep Cryogenic Treatment on Property of 3Cr13Mo1V1.5 High Chromium Cast Iron, *Materials and Design*, 28: 1059-1064.

14. Havva Kaydal Zeytin, Hakan Yildirim, Banu Berme, Salim Duduoglu, Gurkan Kazdal, and Adem Deniz. (2011). Effect of Boron and Heat Treatment on Mechanical Properties of White Cast Iron for Mining Application, *Journal of Iron and Steel Research*: 18(11): 31-39.
15. Cement Production Line Complete Sets of Equipment. (n.d), from http://www.line_mill.com.
16. Ball Mill, Croatian-English Chemistry: Dictionary and Glossary. (n.d). from <http://www.glossary.periodni.com/glossary.php?en=ball+mill>.
17. *Steel Forge Grinding Ball*. (n.d). from <http://www.vitkoviccylinders.cz>.
18. Kalpakjian, S. and Schmid, S., R. (2006). *Manufacturing, Engineering, and Technology* (5th ed.), Pearson Education.
19. Malcolm, B. (1995). *Steel Casting Handbook*, ASM International, USA.
20. Solid Cast Tutorials, Finite Solutions Inc. (n.d). from <http://www.finitesolutions.com>.
21. M. Izciler and H. Celiq. (2000) Two- and Three- Body Abrasive Wear Behaviour of Different *Heat-Treated* Boron Alloyed High Chromium Cast Iron *Grinding Balls*, *Journal of Materials Processing Technology*,105: 237-245.
22. Zuhm Gahr, K. H. (1980). Abrasive Wear of White Cast Irons, *Wear*, 64: 175-194.
23. Muscara, J., and Simont, M. J. (1972). Construction and Evaluation of a Versatile Abrasive Wear Testing Apparatus. *Metals Eng. Quarterly*,12: 21-32.
24. Scandian, C., Boher, C., de Mello, J. D. B., Rezai-Aria, F. (2009). Effect of molybdenum and chromium Contents in Sliding Wear of High-Chromium White Cast Iron: The Relationship between Microstructure and Wear. *Wear*, 267:401-408.
25. Avery, H.S. (1961). *Wear*, 4: 427.
26. Gates, J. D., Dargusch, M. S., Walsh, J. J., Field, S. L., Hermand, M. J-P., Delaup, B. G., Saad, J. R. (2008). Effect of Abrasive Mineral on Alloy Performance in The Ball Mill Abrasion test. *Wear*, 265:865-870.
27. Hinckley, B., Dolman, K. F., Wuhrrer, R., Yeung, W., and Ray, A. (2008). SEM Investigation of Heat Treated High Chromium Cast Iron, *Materials Forum*, 32.
28. Zhou Jiyang. (2011). *Serial Report: Colour Metallography of Cast Iron*: 337-349.

29. Reda, R., Nofal, A., Ibrahim, K., and Hussien, A. (2010). Investigation of Improving Wear Performance of Hypereutectic 15% Cr-2% Mo White Irons, *China Foundry*, 7(4): 438:446.
30. Bedolla-Jacuinde, A., Arias, L., and Hernandez, B. (2003). Kinetics of Secondary Carbides Precipitation in a High-Chromium White Irons, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 12: 371-382.
31. Da Li, Ligang Liu, Yunkun Zhang, Chunlei Ye, Xuejun Ren, Yulin Yang, and Qingxiang Yang. (2009). Phase Diagram Calculation of High Chromium Cast Irons and Influence of It's Chemical Composition, *Materials and Design*, 30: 340-345.
32. Bedolla-Jacuinde, A., Hernandez, B., and Bejar-Gomez, L. (2005). SEM Study on the M₇C₃ Carbide Nucleation during Eutectic Solidification of High Chromium White Irons, *Z. Metallkd.* 96(12): 1380-1385.
33. Powell, G. L. F., Brown, I. H., and Nelson, G. D. (n.d). Tough Hypereutectic High Chromium White Iron – A Double in-situ Fibrous Composite.
34. Breyer, J. P. and Walmag, J. (n.d). Metallurgy of High Chromium – Molybdenum White Iron and Steel Rolls.
35. Daniel, H., Herring. (2005). *Article of The Heat Treat Doctor: A Discussion of Retained Austenite*, from <http://www.Industrialheating.com>.
36. *Retained Austenite Analysis*. (2003). H&M analytical services, Inc.
37. T. Fujita. K. (1991). Influence of Retained Austenite on Rolling Fatigue Strength of Austempered Spheroidal Graphite Cast Iron, *J. JFS*, 63:775-780.
38. Hou Qing-You, Huang Zhen-Yi, and Wang Zing-Tao. (2009). Application of Rietveld Refinement to Investigate the High Chromium White Cast Iron Austempered at Different Temperatures, *Journal of Iron and Steel*, 16(4): 33-38.
39. Kern. F. Roy. (1979). *Steel Selection: A Guide for Improving Performance and Profits*, John Willey and Sons, USA.
40. Toyo Grinding Ball, Maanshan.co.ltd (n.d). available from <http://toyogb.w200.newah.com>.
41. Standar Industri Indonesia. (1983). *Bola Pelumat Logam Ferro: SII-0789-83 (SNI-1069)*, Januari 1983.
42. Heine, R. W., Loper, C. R., Rosenthal, P. C. (1967). Principle of Metal Casting: Second Edition American Foundrymen's Society, *Mc. Graw Hill Book Company*.
43. Huard, C., Hartley, M., Lechkun, S., Menking, M. (2009). Lab. Report: Quantitative Metallography.

44. Pearce J.T.H. (2001). Structural Characterization of High Chromium Cast Irons, *Solidification Science and Processing: Outlook for 21st Century*, India: 241-247.
45. Radulovic, M., Fiset, M., Peev, K., and Tomovic, M. (1994), The Influence of Vanadium on Fracture and Abrasion Resistance in High Chromium White Irons, *Scripta Metall. Mater.*, 31.
46. Stanka, M., Markovic, S., and Zec, S. (2002). The Effect of Boron on The Amount and Type of Carbides in Chromium White Irons, *J. Serb. Chem. Soc.* 67: 697-707.
47. Albertin, E. (2011) An Explanation of His Article (Effect of Carbide Fraction and Matrix Microstructure on The Wear of Cast Iron Balls Tested in a Laboratory Ball Mill), December 16th, 2011, Albertin@ipt.br.
48. Wulpi, Donald, J. (1995). *Understanding How Components Fail*, ASM, Metal Park, Ohio.



Lampiran 1***License File untuk Penggunaan SolidCast™***

To: Fajar Nurjaman <nurjaman_80@yahoo.com>
Sent: Monday, April 16, 2012 7:36 PM
Subject: Fw: License Issued For Indonesian Institute of Science

Dear Fajar Nurjaman,

Thank you for your interest in the Finite Solutions suite of casting simulation software. My name is Jeff Meredith, I am based in Sydney Australia and an Agent for Finite Solutions. I provide training and technical support in our region.

Attached to this message is a "License File" which will activate Version 8 of SOLIDCast as requested. Expiration dates are:

SOLIDCastExpires 16 May, 2012
FLOWCastExpires 16 May, 2012
OPTICastExpires 16 May, 2012

This file contains activation information for requests logged from:

Fajar Nurjaman : nurjaman_80@yahoo.com, 13 Apr 2012, 23:04

After downloading this file, just double-click its icon to activate the software on each computer. Be sure to close SOLIDCast BEFORE activating. After doing this, you should be able to start SOLIDCast Version 8 and run it.

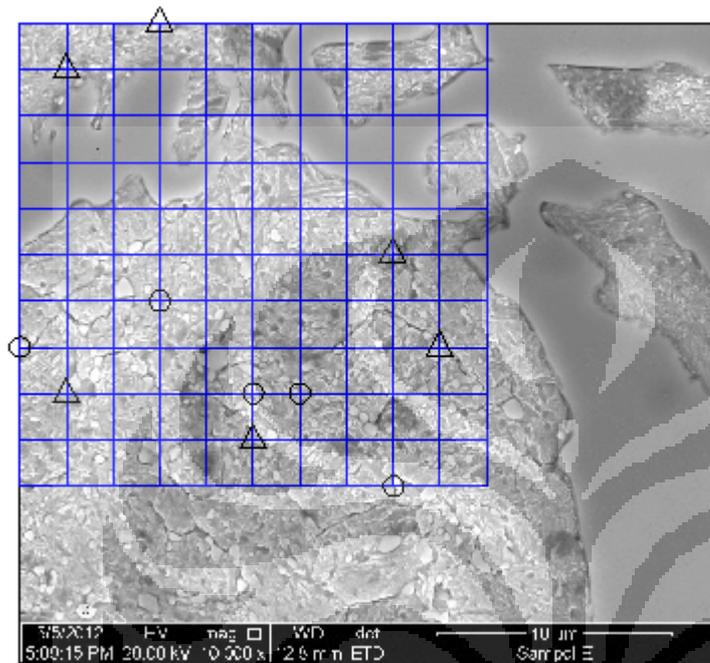
Please let us know if you have any questions or problems.

Sincerely,

Jeff Meredith

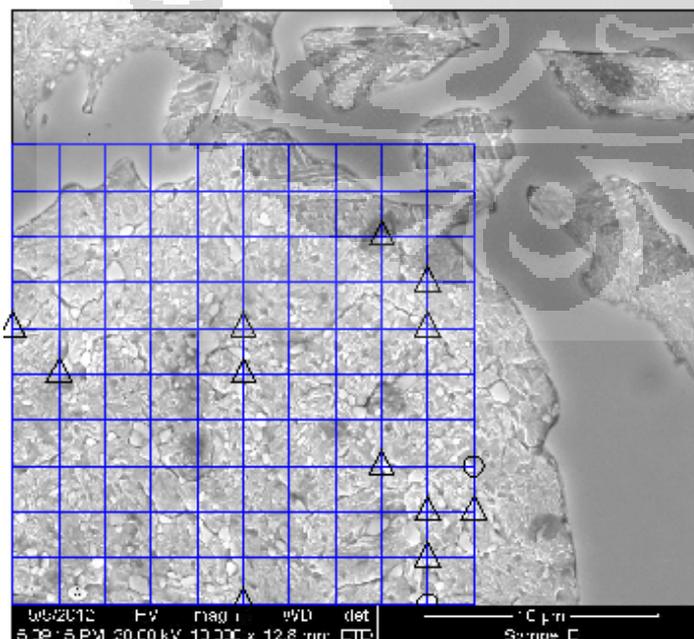
Casting Solutions Pty Ltd
PO Box 131,
Moorebank, NSW, 2170
Australia
www.finitesolutions.com

Lampiran 5

SECONDARY CARBIDE VOLUME FRACTION**Sampel B As-Tempered**

$N=1$, $\triangle = A$, $\circ = B$

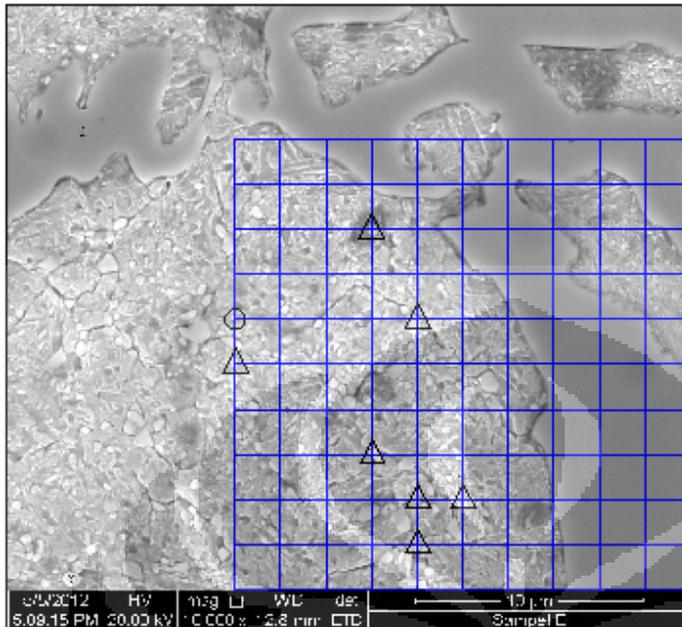
Po	A	B	Jumlah	Volume
100	6	5	8.5	8.5%



$N=2$, $\triangle = A$, $\circ = B$

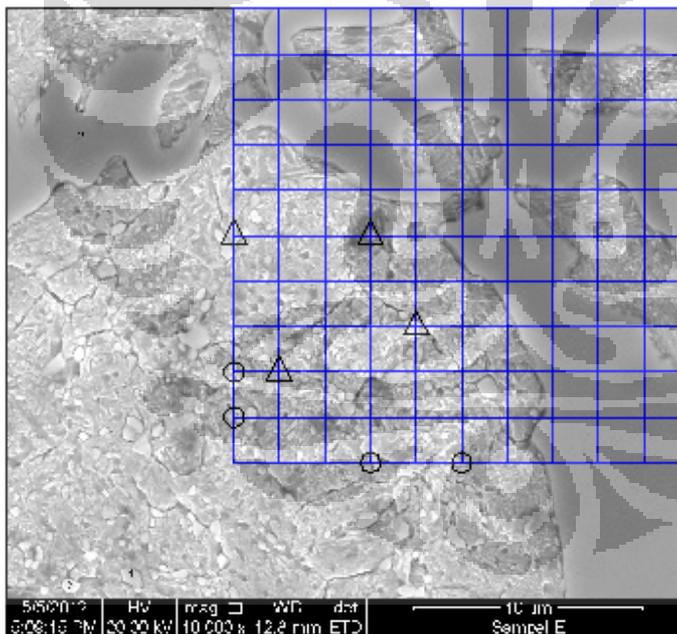
Po	A	B	Jumlah	Volume
100	12	2	13	13%

(Lanjutan)



N=3, $\triangle = A$, $\circ = B$

Po	A	B	Jumlah	Volume
100	7	1	7.5	7.5%

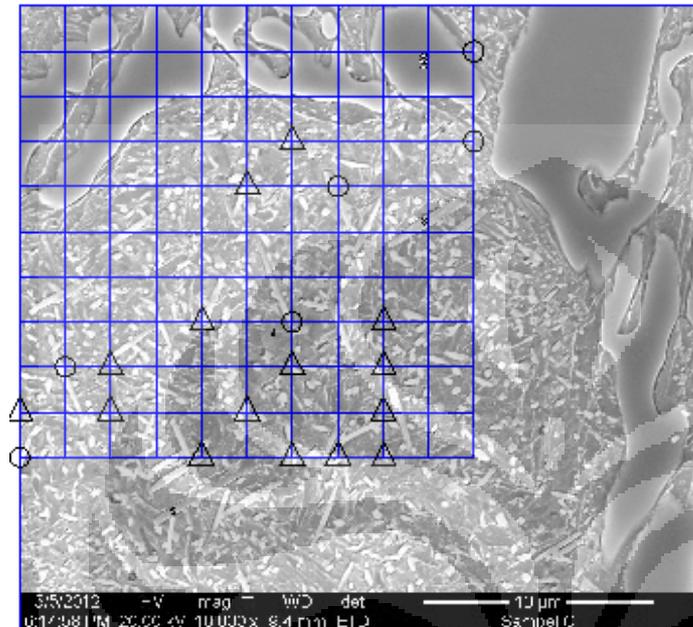


N=4, $\triangle = A$, $\circ = B$

Po	A	B	Jumlah	Volume
100	4	6	6	6%

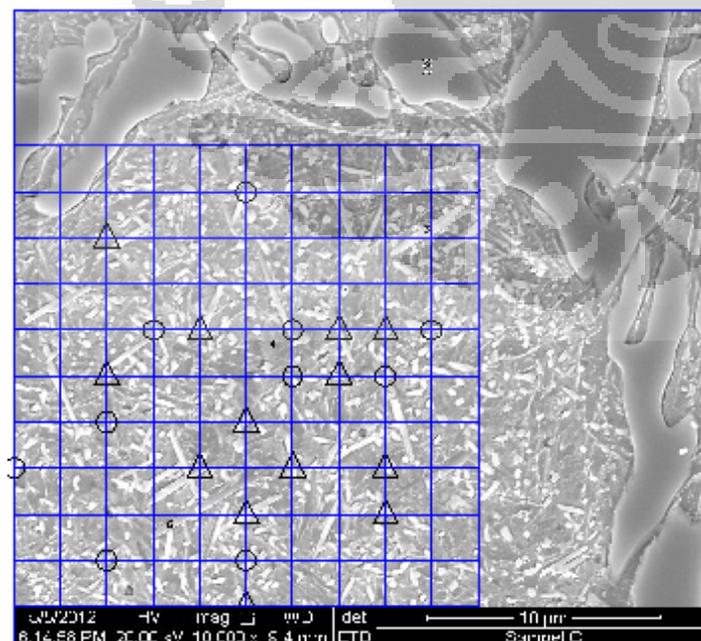
N	A	B	Jumlah	Volume
1	6	5	8.5	8.5%
2	12	2	13	13%
3	7	1	7.5	7.5%
4	4	4	6	6%
Nilai Rerata			8.75	8.75%

Lampiran 6
SECONDARY CARBIDE VOLUME FRACTION
Sampel C As-Tempered



N=1, $\triangle = A$, $\circ = B$

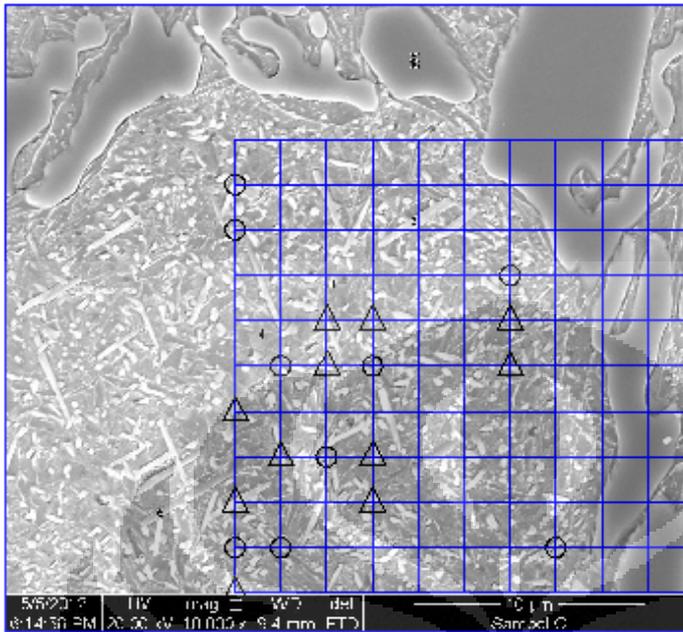
Po	A	B	Jumlah	Volume
100	15	6	18	18%



N=2, $\triangle = A$, $\circ = B$

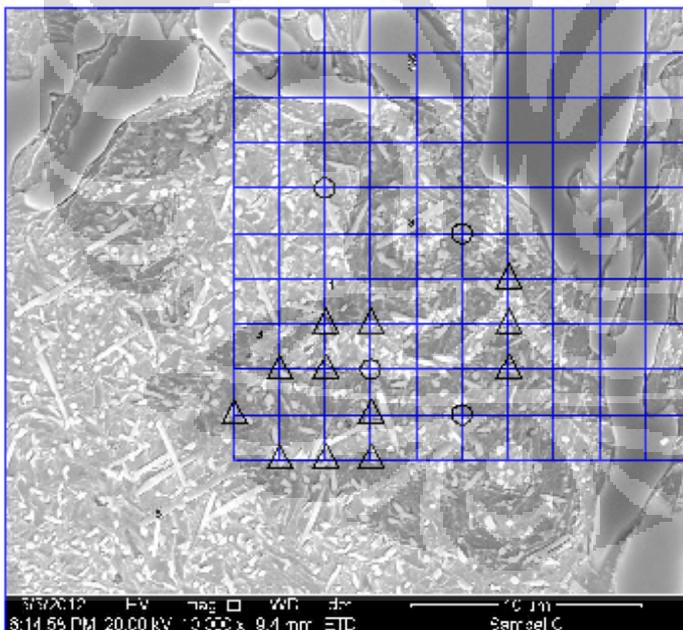
Po	A	B	Jumlah	Volume
100	12	10	17	17%

(Lanjutan)



$N=3$, $\triangle = A$, $\circ = B$

Po	A	B	Jumlah	Volume
100	11	8	15	15%

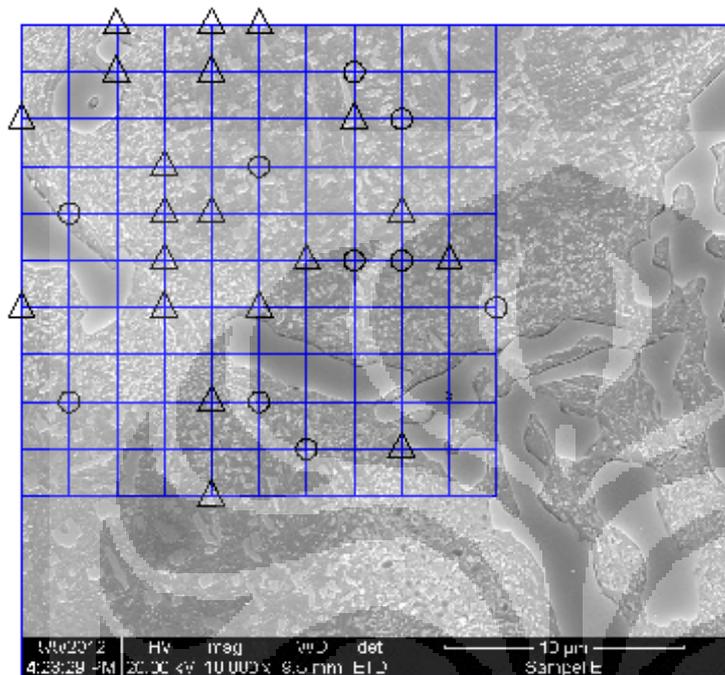


$N=4$, $\triangle = A$, $\circ = B$

Po	A	B	Jumlah	Volume
100	12	4	14	14%

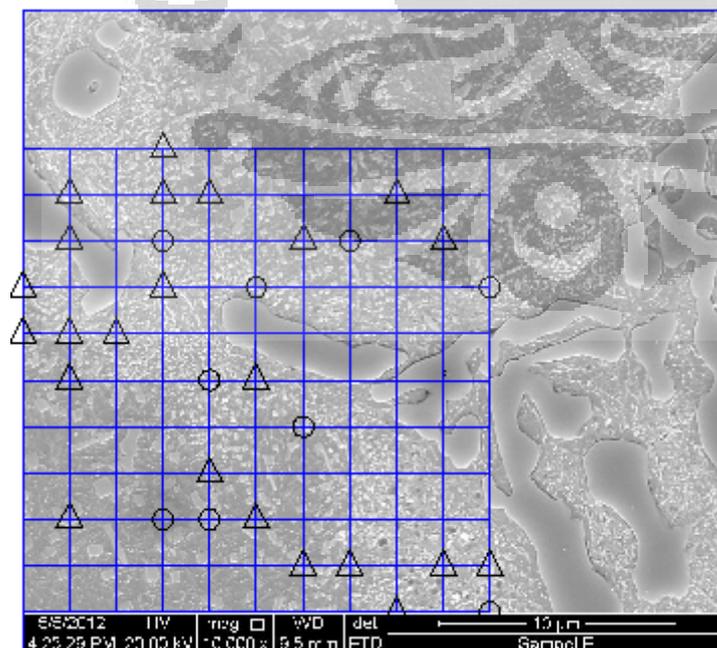
N	A	B	Jumlah	Volume
1	15	6	18	18%
2	12	10	17	17%
3	11	8	15	15%
4	12	4	14	14%
Nilai Rerata			16	16%

Lampiran 7

SECONDARY CARBIDE VOLUME FRACTION**Sampel E As-Tempered**

N=1, $\triangle = A$, $\circ = B$

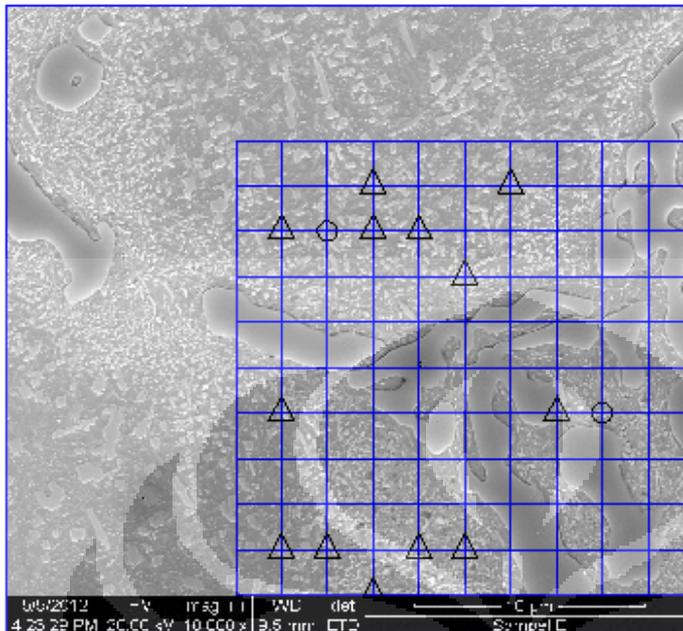
Po	A	B	Jumlah	Volume
100	19	10	24	24%



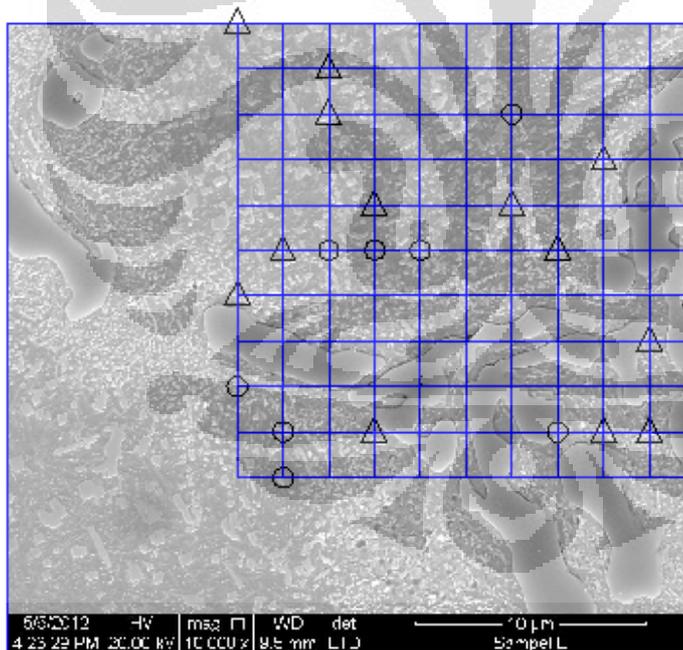
N=2, $\triangle = A$, $\circ = B$

Po	A	B	Jumlah	Volume
100	23	9	27.5	27.5%

(Lanjutan)


 $N=3$, $\triangle = A$, $\circ = B$

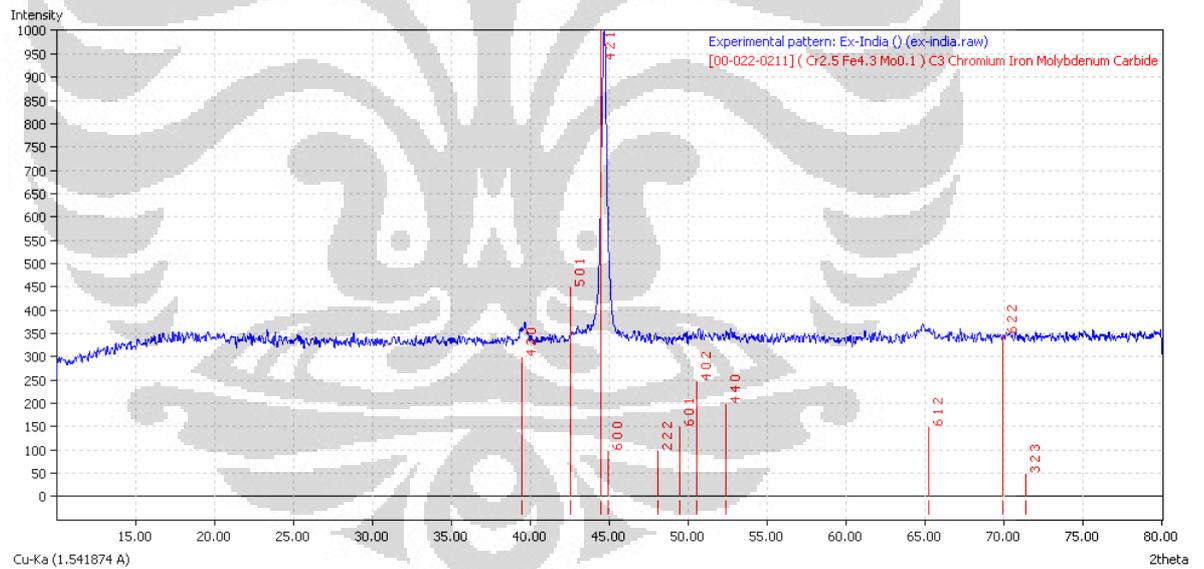
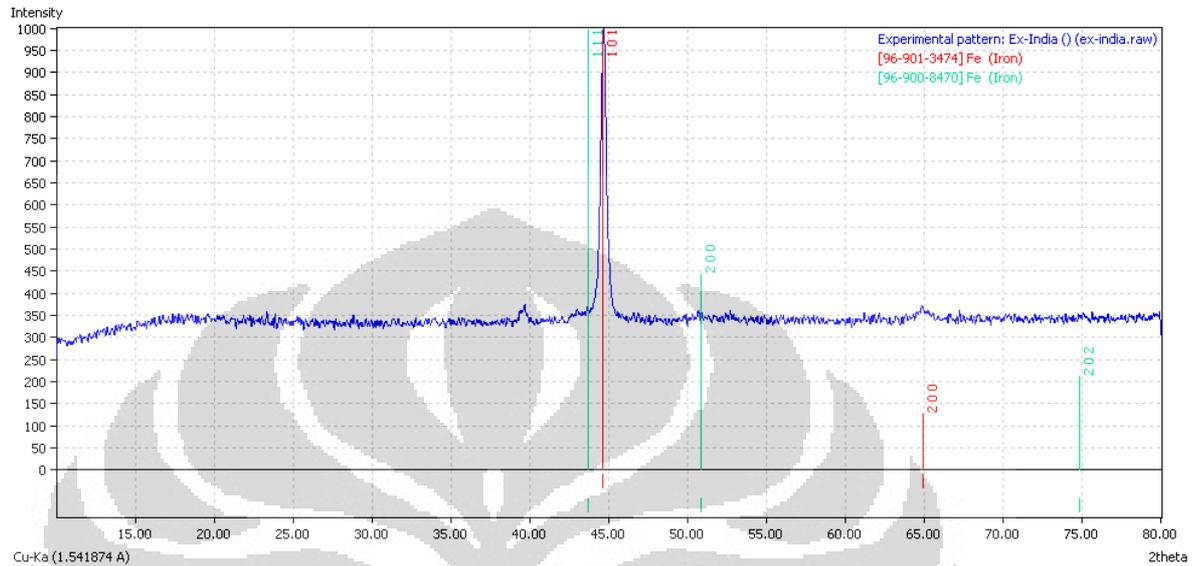
Po	A	B	Jumlah	Volume
100	13	2	14	14%


 $N=4$, $\triangle = A$, $\circ = B$

Po	A	B	Jumlah	Volume
100	18	7	21.5	21.5%

N	A	B	Jumlah	Volume
1	19	10	24	24%
2	23	9	27.5	27.5%
3	13	2	14	14%
4	18	7	21.5	21.5%
Nilai Rerata			16	16%

Lampiran 8
ANALISA XRD
Grinding Bal l Ex-India



***** Basic Data Process *****

Group : 13-12
Data : Ex-India

Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	4	44.6318	2.02864	100	0.39420	1538	34961
2	1	39.5478	2.27691	5	0.51160	75	2410
3	7	64.7800	1.43799	4	0.46000	68	1009

(Lanjutan)

Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I ₁	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	39.5478	2.27691	5	0.51160	75	2410
2	42.8600	2.10831	3	0.70000	50	1874
3	43.6000	2.07422	4	0.69000	61	3689
4	44.6318	2.02864	100	0.39420	1538	34961
5	50.6509	1.80078	3	0.17820	46	742
6	64.6000	1.44156	3	0.38660	52	1408
7	64.7800	1.43799	4	0.46000	68	1009
8	65.2000	1.42974	3	0.26660	51	942

Keterangan:

	M ₇ C ₃ / (Cr _{2.5} , Fe _{4.3} , Mo _{0.1})C ₃	[Data card: 022-0211]
	Austenit	[Data card: 96-900-8470]
	Martensit	[Data card: 96-901-3474]

(Lanjutan)

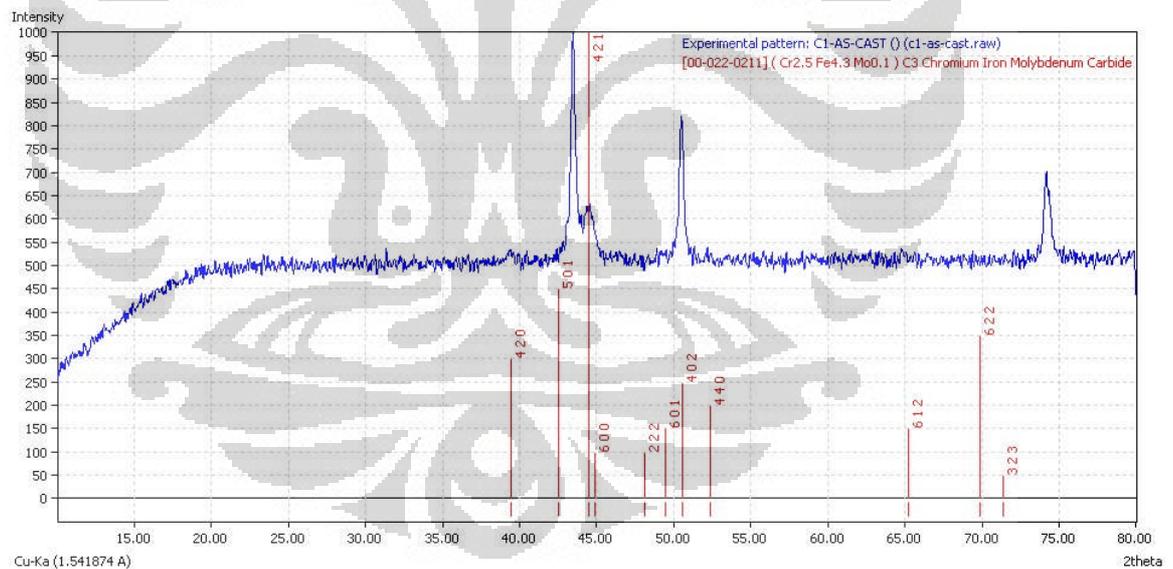
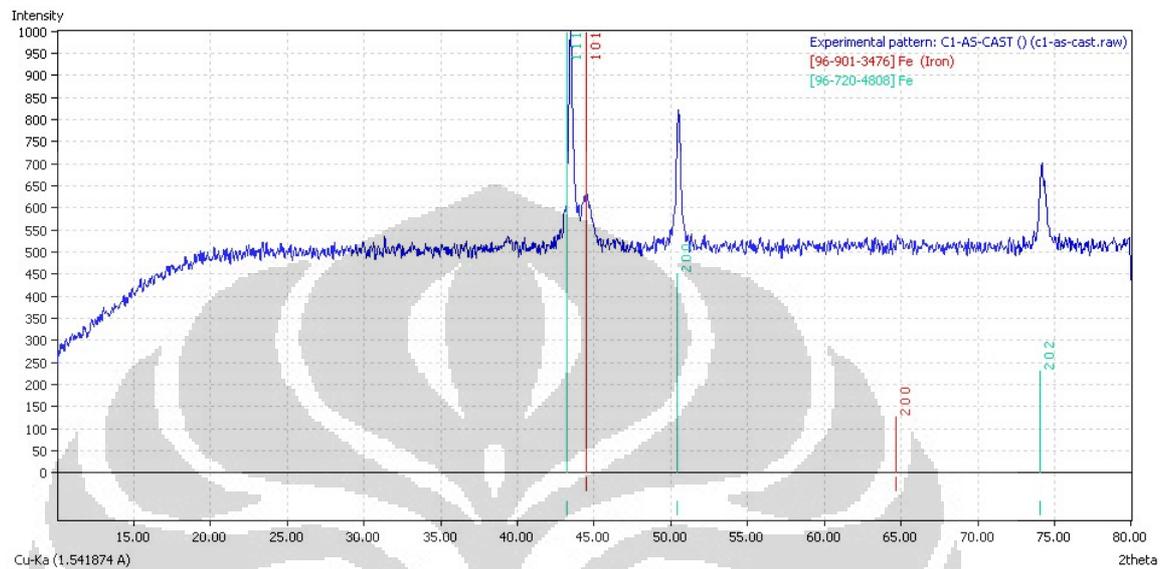
21	23.7090	3.74975	3	0.40200	17	540
22	25.3875	3.50551	3	0.29500	20	569
23	26.3450	3.38024	3	0.51000	20	568
24	27.7273	3.21470	4	0.31070	21	420
25	31.6750	2.82254	4	0.25000	23	422
26	34.1476	2.62341	3	0.27010	20	505
27	36.2057	2.47905	5	0.29140	26	618
28	40.2193	2.24043	3	0.09440	20	140
29	42.7200	2.11489	7	0.30660	39	1231
30	43.5290	2.07744	100	0.53560	173	1593
31	44.6282	2.02879	47	0.78980	270	10585
32	45.7000	1.98367	6	0.79000	35	1723
33	46.2200	1.96256	5	0.32000	27	414
34	47.0864	1.92845	7	0.35290	39	777
35	47.6800	1.90582	4	0.20000	24	276
36	48.0675	1.89135	4	0.21500	22	309
37	48.7000	1.86626	4	0.30000	22	333
38	49.0566	1.85551	6	0.36670	32	453
39	49.3866	1.84388	4	0.17330	25	237
40	50.0400	1.82132	6	0.28000	33	649
41	50.7300	1.79816	22	0.70000	125	3785
42	51.2800	1.78015	10	0.58660	56	1772
43	52.6075	1.73832	5	0.23500	27	530
44	53.2017	1.72029	5	0.25940	26	396
45	53.8975	1.69972	5	0.25500	27	478
46	54.5916	1.67973	4	0.20330	21	350
47	55.2890	1.66157	4	0.17800	21	270
48	55.9333	1.64258	6	0.41330	32	835
49	56.6325	1.62395	5	0.30500	26	497
50	57.4100	1.60379	5	0.30000	31	600
51	59.0675	1.56268	4	0.33500	25	538
52	60.4485	1.53024	3	0.19300	17	336
53	62.2666	1.48908	4	0.28330	23	487

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
54	63.3150	1.46768	3	0.19000	20	200
55	64.0466	1.45267	3	0.30670	20	326
56	64.6150	1.44126	5	0.31660	26	434
57	65.3227	1.42733	7	0.47260	42	891
58	65.8350	1.41748	3	0.17000	17	170
59	67.1250	1.38033	4	0.22340	24	341
60	69.5400	1.35073	3	0.16000	17	183
61	70.0366	1.34233	3	0.30570	10	472
62	72.4283	1.30381	5	0.23000	26	416
63	73.4390	1.28818	3	0.37000	17	318
64	73.8600	1.28204	4	0.28000	23	336
65	74.3933	1.27431	11	0.45470	62	1116
66	74.8400	1.26766	5	0.38660	29	554
67	75.2850	1.26170	6	0.25000	30	512
68	76.2116	1.24823	4	0.29670	22	486
69	77.7233	1.22768	3	0.40670	17	491
70	78.3575	1.21933	3	0.34500	20	420

Keterangan:

	Fe ₃ C	[Data card: 96-901-1406]
	Austenit (sisa)	[Data card: 96-900-8470]
	Martensit	[Data card: 96-900-6596]

Lampiran 10
ANALISA XRD
Sampel C As-Cast



Group : 23
Data : C1-AS-CAST

Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	37	43.4358	2.08168	100	0.41320	677	14389
2	42	50.4542	1.80734	65	0.39210	439	8889
3	61	74.1577	1.27763	46	0.43400	311	7346

(Lanjutan)

Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	12.3505	7.16092	3	0.33100	20	398
2	13.0208	6.79375	5	0.50830	32	852
3	13.7000	6.45843	4	0.41340	30	1125
4	14.2800	6.19739	6	0.00000	38	0
5	14.8200	5.97277	7	0.00000	47	0
6	15.3200	5.77894	8	0.00000	57	0
7	15.9200	5.56247	8	0.00000	53	0
8	16.0600	5.51429	8	0.00000	53	0
9	16.5800	5.34250	10	0.00000	68	0
10	17.2600	5.13352	11	0.00000	73	0
11	18.3600	4.82836	11	0.00000	75	0
12	19.0400	4.65742	11	0.00000	76	0
13	19.7400	4.49382	10	0.00000	66	0
14	20.3000	4.37110	10	0.00000	65	0
15	20.9800	4.23093	9	0.00000	62	0
16	21.4800	4.13356	7	0.00000	46	0
17	21.8200	4.06992	6	0.00000	40	0
18	22.4800	3.95190	8	0.00000	55	0
19	22.9400	3.87368	6	0.00000	41	0
20	23.5400	3.77629	8	0.00000	52	0
21	23.9000	3.72021	5	0.00000	31	0
22	24.5566	3.62221	6	0.47330	44	1344
23	25.1000	3.54501	4	0.51200	30	939
24	25.7200	3.46094	3	0.00000	21	0
25	25.8600	3.44252	4	0.42000	26	899
26	28.0490	3.17863	3	0.20470	21	511
27	28.9920	3.07735	4	0.26400	24	529
27	28.9920	3.07735	4	0.26400	24	529
28	29.5116	3.02434	3	0.25670	20	279
29	29.9278	2.98323	4	0.31570	29	392
30	30.4821	2.93023	4	0.21570	25	295
31	31.3900	2.84752	4	0.26000	25	547
32	32.2320	2.77503	3	0.30400	23	515
33	33.0900	2.70501	4	0.38000	26	601
34	36.5020	2.45960	4	0.12400	25	194
35	39.3450	2.28818	5	0.41000	36	963
36	42.5800	2.12152	5	0.37720	31	1424
37	43.4358	2.08168	100	0.41320	677	14389
38	44.3800	2.03956	28	0.94280	187	9281
39	46.4050	1.95517	3	0.37000	21	567
40	49.2700	1.84797	5	0.26000	34	690
41	49.9400	1.82473	6	0.32000	44	1151
42	50.4542	1.80734	65	0.39210	439	8889
43	50.9400	1.79124	6	0.00000	44	0
44	51.2283	1.78183	5	0.13670	32	572
45	52.1837	1.75143	4	0.40750	29	670
46	53.4326	1.71340	3	0.24130	21	366
47	55.0875	1.66578	3	0.13500	23	211
48	55.8018	1.64614	4	0.18640	25	275
49	59.0820	1.56233	4	0.19600	25	512
50	60.3986	1.53138	4	0.21070	25	404
51	61.4116	1.50853	4	0.23670	25	364
52	61.8000	1.49998	3	0.32000	21	426
53	62.6360	1.48195	5	0.28000	34	612

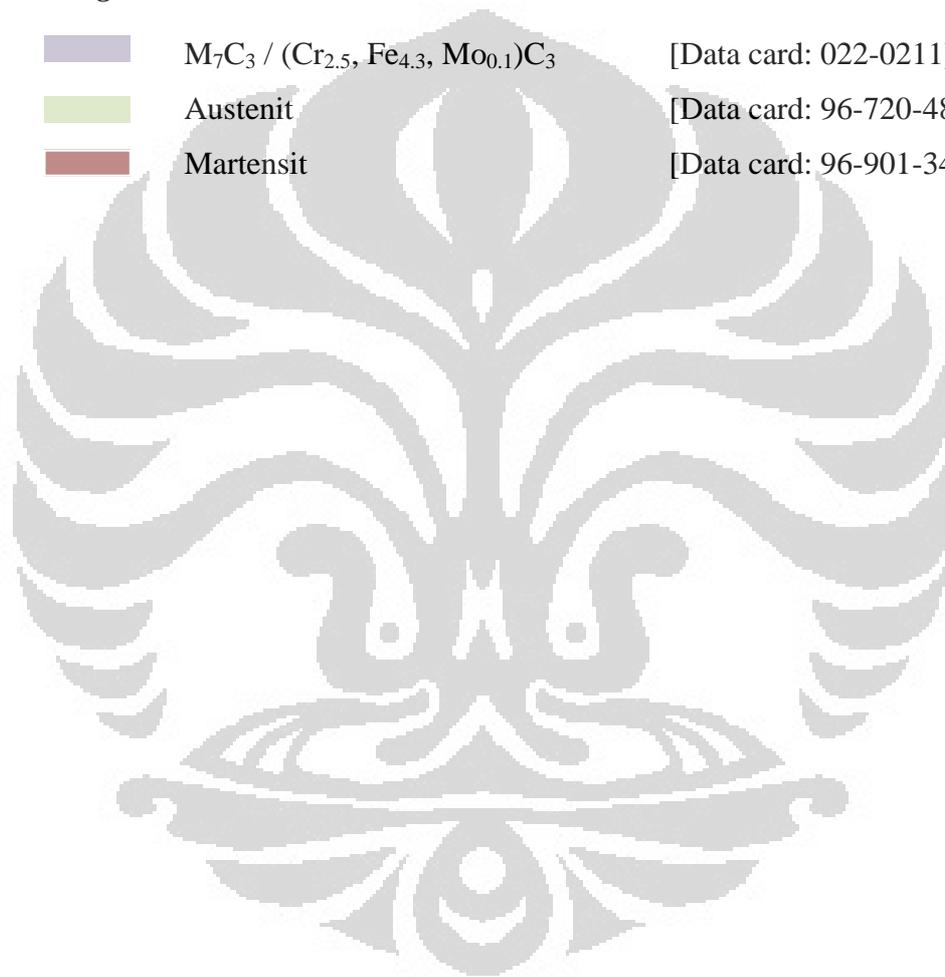
peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
54	63.2600	1.46883	4	0.32000	29	594
55	64.8184	1.43723	6	0.37460	44	1101
56	65.5308	1.42332	4	0.22830	28	468
57	66.4470	1.40590	5	0.32600	33	669
58	67.3700	1.38886	3	0.22000	20	345
59	73.0630	1.29405	4	0.25400	25	375
60	73.5800	1.28623	5	0.26000	31	552

(Lanjutan)

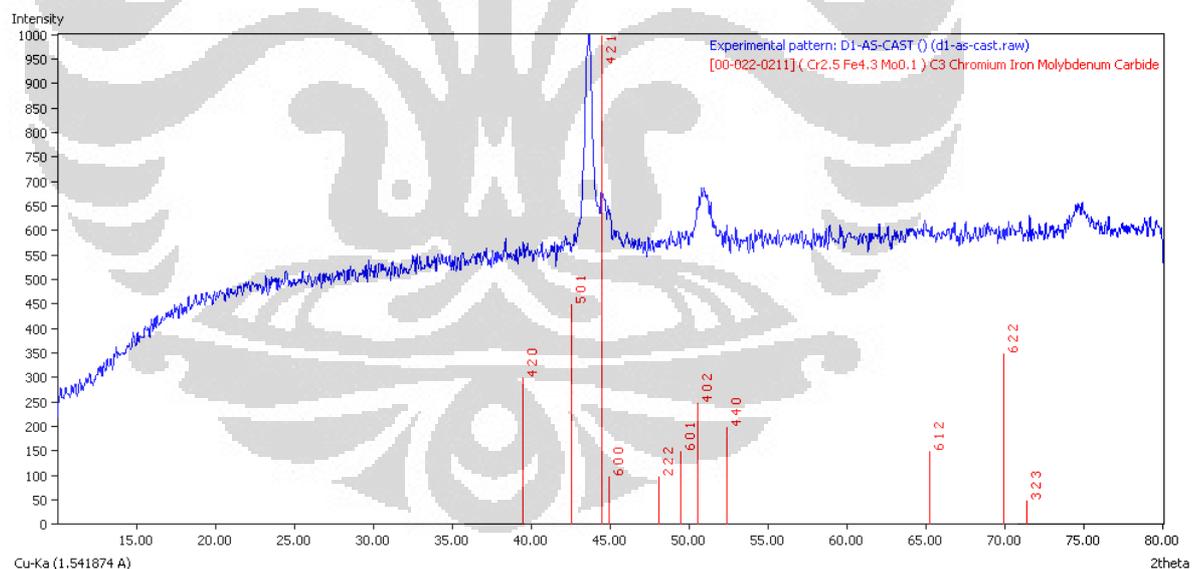
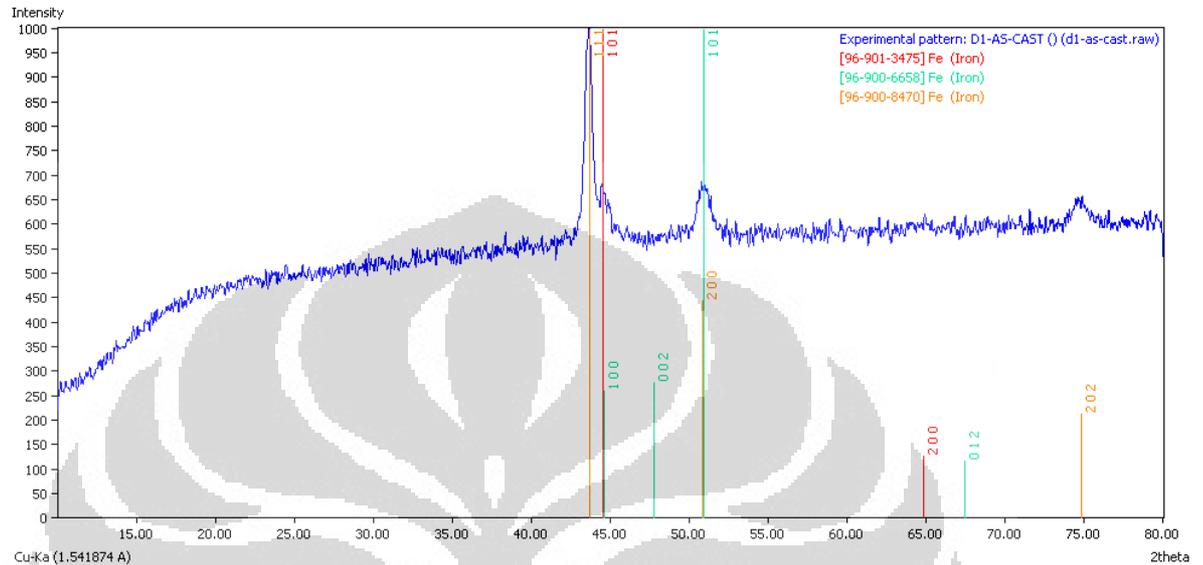
61	74.1577	1.27763	46	0.43400	311	7346
62	74.9133	1.26661	4	0.22670	28	556
63	75.7716	1.25438	3	0.24330	21	401
64	78.7764	1.21389	4	0.21290	25	270
65	79.6875	1.20229	3	0.22500	22	362

Keterangan:

	$M_7C_3 / (Cr_{2.5}, Fe_{4.3}, Mo_{0.1})C_3$	[Data card: 022-0211]
	Austenit	[Data card: 96-720-4808]
	Martensit	[Data card: 96-901-3476]



Lampiran 11
ANALISA XRD
Sampel D As-Cast



Group : 23
Data : D1-AS-CAST

Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	28	43.5906	2.07465	100	0.67520	508	17194
2	32	50.8770	1.79331	27	0.97400	139	7219
3	29	44.5600	2.03174	25	0.79000	129	6145

Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	12.9800	6.81502	3	0.60000	16	525

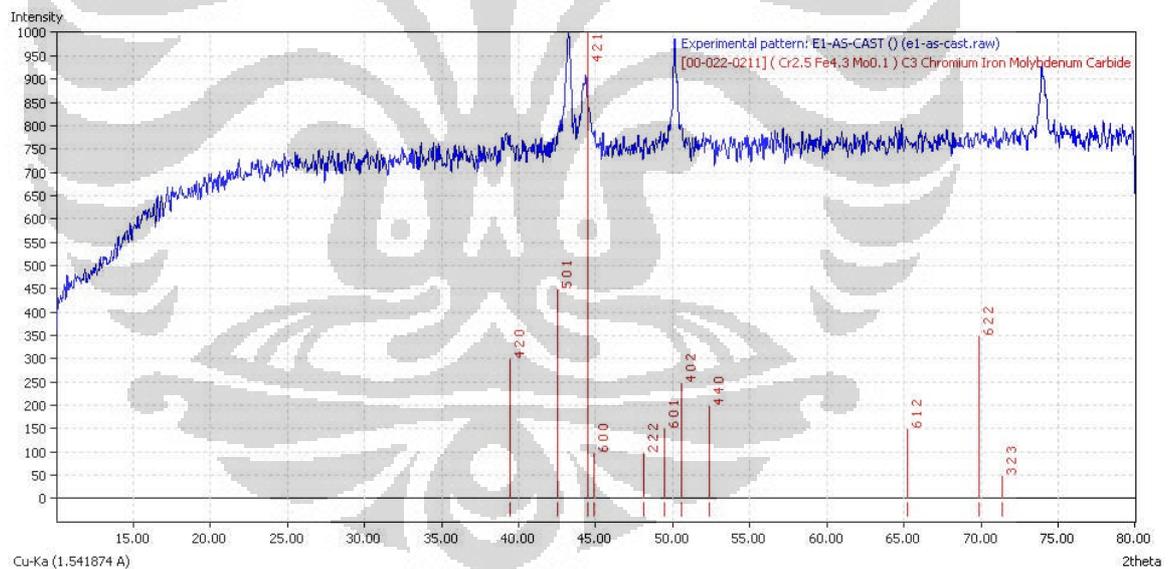
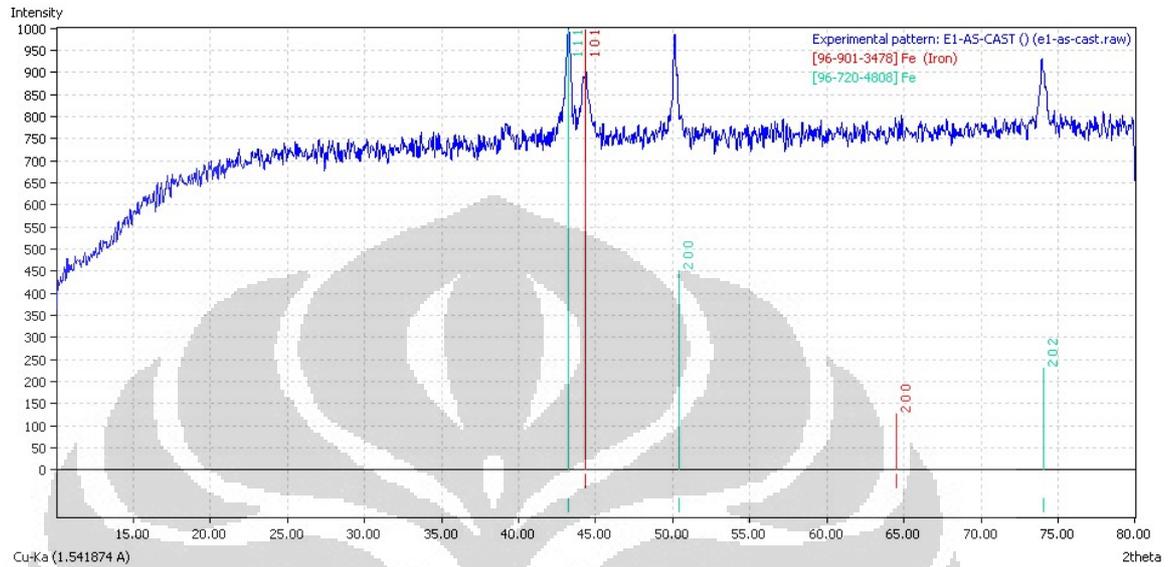
(Lanjutan)

2	13.8000	6.41186	6	0.82000	29	1807
3	14.7400	6.00500	7	0.00000	36	0
4	15.6200	5.66862	10	0.00000	50	0
5	15.8800	5.57639	10	0.00000	53	0
6	16.2800	5.44027	11	0.00000	58	0
7	16.8000	5.27303	12	0.00000	60	0
8	17.1800	5.15724	13	0.00000	65	0
9	18.8600	4.70147	13	0.00000	66	0
10	19.3000	4.59526	13	0.00000	65	0
11	20.1800	4.39682	12	0.00000	60	0
12	21.1000	4.20714	9	0.00000	48	0
13	21.7400	4.08471	10	0.00000	53	0
14	23.7400	3.74492	8	0.00000	42	0
15	24.3600	3.65099	8	1.06660	41	1823
16	25.3000	3.51744	6	1.33000	29	1963
17	26.7200	3.33364	3	0.00000	16	0
18	27.0000	3.29970	3	0.52000	17	534
19	27.8333	3.20278	4	0.41330	22	455
20	28.4800	3.13150	3	0.72000	16	846
21	30.4500	2.93324	4	0.46000	20	840
22	32.6700	2.73882	4	0.39340	19	482
23	34.2116	2.61885	3	0.60330	16	844
24	36.8800	2.43526	3	0.32000	15	554
25	38.3100	2.34758	4	0.50000	20	583
26	39.5200	2.27845	4	0.38000	18	455
27	42.2200	2.13877	5	0.60000	26	974
28	43.5906	2.07465	100	0.67520	508	17194
29	44.5600	2.03174	25	0.79000	129	6145
30	46.0400	1.96981	3	0.55000	16	839
31	49.4600	1.84131	4	0.17340	20	414
32	50.8770	1.79331	27	0.97400	139	7219
33	52.1200	1.75342	4	0.32000	20	617
34	54.4940	1.68251	4	0.18800	20	458
35	61.7833	1.50034	3	0.19330	16	270
36	63.9750	1.45413	5	0.47000	23	664
37	64.8900	1.43581	5	0.71340	26	1008
38	66.0700	1.41300	3	0.22000	16	203
39	66.5200	1.40453	4	0.40000	22	570
40	68.8275	1.36296	4	0.54500	22	859
41	70.2216	1.33928	3	0.23670	15	451
42	74.6000	1.27115	13	1.00000	67	3454
43	75.6200	1.25651	4	0.41340	19	670
44	78.8850	1.21249	4	0.33000	19	596

Keterangan:

	$M_7C_3 / (Cr_{2.5}, Fe_{4.3}, Mo_{0.1})C_3$	[Data card: 022-0211]
	Austenit	[Data card: 96-900-8470]
	Martensit	[Data card: 96-901-3475]
	Bainit	[Data card: 96-900-6658]

Lampiran 12
ANALISA XRD
Sampel E As-Cast



Group : 23
Data : E1-AS-CAST

Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	39	43.1710	2.09384	100	0.65800	181	6247
2	45	50.0983	1.81934	81	0.64330	146	4788
3	40	44.2693	2.04440	71	0.72140	128	4783

(Lanjutan)

Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	10.6800	8.27695	12	0.76000	22	802
2	11.0600	7.99341	12	0.00000	22	0
3	11.5400	7.66198	13	0.52000	23	887
4	12.9500	6.83074	11	0.78000	20	945
5	14.0200	6.31173	14	0.89340	26	1614
6	14.6600	6.03759	23	0.00000	41	0
7	15.6600	5.65423	33	0.00000	59	0
8	16.4600	5.38118	29	0.00000	53	0
9	17.0000	5.21144	29	0.00000	52	0
10	17.4000	5.09253	36	0.00000	66	0
11	18.0200	4.91869	33	0.00000	60	0
12	18.7400	4.73130	29	0.00000	53	0
13	19.8200	4.47586	32	0.00000	58	0
14	20.4000	4.34989	27	0.00000	48	0
15	21.1600	4.19535	28	0.00000	50	0
16	21.6400	4.10336	31	0.00000	56	0
17	22.9800	3.86703	29	1.12000	52	5254
18	24.2200	3.67178	24	0.00000	44	0
19	24.8800	3.57585	21	0.00000	38	0
20	25.4200	3.50110	20	1.74000	37	2345
21	26.9000	3.31174	18	0.86000	32	1207
22	27.8150	3.20484	16	0.61000	29	928
23	29.0966	3.06653	14	0.60670	26	927
24	30.1400	2.96270	12	0.76000	22	802
25	30.9800	2.88426	6	0.26660	10	205
26	32.0266	2.79235	5	0.13330	9	242
27	32.4600	2.75605	7	0.00000	13	0
28	33.1000	2.70421	4	0.00000	8	0
29	33.4875	2.67380	6	0.13500	11	194
30	34.6000	2.59033	10	0.52000	18	642
31	35.5900	2.52051	5	0.10000	9	52
32	36.1900	2.48009	7	0.54000	13	474
33	37.8150	2.37717	4	0.11000	8	88
34	38.1233	2.35865	4	0.08670	7	45
35	39.2175	2.29532	20	0.55500	37	1111
36	40.4200	2.22977	3	0.09000	5	63
37	40.9966	2.19973	6	0.35330	10	306
38	42.3000	2.13491	9	0.22000	16	348
39	43.1710	2.09384	100	0.65800	181	6247
40	44.2693	2.04440	71	0.72140	128	4783
41	45.1400	2.00697	7	0.18000	12	188
42	47.5825	1.90949	4	0.12500	8	76
43	48.3733	1.88011	3	0.12000	5	66
44	49.1200	1.85326	9	0.24000	17	420
45	50.0983	1.81934	81	0.64330	146	4788
46	50.7400	1.79783	10	0.08000	19	193
47	51.6400	1.76859	8	0.20000	15	234
48	52.0908	1.75434	13	0.63170	24	678
49	53.1140	1.72293	8	0.21200	15	180
50	53.6000	1.70845	3	0.16000	5	134
51	53.9475	1.69826	8	0.15500	15	130
52	54.5933	1.67969	9	0.20000	16	229
53	55.4658	1.65531	6	0.24170	10	151

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
54	56.0400	1.63970	6	0.25340	11	314
55	56.7880	1.61987	9	0.17600	16	296
56	58.1900	1.58413	4	0.18000	7	100
57	58.6500	1.57280	6	0.18000	11	159
58	59.3050	1.55698	7	0.27000	12	282
59	60.3700	1.53204	4	0.14000	8	84
60	60.8100	1.52200	9	0.38000	16	332

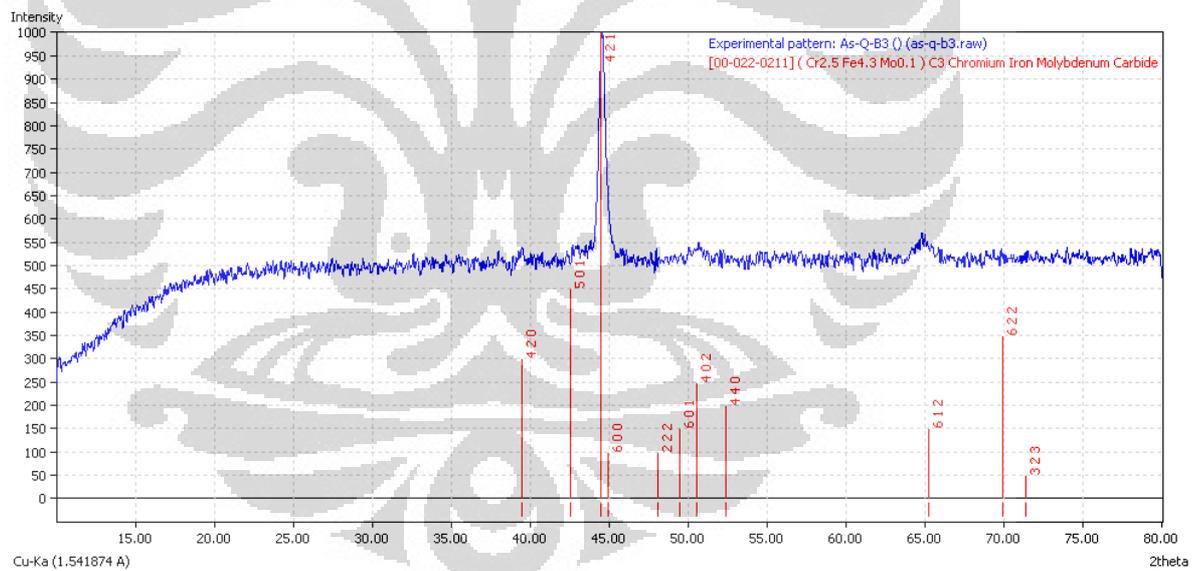
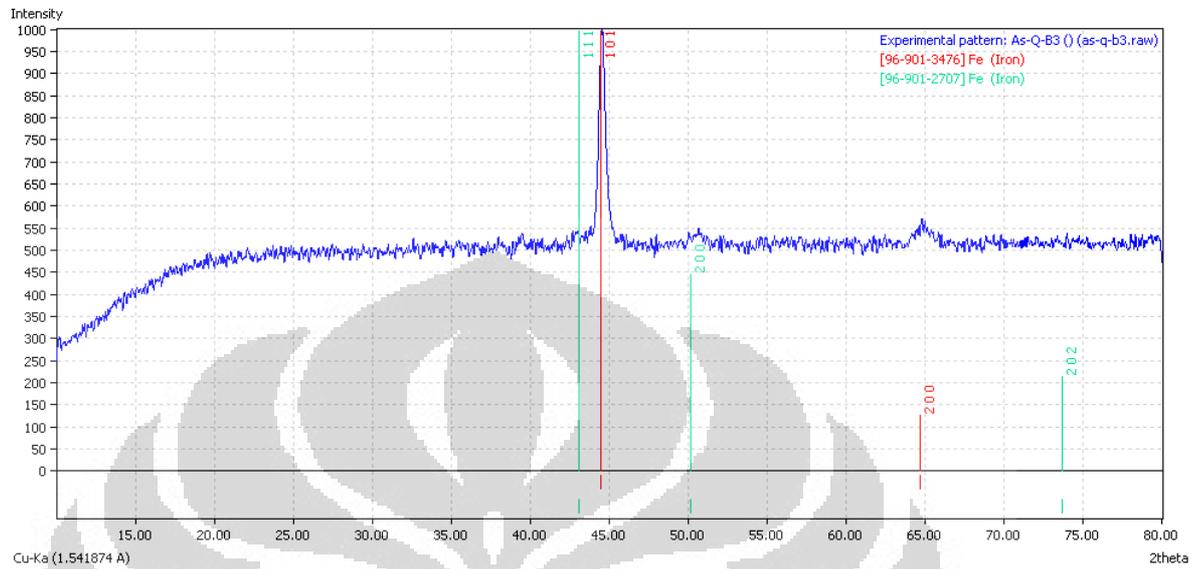
(Lanjutan)

61	61.8466	1.49896	6	0.18670	10	160
62	62.6840	1.48093	7	0.20800	13	267
63	63.4350	1.46520	4	0.19000	8	102
64	64.4700	1.44415	9	0.58000	17	498
65	65.0000	1.43365	4	0.00000	7	0
66	66.2146	1.41027	8	0.32270	14	275
67	67.5700	1.38524	10	0.24000	18	359
68	69.0133	1.35975	4	0.22670	8	127
69	69.8650	1.34524	7	0.41000	13	401
70	70.7000	1.33139	5	0.12000	9	113
71	71.5900	1.31701	7	0.34000	13	333
72	72.4800	1.30301	6	0.34660	10	276
73	73.0200	1.29470	6	0.32000	10	240
74	73.9333	1.28095	70	0.58670	126	4036
75	75.3900	1.25978	10	0.38000	19	600
76	76.0800	1.25006	3	0.24000	6	128
77	77.2258	1.23435	8	0.23830	15	186
78	77.7267	1.22764	4	0.16000	8	61

Keterangan:

	$M_7C_3 / (Cr_{2.5}, Fe_{4.3}, Mo_{0.1})C_3$	[Data card: 022-0211]
	Austenit	[Data card: 96-720-4808]
	Ferrit	[Data card: 96-901-3478]

Lampiran 13
ANALISA XRD
Sampel B As-Quenched



Group : 42
Data : As-Q-B3

Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	32	44.5126	2.03379	100	0.56140	680	21537
2	7	17.2800	5.12762	11	0.00000	72	0
3	10	19.5800	4.53018	10	0.00000	68	0

(Lanjutan)

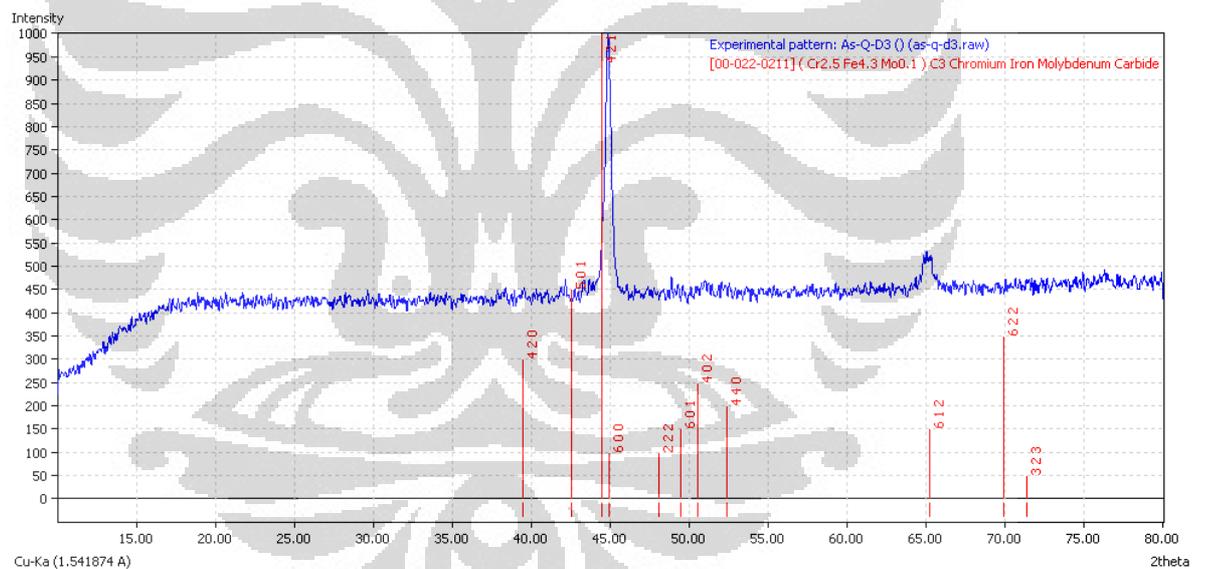
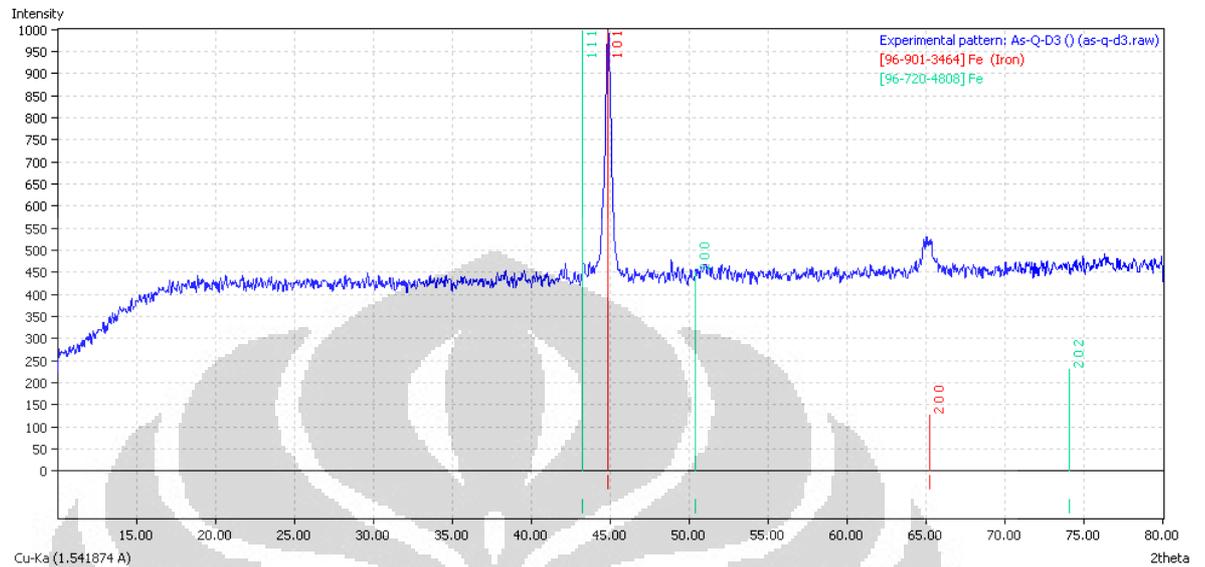
Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	12.6800	6.97557	3	0.59000	22	1087
2	13.8800	6.37508	7	1.16000	48	3424
3	14.8200	5.97277	8	0.00000	54	0
4	15.3200	5.77894	7	0.00000	49	0
5	15.9200	5.56247	8	0.00000	56	0
6	16.1400	5.48714	8	0.00000	54	0
7	17.2800	5.12762	11	0.00000	72	0
8	18.0200	4.91869	10	0.00000	65	0
9	18.7000	4.74133	9	0.00000	64	0
10	19.5800	4.53018	10	0.00000	68	0
11	20.4000	4.34989	9	0.00000	59	0
12	20.9600	4.23492	8	0.00000	57	0
13	21.5600	4.11841	8	0.00000	52	0
14	22.1000	4.01898	8	1.12000	53	3552
15	23.4000	3.79856	6	0.00000	44	0
16	24.1000	3.68979	6	0.00000	38	0
17	24.2000	3.67477	5	0.00000	33	0
18	24.7400	3.59577	5	0.88000	37	1759
19	25.6400	3.47156	4	0.32000	29	444
20	26.1200	3.40884	4	0.78000	27	756
21	26.8400	3.31901	4	0.63000	27	652
22	27.4833	3.24276	4	0.72670	30	1440
23	29.5708	3.01842	3	0.20830	21	507
24	32.6500	2.74045	3	0.30000	22	469
25	33.4250	2.67866	3	0.31000	22	525
26	34.6814	2.58444	3	0.29430	20	332
27	35.5133	2.52578	4	0.30670	24	545
28	38.0525	2.36287	3	0.37500	20	390
29	39.4205	2.28397	6	0.39100	40	1142
30	42.8200	2.11018	7	0.34000	48	2164
31	43.6000	2.07422	6	0.00000	41	0
32	44.5126	2.03379	100	0.56140	680	21537
33	45.7800	1.98039	4	0.38660	28	1121
34	50.1800	1.81657	5	0.56000	34	1103
35	50.5833	1.80303	7	0.60670	47	1675
36	54.6035	1.67940	3	0.53510	23	762
37	64.2800	1.44796	5	0.52000	36	787
38	64.6800	1.43997	10	0.46000	68	1454
39	65.2400	1.42896	6	0.41340	43	1499
40	68.9900	1.36015	4	0.46000	24	1130
41	74.5275	1.27220	4	0.25500	24	612
42	79.2030	1.20842	4	0.42600	29	1431

Keterangan:

	M ₇ C ₃ / (Cr _{2.5} , Fe _{4.3} , Mo _{0.1})C ₃	[Data card: 022-0211]
	Austenit (sisa)	[Data card: 96-901-2707]
	Martensit	[Data card: 96-901-3476]

Lampiran 14
ANALISA XRD
Sampel D As-Quenched



Group : 42
Data : As-Q-D3

Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	21	44.8206	2.02053	100	0.47950	818	22918
2	27	65.0212	1.43323	14	0.70250	113	4686
3	6	16.5000	5.36822	8	0.00000	65	0

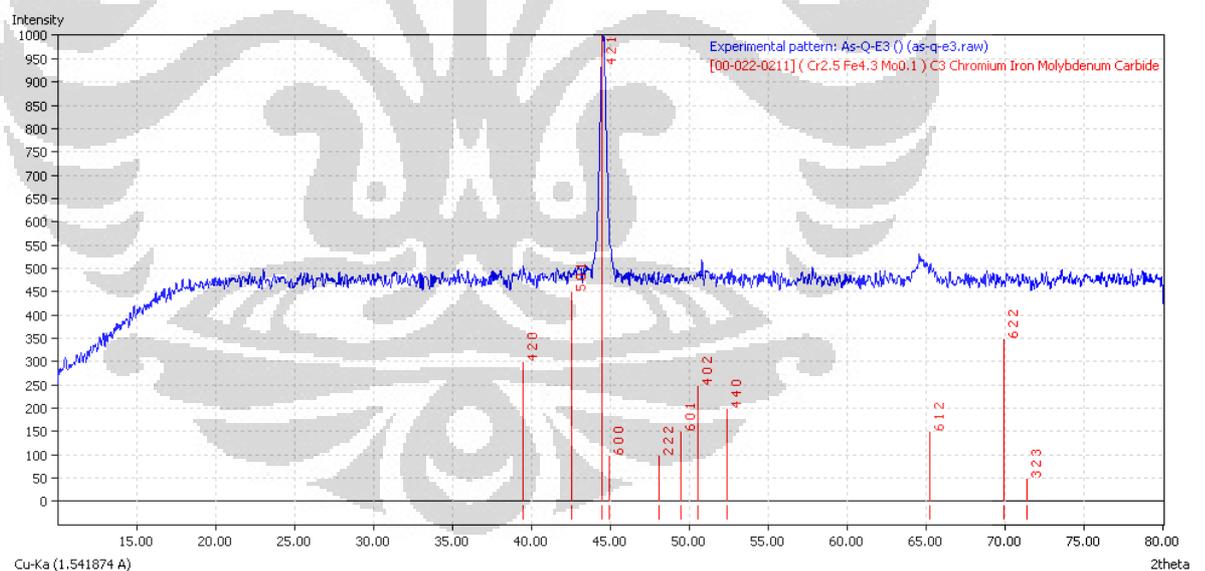
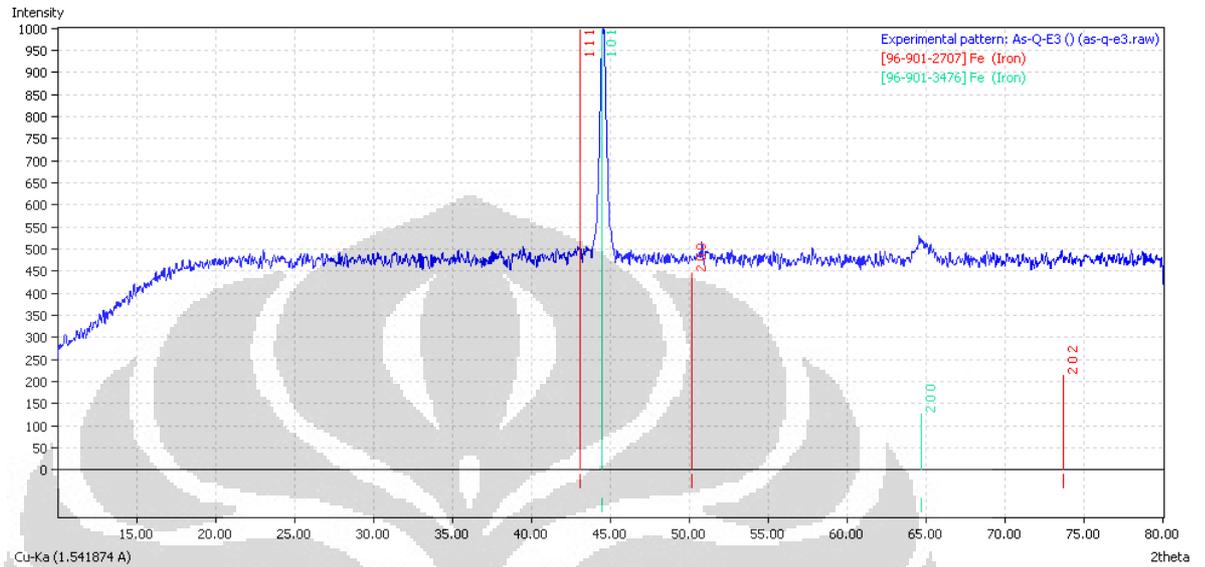
(Lanjutan)

# Peak Data List						
peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I ₁	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	12.8200	6.89971	3	0.90000	27	1534
2	13.4200	6.59255	5	0.46400	40	1508
3	14.0000	6.32070	7	0.00000	55	0
4	14.6400	6.04580	6	0.00000	50	0
5	15.3400	5.77145	8	0.00000	63	0
6	16.5000	5.36822	8	0.00000	65	0
7	17.2000	5.15129	8	0.00000	64	0
8	18.1000	4.89713	7	0.00000	57	0
9	18.3600	4.82836	6	0.00000	47	0
10	19.0400	4.65742	7	0.98000	57	3123
11	19.9200	4.45362	4	0.00000	36	0
12	20.4800	4.33308	4	0.00000	35	0
13	21.0600	4.21504	4	0.73340	32	1306
14	21.6512	4.10126	4	0.35750	33	743
15	22.8300	3.89210	3	0.38000	25	1047
16	34.7000	2.58310	3	0.28000	27	819
17	38.2616	2.35044	4	0.22330	31	659
18	42.0780	2.14566	4	0.36400	34	676
19	43.3000	2.08790	5	0.38400	40	1161
20	43.7400	2.06791	5	0.00000	43	0
21	44.8206	2.02053	100	0.47950	818	22918
22	45.9000	1.97549	4	0.36000	29	1233
23	51.0228	1.78852	5	0.55430	39	1317
24	52.0860	1.75449	3	0.50000	28	1094
25	53.6020	1.70839	3	0.19600	28	452
26	54.5146	1.68192	3	0.24420	27	606
27	65.0212	1.43323	14	0.70250	113	4686
28	76.2480	1.24772	4	0.46400	30	971

Keterangan:

	M ₇ C ₃ / (Cr _{2.5} , Fe _{4.3} , Mo _{0.1})C ₃	[Data card: 022-0211]
	Austenit (sisa)	[Data card: 96-720-4808]
	Martensit	[Data card: 96-901-3464]

Lampiran 15
ANALISA XRD
Sampel E As-Quenched



Group : 42
Data : As-Q-E3

# Strongest 3 peaks							
no.	peak no.	2Theta (deg)	d (A)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	26	44.4981	2.03442	100	0.51960	768	22153
2	30	64.5600	1.44235	10	0.65340	74	2465
3	8	17.9600	4.93498	10	0.00000	73	0

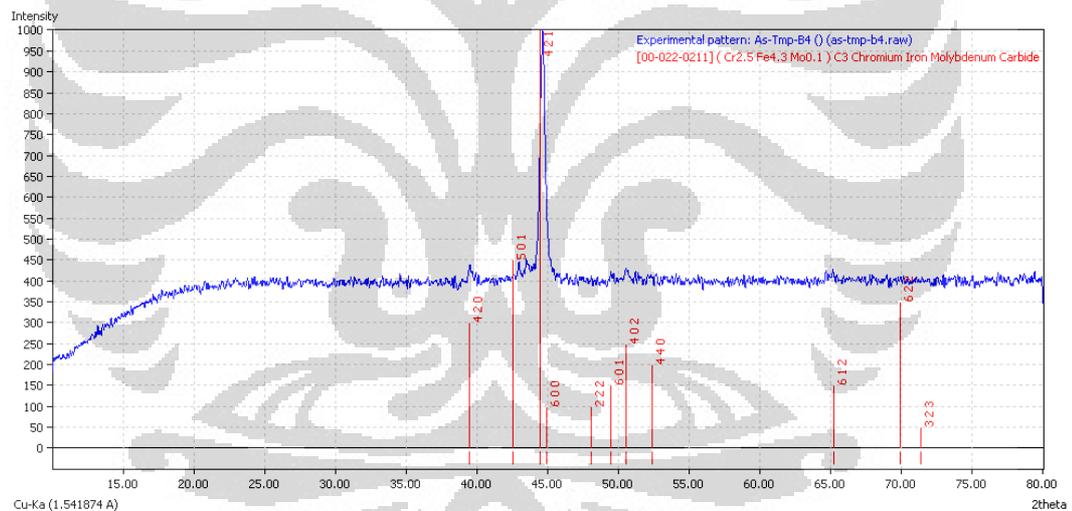
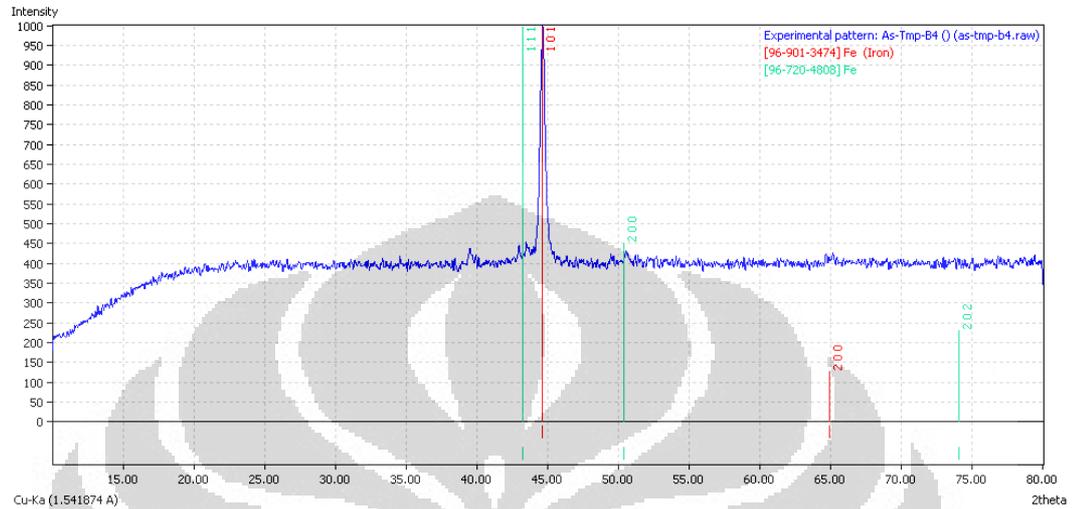
(Lanjutan)

# Peak Data List							
peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)	
1	13.7600	6.43040	4	0.66000	33	2004	
2	14.1800	6.24087	5	0.00000	39	0	
3	15.0400	5.88589	7	0.00000	55	0	
4	15.5800	5.68308	7	0.00000	54	0	
5	16.1200	5.49390	9	0.00000	67	0	
6	16.5600	5.34891	9	0.00000	68	0	
7	17.4800	5.06940	9	0.00000	69	0	
8	17.9600	4.93498	10	0.00000	73	0	
9	18.9000	4.69161	8	0.00000	61	0	
10	19.8600	4.46693	7	0.00000	54	0	
11	20.3000	4.37110	6	0.00000	43	0	
12	21.0200	4.22297	7	0.00000	50	0	
13	21.6200	4.10711	5	0.00000	42	0	
14	22.3200	3.97986	5	0.62660	37	1798	
15	23.0600	3.85379	5	0.48000	37	831	
16	23.7400	3.74492	4	0.62000	28	603	
17	24.1200	3.68678	4	0.56000	31	732	
18	25.5733	3.48046	3	0.86670	23	873	
19	26.5800	3.35088	3	0.22660	23	458	
20	31.3250	2.85328	4	0.35000	27	793	
21	37.8960	2.37227	3	0.47200	25	701	
22	39.0200	2.30649	3	0.38000	26	414	
23	39.3733	2.28660	4	0.38670	33	770	
24	42.9358	2.10476	5	0.45830	37	1226	
25	43.4900	2.07921	5	0.34000	36	801	
26	44.4981	2.03442	100	0.51960	768	22153	
27	50.6150	1.80197	4	0.25000	33	770	
28	51.1971	1.78284	4	0.19430	33	489	
29	57.7714	1.59461	4	0.41710	28	1026	
30	64.5600	1.44235	10	0.65340	74	2465	
31	65.1800	1.43013	6	0.64000	45	1453	
32	72.4200	1.30394	3	0.28000	24	387	
33	73.4900	1.28758	4	0.34000	33	1011	
34	75.1100	1.26378	4	0.28660	27	534	

Keterangan:

	M ₇ C ₃ / (Cr _{2.5} , Fe _{4.3} , Mo _{0.1})C ₃	[Data card: 022-0211]
	Austenit (sisa)	[Data card: 96-901-2707]
	Martensit	[Data card: 96-901-3476]

Lampiran 16
ANALISA XRD
Sampel B As-Tempered



Group : 13-12
Data : As-Tmp-B4

Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	4	44.6037	2.02985	100	0.42610	1205	27667
2	3	43.5200	2.07785	7	0.43080	88	2505
3	1	39.4851	2.28038	7	0.33830	79	2113

(Lanjutan)

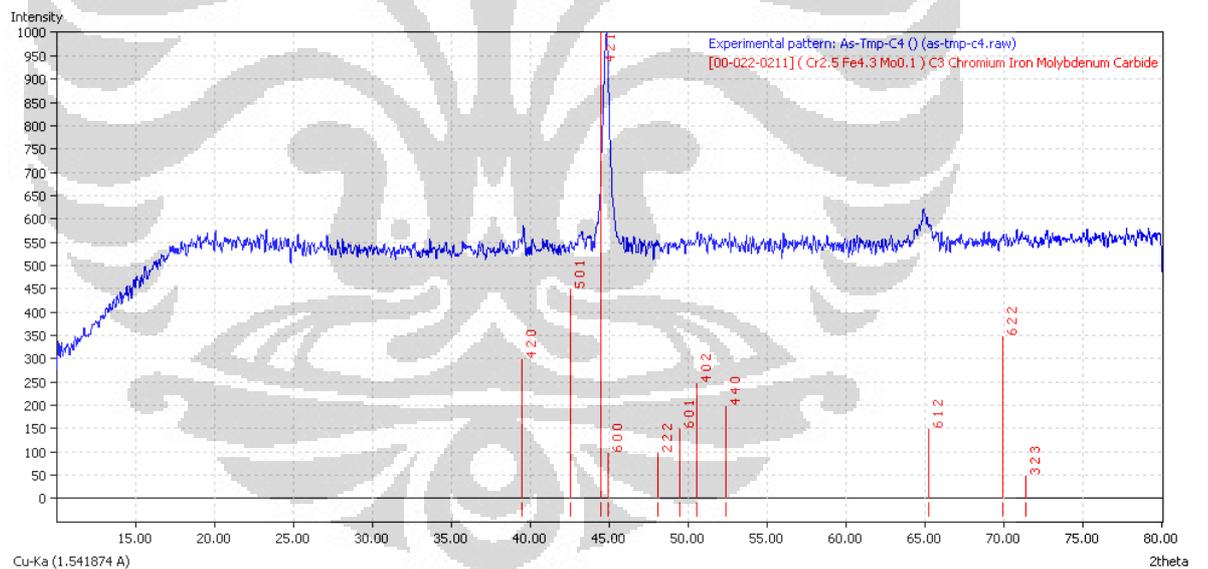
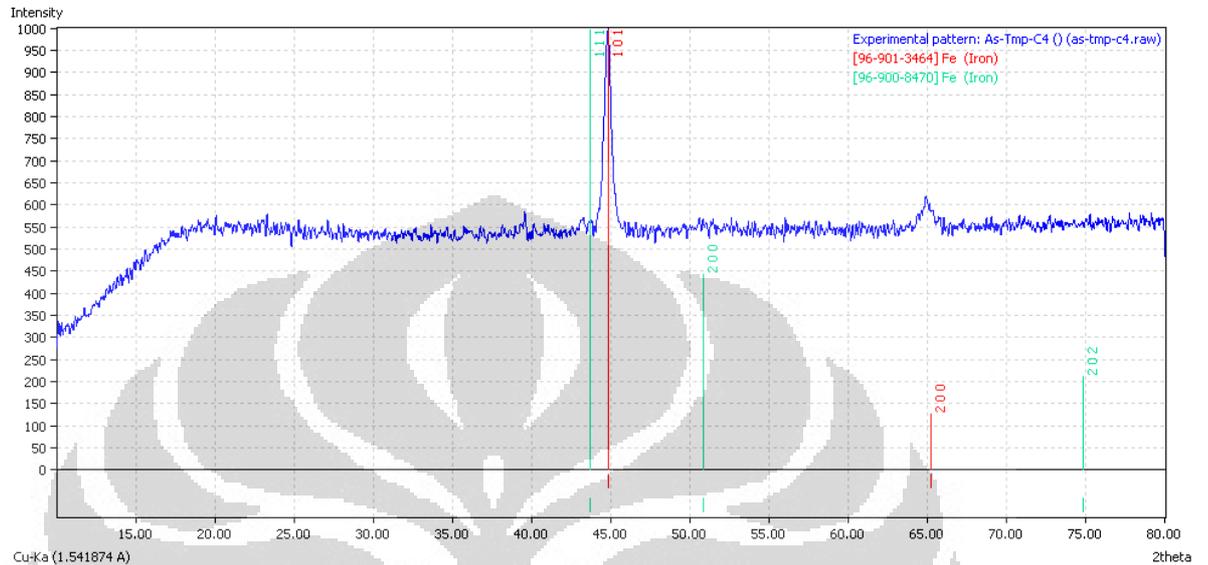
Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	39.4851	2.28038	7	0.33830	79	2113
2	42.9710	2.10312	6	0.33800	69	1615
3	43.5200	2.07785	7	0.43080	88	2505
4	44.6037	2.02985	100	0.42610	1205	27667
5	45.2600	2.00193	6	0.28000	71	2061
6	45.7250	1.98265	3	0.17000	40	446
7	49.4812	1.84057	4	0.31750	44	988
8	50.5326	1.80472	6	0.36810	68	2122
9	64.6691	1.44018	4	0.26180	43	588
10	65.0820	1.43204	4	0.20400	52	728

Keterangan:

	M ₇ C ₃ / (Cr _{2.5} , Fe _{4.3} , Mo _{0.1})C ₃	[Data card: 022-0211]
	Austenit	[Data card: 96-720-4808]
	Martensit	[Data card: 96-901-3474]

Lampiran 17
ANALISA XRD
Sampel C As-Tempered



Group : 15-12
Data : As-Tmp-C4

# Strongest 3 peaks							
no.	peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	6	44.7616	2.02306	100	0.56480	571	18104
2	12	64.8366	1.43687	15	0.87330	88	3850
3	3	39.4290	2.28350	7	0.35800	38	1041

(Lanjutan)

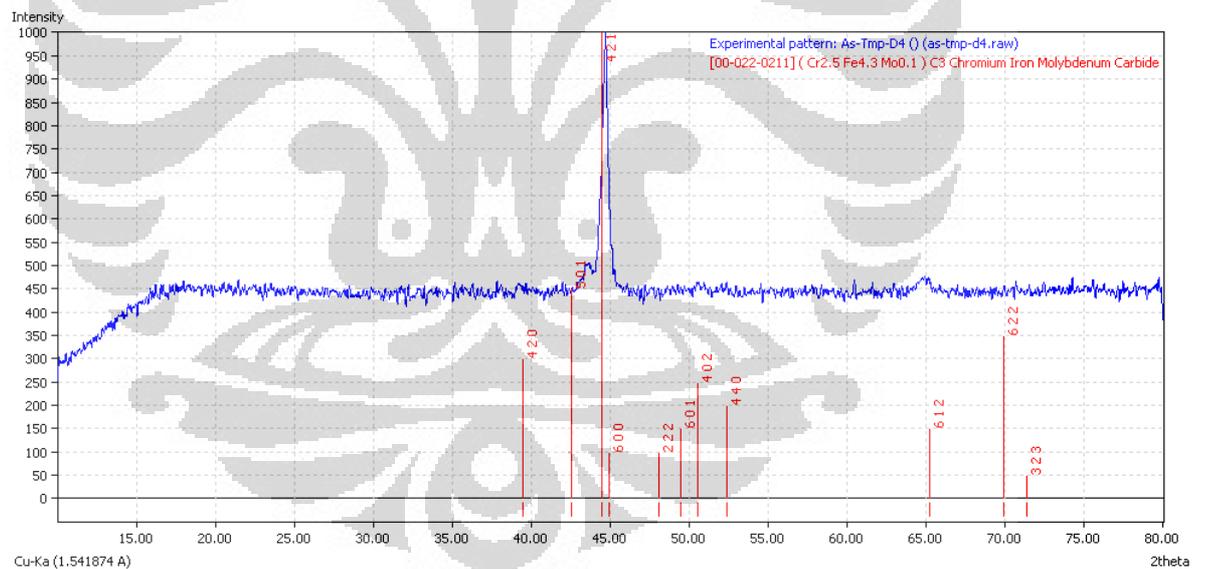
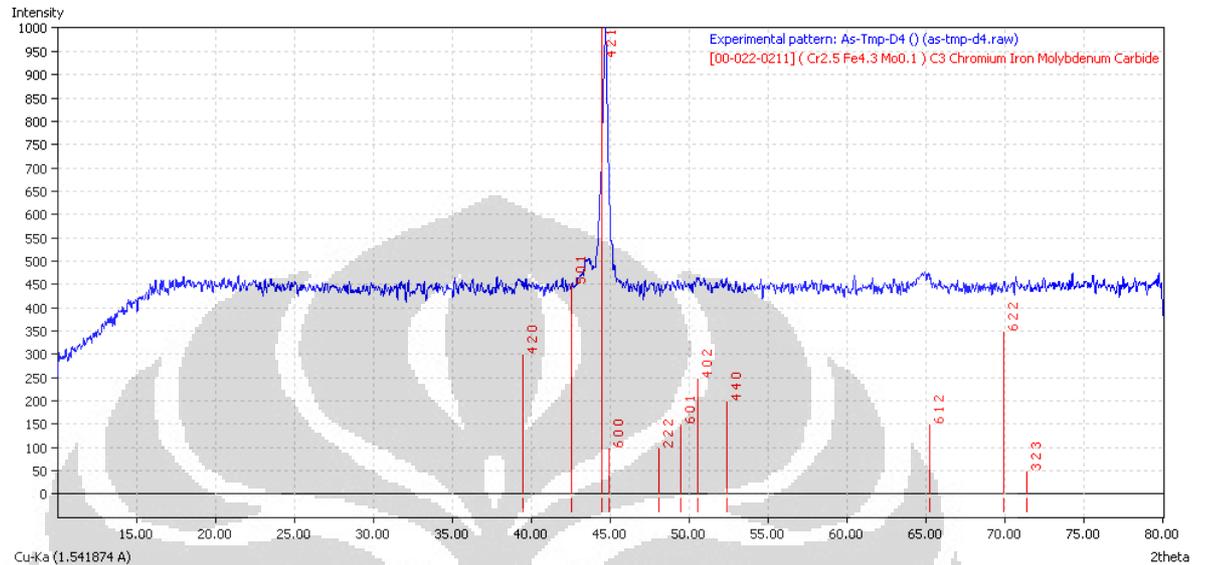
Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	34.5300	2.59542	3	0.38000	17	574
2	35.8850	2.50047	4	0.41000	21	604
3	39.4290	2.28350	7	0.35800	38	1041
4	43.1200	2.09619	7	0.32000	38	643
5	43.5400	2.07694	5	0.65340	29	1044
6	44.7616	2.02306	100	0.56480	571	18104
7	46.3700	1.95656	3	0.18000	19	355
8	50.6175	1.80189	4	0.58500	24	1004
9	51.4246	1.77549	3	0.39580	18	561
10	62.6641	1.48135	3	0.26170	17	311
11	63.7766	1.45817	3	0.27330	19	394
12	64.8366	1.43687	15	0.87330	88	3850
13	65.8200	1.41776	4	0.32000	23	528
14	67.0875	1.39402	4	0.39500	20	649
15	68.8133	1.36321	4	0.42670	20	647
16	69.9500	1.34381	4	0.30000	21	362
17	70.9800	1.32682	4	0.82000	22	1093
18	78.6360	1.21571	3	0.19200	19	335
19	79.6458	1.20281	3	0.24170	18	289

Keterangan:

	M ₇ C ₃ / (Cr _{2.5} , Fe _{4.3} , Mo _{0.1})C ₃	[Data card: 022-0211]
	Austenit (sisa)	[Data card: 96-900-8470]
	Martensit	[Data card: 96-901-3464]

Lampiran 18
ANALISA XRD
Sampel D As-Tempered



Group : 15-12
Data : As-Tmp-D4

Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	7	44.6265	2.02887	100	0.49950	918	26011
2	6	43.5600	2.07604	13	0.71420	121	4804
3	12	64.6800	1.43997	6	0.67200	58	2205

(Lanjutan)

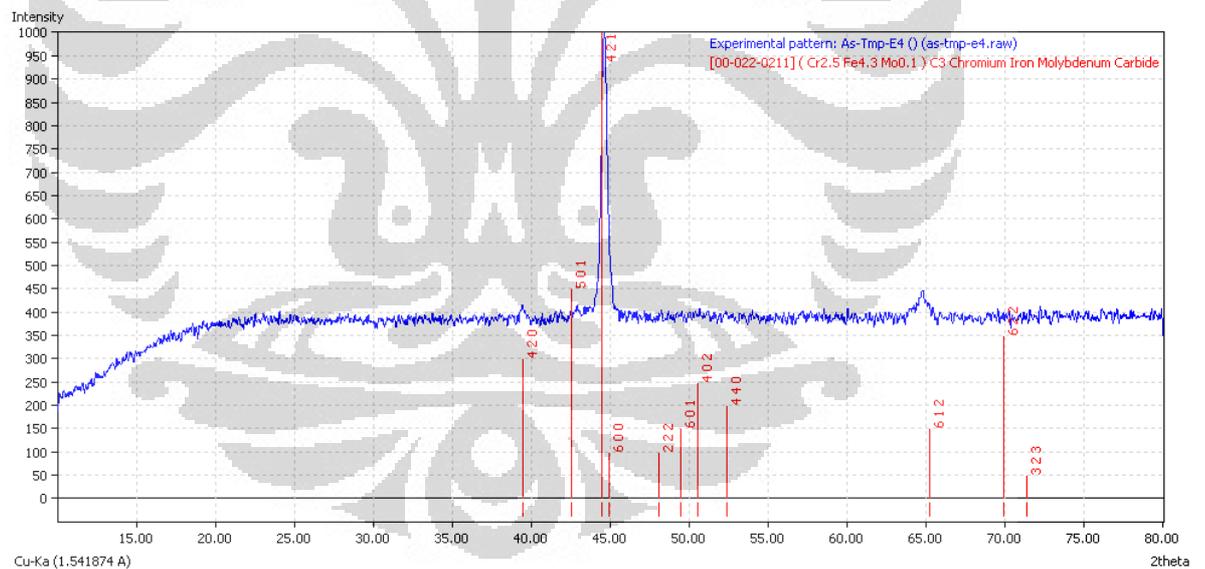
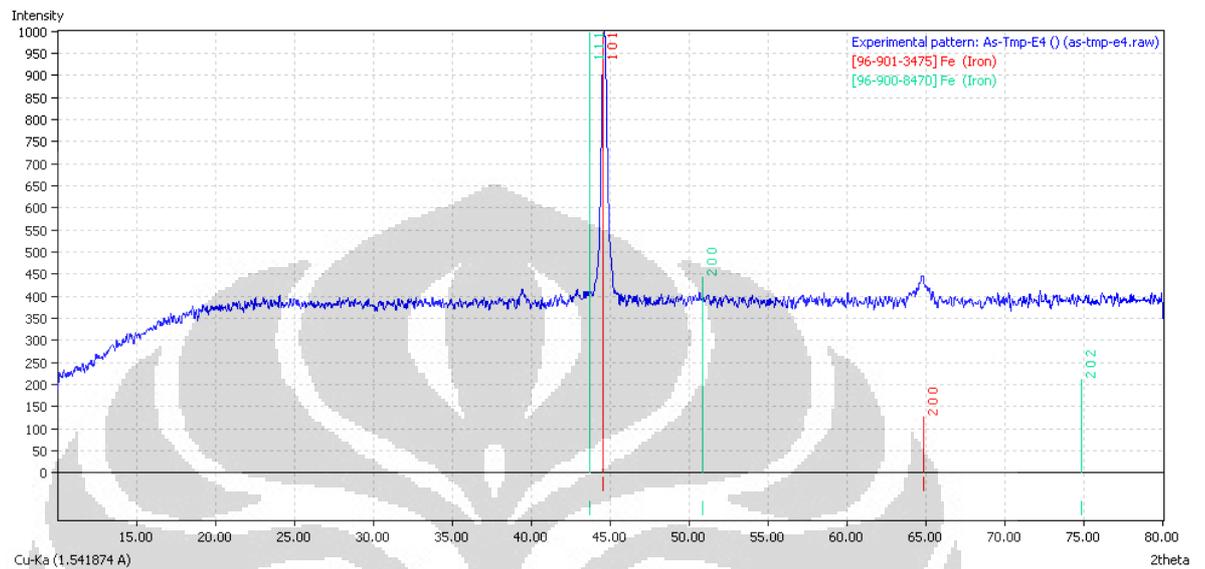
Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I ₁	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	31.7791	2.81353	4	0.11830	37	323
2	37.9152	2.37111	3	0.32380	31	647
3	39.2720	2.29226	4	0.52800	39	1855
4	41.9891	2.15000	3	0.19170	32	787
5	43.0600	2.09898	6	0.35420	52	1173
6	43.5600	2.07604	13	0.71420	121	4804
7	44.6265	2.02887	100	0.49950	918	26011
8	47.5978	1.90891	3	0.14430	30	407
9	50.4600	1.80714	4	0.30660	39	995
10	50.9400	1.79124	3	0.20000	28	485
11	60.3916	1.53154	4	0.23670	33	590
12	64.6800	1.43997	6	0.67200	58	2205
13	65.1400	1.43091	5	0.33720	44	1066
14	75.4953	1.25828	3	0.25730	31	1004
15	77.4833	1.23089	3	0.31330	28	690
16	78.6332	1.21574	3	0.23140	30	554

Keterangan:

	M ₇ C ₃ / (Cr _{2.5} , Fe _{4.3} , Mo _{0.1})C ₃	[Data card: 022-0211]
	Austenit (sisa)	[Data card: 96-900-8470]
	Martensit	[Data card: 96-901-3475]

Lampiran 19
ANALISA XRD
Sampel D As-Tempered



Group : 13-12
Data : As-Tmp-E4

Strongest 3 peaks

no.	peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I1	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	21	44.5819	2.03079	100	0.43830	1240	30790
2	23	64.6687	1.44019	10	0.50750	121	2958
3	18	39.3900	2.28567	5	0.34000	67	1689

(Lanjutan)

Peak Data List

peak no.	2Theta (deg)	d (Å)	I/I ₁	FWHM (deg)	Intensity (Counts)	Integrated Int (Counts)
1	13.4200	6.59255	4	0.42660	44	1897
2	13.8200	6.40262	3	0.00000	38	0
3	14.5600	6.07883	4	0.53600	47	2187
4	15.0600	5.87812	3	0.00000	37	0
5	15.8200	5.59740	3	0.78860	43	2481
6	16.4400	5.38768	4	0.00000	54	0
7	16.8000	5.27303	4	0.00000	49	0
8	17.2000	5.15129	4	0.78660	53	1882
9	18.0600	4.90788	4	0.69600	53	1265
10	18.4600	4.80243	5	0.62660	59	1245
11	19.1400	4.63331	5	0.58400	60	2103
12	19.7800	4.48482	4	0.00000	48	0
13	20.1400	4.40546	3	0.00000	39	0
14	21.2516	4.17747	4	0.69670	46	2679
15	22.1800	4.00466	4	0.52000	46	911
16	22.5800	3.93462	3	0.38660	38	538
17	23.0411	3.85691	4	0.45560	44	1917
18	39.3900	2.28567	5	0.34000	67	1689
19	42.8497	2.10879	4	0.43660	50	1512
20	43.5000	2.07876	3	0.66660	39	2507
21	44.5819	2.03079	100	0.43830	1240	30790
22	63.9200	1.45524	4	0.22000	46	758
23	64.6687	1.44019	10	0.50750	121	2958
24	65.0800	1.43208	4	0.36000	53	1163
25	76.1585	1.24896	3	0.21300	37	412
26	76.5940	1.24294	3	0.14800	37	331

Keterangan:

	M ₇ C ₃ / (Cr _{2.5} , Fe _{4.3} , Mo _{0.1})C ₃	[Data card: 022-0211]
	Austenit (sisa)	[Data card: 96-900-8470]
	Martensit	[Data card: 96-901-3475]