



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PERBEDAAN WAKTU TAHAN AUSTENISASI
PADA PERLAKUAN *SUBZERO* TERHADAP MATERIAL
GRINDING BALL DENGAN VARIASI WAKTU TAHAN 4, 5
DAN 6 JAM PADA TEMPERATUR AUSTENISASI 950°C**

SKRIPSI

**RULLIANSYAH
0806331986**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JUNI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PERBEDAAN WAKTU TAHAN AUSTENISASI
PADA PERLAKUAN *SUBZERO* TERHADAP MATERIAL
GRINDING BALL DENGAN VARIASI WAKTU TAHAN 4, 5
DAN 6 JAM PADA TEMPERATUR AUSTENISASI 950°C**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**RULLIANSYAH
0806331986**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JUNI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Rulliansyah

NPM : 0806331986

Tanda Tangan : 


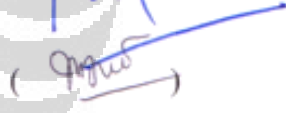

Tanggal : 26 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Rulliansyah
NPM : 0806331986
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh perbedaan waktu tahan austenisasi pada perlakuan *subzero* terhadap material *grinding ball* dengan variasi waktu tahan 4, 5 dan 6 jam pada temperatur austenisasi 950°C

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. –Ing. Ir. Bambang Suharno ()
Penguji 1 : Dr. Ir. Myrna Ariati Mochtar, M.S. ()
Penguji 2 : Fajar Nurjaman, ST ()

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 26 Juni 2012

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

Bismillahirrahmanirrahim,

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Semenjak dari masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada :

- (1) Prof. Dr. -Ing. Ir Bambang Suharno, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarah saya dalam penyusunan skripsi ini.
- (2) Fajar Nurjaman, ST, yang telah banyak membantu dalam penyelesaian skripsi ini
- (3) Kedua orang tua, Irwansyah dan Sarina Rulita, dan keluarga yang senantiasa memberi dukungan, pengertian dan motivasi
- (4) Cut Nury Hikmah Sabry atas dorongan dan pengertiannya
- (5) Teman teman metalurgi yang membantu dan memberi semangat

Akhir kata, saya berharap Allah berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu dalam penelitian dan penulisan skripsi ini. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Depok, 26 Juni 2012

Penulis

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

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

Nama : Rulliansyah
NPM : 0806331986
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

Pengaruh perbedaan waktu tahan austenisasi pada perlakuan *subzero* terhadap material *grinding ball* dengan variasi waktu tahan 4, 5 dan 6 jam pada temperatur austenisasi 950°C

berserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis atau pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada Tanggal : 26 Juni 2012

Yang menyatakan


(Rulliansyah)

ABSTRAK

Nama : Rulliansyah
Program Studi : Teknik metalurgi dan material
Judul : Pengaruh perbedaan waktu tahan austenisasi pada perlakuan *subzero* terhadap material *grinding ball* dengan variasi waktu tahan 4, 5 dan 6 jam pada temperatur austenisasi 950°C.

Grinding Ball yang digunakan sebagai material penggerus umpan dalam sebuah mill dalam industri pertambangan maupun industri semen, berupa material besi tuang putih krom tinggi. Besi tuang putih krom tinggi dapat ditingkatkan sifat mekanisnya dengan komposisi yang sesuai dan perlakuan panas yang tepat. Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari pengaruh *subzero treatment* terhadap mikrostruktur, ketangguhan dan kekerasan pada material *high chromium white cast iron*. Perlakuan panas yang diberikan meliputi *subcritical treatment*, austenisasi dan *quenching* kemudian *tempering*. *Subzero treatment* dilakukan setelah austenisasi, dengan variasi waktu tahan austenisasi 4, 5 dan 6 jam pada temperatur 950°C, menggunakan nitrogen cair. Penelitian ini menggunakan 2 material dengan komposisi yang berbeda, 2.0wt.%C-13wt.%Cr-0.06wt.%Mo dan 2.0wt.%C- 13.3wt.%Cr-1.3wt.%Mo, sehingga pengaruh Mo juga diteliti dalam penelitian ini. Karakterisasi yang dilakukan berupa uji keras, uji impak, XRD dan SEM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *subzero treatment* dapat meningkatkan kekerasan, dengan menghasilkan austenit sisa yang sedikit. Sifat mekanis yang optimum pada saat dilakukan *subzero treatment* adalah ketika waktu tahan austenisasi selama 4 jam. Namun demikian nilai ketangguhan menurun dari hasil *as-cast*, akibat dari sangat rendahnya jumlah austenit sisa.

Kata Kunci :

Baja putih paduan krom tinggi ; Perlakuan *subzero*; Perlakuan subkritis; Transformasi Martensit; Austenit Sisa

ABSTRACT

Name : Rulliansyah
Study Program: Metallurgy and Material Engineering
Title : Effect of austenizing holding time variation on subzero treatment subjected to grinding ball material with varying of holding time for 4, 5 and 6 hours at austenizing temperature 950°C

Grinding ball, as used in mill at mining and cement industry to grind ore or feed, is a high chromium white cast iron. Properties of high chromium white cast iron could be improved by using suitable heat treatment and a good combination of its composition. Effects of subzero treatment to microstructure, toughness and hardness on high chromium white cast iron were investigated. Heat treatment subjected to this material were, subcritical treatment, austenizing then quench, and tempering. Subzero treatment was done after austenizing using liquid nitrogen, with three different time of austenizing holding times, which were for 4, 5 and 6 hours at 950°C of temperature. This research using 2 different sample 2.0wt.%C-13wt.%Cr-0.06wt.%Mo and 2.0wt.%C- 13.3wt.%Cr-1.3wt.%Mo, furthermore effects of Molibdenum content also investigated. Hardness test, impact test, XRD and SEM were conducted. The result showed that subzero treatment can increase hardness, due to very low content of retained austenite. Optimum mechanical properties when subjected subzero treatment was for 4 hours of austenizing holding time. Otherwise, toughness of the material was reduced from *as cast* sample, due to very low content of retained austenite.

Keyword :
High chromium white cast iron; Subzero treatment; Subcritical treatment; Martensite transformation; Retained austenite

DAFTAR ISI

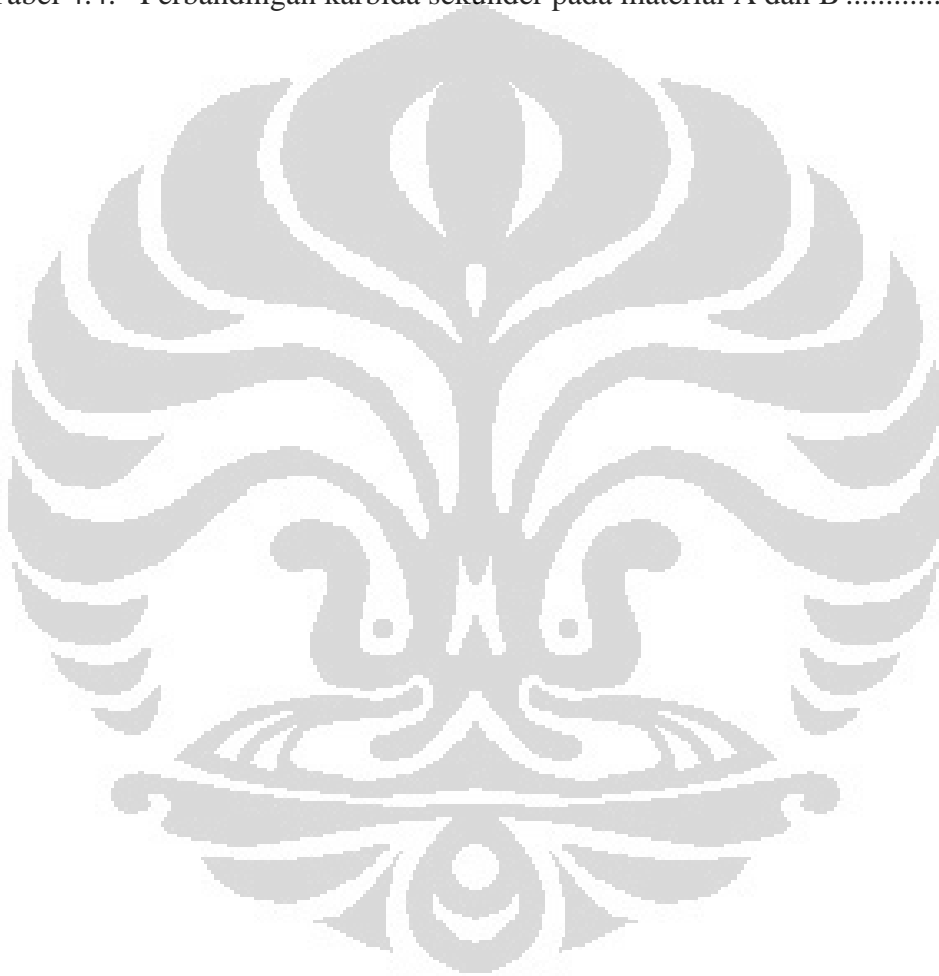
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Penelitian	3
1.5 Sistematika Penelitian	3
2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Besi Tuang Putih Paduan Tinggi.....	5
2.2 <i>High Chromium White Cast Iron</i>	5
2.3 Karbida Primer dan Sekunder	7
2.3 Austenit Sisa.....	9
2.4 Pengaruh Unsur Paduan	10
2.4.1 Karbon	10
2.4.2 Kromium.....	10
2.4.3 Molibdenum.....	10
2.4.4 Nikel.....	10
2.4.5 Tembaga.....	10
2.4.6 Silikon.....	11
2.5 Proses Perlakuan Panas	11
2.5.1 Perlakuan <i>subcritical</i>	11
2.5.2 Austenisasi.....	11
2.5.3 <i>Quench</i>	12
2.5.4 Temper	13
2.6 <i>High Chromium White Cast Iron</i> sebagai <i>Grinding Ball</i>	13
3. METODOLOGI PENELITIAN	14
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	14
3.2 Proses Perlakuan Panas	16
3.2.1 Perlakuan <i>Subcritical</i>	16
3.2.2 <i>Hardening</i>	16
3.2.3 <i>Tempering</i>	17
3.3 Karakterisasi	18
3.3.1 Pengujian Metalografi.....	18

3.3.3 Pengujian Impak	18
3.3.4 Pengujian Kekerasan <i>Rockwell</i>	19
3.3.5 Pengujian XRD	19
3.3.6 Pengujian SEM	19
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	20
4.1 Pengaruh Waktu Tahan Austenisasi terhadap Sifat Mekanis	20
4.2 Pengaruh Waktu Tahan Austenisasi terhadap Karbida Primer	32
4.3 Pengaruh Waktu Tahan Austenisasi terhadap Karbida Sekunder	34
4.4 Pengaruh Waktu Tahan Austenisasi terhadap Austenit Sisa	36
4.5 Kesesuaian Material Uji terhadap Aplikasi <i>Grinding Ball</i>	42
5. KESIMPULAN	45
5.1 Kesimpulan	45
5.2 Saran	45
DAFTAR ACUAN	46



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1.	Komposisi kimia material uji.....	3
Tabel 2.1.	Spesifikasi material tahan abrasif	6
Tabel 2.2.	Jenis bola gerus dan komposisinya	13
Tabel 4.1.	Perbandingan karbida primer pada material A dan B.....	32
Tabel 4.2.	Volume fraksi karbida primer kondisi <i>as-tempered</i>	33
Tabel 4.3.	Volume fraksi karbida sekunder kondisi <i>as-tempered</i>	34
Tabel 4.4.	Perbandingan karbida sekunder pada material A dan B	35

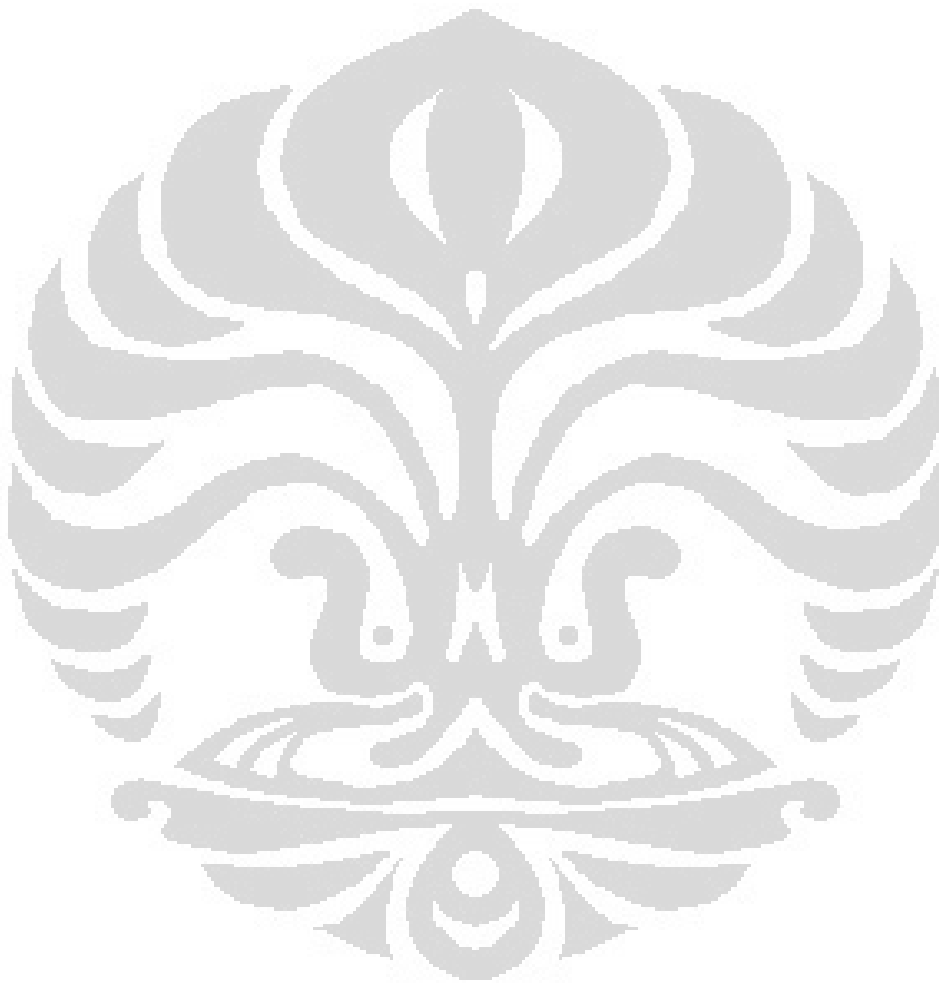


DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Kesetimbangan diagram fasa <i>high chromium cast iron</i>	7
Gambar 2.2.	Mikrostruktur karbida eutektik pada matriks austenit.....	8
Gambar 2.3.	Mikrostruktur matriks martensitik dan karbida sekunder	8
Gambar 3.1.	Diagram alir penelitian & komposisi material uji.....	14
Gambar 3.2.	Proses perlakuan panas pada material uji.....	15
Gambar 3.3.	Diagram perlakuan panas <i>subcritical</i>	16
Gambar 3.4.	Diagram perlakuan panas <i>hardening</i>	17
Gambar 3.5.	Diagram perlakuan panas <i>tempering</i>	17
Gambar 4.1.	Data kekerasan material A pada setiap kondisi perlakuan panas...	20
Gambar 4.2.	Foto mikro material A kondisi <i>as-cast</i> dan <i>as-subcritical</i>	21
Gambar 4.3.	Data kekerasan material B pada setiap kondisi perlakuan panas ...	22
Gambar 4.4.	Mikrostruktur <i>as-cast</i> material A dan B.....	23
Gambar 4.5.	Data kekerasan material A & B kondisi <i>as-cast</i> & <i>as-subcritical</i> .	24
Gambar 4.6.	Foto mikro material B <i>as-subcritical</i>	25
Gambar 4.7.	Data kekerasan material A dan B kondisi <i>as-quenched</i>	25
Gambar 4.8.	Foto mikro material B <i>as-cast</i>	26
Gambar 4.9.	Mikrostruktur material B <i>as-tempered</i>	27
Gambar 4.10.	Foto mikro kondisi <i>as-quenched</i> material A dan B.....	28
Gambar 4.11.	Nilai kekerasan material A dan B pada kondisi <i>as-tempered</i>	28
Gambar 4.12.	Foto mikro kondisi <i>as-tempered</i> material A dan B	30
Gambar 4.13.	Nilai ketangguhan material A dan B	30
Gambar 4.14.	Perbandingan nilai ketangguhan pada kondisi <i>as-tempered</i>	31
Gambar 4.15.	Pengkasaran karbida sekunder	36
Gambar 4.16.	Pola XRD material <i>as-cast</i>	37
Gambar 4.17.	Difraktogram XRD material A.....	38
Gambar 4.18.	Perbandingan pola XRD material A dengan waktu tahan austenisasi 4 dan 5 jam;.....	38
Gambar 4.19.	Perbandingan pola XRD material A dengan waktu tahan austenisasi 5 dan 6 jam;.....	39
Gambar 4.20.	Difraktogram XRD material B	40
Gambar 4.21.	Perbandingan pola XRD material B dengan waktu tahan austenisasi 4 dan 6 jam;.....	41
Gambar 4.22.	Perbandingan pola XRD material B dengan waktu tahan austenisasi 5 dan 6 jam;.....	41
Gambar 4.23.	Perbandingan Pola XRD Material A dan B dengan waktu tahan austenisasi 4 jam;	42
Gambar 4.24.	Data kekerasan material <i>as-tempered</i> dengan batas minimum kekerasan.....	43
Gambar 4.25.	Perbandingan nilai ketangguhan material A dan B pada kondisi <i>as- tempered</i> dengan waktu tahan austenisasi 4 jam.....	44

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Perhitungan karbida sekunder	49
Lampiran 2	Data XRD.....	73



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Grinding ball (bola penggerus) merupakan salah satu material dalam industri pertambangan yang digunakan untuk menghancurkan atau menggerus mineral umpan. Sebagai media penggerus, *grinding ball* dipersyaratkan memiliki kekerasan, ketangguhan, dan ketahanan aus yang tinggi, sehingga material *grinding ball* tidak ikut terkikis yang nantinya akan ikut tercampur dengan material umpan, yang akan menurunkan mutu mineral hasil tambang dan juga mempercepat umur pakai *grinding ball*. Sifat ketangguhan dari *grinding ball* akan membuat material ini menjadi lebih tahan beban impact, baik sesama *grinding ball* di dalam *mill* maupun dengan mineral umpan.

Diperkirakan kebutuhan *grinding ball* yang diserap oleh industri pertambangan dan industri semen di Indonesia mencapai 8000-10000 ton per tahun. Sementara itu kebutuhan akan *grinding ball* kebanyakan merupakan bersumber dari produk impor, baik itu dari Cina maupun produk *grinding ball* dari India. Maka daripada itu, pengoptimalan produk *grinding ball* lokal harus dilakukan dengan melakukan berbagai macam penelitian.

Pengoptimalan *grinding ball* lokal agar lebih menjual diawali dari mengetahui material yang tepat. Dari penelitian yang telah dilakukan, diketahui bahwa material yang tepat untuk bola pelumat yaitu *High Chromium White Cast Iron*. Dalam pembuatan bola pelumat agar nilai kekerasan dan ketangguhan yang diinginkan tercapai maka diperlukan juga perlakuan panas yang tepat.

Jumlah austenit sisa pada *grinding ball* juga mempengaruhi sifat ketahanan abrasif dari *high chromium white cast iron*. Kadar austenit sisa pada *grinding ball* dikendalikan dengan temper berulang-ulang ataupun dengan perlakuan *subzero*. Oleh karena itu perlu dilakukan pengkajian lebih lanjut guna mengoptimalkan *high chromium white cast iron grinding ball* dengan keterkaitannya dengan austenit sisa sehingga dapat meningkatkan ketangguhan dan kekerasannya.

1.2 Rumusan Masalah

Grinding ball yang berupa material *high chromium white cast iron* diharuskan memiliki nilai kekerasan yang tinggi dan juga ketangguhan yang tinggi. Dimana nilai kekerasan didapat dari karbida yang terbentuk serta matriks martensit yang kuat dan getas. Untuk mengimbangi kegetasan dari matriks maka harus ada pula kombinasi dari austenit yang lunak dan tangguh, sehingga akan membuat material *high chromium white cast iron* tersebut memiliki nilai kekerasan, ketangguhan dan sifat ketahanan abrasif yang baik.

Jumlah austenit sisa yang tidak bertransformasi menjadi martensit haruslah dikontrol agar tidak mengurangi kekerasan dan berefek buruk pada sifat ketahanan abrasif dari *grinding ball*. Austenit sisa yang terlalu sedikit juga akan membuat material tersebut kehilangan nilai ketangguhannya.

Proses perlakuan *subzero*, dimana dapat membuat nilai austenit sisa berkurang, akan membuat nilai kekerasan meningkat dan juga akan membuat sifat ketahanan abrasif meningkat. Penelitian ini sangat dibutuhkan untuk mengetahui pengaruh efek *cryogenic* yang diberikan, yang dapat mengoptimalkan sifat dari *grinding ball high chromium white cast iron*.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh perlakuan *subzero* terhadap austenit sisa yang terbentuk pada *high chromium white cast iron*.
2. Menganalisa pengaruh unsur paduan Mo terhadap kekerasan, ketangguhan dan mikrostruktur pada *high chromium white cast iron*.
3. Mengetahui pengaruh perbedaan waktu tahan austenisasi pada *high chromium white cast iron* terhadap sifat mekanik dan pembentukan karbida sekunder.

1.4 Batasan Penelitian

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini antara lain:

1. Material yang digunakan adalah 2 buah material *High Chromium White Cast Iron* ASTM A532 Kelas II Tipe A. Perbedaan diantara kedua material terdapat pada kadar Molibdenum. Komposisinya adalah sebagai berikut :

Tabel 1.1. Komposisi kimia material uji

	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu
Sampel A	2,23	0,773	0,12	0,354	0,709	0,464	13,3	0,063	0,051
Sampel B	2,18	0,719	0,12	0,4	0,697	0,448	13	1,38	0,055

2. Proses perlakuan panas yang dilakukan meliputi proses *subcritical* pada suhu 700°C selama 1 jam dan kemudian didinginkan pada suhu kamar. Proses austenisasi pada suhu 950°C dengan variabel waktu tahan 4,5, dan 6 jam. Proses *quench subzero treatment* menggunakan nitrogen cair dan proses temper pada suhu 250°C selama 1 jam.
3. Karakterisasi terhadap material *high chromium white cast iron* meliputi:
 - Pengujian kekerasan
 - Pengujian impak
 - Pengamatan struktur mikro/metalografi dan SEM
 - Pengamatan fasa yang terbentuk dengan menggunakan XRD.

1.5 Sistematika Penelitian

Sistematika penulisan dalam penelitian ini disusun agar penulisan skripsi ini menjadi runut sehingga kerangka alur penelitian mudah dimengerti, sistematis dan praktis. Sistematika tersebut dapat diuraikan dalam bentuk bab-bab yang saling terpartisi dan saling berkaitan satu sama lain, yaitu sebagai berikut:

Bab 1 Pendahuluan

Membahas latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan penelitian dan sistematika penulisan.

Bab 2 Tinjauan Pustaka

Membahas dasar teori penunjang tentang material *grinding ball* berupa *high chromium white cast iron* dan proses perlakuan panasnya.

Bab 3 Metodologi Penelitian

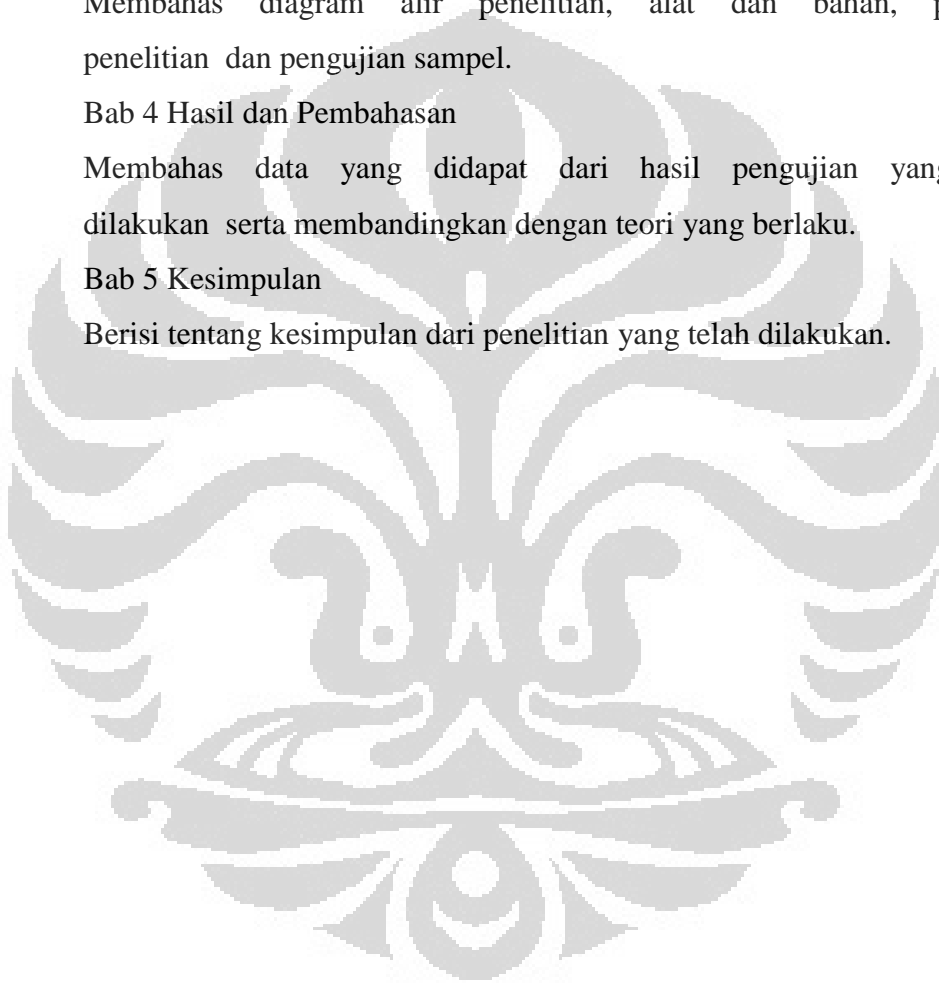
Membahas diagram alir penelitian, alat dan bahan, prosedur penelitian dan pengujian sampel.

Bab 4 Hasil dan Pembahasan

Membahas data yang didapat dari hasil pengujian yang telah dilakukan serta membandingkan dengan teori yang berlaku.

Bab 5 Kesimpulan

Berisi tentang kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan.



BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Besi Tuang Putih Paduan Tinggi

Besi tuang putih paduan tinggi biasanya digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan abrasi. Ketahanan abrasi ini diperoleh dari karbida eutektik yang terdapat dalam mikrostruktur. Untuk memperoleh karbida tersebut yang perlu diperhatikan yaitu komposisi kimia dan proses perlakuan panas. Pemilihan komposisi kimia dan perlakuan panas yang tepat memungkinkan material tersebut memiliki ketangguhan dan ketahanan abrasi yang seimbang.

Besi tuang putih paduan tinggi mengandung paduan krom untuk mencegah pembentukan grafit, sehingga dapat menstabilkan fasa karbida. Karbida yang terbentuk biasanya berupa karbida krom M_7C_3 . Karbida krom yang terlalu banyak akan menyebabkan kegetasan, sehingga proses perlakuan panas yang tepat dan penambahan paduan yang sesuai diharuskan untuk mengatur jumlah karbida yang terbentuk.

2.2 *High Chromium White Cast Iron*

Besi tuang putih krom tinggi mengandung Cr sekitar 11-30% dan 1,8-3,6%C. Besi tuang putih ini mempunyai kombinasi ketangguhan dan ketahanan abrasi yang baik. Mikrostruktur dari *High Chromium White Cast Iron* terdiri dari komposisi dengan jumlah besar karbida primer dan karbida sekunder dan matriks yang lunak. *High Chromium White Cast Iron* memiliki ketangguhan dan kekerasan yang lebih besar dibandingkan dengan besi tuang putih paduan rendah. Mikrostruktur umum pada material *as-cast* terdiri dari karbida primer dan karbida eutektik (M_7C_3) pada matriks austenitik^[1].

Material *high chromium white cast iron* yang digunakan sebagai *grinding ball* termasuk dalam material ASTM A532, yang umum digunakan yaitu kelas II tipe A akibat dari nilai kekerasan yang tinggi dan juga ketahanan aus yang baik.

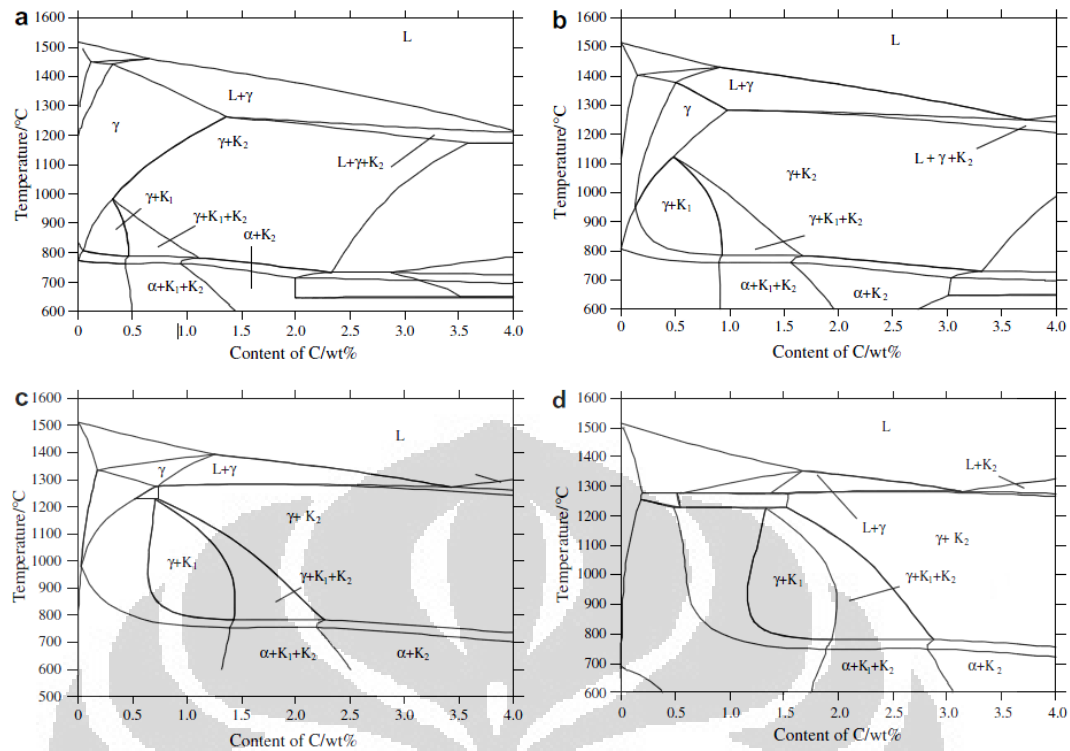
Tabel 2.1. Spesifikasi material tahan abrasif

Kelas	Tipe	Komposisi (%wt)							Nilai Kekerasan			
		C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	As Cast		Hardened	
									HRC	BHN	HRC	BHN
I	A	2.8-3.6	2.0 maks	0,8 maks	3.3-5.0	1.4-4.0	1.0 maks	---	53	550	59	650
I	B	2.4-3.0	2.0 maks	0,8 maks	3.3-5.0	1.4-4.0	1.0 maks	---	53	550	59	650
I	C	2.5-3.7	2.0 maks	0,8 maks	4.0 maks	1.0-2.5	1.0 maks	---	53	550	59	650
I	D	2.5-3.6	2.0 maks	2.0 maks	4.5-7.0	7.0-11	1.5 maks	---	50	500	59	650
II	A	2.0-3.3	2.0 maks	1.5 maks	2.5 maks	11.0-14.0	3.0 maks	1.2 maks	53	550	59	650
II	B	2.0-3.4	2.0 maks	1.5 maks	2.5 maks	14.0-18.0	3.0 maks	1.2 maks	46	450	59	650
II	C	2.0-3.5	2.0 maks	1.0-2.2	2.5 maks	18.0-23.0	3.0 maks	1.2 maks	46	450	59	650
II	D	2.0-3.6	2.0 maks	1.5 maks	2.5 maks	23.0-30.0	3.0 maks	1.2 maks	46	450	59	650

(Sumber: ASTM A532)

Besi tuang putih untuk ketahanan abrasi mengandung 11-23% kromium dan Mo sampai 3,0%. Dalam kondisi *as-cast* matriks berupa austenitik atau austenitik martensitik, dimana matriks martensitik akan meningkatkan nilai kekerasan dan penambahan molibdenum dimaksudkan agar menahan pembentukan perlit dan mendapatkan kekerasan maksimum. Ketika mengeras, morfologi karbida relatif tebal terhadap modifikasi perlakuan panas selanjutnya. Sebaliknya, pada struktur *as-cast* austenitik siap diberi perlakuan panas untuk menghasilkan endapan karbida sekunder pada matriks.^[2]

High chromium cast iron dapat berupa komposisi hypoeutectic, eutectic atau hypereutectic tergantung dari kadar karbonnya^[3]. Umumnya *high chromium cast iron* yang digunakan dalam kerja rekayasa berupa *hypoeutectic* dengan kandungan 10-30wt.%Cr dan 2.0-3.5 wt.%C.^[3-4] Sementara itu *hypereutectic high chromium cast iron* memiliki fraksi volume karbida M_7C_3 yang lebih banyak namun penggunaannya kurang begitu disukai akibat dari scrap dan tingkat *reject* yang tinggi. Hal ini disebabkan oleh karbida primer yang lebih besar dan kasar.^[3]



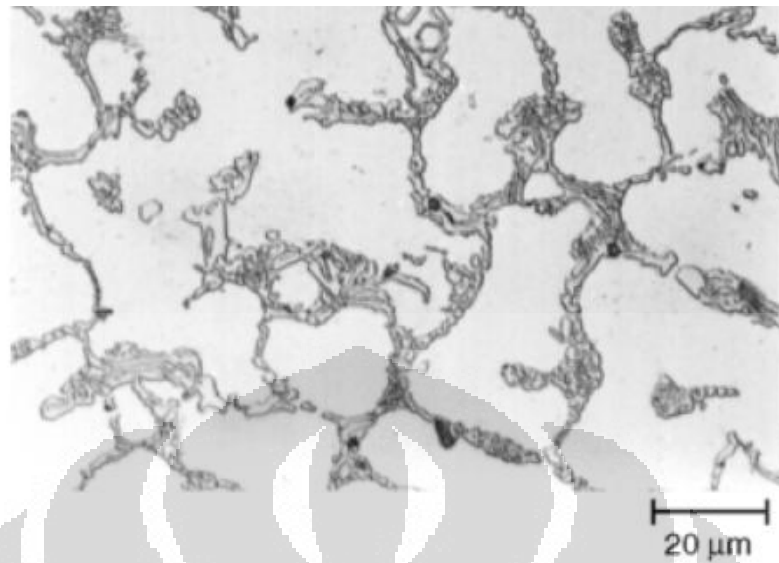
Gambar 2. 1 Kestimbangan diagram fasa *high chromium cast iron* (a)10% Cr (b)15%Cr (c)20% Cr (d)25% Cr L-liquid; γ -austenit; α -ferrit; K_1 -(Fe,Cr)₂₃C₆ K_2 -(Fe,Cr)₇C₃ [5]

2.3 Karbida Primer dan Sekunder

Karbida Primer merupakan senyawa antara karbon dengan paduan tertentu yang terbentuk pada batas butir. Dimana pada proses pendinginan karbon akan bergerak dari matriks menuju batas butir. Di batas butir ini karbon akan mengendap keluar dari matriks dan membentuk senyawa karbida.

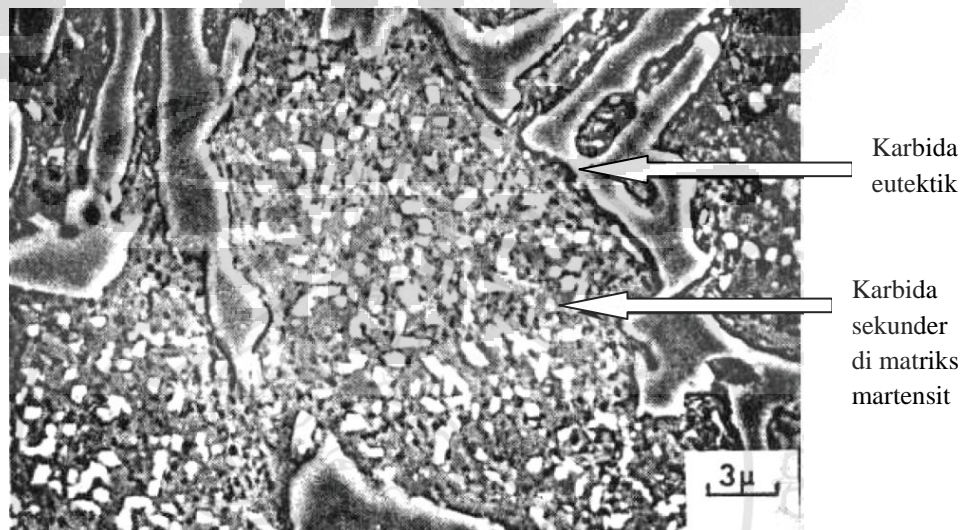
Karbida Eutektik, tipe dan morfologinya berbeda beda tergantung komposisi dari material. Struktur karbida eutektik dipengaruhi oleh kandungan krom, hal ini dikarenakan krom merupakan pembentuk karbida yang lebih kuat dibandingkan besi^[6]. Pearce menginvestigasi bahwa semakin meningkatnya kadar krom, yakni diatas 12wt.%Cr, karbida eutektik akan berubah dari M_3C menjadi M_7C_3 , yang sering dideskripsikan sebagai *discontinuous* atau *lamelar*^[7]. Perubahan morfologi ini juga akan meningkatkan kekerasan karbida^[2]. Maratray^[8] menyarankan sebuah formula empiris untuk menentukan volume karbida eutektik berdasarkan komposisi karbon dan krom,

$$\%CV = 12.33(\text{wt. \%C}) + 0.55(\text{wt. \%Cr}) - 15.2 \dots\dots\dots(2.1)$$



Gambar 2.2. Mikrostruktur karbida eutektik berbentuk lamellar pada matriks austenit 18,64%Cr^[9]

Karbida sekunder didapat dari proses perlakuan panas. Proses ini diawali di mana ketika destablisasi dilakukan, karbida sekunder akan mengendap di dalam matriks seiring proses *quench* dilakukan.



Gambar 2.3. Mikrostruktur matriks martensitik dari 30wt.%Cr dan 2.4wt.%C yang mengandung karbida sekunder^[10]

Efek yang diberikan oleh karbida sekunder ini lebih bagus dimana tidak hanya kekerasan saja yang diperoleh namun efek penguatan juga semakin baik

dikarenakan posisi karbida ini didalam matriks. Karbida primer memberikan efek penguatan yang tidak begitu baik dikarenakan posisi nya berada pada batas butir.

Tipe dan morfologi karbida sekunder juga tergantung pada komposisi paduan dan temperatur destablisasi. Pada paduan krom tinggi dengan kadar krom sekitar 25-30wt.%, karbida yang terbentuk bertipe $M_{23}C_6$ morfologinya seperti *fine interconnected rods*(berbentuk serabut). Pada kadar Cr 15-20wt.%Cr, karbida yang terbentuk berupa *single rod-like* M_7C_3 ^[11].

2.3 Austenit Sisa

Pembentukan martensit terjadi akibat depleksi dari karbon dan krom dengan cara difusi menuju karbida selama solidifikasi dan pendinginan selanjutnya pada temeperatur kamar^[2, 12-13]. Austenit yang tidak bertransformasi menjadi martensit selama proses *quench* dinamakan austenit sisa. Sifat austenit yang lunak dan tangguh akan menjadi kombinasi yang sesuai dengan martensit yang kuat dan getas. Keberadaan austenit tersebut dalam matriks dapat berkontribusi secara positif terhadap ketahanan abrasif, diakibatkan oleh *work hardening* dan tranformasi martensitik yang melibatkan stress, yang mana akan memberikan dukungan yang bagus terhadap karbida^[14-16]. Namun harus diperhatikan range yang sesuai dari kadar austenit sisa tersebut, dimana kadar austenit sisa dengan jumlah besar akan menurunkan nilai kekerasan dan juga akan berefek buruk pada sifat ketahanan abrasi besi tuang putih paduan tinggi. Sebaliknya, jika jumlah austenit sisa terlalu rendah maka akan meurunkan nilai ketangguhan dari *high chromium white cast iron*. Austenit sisa yang seimbang menurut Herring yaitu sekitar 20%^[17].

Untuk mengurangi jumlah austenit sisa dapat dilakukan dengan tempering. Temper yang berulang ulang sering dilakukan untuk memastikan jumlah maksimal austenit sisa yang sudah bertransformasi. Cara lain yaitu menggunakan perlakuan dingin(-85°C) atau perlakuan *cryogenic*(-195°C), dimana semakin rendah temperatur maka derajat tranformasi juga meingkat^[18].

2.4 Pengaruh Unsur Paduan

2.4.1 Karbon

Dengan meningkatnya kadar karbon, kekerasan dan ketahanan abrasi dari besi tuang putih juga meningkat. Namun demikian, *transverse fracture toughness* menurun dan kegetasan meningkat. Semakin besar kandungan karbon mengakibatkan menurunnya ketangguhan impak. Meningkatnya kadar karbon juga meningkatkan jumlah dari karbida eutektik yang keras dan getas.

2.4.2 Kromium

Peran utama dari Cr pada besi tuang putih yaitu membentuk karbida, meningkatkan ketahanan korosi dan menstabilkan struktur pada temperatur tinggi. Meningkatkan kadar karbon dan kromium bersamaan akan meningkatkan jumlah karbida yang terbentuk, tetapi akan menurunkan ketangguhan.

Dengan meningkatnya kadar Cr, struktur dan sifat paduan besi tuang putih berubah secara substansial. Karbida berubah dari $M(Fe,Cr)_3C$ menjadi $M(Fe,Cr)_7C_3$, kekerasan dari karbida pada saat yang bersamaan juga meningkat, dan ketangguhan juga mengalami peningkatan.

2.4.3 Molibdenum

Pada besi tuang putih, Mo yang terdapat pada matriks logam akan meningkatkan kemampukerasan dari besi. Diperkirakan 50% dari fraksi masa Mo membentuk Mo_2C , 25% terdapat pada matriks, dan 25% sisanya terlarut dalam matriks^[19].

2.4.4 Nikel

Nikel tidak dapat terlarut pada karbida dan keseluruhan nikel terlarut dalam austenit, dimana nikel berperan untuk meningkatkan kemampukerasan. Penambahan Nikel sekitar 0,2%-1,5% pada high chromium white cast iron akan menghalangi pembentukan *pearlite*. Jika Ni dan Mo ditambahkan secara bersamaan, efek penghambatan pembentukan *pearlite* lebih signifikan.

2.4.5 Tembaga

Pada besi tuang putih krom tinggi, tembaga menghambat pembentukan *pearlite*. Karena keterbatasan daya larut dalam austenit, Cu tidak seharusnya ditambahkan secara berlebihan. Penambahan Cu yang berlebihan akan

mengakibatkan meningkatnya austenit sisa dan selanjutnya akan mengakibatkan efek yang merugikan pada ketahanan abrasi.

2.4.6 Silikon

Silikon merupakan elemen yang dibatasi pada besi tuang putih dikarenakan meningkatkan aktivitas karbon sehingga dapat dengan mudah meningkatkan pembentukan grafit dan memperlambat pembentukan karbida. Selain itu silikon juga mengurangi kemampukerasan dan meningkatkan pembentukan *pearlite*, dimana akan berefek buruk pada sifat ketahanan abrasi.

2.5 Proses Perlakuan Panas

2.5.1 Perlakuan *subcritical*

Perlakuan *subcritical* dilakukan dengan tujuan mengurangi austenit sisa dan meningkatkan ketahanan terhadap *spalling*. Kisaran waktu dan temperatur yang tepat harus diperhatikan pada proses perlakuan *subcritical*, dimana waktu atau temperatur yang berlebihan akan mengakibatkan pelunakan dan penurunan secara drastis sifat ketahanan abrasi.

Tujuan dari *subcritical treatment* yaitu mentransformasikan austenit sisa yang didapat dari *as-cast* material^[20]. Karl Heinz Zuhm Gahr^[21] menyatakan bahwa proses perlakuan panas pada material *as-cast* pada range temperatur 550-700°C mengakibatkan austenit terdekomposisi sebagian menjadi *ferrite* dan karbida sekunder. Albertin^[22] menyatakan bahwa reaksi di *subcritical treatment* lebih efektif mengurangi austenit sisa pada struktur akhir martensit dibandingkan dengan austenisasi secara langsung pada temperatur yang tinggi, ini dikarenakan ketika material *as-cast* di austenisasi secara langsung akan mengakibatkan austenit sisa yang terdapat pada material *as-cast* akan menjadi stabil sehingga ketika *quench* dilakukan austenit yang sudah stabil ini tidak berubah menjadi martensit.

2.5.2 Austenisasi

Temperatur austenisasi sangat berkaitan dengan besarnya larutan karbon dalam matriks austenit. Temperatur yang terlalu tinggi akan meningkatkan kestabilan austenit sehingga akan menimbulkan banyak austenit sisa pada struktur

akhirnya, yang mana akan mengurangi nilai kekerasan. Sementara itu temperatur austenit yang rendah akan memberikan martensit yang memiliki kadar karbon yang terlalu rendah pada struktur yang juga akan menurunkan nilai kekerasan.

Perlakuan panas yang baik akan menghasilkan destabilisasi austenit dengan pengendapan karbida sekunder dalam matriks austenit. Temperatur austenisasi untuk besi tuang putih kelas II berada pada kisaran temperatur 920-1060°C. Untuk memberikan hasil pemanasan yang optimal maka diperlukan waktu tahan dalam jangka waktu tertentu pada proses austenisasi. Ini dimaksudkan agar keseimbangan kelarutan karbida kromiun dapat memastikan sifat keras muncul. Pada waktu penahanan selama 90 menit pertama, presipitasi terjadi, dan selama 3 jam kemudian tidak ada presipitasi baru, hanya pengkasaran dari partikel yang ada. Pada waktu penahanan selama 4 jam, terjadinya pelarutan dari beberapa karbida mengakibatkan pengkasaran pada unsur yang secara termodinamis lebih stabil^[23] hal ini juga ditemukan oleh Kuwono *et al*^[24]. Powell dan Laird^[25] menyarankan bahwa presipitasi terjadi pada saat 25 menit pertama pada temperatur austenisasi. Kuwano *et al*^[24] merasa bahwa presipitasi terjadi pada waktu yang singkat pada temperatur antara 950-1000°C.

2.5.3 Quench

Untuk proses pendinginan diharapkan dapat melewati temperatur pearlit sekitar 500-600°C, lalu ditahan untuk penyeragaman temperatur. Pendinginan dengan cepat juga dapat dilakukan untuk mengurangi jumlah austenit sisa yang terbentuk. Proses *subzero treatment* akan membuat derajat transformasi meningkat, sehingga jumlah austenit yang tidak bertransformasi akan berkurang. Pada *subzero treatment* suhu yang harus dicapai sekitar -190°C. Penahanan pada subzero berkisar antara 10 hingga 60 menit, agar pendinginan merata.

Tabrett dan Sare, mempelajari pengaruh perlakuan sub-ambient pada 3wt%Cr-15wt%C-3wt%Mo, di mana setelah material di destabilisasi pada suhu 1100°C lalu di air *quench*, sampel ditempatkan pada *domestic freezer* (-25°C), campuran etanol-nitrogen cair (-95°C) dan nitrogen cair (-196°C) dengan waktu tahan selama 30 menit. Hasil investigasi menunjukkan bahwa semakin menurunnya temperatur, proporsi martensit dalam matriks semakin meningkat,

ketahanan abrasi maksimum didapat dari struktur dengan austenit sisa sekitar 30% (pada temperatur -95°C) serta struktur yang didinginkan pada -196°C , hanya menurunkan sedikit austenit sisa, tidak jauh beda dengan temperatur sekitar -95°C , yaitu sekitar 28%.

2.5.4 Temper

Temper dilakukan untuk mengembalikan ketangguhan yang hilang akibat *quenching*, selain itu temper juga dilakukan untuk menghilangkan tegangan sisa. Sare dan Arnold ^[26] menyebutkan bahwa tempering paduan dengan kandungan 27wt.%Cr pada 500°C dapat mengurangi austenit sisa berkisar kurang dari 10% volume. Sementara temperatur temper antara $200-250^{\circ}\text{C}$ terlalu rendah untuk mengurangi austenit sisa ^[27].

2.6 High Chromium White Cast Iron sebagai Grinding Ball

Nilai kekerasan dan ketahanan aus yang baik oleh material high chromium white cast iron membuat material ini cocok digunakan sebagai material *grinding ball*. Kekerasan yang baik ini diperoleh dari pembentukan karbida dan matriks martensitik yang terbentuk akibat perlakuan panas. Distribusi karbida serta kombinasi dari austenit sisa dan matriks martensitik juga akan membuat material ini tangguh dan tahan aus.

Sesuai dengan standar SNI 1069 atau SII-0789-83 persyaratan *grinding ball* haruslah minimal 506 BHN (53 HRC) untuk jenis tempa, 600 BHN untuk krom tinggi, 500 BHN untuk Ni-Hard, serta baja paduan 400 BHN. *Grinding ball* diharuskan memiliki karbida krom dan juga matriks martensitik.

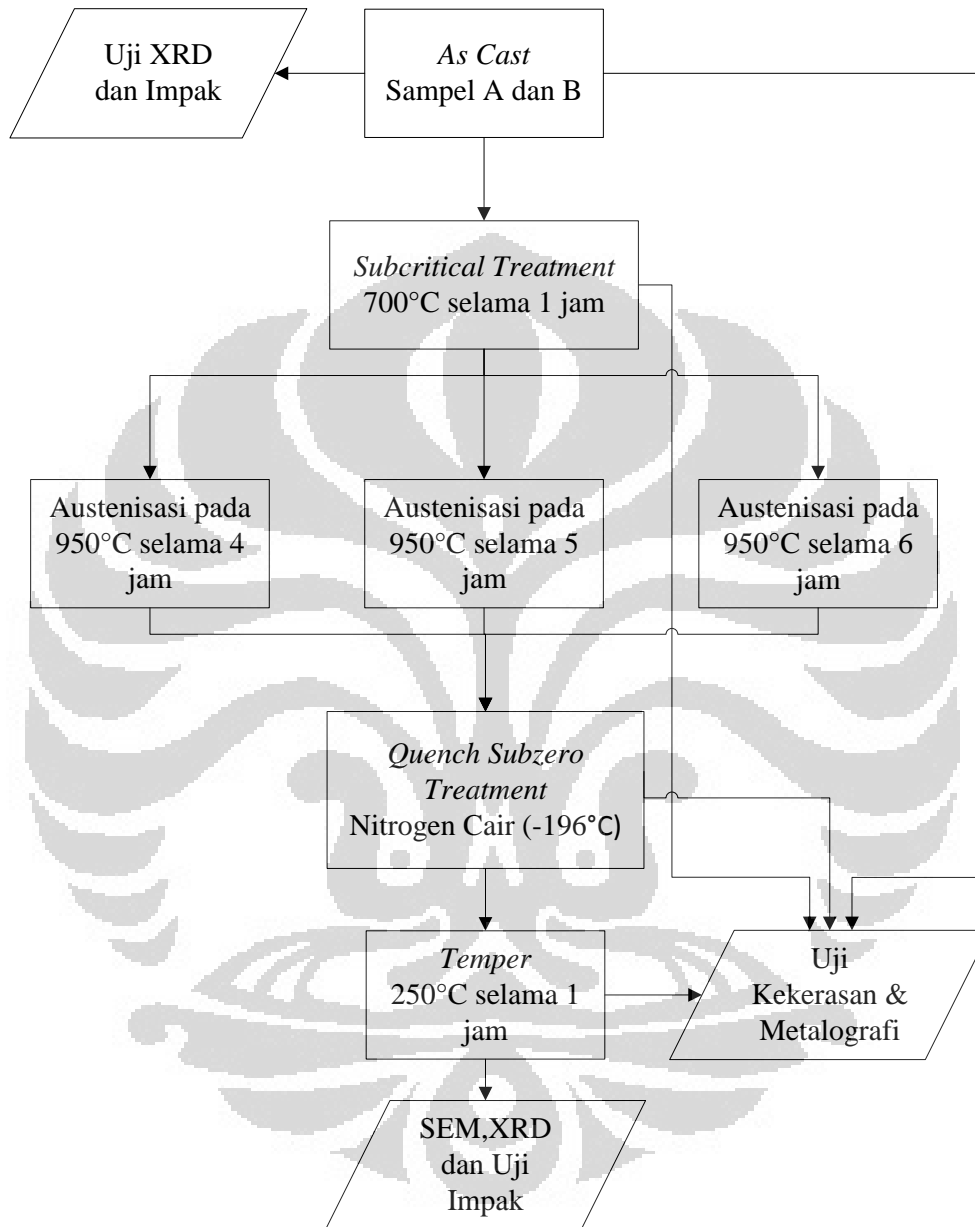
Tabel 2.2. Jenis bola gerus dan komposisinya

Klasifikasi	Komposisi									BHN (min)	HRC (min)	
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu			
Besi Cor	Cil	<3.74	<1.8	<0.60	<0.10	<0.10	<1.71	-	-	-	415	43
	Tempa	2.38-2.65	-	-	-	-	0.25-2.53	-	-	-	506	52
	Krom Tinggi	2.2-3.2	0.4-1.0	0.4-1.0	<0.30	<0.30	14.0-20.0	-	0.05	-	600	59
	Ni-Hard	2.8-3.2	0.3-0.7	0.4-0.6	<0.10	<0.10	1.8-2.0	3.2-4.4	-	-	500	53
Baja	Baja Paduan	0.30-0.85	0.15-0.35	0.15-1.00	<0.05	<0.05	-	2.4	0.05-0.37	0.10-0.15	400	47
	Baja Karbon	0.55-0.85	0.15-0.30	0.20-0.90	<0.05	<0.05	-	-	-	-	262	25

(Sumber: SII-0789-83)

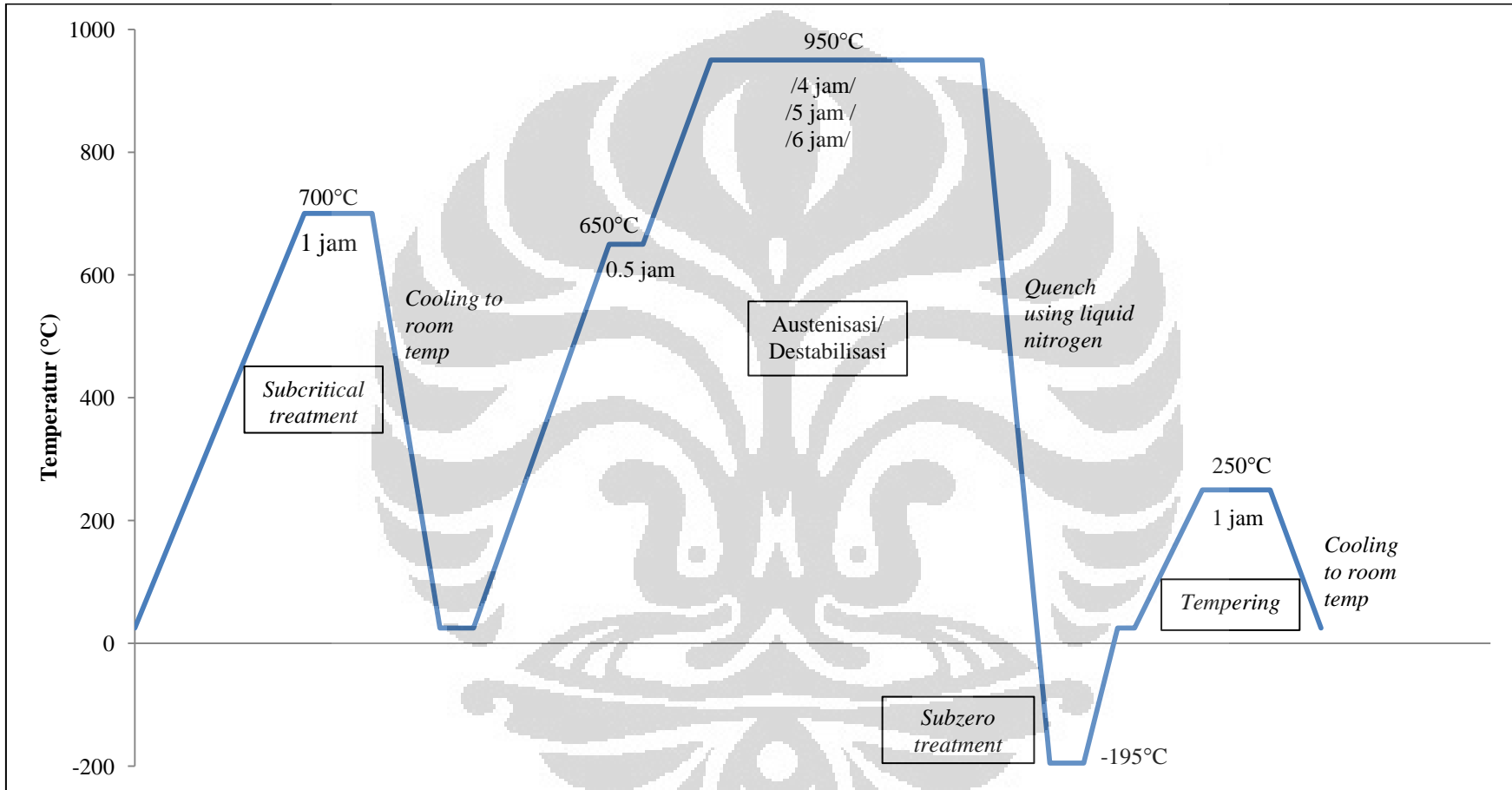
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu
Sampel A	2,23	0,773	0,12	0,354	0,709	0,464	13,3	0,063	0,051
Sampel B	2,18	0,719	0,12	0,4	0,697	0,448	13	1,38	0,055

Gambar 3.1. Diagram alir penelitian & komposisi material uji

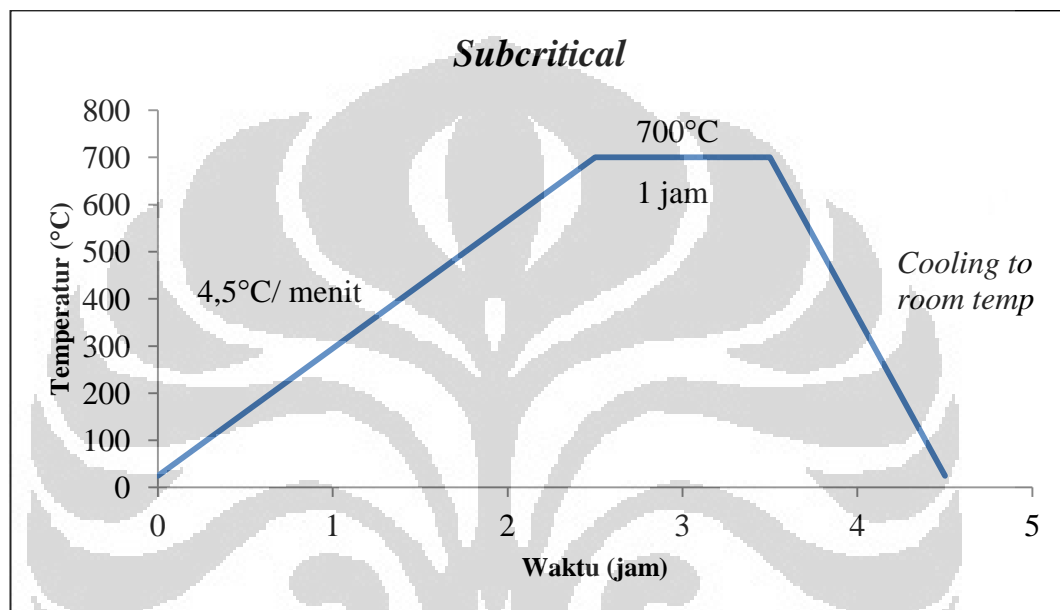


Gambar 3.2. Proses perlakuan panas pada material uji

3.2 Proses Perlakuan Panas

3.2.1 Perlakuan *Subcritical*

Material dimasukkan ke dalam *nabartherm furnace*, kemudian dipanaskan hingga suhu 700°C dan di tahan selama 1 jam, kemudian di keluarkan dari *furnace*, dan didinginkan pada suhu kamar.



Gambar 3.3. Diagram perlakuan panas *subcritical*

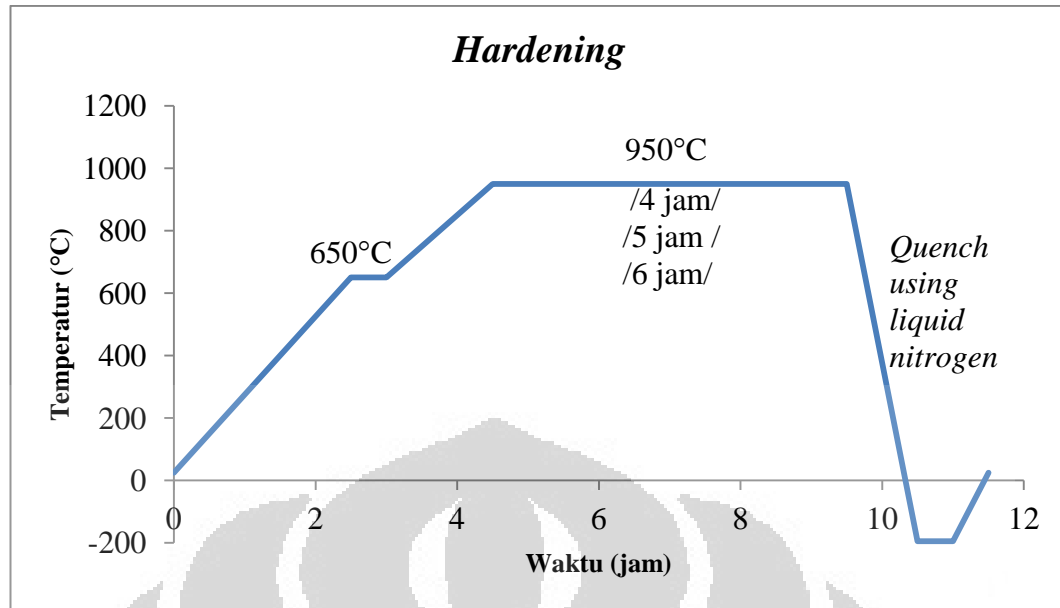
3.2.2 *Hardening*

3.2.2.1 Austenisasi

Material dipanaskan terlebih dahulu sampai 650°C di tahan selama 30 menit, kemudian dipanaskan hingga 950°C dengan variabel waktu tahan 4,5, dan 6 jam

3.2.2.2 *Quenching*

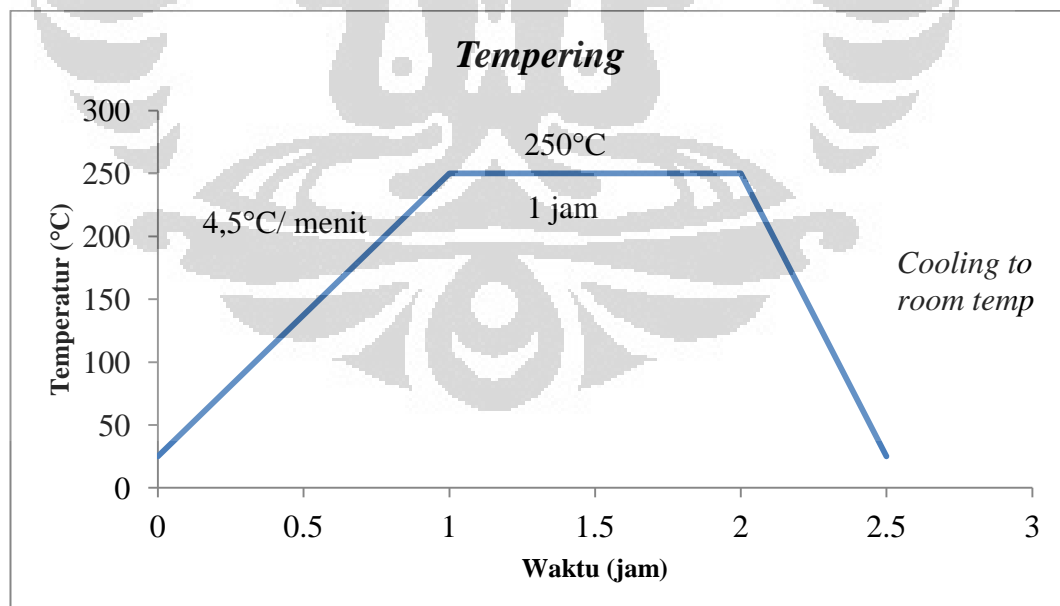
Setelah austenisasi, maka material dikeluarkan dari dalam *furnace* dan dicelup kedalam wadah yang berisi nitrogen cair, dan menutup wadah tersebut agar nitrogen tidak menguap.



Gambar 3.4. Diagram perlakuan panas *hardening*

3.2.3 Tempering

Material kembali dimasukkan ke *furnace* dan panaskan hingga temperatur 250°C selama 1 jam.



Gambar 3.5. Diagram perlakuan panas *tempering*

3.3 Karakterisasi

3.3.1 Pengujian Metalografi

Pengamatan struktur mikro dilakukan pada sampel *as-cast*, *as-subcritical*, *as-hardened*, dan *as-temper*. Prosedur yang dilakukan pertama yaitu pengamplasan sampel. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas berturut-turut dengan nomor grit #40, #80, #120, #240, #400, #600, #800, #1000 dan #1500. Pada saat pengamplasan, pemberian air dilakukan untuk menghindari efek pemanasan terhadap struktur mikro dan mengalirkan geram logam yang terkikis. Selain itu, perubahan arah pengamplasan yang baru adalah 45° atau 90° terhadap arah sebelumnya.

Setelah dilakukan pengamplasan, maka dilakukan pemolesan dengan menggunakan alumina. Proses pengerjaannya sama dengan pengamplasan. Setelah permukaan telah rata, dilakukan proses etsa. Sampel dicelupkan ke dalam larutan Nital 3% selama kurang lebih 7 detik kemudian dicuci dengan air mengalir dan dikeringkan. Kemudian pengamatan dan pengambilan foto mikrostruktur dilakukan menggunakan mikrostruktur optik. Struktur mikro mengacu pada *ASM Handbook Vol 9*.

3.3.3 Pengujian Impak

Pengujian impak dilakukan terhadap sampel *as-cast* dan *as-temper*. Standar pengujian yang digunakan mengacu pada ASTM E23, dengan menggunakan metode Charpy. Prosedur pengujian yang dilakukan dimulai dari:

- a. Melakukan proses machining pada sample untuk membentuk takik pada sample impak metode Charpy
- b. Mengukur luas area dibawah takik
- c. Meletakkan sampel
- d. Menaikkan pendulum, pastikan jarum merah pada skala nol
- e. Melepaskan pendulum, dan menarik tuas rem
- f. Membaca nilai pada jarum mesin impak
- g. Mengukur luas area patahan

3.3.4 Pengujian Kekerasan *Rockwell*

Tiap tiap sampel diuji kekerasannya menggunakan metode rockwell skala C dengan standar beban 150 kg indenter intan, mengacu pada ASTM E18 dan. Prosedur pengujian adalah sebagai berikut:

- a. Melakukan pengamplasan pada bagian yang ingin diuji kekerasannya
- b. Melakukan penjejakan awal dengan beban 10 kg, setelah itu melakukakm penjejakan dengan beban 150 kg.
- c. Menahan proses penjejakan selama 10 detik untuk memberikan hasil deformasi yang sempurna
- d. Mencatat nilai kekerasan yang ditampilkan pada mesin.
- e. Mengulangi proses hingga terdapat minimal 5 titik

3.3.5 Pengujian XRD

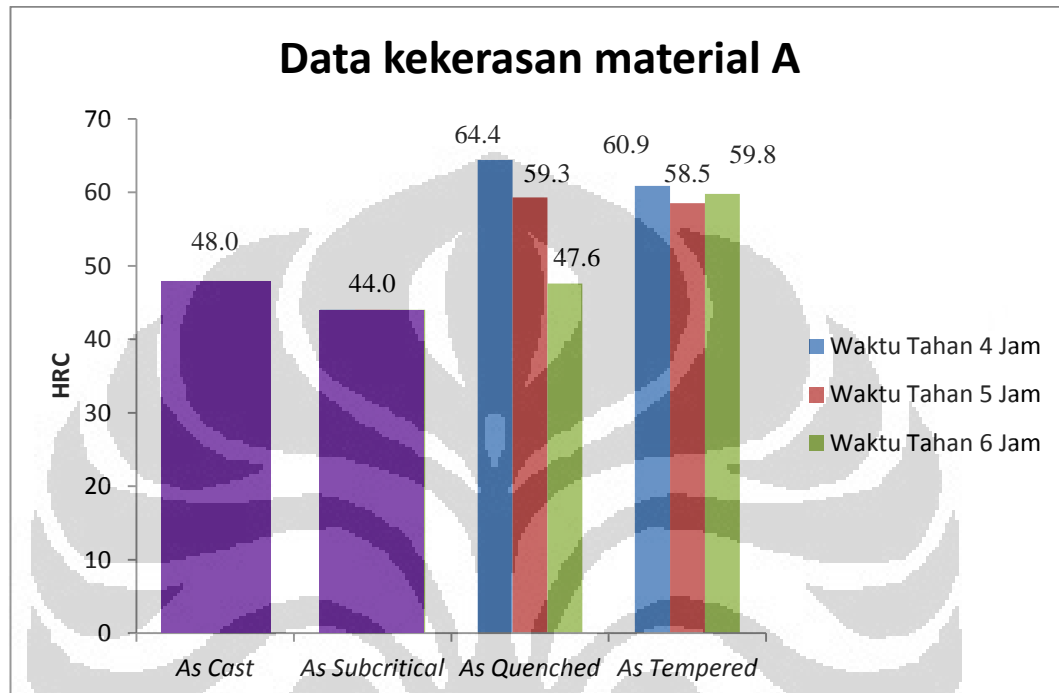
XRD merupakan uji non destruktif dimana pengujian ini akan mengungkapkan informasi yang detail mengenai senyawa kimia dan struktur kristalografi dari material tersebut. XRD menggunakan hukum Bragg, dimana dengan memvariasikan sudut theta dan jarak maka kondisi dari hukum Bragg dapat diidentifikasi, yang akan memberikan puncak puncak yang terdifraksi yang membentuk pola, yang merupakan karakteristik dari sampel. Sampel yang diuji XRD yaitu sample *as-cast* dan sampel *as-temper*. Pengujian dimaksudkan untuk mendeteksi austenit sisa pada material.

3.3.6 Pengujian SEM

SEM memiliki daerah DOF (*depth of field*) yang besar, yaitu sekitar 4mm-0,4mm, serta pembesaran hingga 3000000x. Akibatnya pencitraan dengan resolusi yang tinggi dapat diperiksa pada pembesaran yang lumayan besar. Pengamatan menggunakan SEM dilakukan pada sample *as-temper*. Pengamatan ini dilakukan untuk mengetahui karbida yang terbentuk akibat dari proses perlakuan panas dalam penelitian.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

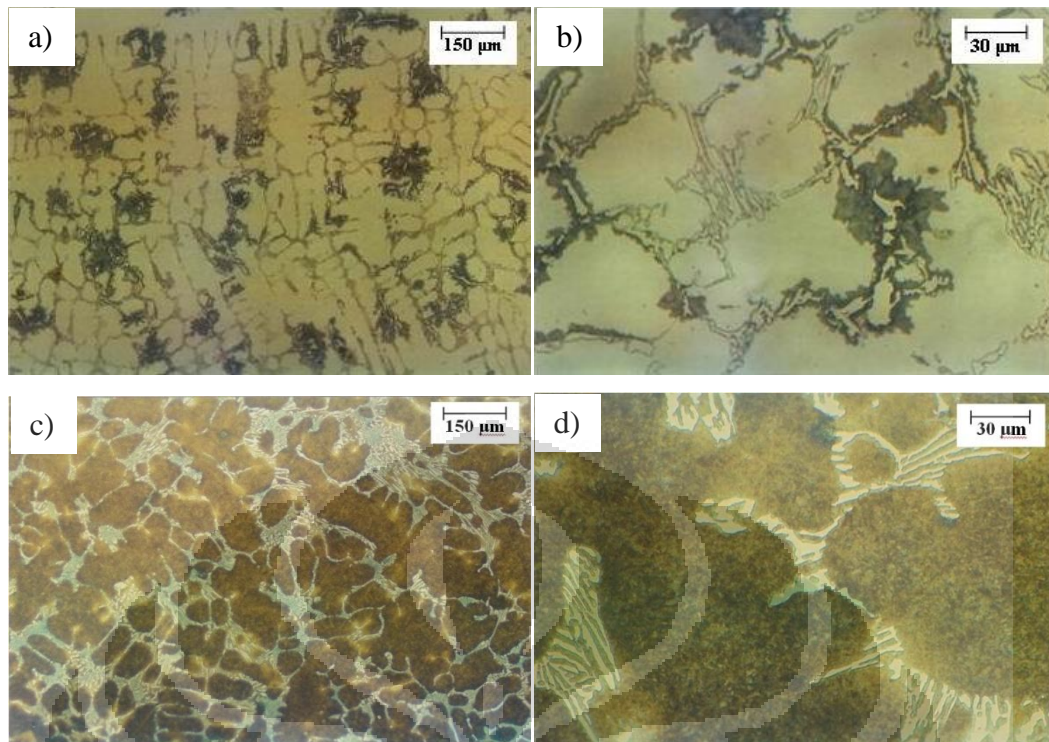
4.1 Pengaruh Waktu Tahan Austenisasi terhadap Sifat Mekanis



Gambar 4.1. Data kekerasan material A pada setiap kondisi perlakuan panas

Nilai kekerasan *as-hardened* meningkat secara signifikan dibandingkan dengan nilai kekerasan *as-cast*. Hal ini disebabkan berubahnya fasa matriks yang sebelumnya austenitik menjadi martensitik. Kondisi *as-hardened* juga mengalami peningkatan kekerasan akibat terbentuknya karbida sekunder didalam matriks.

Namun nilai kekerasan pada material A menurun ketika diberi perlakuan subkritis, hal ini disebabkan oleh proses subkritis yang mentransformasikan austenit menjadi *pearlite*, namun *pearlite* (*ferrite* + karbida) yang dihasilkan menjadi kasar sehingga kekerasan menurun.



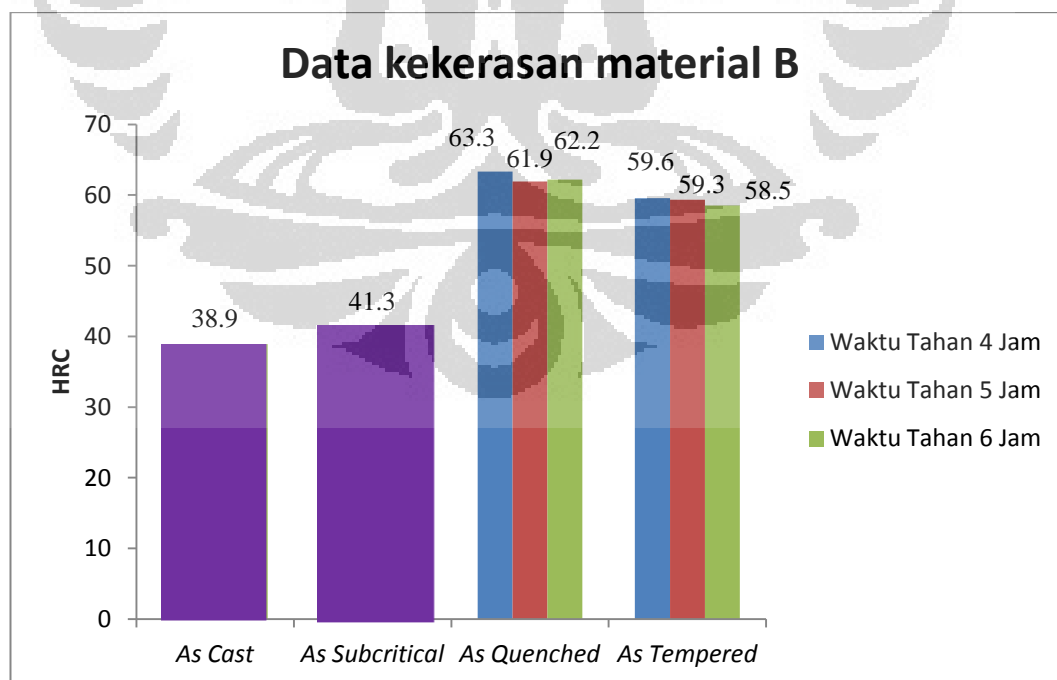
Gambar 4.2. Foto mikro material A a) b) kondisi *as-cast* c) d) kondisi *as-subcritical* (etsa nital 3%)

Pada kondisi setelah *quench* dilakukan, nilai kekerasan dengan waktu tahan selama 4 jam memiliki nilai kekerasan yang paling tinggi sebesar 64,4 HRC, sementara itu material dengan waktu tahan austenisasi selama 5 jam sebesar 59,3 HRC dan nilai kekerasan terendah dimiliki oleh material dengan waktu tahan austenisasi selama 6 jam sebesar 47,6 HRC, ini artinya nilai kekerasan menurun dengan semakin lamanya waktu tahan. Bahkan jika melihat data kekerasan *as-cast*, data *as-cast* tersebut lebih besar daripada *as-quenched* 6 jam, *as-cast* 48,0 HRC dan *as-quenched* 6 jam 47,6 HRC. Kekerasan yang sangat rendah ini diakibatkan oleh mengkasarnya karbida yang mengakibatkan terdifusinya beberapa elemen sehingga matriks akan mengalami pengurangan sejumlah partikel. Penurunan nilai kekerasan akibat waktu tahan yang semakin lama juga mungkin terjadi akibat austenit yang makin stabil dengan semakin lamanya waktu tahan dan ketika *quench* dilakukan masih banyak austenit yang belum bertransformasi menjadi martensit, sehingga penurunan kekerasan terjadi.

Pada material yang telah diberi perlakuan *temper*, nilai kekerasan menurun dikarenakan hilangnya tegangan sisa yang terdapat ketika pendinginan cepat dilakukan. Namun nilai kekerasan *as-tempered* material A dengan waktu tahan 6

jam mengalami peningkatan dibandingkan dengan *as-quenched*. Hal ini dapat terjadi ketika proses tempering dilakukan pada suhu 250°C, elemen yang sebelumnya terdifusi dalam karbida sekunder yang teraglomerasi, kembali lagi ke dalam matriks, selain itu ketika *tempering* dilakukan austenit sisa juga bertransformasi menjadi martensit sehingga nilai kekerasan pada saat *as-tempered* meningkat.

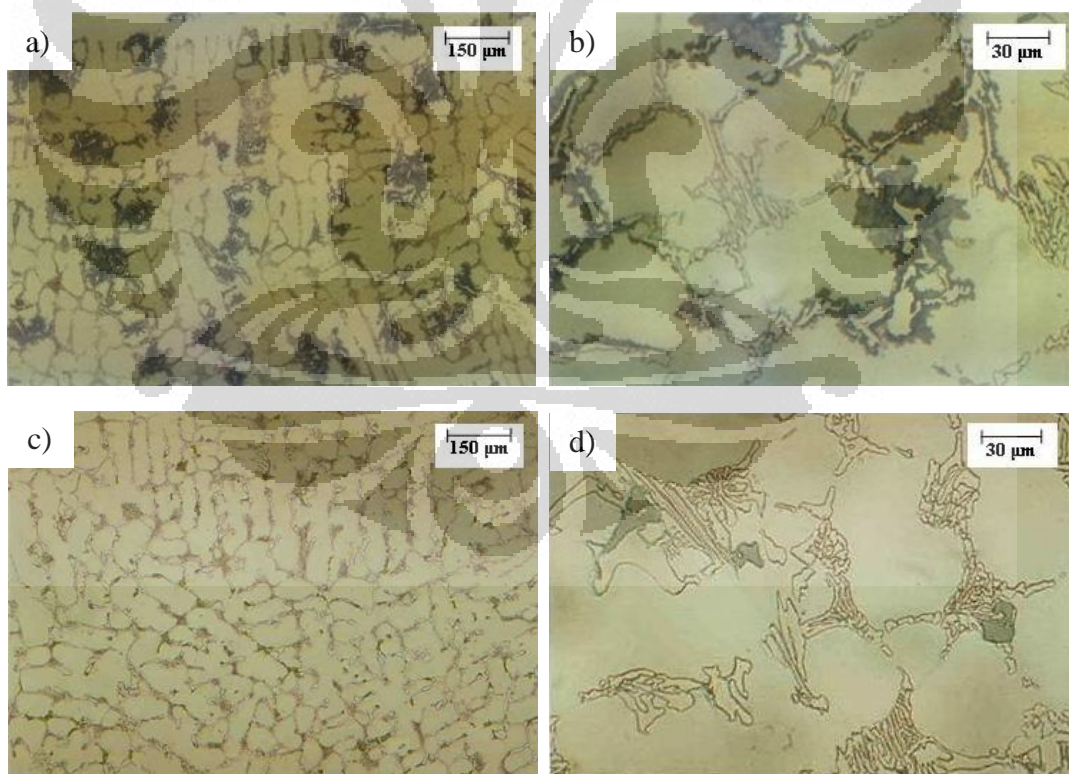
Peningkatan nilai kekerasan setelah *tempering* yang hanya terjadi pada material dengan waktu tahan austenisasi 6 jam, kemungkinan akibat dari austenit yang ada pada material dengan waktu tahan 6 jam lebih mudah bertransformasi setelah *tempering* dilakukan, dibandingkan dengan material dengan waktu tahan austenisasi 4 dan 5 jam. Hal ini dapat disebabkan karena jumlah austenit sisa pada material *as-quenched* dengan waktu tahan 6 jam lebih banyak sehingga ketika *tempering* dilakukan austenit tersebut bertransformasi menjadi martensit dengan kuantitas yang lebih banyak, sementara itu austenit sisa yang berjumlah sedikit pada material dengan waktu tahan 4 dan 5 jam juga menghasilkan martensit yang sedikit.



Gambar 4.3. Data kekerasan material B pada setiap kondisi perlakuan panas

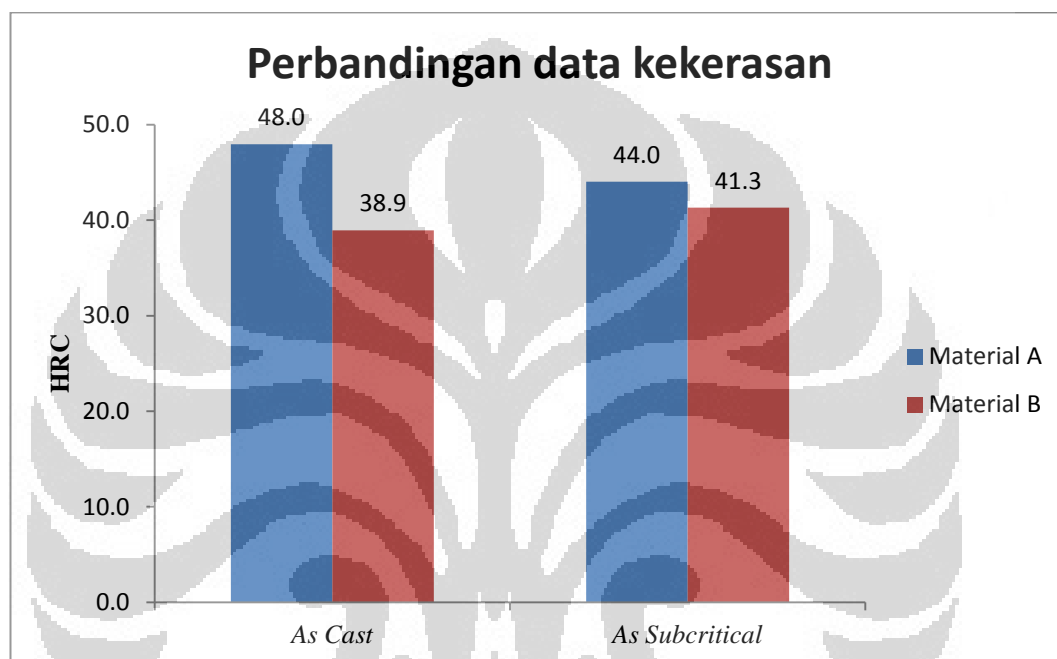
Nilai kekerasan pada kondisi *as-cast* material B lebih rendah dibandingkan dengan material A. Berkurangnya nilai kekerasan pada kondisi *as-cast* di material B dikarenakan adanya unsur Mo yang menekan pembentukan *pearlite*, sehingga matriks pada *as-cast* berupa austenitik, yang nilai kekerasannya lebih rendah dibanding *pearlite*(*ferrite + carbide*).

Pengamatan struktur mikro pada material *as-cast* dapat dilihat pada gambar di bawah. Pada material A dan B terdapat karbida eutektik. Matriks pada material B berupa austenitik, sementara pada material A berupa *pearlite* dan austenit. Terbentuknya matriks austenitik pada material B dikarenakan adanya unsur Mo yang berfungsi sebagai unsur penahan terbentuknya *pearlite*. Sementara pada material A, tidak adanya unsur Mo mengakibatkan matriks tidak sepenuhnya austenit, namun ada *pearlite*(*ferrite + carbide*) yang terbentuk dari hasil solidifikasi dari pengecoran.



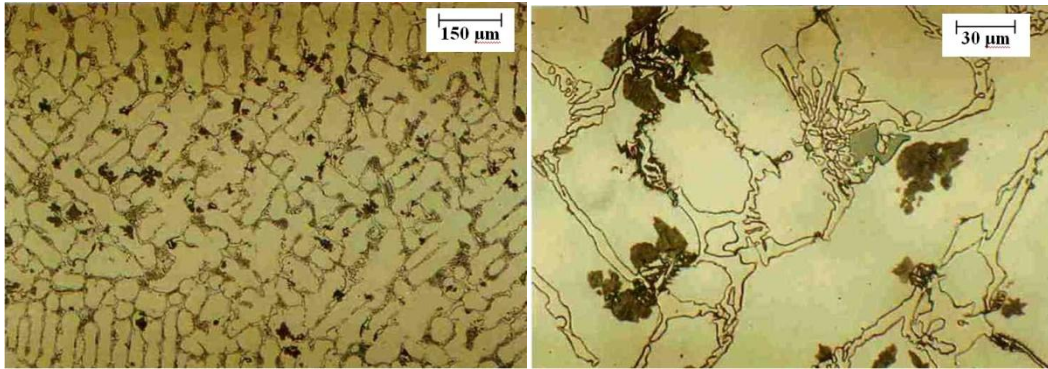
Gambar 4.4. Mikrostruktur *as-cast* a) b) material A ; c) d) material B (etsa nital3%)

Penurunan nilai kekerasan yang terjadi pada material A pada kondisi *as-subcritical* tidak terjadi pada material B, hal ini bisa saja terjadi akibat transformasi sebagian austenit yang diakibatkan oleh proses subkritis menghasilkan *pearlite* dengan karbida sekunder yang lebih *fine* dibandingkan dengan material A yang menghasilkan *pearlite* kasar.



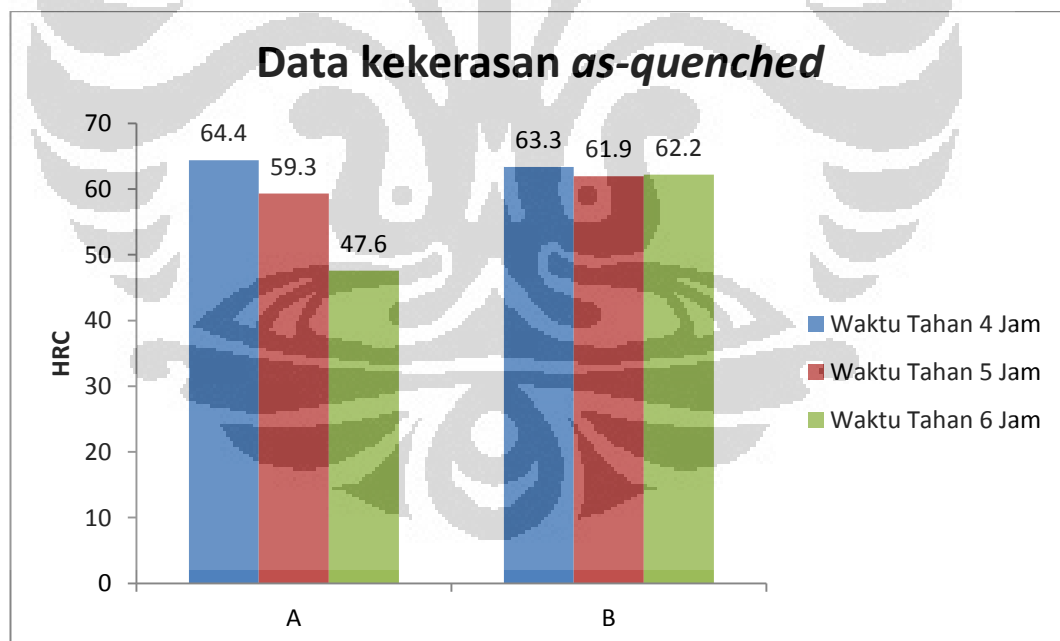
Gambar 4.5. Data kekerasan material A dan B kondisi *as-cast* dan *as-subcritical*

Namun nilai kekerasan pada kondisi *as-subcritical* lebih besar pada material A, ini artinya meskipun morfologi *pearlite* yang kasar yang didapat pada material A yang mengakibatkan penurunan nilai kekerasan pada kondisi *as-subcritical* material A, tetapi fraksi massanya lebih banyak dibandingkan dengan material B, sehingga nilai kekerasan pada kondisi *as-subcritical* masih tinggi pada material A dibandingkan dengan material B. Pada material yang sudah dikenakan perlakuan subkritis, hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan adanya fasa *pearlite* pada foto hasil pengamatan. Hal ini sesuai dengan literatur^[21], dimana jika material diberi perlakuan subkritis pada suhu 550-800°C akan membuat struktur matriks yang awalnya austenit berubah menjadi *pearlite*.



Gambar 4.6. Foto mikro material B *as-subcritical* (etsa nital 3%)

Nilai kekerasan yang paling tinggi, baik pada material uji A dan B, didapat pada material dengan waktu tahan austenisasi 4 jam. Menurunnya nilai kekerasan seiring dengan semakin lamanya waktu tahan, dikarenakan oleh pengkasaran karbida. Semakin lama waktu tahan akan meningkatkan difusinya sejumlah elemen, sehingga karbida menjadi kasar dan melarutnya elemen lain^[23].



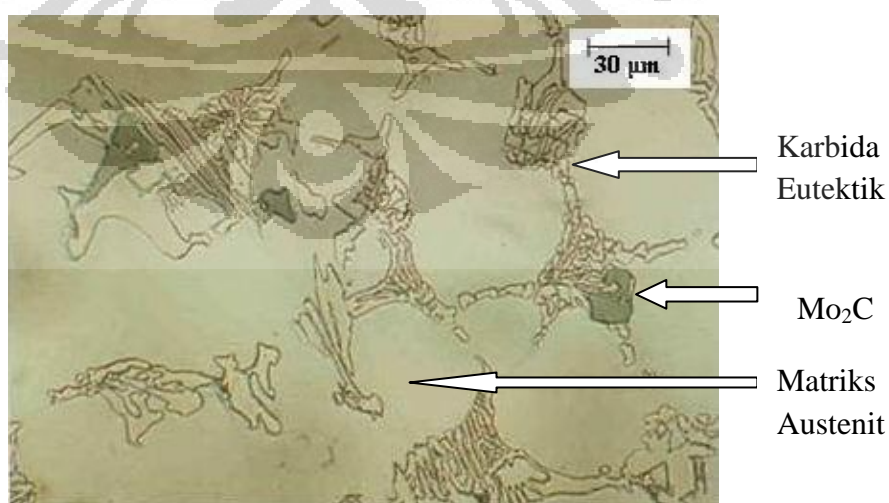
Gambar 4.7. Data kekerasan material A dan B kondisi *as-quenched*

Nilai kekerasan *as-quenched* pada kondisi waktu tahan 5 dan 6 jam, lebih besar pada material B dibandingkan dengan material A, hal ini dikarenakan adanya unsur Mo yang meningkatkan kemampukerasan yang berada dalam

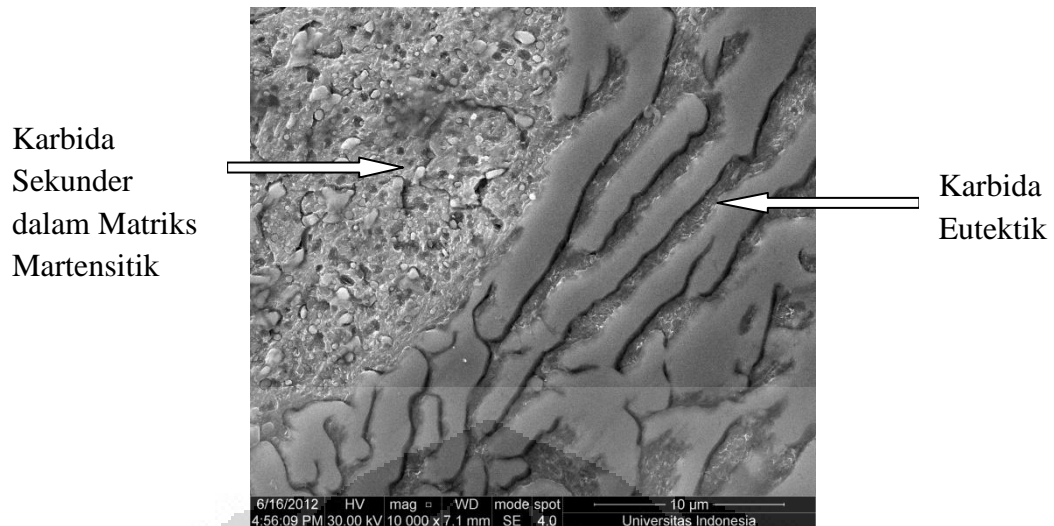
matriks, sementara itu pada material A, material A yang memiliki unsur Mo yang lebih rendah dibanding dengan material B, ketika waktu tahan semakin lama, karbida mulai mengkasar, sehingga partikel Mo ikut terlarut dalam karbida dan austenit juga menjadi lebih stabil, sehingga menyebabkan matriks kekurangan unsur Mo, yang akhirnya, kemampukerasan menurun, dan menurunkan derajat transformasi martensit pada material A, sehingga kekerasan pun ikut turun.

Jika melihat perbandingan data kekerasan *as-quenched* kedua material, dapat dilihat bahwa pengaruh waktu tahan yang semakin lama yang pada material A akan menurunkan nilai kekerasan, secara umum tidak terjadi pada material B, hal ini akibat adanya pengaruh unsur Molibdenum seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya yang meningkatkan kemampukerasan.

Pada pengamatan struktur mikro material *as-hardened*, maka mulai terbentuk fasa martensitik, dan karbida sekunder. Karbida sekunder ini terletak didalam matriks martensit. Pengaruh perbedaan waktu tahan antara 4, 5 dan 6 jam tidak dapat diamati melalui struktur mikro dengan perbesaran 500 kali ini, seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah dimana tidak ada perbedaan yang signifikan antara 4, 5 dan 6 jam. Pada material B *as-cast*, sudah terlihat struktur Mo_2C yang terdapat di luar matriks. Mo_2C ini terbentuk akibat adanya karbon berikatan dengan Mo.

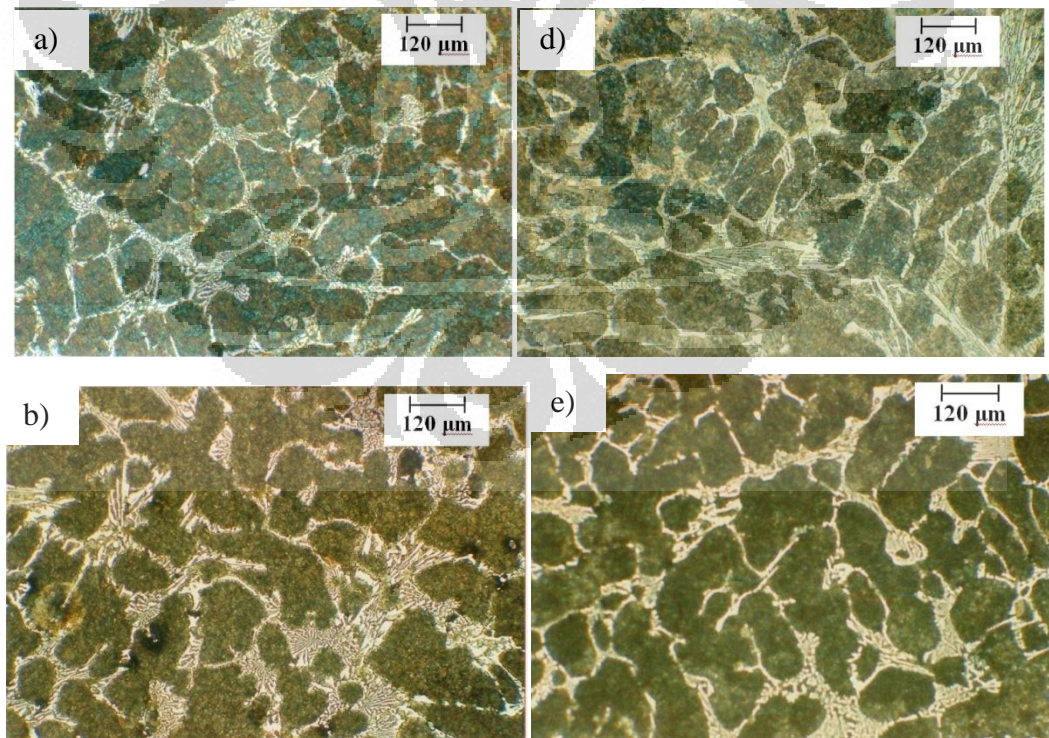


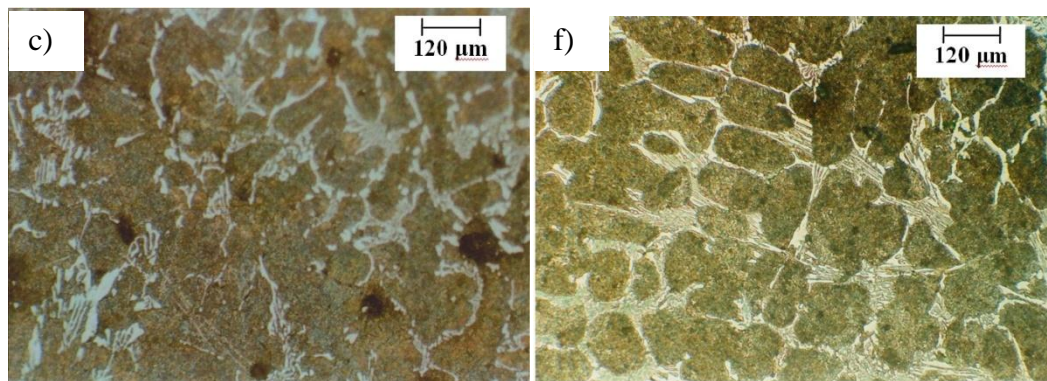
Gambar 4.8. Foto mikro material B *as-cast* (etsa nital 3%)



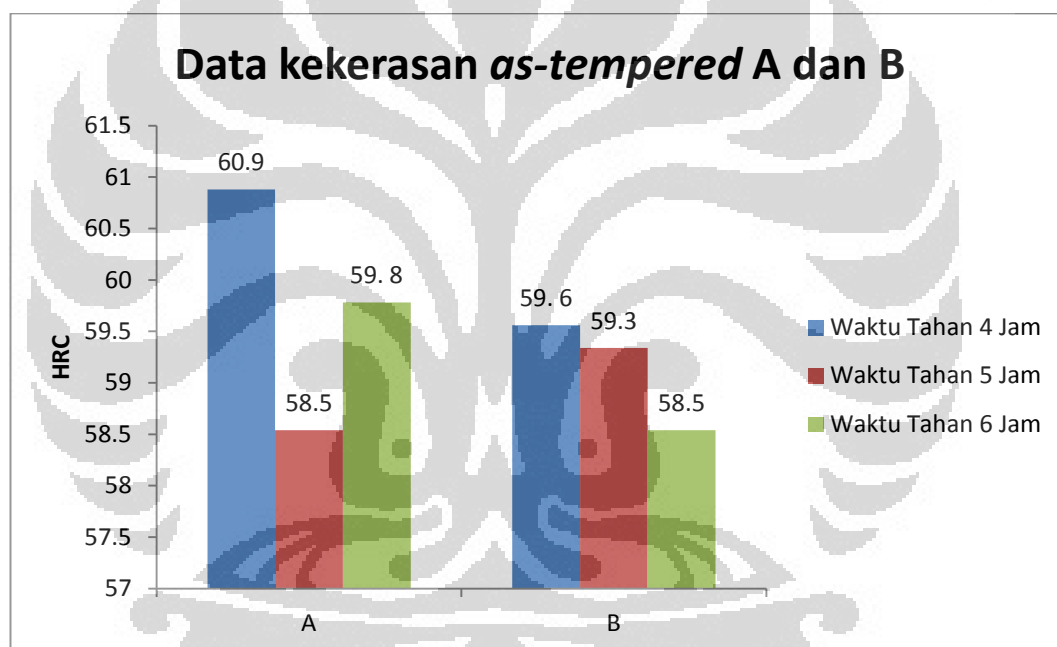
Gambar 4.9. Pengamatan mikrostruktur menggunakan SEM material B *as-tempered* pada kondisi waktu tahan destabilisasi selama 4 Jam dan temperatur 950°C.

Sementara itu mulai terlihat karbida sekunder didalam matriks martensit akibat proses *quench* dan juga karbida sekunder didalam matriks tersebut seperti yang ditunjukkan pada gambar diatas.





Gambar 4.10. Foto mikro kondisi *as-quenched* a) waktu tahan 4 jam b) 5 jam c) 6 jam material A; d) waktu tahan 4 jam e) 5 jam f) 6 jam material B (etsa nital 3%)

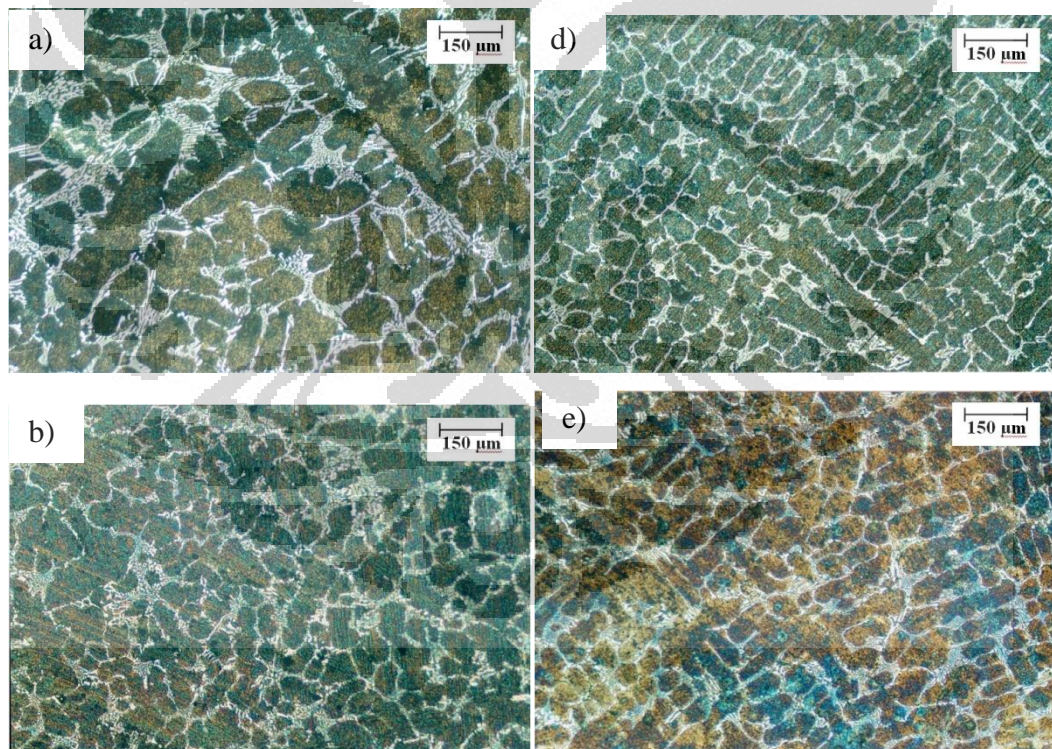


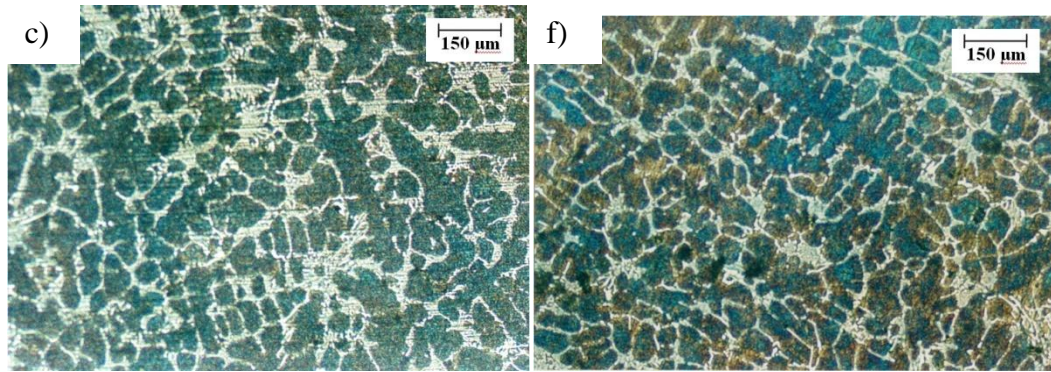
Gambar 4.11. Perbandingan nilai kekerasan material A dan B pada kondisi *as-tempered*

Uji kekerasan menunjukkan bahwa material B dengan unsur paduan Mo tidak memiliki nilai kekerasan yang lebih signifikan dibandingkan dengan material A tanpa Mo. Kekerasan yang didapat dari adanya karbida Mo_2C tidak begitu efektif. Bahkan menurut Boonmak^[28], Mo lebih berkontribusi pada jumlah austenit sisa, akibat dari matriks austenitik pada material *as-cast* yang berasal dari penahan pembentukan *pearlite* oleh Mo. Ini artinya masih adanya austenit sisa pada material B yang berasal dari matriks austenitik kondisi *as-cast*.

Namun nilai kekerasan pada material A dengan waktu tahan 6 jam meningkat setelah *tempering* dilakukan, hal itu tidak terjadi pada material B dengan waktu tahan 6 jam. Kondisi ini dapat terjadi akibat austenit sisa pada material *as-cast* B masih belum bertransformasi menjadi martensit ketika *quench* dilakukan, dan tetap tidak berubah ketika *tempering* dilakukan. Beda halnya dengan material A, yang dalam kondisi *as-cast*, memiliki austenit sisa yang lebih sedikit, sehingga ketika *quench* dilakukan dan meskipun meninggalkan austenit sisa, austenit sisa tersebut bisa bertransformasi menjadi martensit.

Hasil pengamatan struktur mikro pada material *as-tempered* tidak jauh berbeda dengan material *as-quenched*. Hal ini disebabkan oleh pada perlakuan temper dengan suhu 250°C, tidak merubah fasa melainkan hanya mengurangi tegangan sisa yang diakibatkan pada saat *quench*.

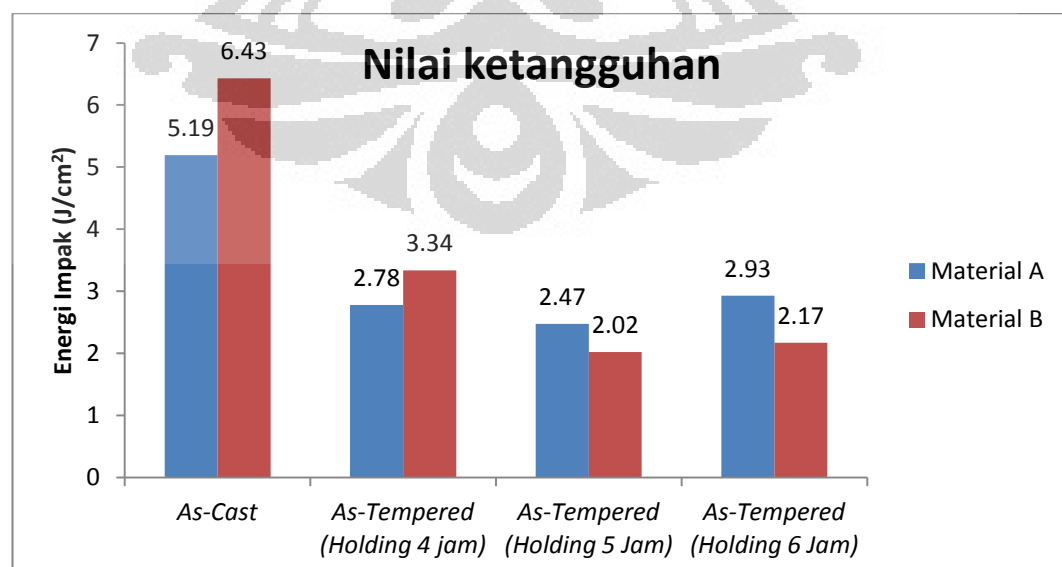




Gambar 4.12. Foto mikro kondisi *as-tempered* a) waktu tahan 4 jam b) 5 jam c) 6 jam material A ; d) waktu tahan 4 jam e) 5 jam f) 6 jam material B (etsa nital 3%)

Sementara itu, nilai ketangguhan material *as-tempered* berkisar antara 2.0 – 3.4 J/cm² dan nilai ketangguhan material *as-cast* untuk material A, 5.19 J/cm² dan B bernilai 6.43 J/cm². Ketangguhan pada kondisi *as-cast* material B lebih tinggi, hal ini dikarenakan matriks austenitik yang dimiliki oleh material B yang lunak, sehingga ketangguhan pun ikut meningkat.

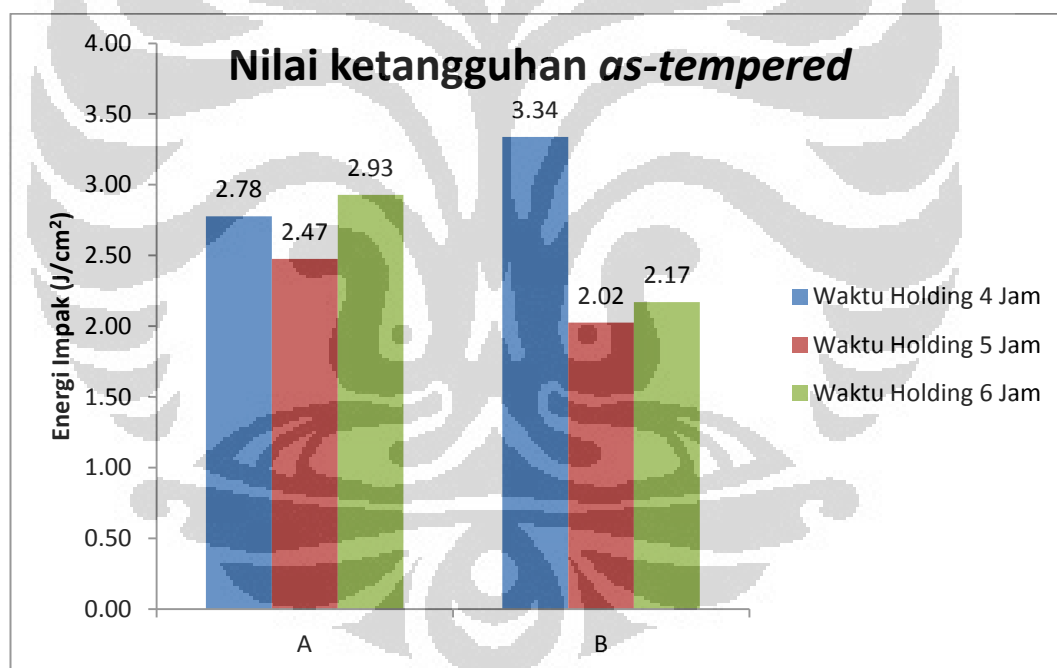
Perbedaan nilai ketangguhan antara material A dan B tidak begitu signifikan. Namun jika dibandingkan dengan material *as-cast*, mengalami perbedaan yang begitu besar. Hal ini disebabkan oleh terbentuknya karbida sekunder dan fasa matriks yang berubah dari austenitik lunak menjadi fasa martensitik yang keras, yang akan meningkatkan nilai kekerasan dan menurunkan ketangguhan.



Gambar 4.13. Nilai ketangguhan material A dan B pada setiap kondisi perlakuan panas

Menurunnya nilai ketangguhan pada material B dibandingkan material A pada kondisi waktu tahan 5 dan 6 jam, dapat terjadi karena adanya Mo yang meningkatkan kemampukerasan sehingga martensit lebih banyak terbentuk dan juga adanya Mo_2C yang meningkatkan nilai kekerasan sehingga nilai ketangguhan meningkat.

Nilai ketangguhan yang optimal terdapat pada waktu tahan 4 jam. Sesuai dengan literatur^[23] dimana, semakin bertambahnya waktu tahan austenisasi, karbida yang terbentuk makin kasar yang disebabkan oleh penggabungan antar karbida. Morfologi *fine* dari karbida sekunder yang terdistribusi merata merupakan morfologi yang diinginkan, dimana akan menjadikan kombinasi kekerasan dan ketangguhan yang baik.



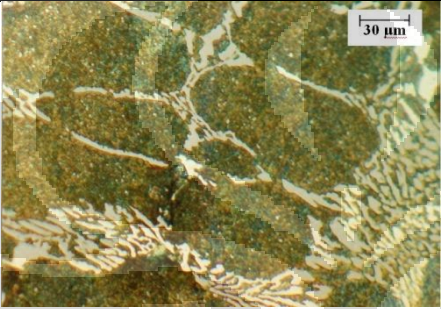
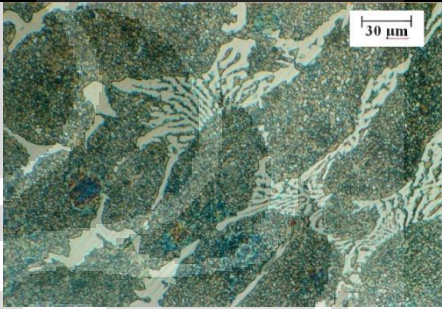
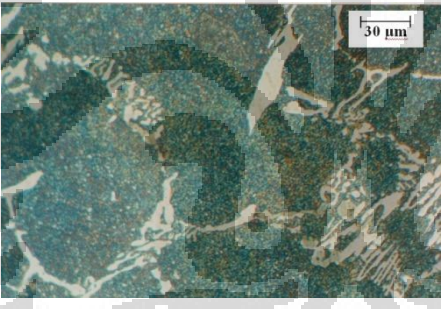
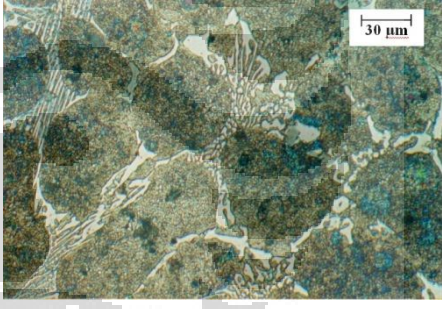

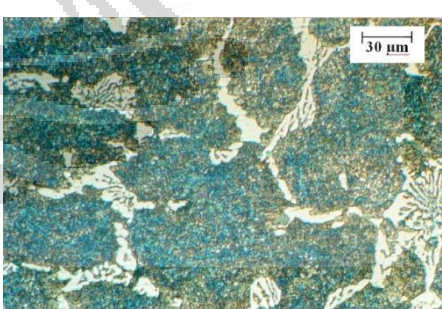
Gambar 4.14. Perbandingan nilai ketangguhan material A dan B pada kondisi *as-tempered*

Secara umum dapat dilihat adanya peningkatan nilai ketangguhan pada kondisi waktu tahan 6 jam dibandingkan dengan waktu tahan 5 jam. Nilai ketangguhan yang meningkat ini bisa terjadi akibat jumlah austenit sisa yang ada pada material dengan waktu tahan 6 jam lebih banyak, dan meningkatkan nilai ketangguhan.

4.2 Pengaruh Waktu Tahan Austenisasi terhadap Karbida Primer

Karbida primer dihitung menggunakan metalografi kuantitatif dari foto mikrostruktur dengan perbesaran 500 kali.

Tabel 4.1. Perbandingan foto mikro material A dan B yang memperlihatkan karbida primer pada material *as-tempered* dengan perbedaan waktu tahan

Waktu tahan	A	B
4 Jam		
5 Jam		
6 Jam		

Nilai perhitungan karbida primer pada material *as-tempered* ditampilkan pada tabel di bawah

Tabel 4.2. Volume fraksi karbida primer *as-tempered*

Waktu Tahan	Material	
	A	B
4 jam	22%	22%
5 jam	17%	16%
6 jam	16%	14%

Karbida primer hasil perhitungan metalografi kuantitatif yang ditunjukkan pada tabel diatas, menunjukkan nilai karbida primer paling tinggi pada posisi 4 jam, dan selanjutnya menurun seiring dengan meningkatnya waktu tahan.

Seharusnya nilai karbida eutektik ini tidak berubah, sesuai dengan literatur [1, 29] di mana proses perlakuan destablisasi tidak merubah morfologi dan fraksi volume karbida. Namun nilai karbida primer ini sebanding dengan nilai kekerasan material, dimana pada material dengan waktu tahan 4 jam memiliki nilai kekerasan yang paling tinggi dibandingkan dengan yang 5 jam dan 6 jam. Begitu juga dengan menurunnya fraksi volume karbida pada material maka nilai kekerasan pun menurun.

Menurut Pearce [30] untuk volume fraksi karbida eutektik pada kandungan karbon diatas 1.5wt%, volume fraksi karbida tersebut mempengaruhi nilai ketangguhan, sementara itu karakteristik matriks tidak begitu mempengaruhi ketangguhan seperti pengaruh fraksi karbida eutektik. Jika dilihat dari fraksi volume karbida paling besar berada pada waktu tahan 4 jam, maka nilai ketangguhan pada kondisi tersebut juga paling tinggi, yaitu 2.78 J/cm^2 untuk A dan 3.34 J/cm^2 untuk material B.

Jika material A dan B dengan kondisi waktu tahan 5 dan 6 jam dibandingkan, maka nilai ketangguhan material A lebih tinggi, hal ini karena persen karbida eutektik material A lebih tinggi. Pada kondisi waktu tahan 4 jam, material A dan B memiliki persen fraksi karbida yang sama, sehingga nilai ketangguhan dipengaruhi oleh austenit sisa pada matriks, ini artinya material B memiliki austenit yang sedikit lebih banyak pada kondisi waktu tahan austenisasi 4 jam.

4.3 Pengaruh Waktu Tahan Austenisasi terhadap Karbida Sekunder

Penghitungan karbida sekunder yang berada di dalam matriks di hitung menggunakan metode metalografi kuantitatif, pada foto mikro dengan perbesaran 20000 kali. Berikut hasil penghitungan persentase volume karbida

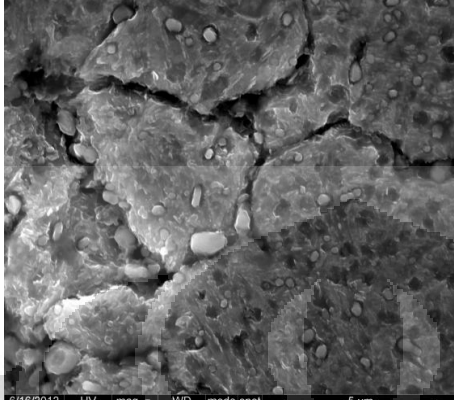
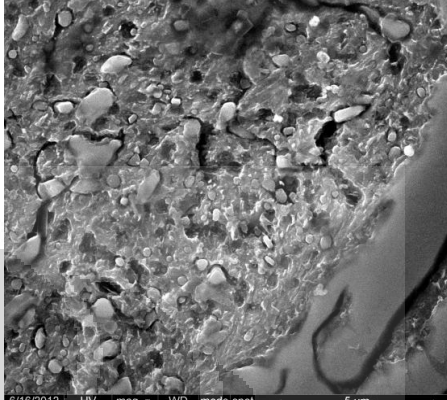
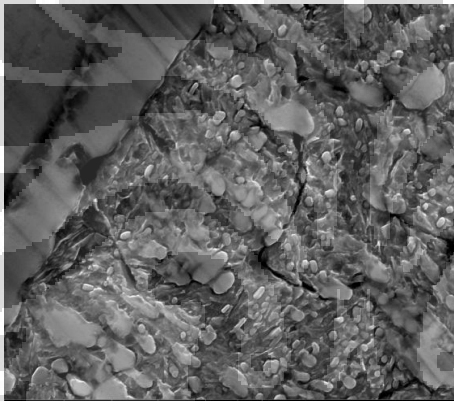
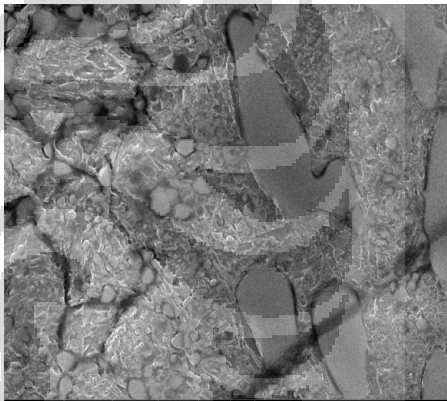
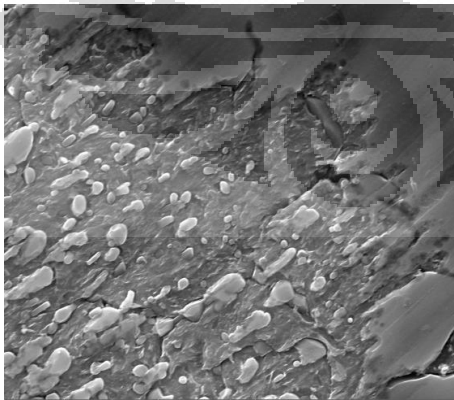
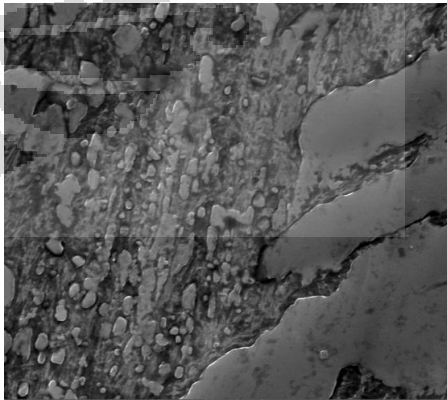
Tabel 4.3. Volume fraksi karbida sekunder kondisi *as-tempered*

Waktu Tahan	Material	
	A	B
4 Jam	4.10%	5.00%
5 Jam	4.40%	4.40%
6 Jam	8.40%	11.00%

Seperti yang ditunjukkan dalam tabel, volume fraksi terbesar baik pada material A maupun B terdapat pada kondisi waktu tahan 6 jam. Volume fraksi ini diakibatkan oleh karbida sekunder yang mulai kasar, sehingga karbida tersebut beraglomerasi satu sama lain.

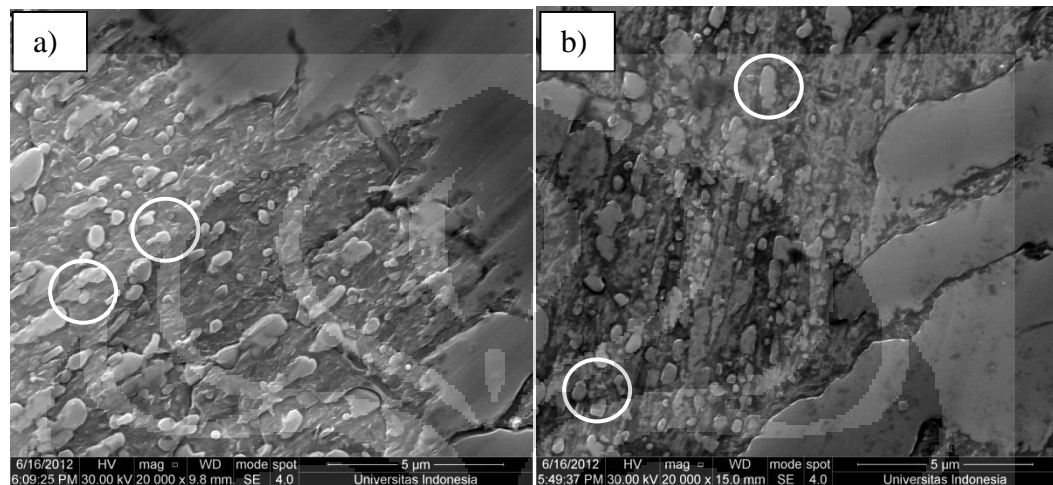
Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, fraksi volume serta morfologi dari karbida sekunder mempengaruhi nilai kekerasan dan ketangguhan. Untuk kondisi dengan waktu tahan 6 jam, meskipun fraksi volume lebih banyak namun morfologi karbida sekunder mengkasar, seperti ditunjukkan pada tabel dibawah.

Tabel 4.4. Perbandingan foto mikro material A dan B yang memperlihatkan karbida sekunder pada material *as-tempered* dengan perbedaan waktu tahan

Waktu tahan	A	B
4 Jam	 <p>6/16/2012 HV mag = WD mode spot 5 µm 6:36:40 PM 30.00 kV 20 000 x 12.4 mm SE 4.0 Universitas Indonesia</p>	 <p>6/16/2012 HV mag = WD mode spot 5 µm 5:00:48 PM 30.00 kV 20 000 x 7.1 mm SE 4.0 Universitas Indonesia</p>
5 Jam	 <p>6/16/2012 HV mag = WD mode spot 5 µm 6:58:09 PM 30.00 kV 20 000 x 10.0 mm SE 4.0 Universitas Indonesia</p>	 <p>6/16/2012 HV mag = WD mode spot 5 µm 5:21:10 PM 30.00 kV 20 000 x 7.2 mm SE 4.0 Universitas Indonesia</p>
6 Jam	 <p>6/16/2012 HV mag = WD mode spot 5 µm 6:09:25 PM 30.00 kV 20 000 x 9.8 mm SE 4.0 Universitas Indonesia</p>	 <p>6/16/2012 HV mag = WD mode spot 5 µm 5:49:37 PM 30.00 kV 20 000 x 15.0 mm SE 4.0 Universitas Indonesia</p>

Karbida sekunder yang terdapat pada material A dan B dengan waktu tahan 6 jam jika dibandingkan dengan kondisi waktu tahan 4 jam, karbida

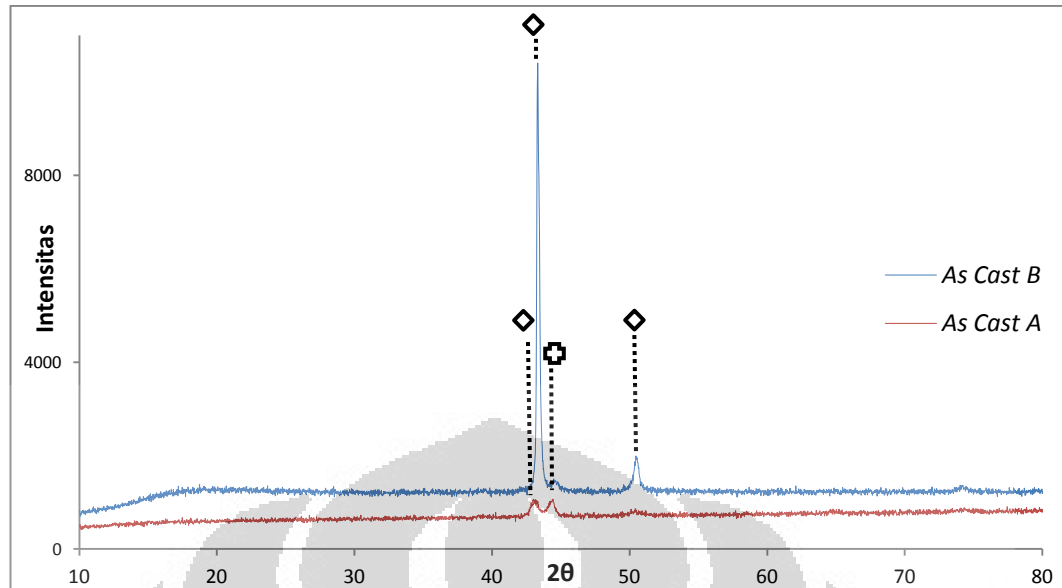
sekundernya kelihatan lebih besar. Hal inilah yang mengakibatkan material dengan waktu tahan 6 jam meskipun memiliki persen karbida sekunder yang lebih banyak, tetapi nilai kekerasannya lebih rendah dibandingkan dengan material dengan waktu tahan 4 jam.



Gambar 4.15. Pengkasaran karbida sekunder pada material dengan waktu tahan austenisasi 6 jam
a) material A b) material B

4.4 Pengaruh Waktu Tahan Austenisasi terhadap Austenit Sisa

Austenit sisa pada material *as-tempered* dan *as-cast* dideteksi menggunakan XRD. Perbedaan pola XRD pada material A dan B ditunjukkan pada gambar dibawah.

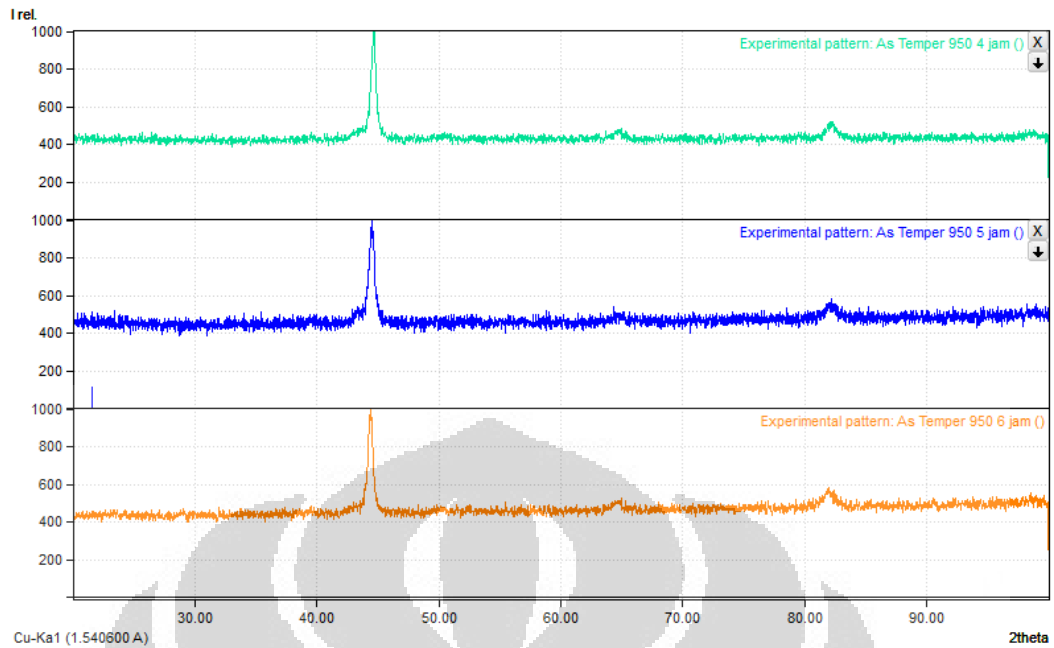


Gambar 4.16. Pola XRD material *as-cast* ◊ : Austenit ◻ : Ferrit

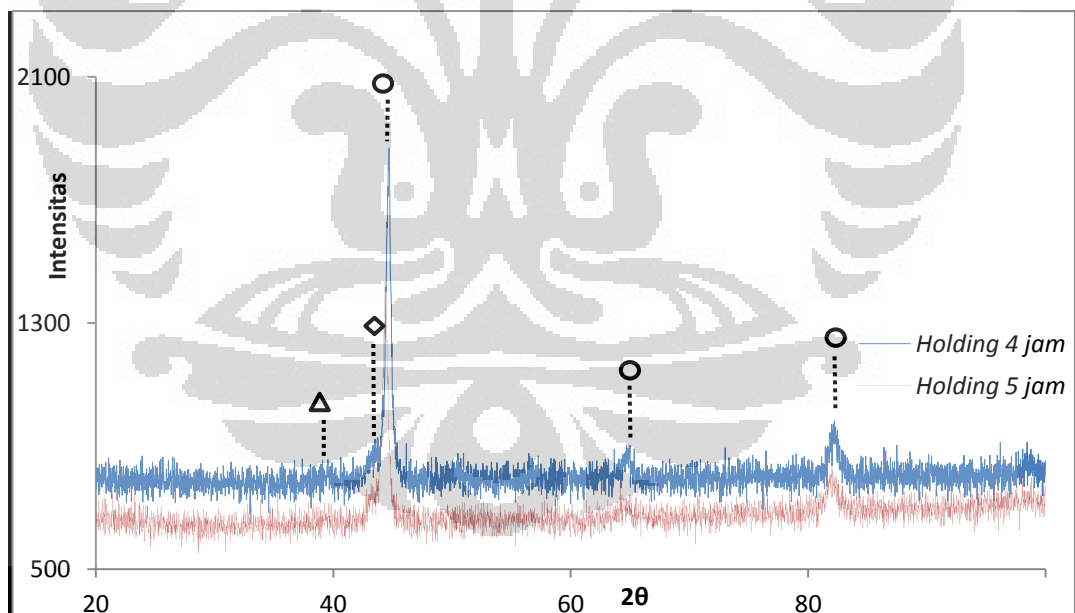
Pola XRD pada material *as-cast* ditampilkan pada gambar diatas. Pada material A fasa yang terbentuk berupa austenit dan *pearlite* (ferrit + karbida), sementara material B fasa yang terbentuk berupa austenitik. Hal ini disebabkan adanya unsur Mo sebagai penahan pembentukan perlite pada material *as-cast*.

Analisa XRD mendukung nilai kekerasan dan ketangguhan yang ditunjukkan sebelumnya, dimana fasa austenitik yang terbentuk pada material B menurunkan nilai kekerasan dan meningkatkan nilai ketangguhan. Pada material A adanya fasa *pearlite*, menyebabkan nilai kekerasannya lebih besar dibandingkan dengan material B.

Jika dibandingkan ketiga proses perlakuan panas (4, 5 dan 6 jam) dalam hasil analisa XRD, maka tidak terdapat perbedaan yang signifikan dimana *peak* tertinggi berupa martensit.



Gambar 4.17. Difraktogram XRD material A dengan perbedaan waktu tahan austenisasi

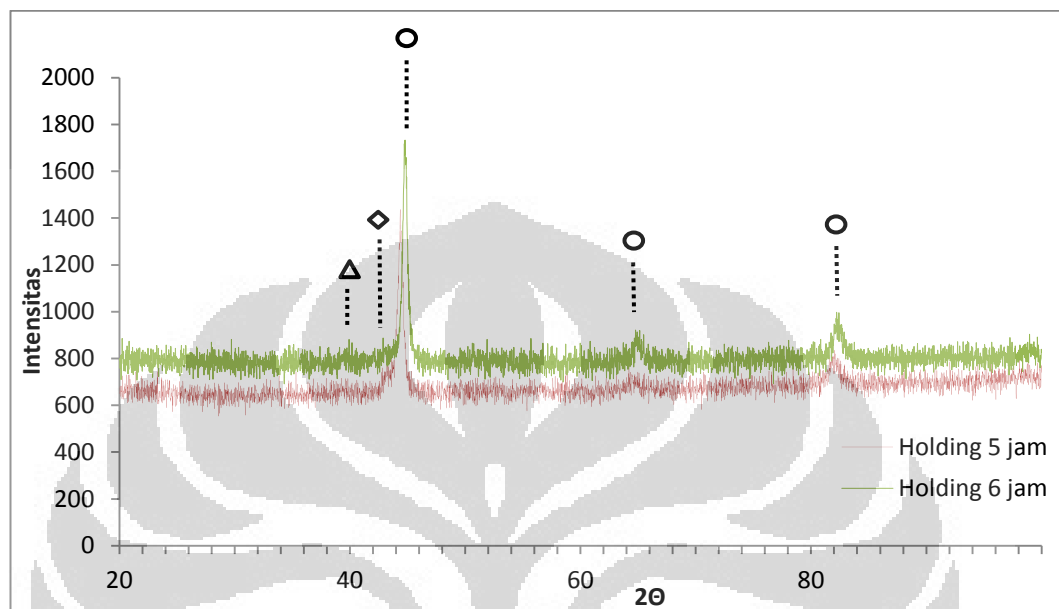


Gambar 4.18. Perbandingan pola XRD material A dengan waktu tahan austenisasi 4 dan 5 jam;

◇ : Austenit ; ○ : Martensit ; △ : M_7C_3

Jika dibandingkan pola XRD antara material A waktu tahan 4 jam dan 6 jam, dapat dilihat bahwa intensitas *peak* martensit lebih tinggi pada material

dengan waktu tahan 4 jam. Hal ini menyebabkan nilai kekerasan dari material dengan waktu tahan 4 jam lebih besar dibandingkan dengan yang 6 jam.



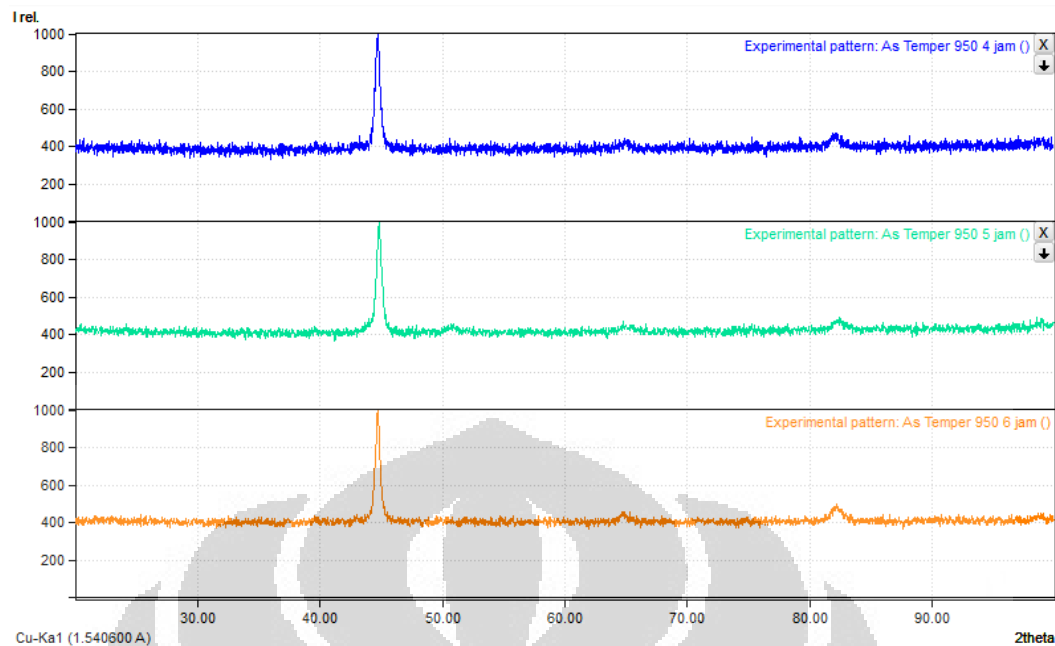
Gambar 4.19. Perbandingan pola XRD material A dengan waktu tahan austenitansi 5 dan 6 jam;

◇ : Austenit ; ○: Martensit ; △ : M_7C_3

Sementara itu *peak* martensit pada material dengan waktu tahan 6 jam intensitas nya lebih tinggi dibandingkan dengan material dengan waktu tahan 5 jam. Hal ini lah yang menyebabkan material A ini lebih keras pada kondisi *as-tempered* dibandingkan material A dengan waktu tahan 5 jam.

Peak austenit muncul sedikit pada ketiga material, dimana austenit sisa masih ada, artinya perlakuan *subzero* yang diberikan tidak dapat mengubah secara keseluruhan austenit menjadi martensit. Puncak intensitas austenit pada material dengan waktu tahan 6 jam lebih tinggi dibandingkan dengan yang lain. Austenit sisa yang ada pada material dengan waktu tahan 6 jam inilah yang membuat nilai ketangguhan material di waktu tahan 6 jam sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan yang 4 jam maupun 5 jam.

Pola XRD pada material B tidak jauh berbeda dibandingkan material A. Seperti dtunjukkan pada gambar di bawah.

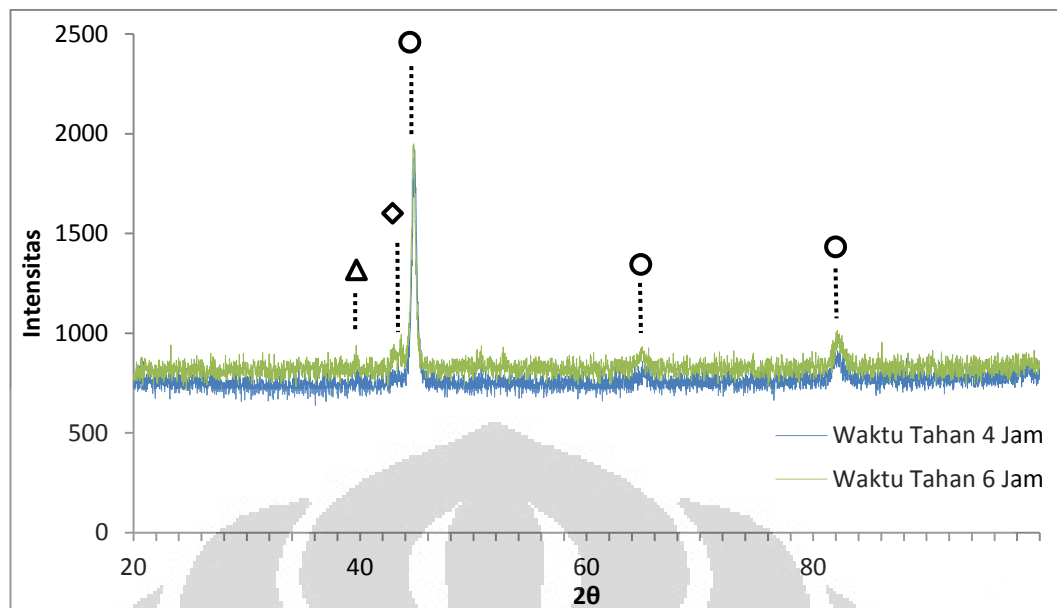


Gambar 4.20. Difraktogram XRD material B dengan perbedaan waktu tahan austenisasi

Perbandingan puncak martensit dan austenit pada material B hampir sama dengan material A. Puncak austenit pada material B dengan waktu tahan 6 jam lebih tinggi dibandingkan dengan material dengan waktu tahan 4 dan 5 jam. Hal inilah yang menyebabkan material B dengan waktu tahan 6 jam lebih besar.

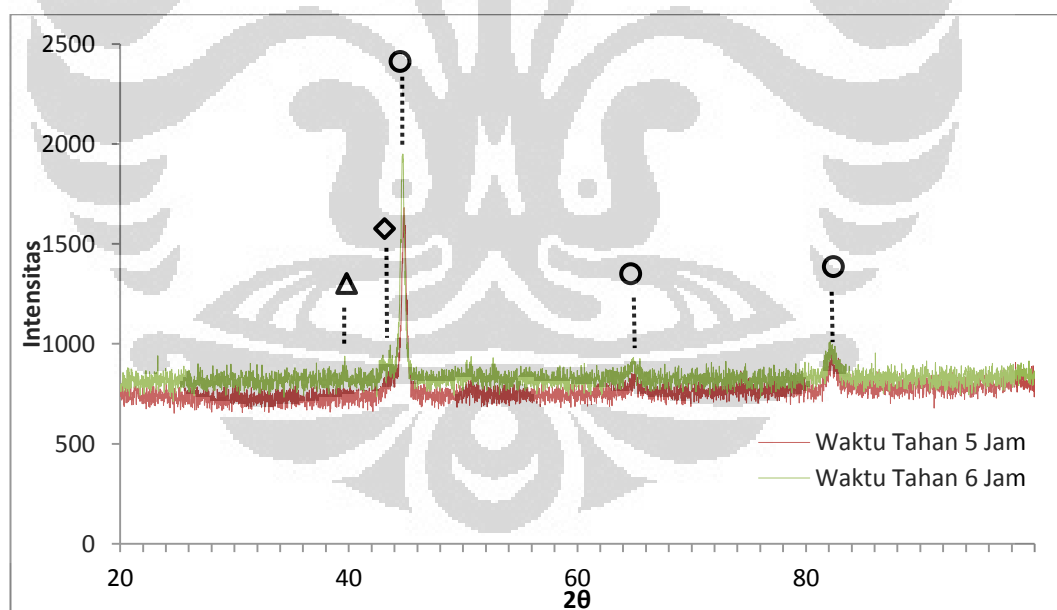
Austenit yang sedikit lebih tinggi yang terdapat pada material B dengan waktu tahan 6 jam, tidak dapat meningkatkan nilai ketangguhan. Nilai ketangguhan material B dengan waktu tahan 6 jam hanya 2.17 J/cm^2 , lebih kecil daripada material B dengan waktu tahan 4 jam 3.34 J/cm^2 . Pengkasaran karbida yang dialami oleh material dengan waktu tahan 6 jam menyebabkan menurunnya sifat mekanis, baik kekerasan maupun ketangguhan.

Jumlah austenit sisa dalam material B dengan temperatur austenisasi 950°C tidak mempengaruhi nilai ketangguhan secara signifikan, namun nilai ketangguhan sangat dipengaruhi dari morfologi karbida sekunder. Hal ini dikarenakan perbedaan jumlah austenit sisa antar ketiganya sangat sedikit sehingga tidak dapat mempengaruhi nilai ketangguhan yang jauh berbeda antar ketiga material dengan waktu tahan berbeda.



Gambar 4. 21 Perbandingan pola XRD material B dengan waktu tahan austenisasi 4 dan 6 jam;

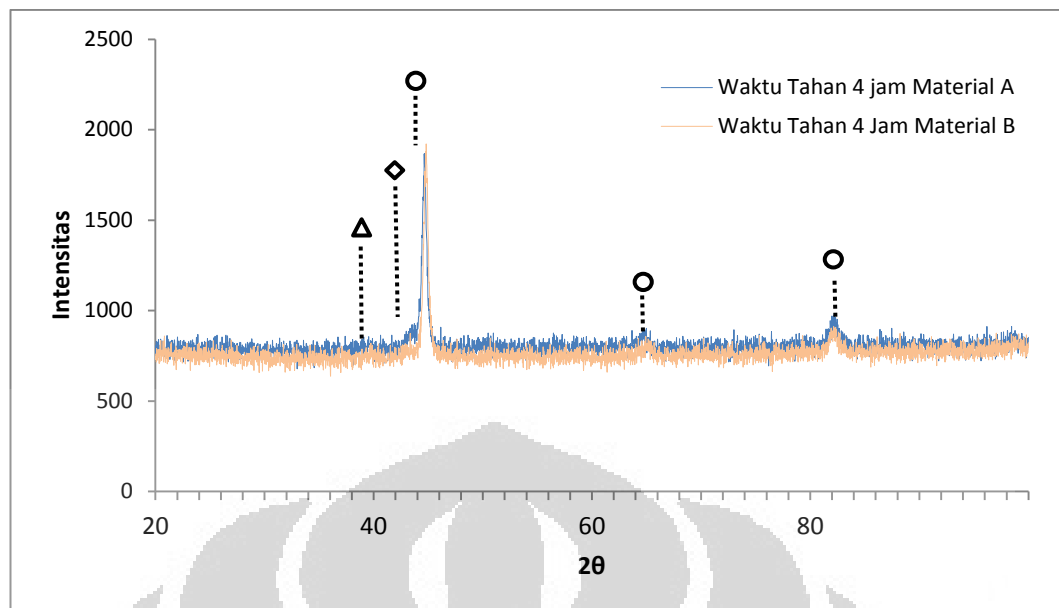
◇ : Austenit ; ○: Martensit ; △ : M_7C_3



Gambar 4. 22 Perbandingan pola XRD material B dengan waktu tahan austenisasi 5 dan 6 jam;

◇ : Austenit ; ○: Martensit ; △ : M_7C_3

Perbandingan pola XRD pada material A dan B ditampilkan pada gambar dibawah, dengan pola acuan waktu tahan selama 4 jam.



Gambar 4. 23 Perbandingan Pola XRD Material A dan B dengan waktu tahan austenitasi 4 jam;

◇ : Austenit ; ○: Martensit ; △ : M_7C_3

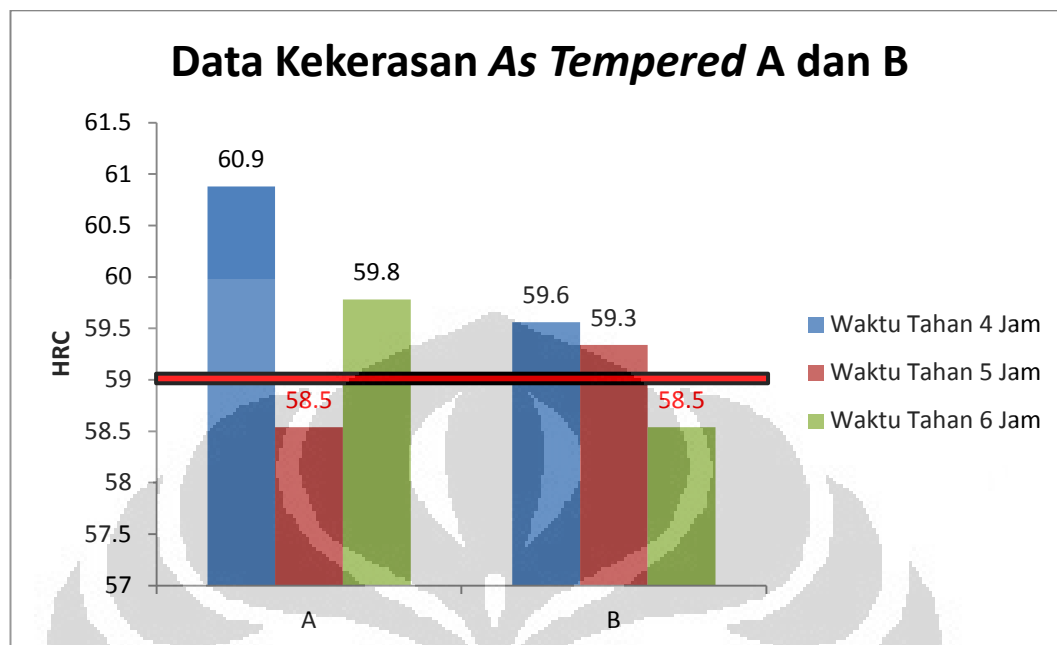
Material A memiliki intensitas martensit yang lebih tinggi dibanding dengan material B. Intensitas martensit yang lebih tinggi pada material A membuat nilai kekerasan pada material ini lebih tinggi dibandingkan dengan material B. Material A memiliki nilai kekerasan 60.9 HRC sementara nilai kekerasan dari material B 59.6 HRC.

Nilai kekerasan yang lebih rendah pada material B, membuat material ini lebih lunak dibandingkan dengan material A. Ketangguhan dari material B pun lebih tinggi dibandingkan dengan material A, dimana material B memiliki nilai ketangguhan 3.34 J/cm^2 dan material A memiliki nilai ketangguhan 2.78 J/cm^2 .

4.5 Kesesuaian Material Uji terhadap Aplikasi *Grinding Ball*

Dari hasil kekerasan *as-tempered*, material A memiliki nilai kekerasan paling tinggi di kondisi waktu tahan 4 jam pada temperatur 950°C , dengan nilai 60.9 HRC. Material B juga memiliki nilai kekerasan paling tinggi di kondisi waktu tahan 4 jam pada temperatur 950°C , dengan nilai 59.6 HRC.

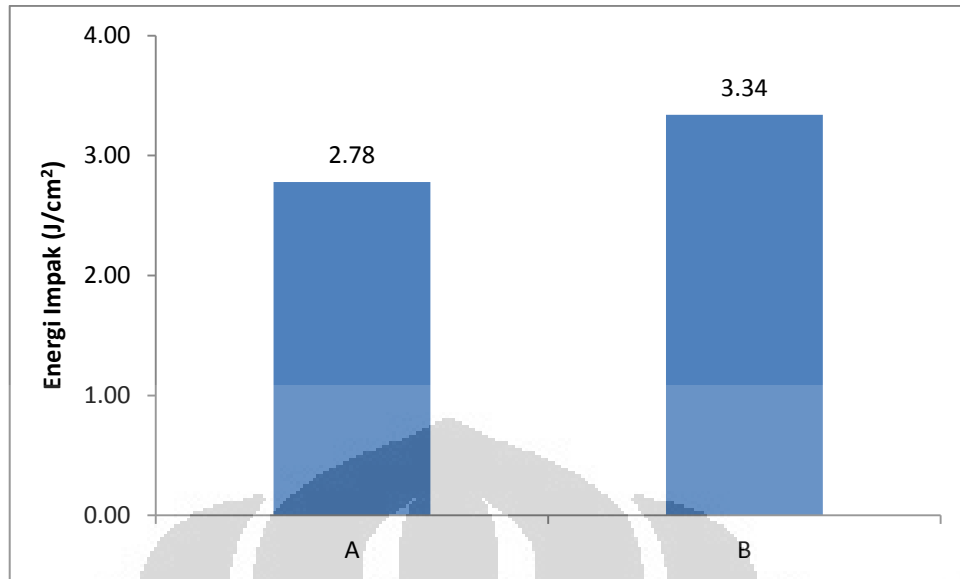
Jika dibandingkan dengan standar ASTM A532 maupun SII 0789-93, nilai kekerasan *grinding ball* minimum setelah hasil temper yaitu minimal 59 HRC, maka nilai kekerasan pada material uji baik A maupun B untuk waktu tahan 4 jam sudah bisa tercapai.



Gambar 4. 24 Data kekerasan *grinding ball* material A dan B *as-tempered* dengan batas minimum kekerasan

Untuk Material A dengan waktu tahan 6 jam dan Material B dengan waktu tahan 5 jam, nilai kekerasan yang dicapai juga sudah melewati batas minimal nilai kekerasan yang diinginkan sesuai ASTM A532 kelas II tipe A maupun SII 0789-93. Jika dilihat dari sisi ekonomis, dengan waktu tahan 4 jam sudahlah cukup untuk mencapai nilai kekerasan minimal yang diinginkan.

Meskipun kekerasan yang didapat lebih rendah daripada material A, material B pada kondisi waktu tahan selama 4 jam memiliki nilai ketangguhan yang lebih tinggi daripada material A. Nilai ketangguhan ini pada aplikasinya akan mempengaruhi umur pakai *grinding ball* itu sendiri, sehingga material B walaupun kekerasan lebih rendah dibanding material A, namun nilai kekerasannya sudah mencapai standar minimum, ketangguhan lebih tinggi yang dimilikinya akan meningkatkan umur pakai *grinding ball*, artinya jika dilihat dari segi ketangguhan maka material B lebih bagus dibandingkan material A pada kondisi temperatur austenisasi 950°C dengan waktu tahan selama 4 jam.



Gambar 4. 25 Perbandingan nilai ketangguhan material A dan B pada kondisi *as-tempered* dengan waktu tahan austenisasi 4 jam

BAB 5 KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

1. Proses *quench* menggunakan nitrogen cair pada temperatur 950°C dengan waktu tahan 4, 5 dan 6 jam , pada kedua material A(2wt.%C-13wt.%Cr-0.06wt.%Mo) dan B (2wt.%C-13wt.%Cr-1.34wt.%Mo) menghasilkan struktur martensit dengan sangat sedikit jumlah austenit sisa.
2. Unsur paduan Mo pada sampel B(2wt.%C-13wt.%Cr-1.34wt.%Mo) pada temperatur austenisasi 950°C dengan waktu tahan 4, 5 dan 6 jam, yang seharusnya meningkatkan nilai kekerasan akibat terbentuknya Mo₂C pada mikrostruktur, ternyata efek pengerasan yang diakibatkan tidak terjadi pada material B. Hal ini disebabkan oleh Mo₂C tidak mempengaruhi fraksi volume karbida primer, dikarenakan komposisinya yang sedikit.
3. Perlakuan panas austenisasi atau destabilisasi dilakukan agar fasa martensitik terbentuk. Waktu tahan yang dilakukan dalam pengujian ini dengan temperatur austenisasi 950°C pada kedua material optimal pada 4 jam, hal ini dikarenakan ketika waktu tahan makin lama karbida sekunder makin kasar, dan akan menurunkan nilai ketangguhan dan juga kekerasan.

5.2 Saran

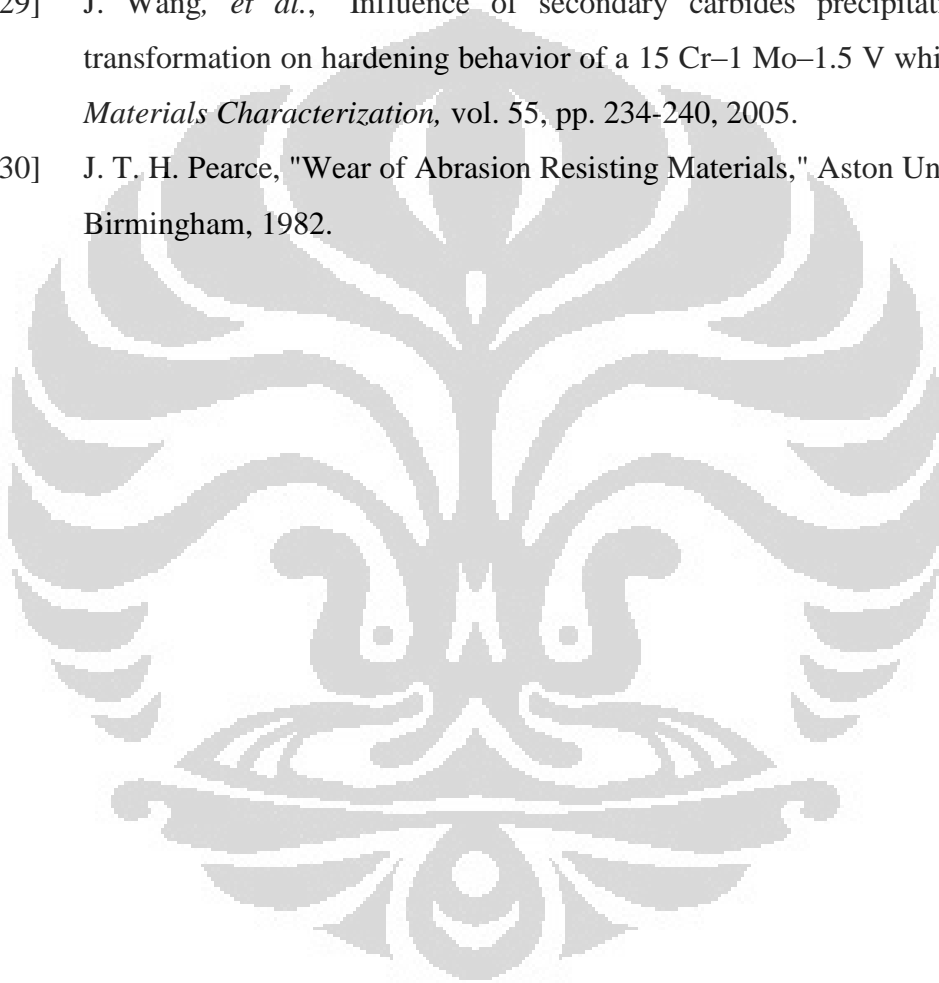
1. Percobaan dengan waktu tahan 3 jam dapat dilakukan untuk pekerjaan yang akan datang, dimana berkurangnya waktu tahan, akan mengurangi energi penggunaan *furnace*.
2. Pengujian aus dan juga pengujian korosi dapat dilanjutkan agar memperoleh masukan yang lebih bagus ke performa *grinding ball*.

DAFTAR ACUAN

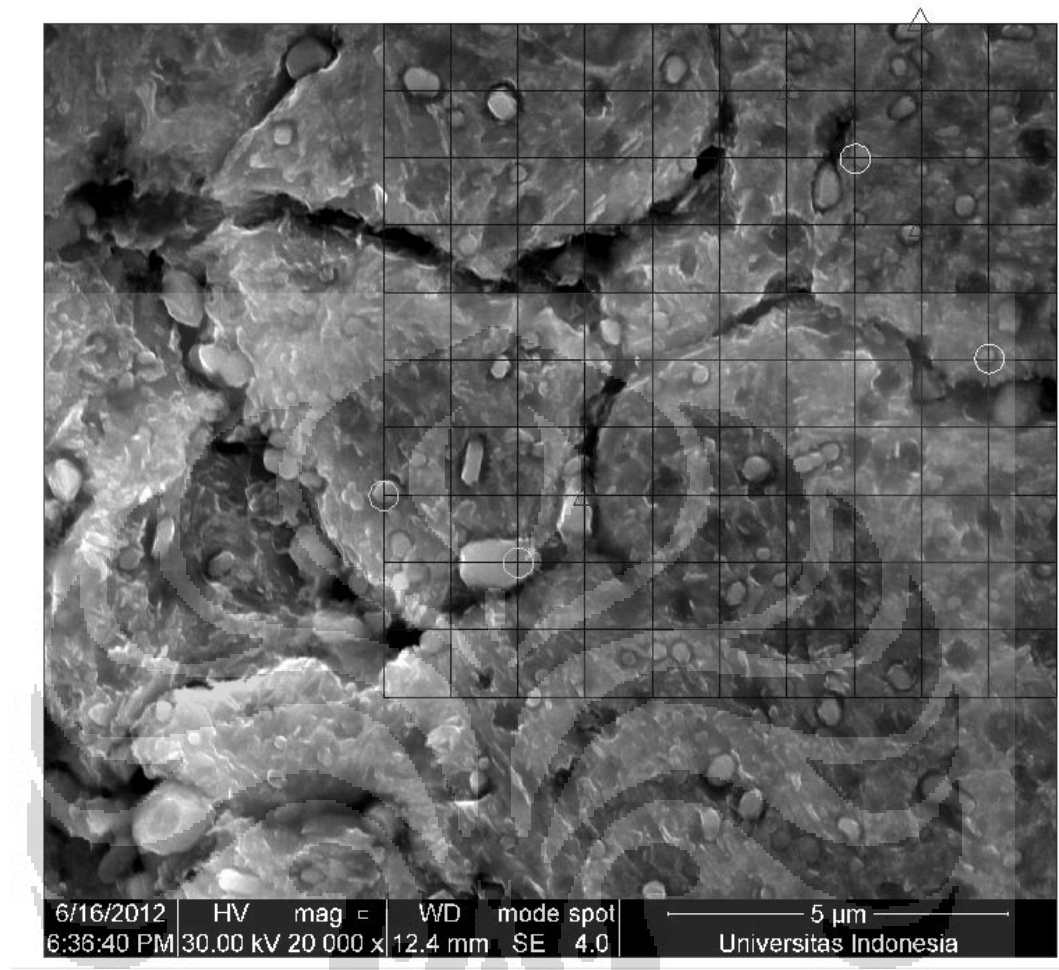
- [1] C. P. Tabrett, *et al.*, "Microstructure-property relationships in high chromium white iron alloys," *International Materials Reviews*, vol. 41, pp. 59-82, 1996.
- [2] G. Powell and G. Laird, "Structure, nucleation, growth and morphology of secondary carbides in high chromium and Cr-Ni white cast irons," *Journal of Materials Science*, vol. 27, pp. 29-35, 1992.
- [3] A. Wiengmoon, *et al.*, "Microstructural and crystallographical study of carbides in 30wt.%Cr cast irons," *Acta Materialia*, vol. 53, pp. 4143-4154, 2005.
- [4] R. J. Llewellyn, *et al.*, *Wear*, vol. 256, pp. 592-599, 2004.
- [5] D. Li, *et al.*, "Phase diagram calculation of high chromium cast irons and influence of its chemical composition," *Materials & Design*, vol. 30, pp. 340-345, 2009.
- [6] A. Bedolla Jacuinde, *et al.*, "SEM study on the M7C3 carbide nucleation during eutectic solidification of high chromium white irons," *Z. Metallkd*, vol. 96, pp. 1380-1384, 2005.
- [7] J. T. H. Pearce, "Structure and wear performance of abrasion resistant chromium white cast irons," *Trans. AFS*, vol. 92, pp. 599-622, 1984.
- [8] F. Maratray and A. Poulalion, "Austenite Retention in High-Chromium White Irons," Chicago, IL, USA, 1982, pp. 795-804.
- [9] *ASM Handbook* vol. 09. Materials Park, Ohio: ASM International, 2004.
- [10] J. T. H. Pearce, "High Chromium irons to resist wear," in *Sixth Asian Foundry Congress*, Calcutta India, 1999, pp. 120-134.
- [11] K. A. Kibble and J. T. H. Pearce, "Influence of heat treatment on the microstructure and hardness of 19% high-chromium cast irons," *Cast Metals*, vol. 6, pp. 9-15, 1993.
- [12] G. Laird, "Microstructures of Ni-Hard I, Ni-Hard IV and High-Cr White Cast Irons," *Trans. AFS*, vol. 99, pp. 339-57, 1991.
- [13] J. S. P. Duppin, and J.M. Schissler, "A Structure Study of Chromium White Cast Iron," *Trans. AFS*, vol. 90, pp. 711-18, 1982.

- [14] F. Maratray and A. Poulalion, *Trans. AFS*, p. 795, 1982.
- [15] S. Turenne, *et al.*, "Matrix microstructure effect on the abrasion wear resistance of high-chromium white cast iron," *Journal of Materials Science*, vol. 24, pp. 3021-3028, 1989.
- [16] I. R. Sare and B. K. Arnold, *Metall. Mater. Trans.*, vol. 26A, p. 1785, 1995.
- [17] D. H. Herring. (2005) A Discussion of Retained Austenite. *Industrial Heating*. 15-16.
- [18] H.-h. Liu, *et al.*, "Effect of Cryogenic Treatment on Property of 14Cr2Mn2V High Chromium Cast Iron Subjected to Subcritical Treatment," *Journal of Iron and Steel Research, International*, vol. 13, pp. 43-48, 2006.
- [19] Z. Jiyang, "Colour Metallography of Cast Iron," ed: China Foundry, 2011.
- [20] P. Amorim, *et al.*, "Soft Annealing of High Chromium White Cast Iron," *Materials Science Forum*, vol. 455-456, 2004.
- [21] K.-H. Zum Gahr and G. T. Eldis, "Abrasive wear of white cast irons," *Wear*, vol. 64, pp. 175-194, 1980.
- [22] E. Albertin and S. L. d. Moraes, "Maximizing wear resistance of balls for grinding of coal," *Wear*, vol. 263, pp. 43-47, 2007.
- [23] A. Bedolla-Jacuinde, *et al.*, "Kinetics of secondary carbides precipitation in a high-chromium white iron," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 12, pp. 371-382, 2003.
- [24] M. Kuwono, *et al.*, "Studies on Precipitation Process of Secondary Carbides in High-Chromium Cast Irons," *Trans. AFS*, vol. 98, pp. 725-734, 1990.
- [25] G. Powell and G. Laird, "Solidification and Solid-State Transformation Mechanism in Si Alloyed High-Chromium White Cast Irons," *Metall. Trans. A*, vol. 24(2), pp. 981-988, 1993.
- [26] I. Sare and B. Arnold, "The influence of heat treatment on the high-stress abrasion resistance and fracture toughness of alloy white cast irons," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 26, pp. 1785-1793, 1995.

- [27] G. Laird, *et al.*, *Abrasion-Resistant Cast Iron Handbook*. USA: American Foundry Society, 2000.
- [28] K. Boonmak, *et al.*, "Effect of Holding Time on Variation of Hardness during Subcritical Heat Treatment of High Chromium Cast Irons Containing Mo," presented at the International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB), Maharakham University, Thailand, 2009.
- [29] J. Wang, *et al.*, "Influence of secondary carbides precipitation and transformation on hardening behavior of a 15 Cr–1 Mo–1.5 V white iron," *Materials Characterization*, vol. 55, pp. 234-240, 2005.
- [30] J. T. H. Pearce, "Wear of Abrasion Resisting Materials," Aston University, Birmingham, 1982.



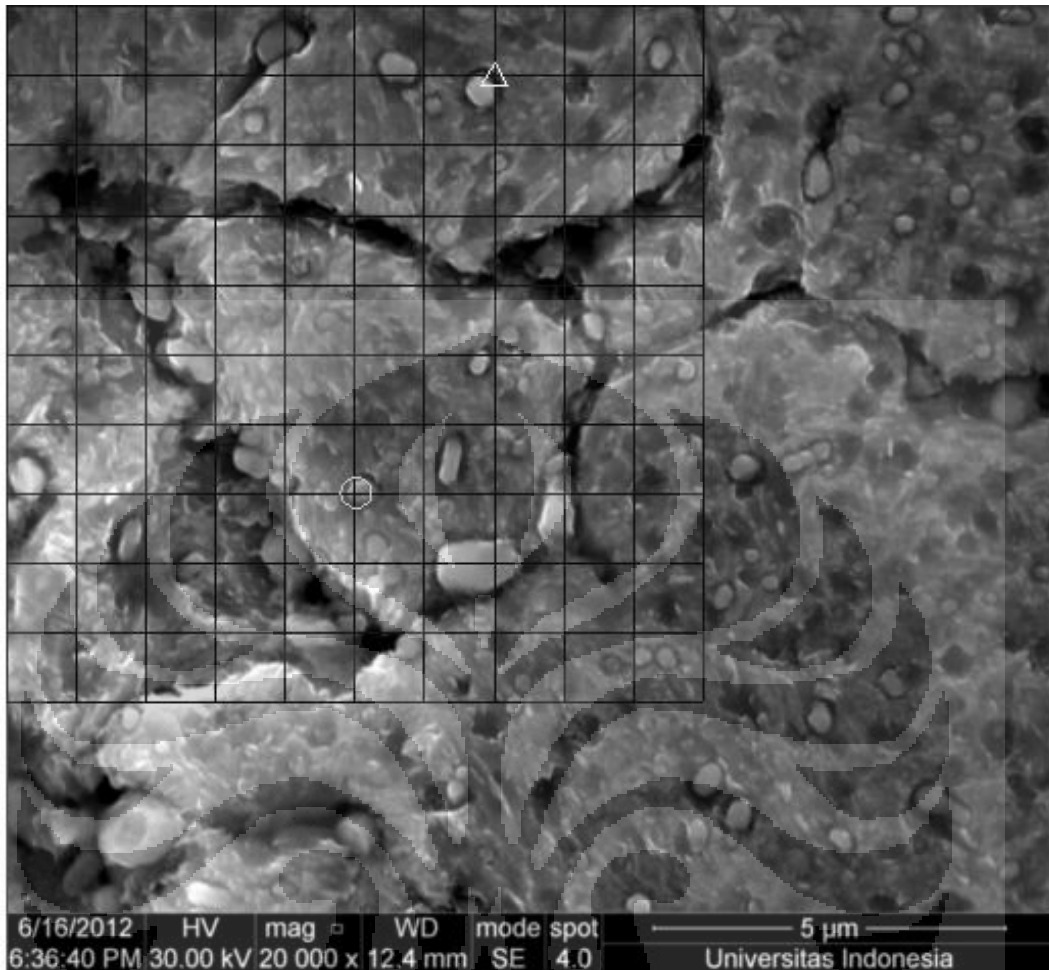
Perhitungan karbida sekunder material A *as-tempered* kondisi waktu tahan destablisasi 4 jam temperatur 950°C. Lokasi 1



	Jumlah Titik	Perhitungan
○	4	4
△	5	2.5
		6.5%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

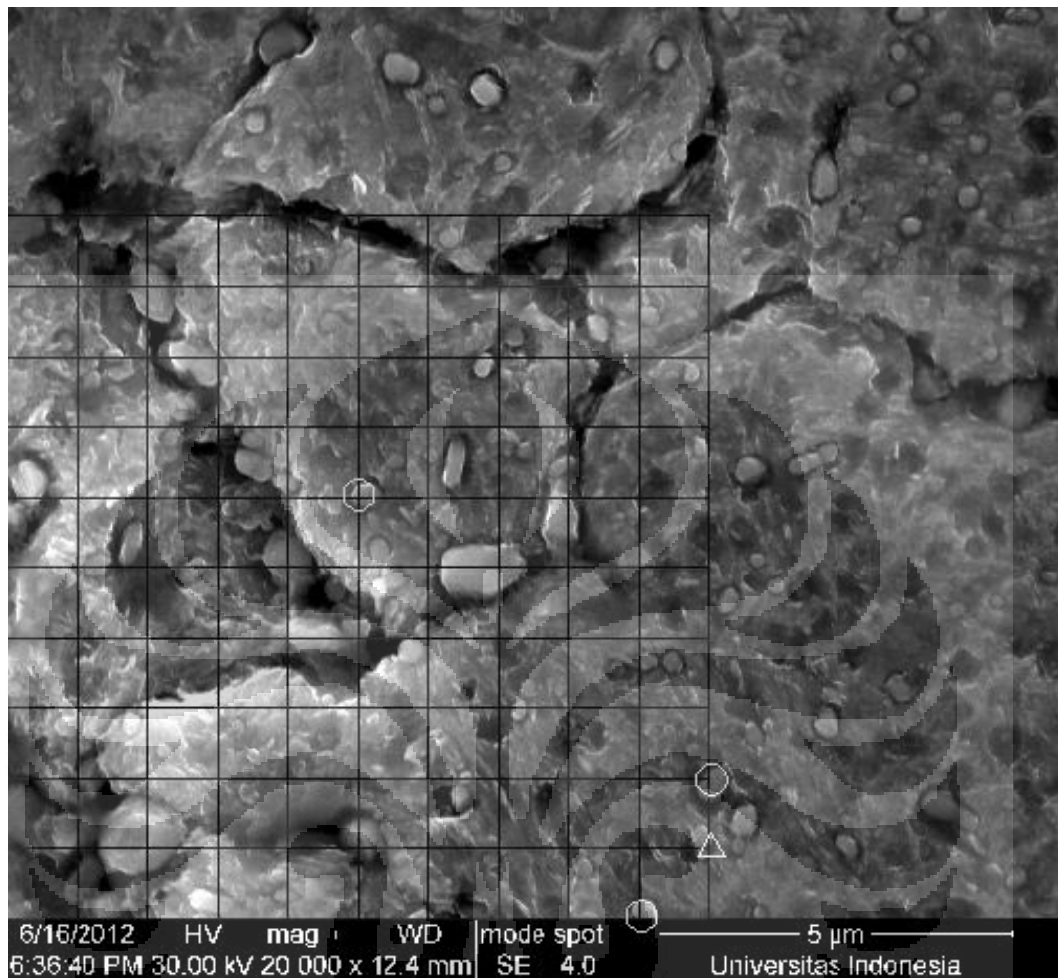
Perhitungan karbida sekunder material A *as-tempered* kondisi waktu tahan destabilisasi 4 jam temperatur 950°C. Lokasi 2



	Jumlah Titik	Perhitungan
○	1	1
△	1	0.5
		1.5%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

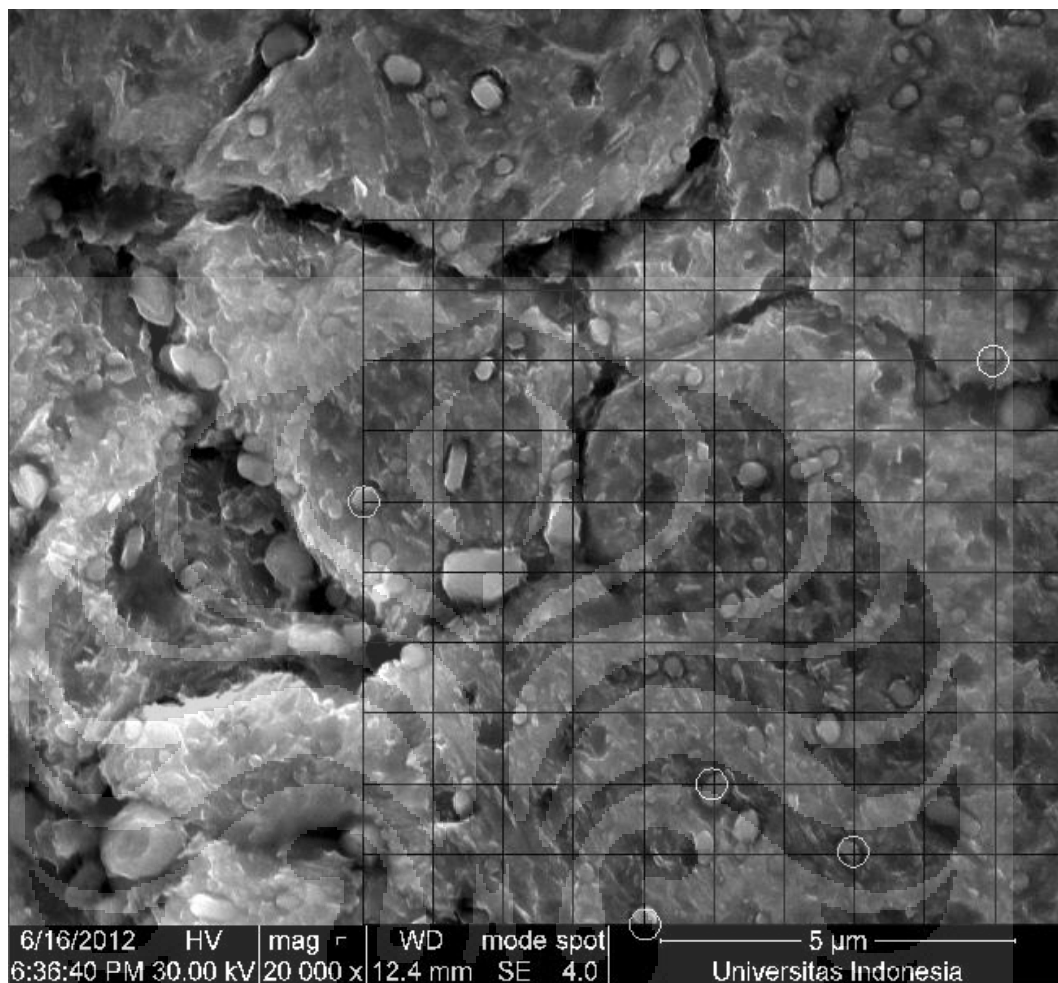
Perhitungan karbida sekunder material A *as-tempered* kondisi waktu tahan destabilisasi 4 jam temperatur 950°C. Lokasi 3



	Jumlah Titik	Perhitungan
○	3	3
△	1	0.5
		3.5%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

Perhitungan karbida sekunder material A *as-tempered* kondisi waktu tahan destablisasi 4 jam temperatur 950°C. Lokasi 4

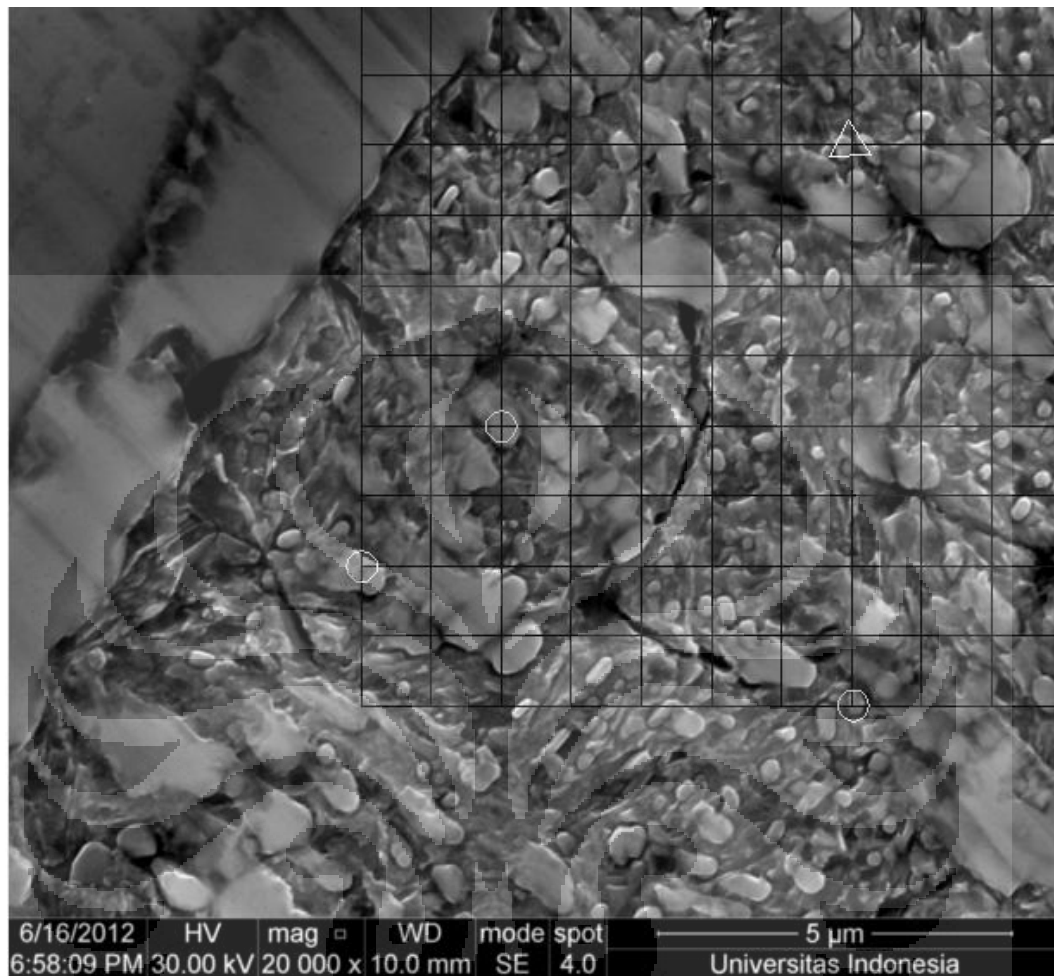


	Jumlah Titik	Perhitungan
○	5	5
△	0	0
		5%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

Total perhitungan	
Lokasi 1	6.5%
Lokasi 2	1.5%
Lokasi 3	3.5%
Lokasi 4	5%
Nilai rata-rata	4.1%

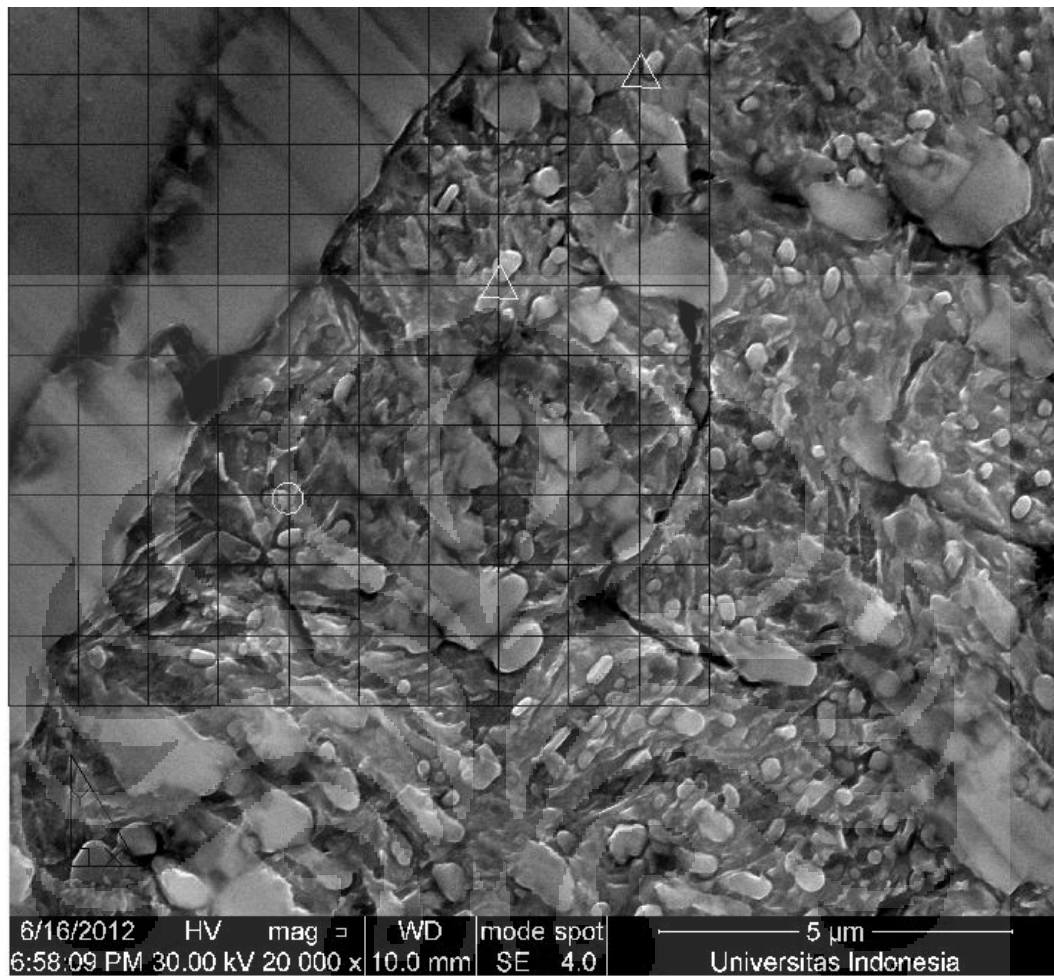
Perhitungan karbida sekunder material A *as-tempered* kondisi waktu tahan destablisasi 5 jam temperatur 950°C. Lokasi 1



	Jumlah Titik	Perhitungan
○	3	3
△	1	0.5
		3.5%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

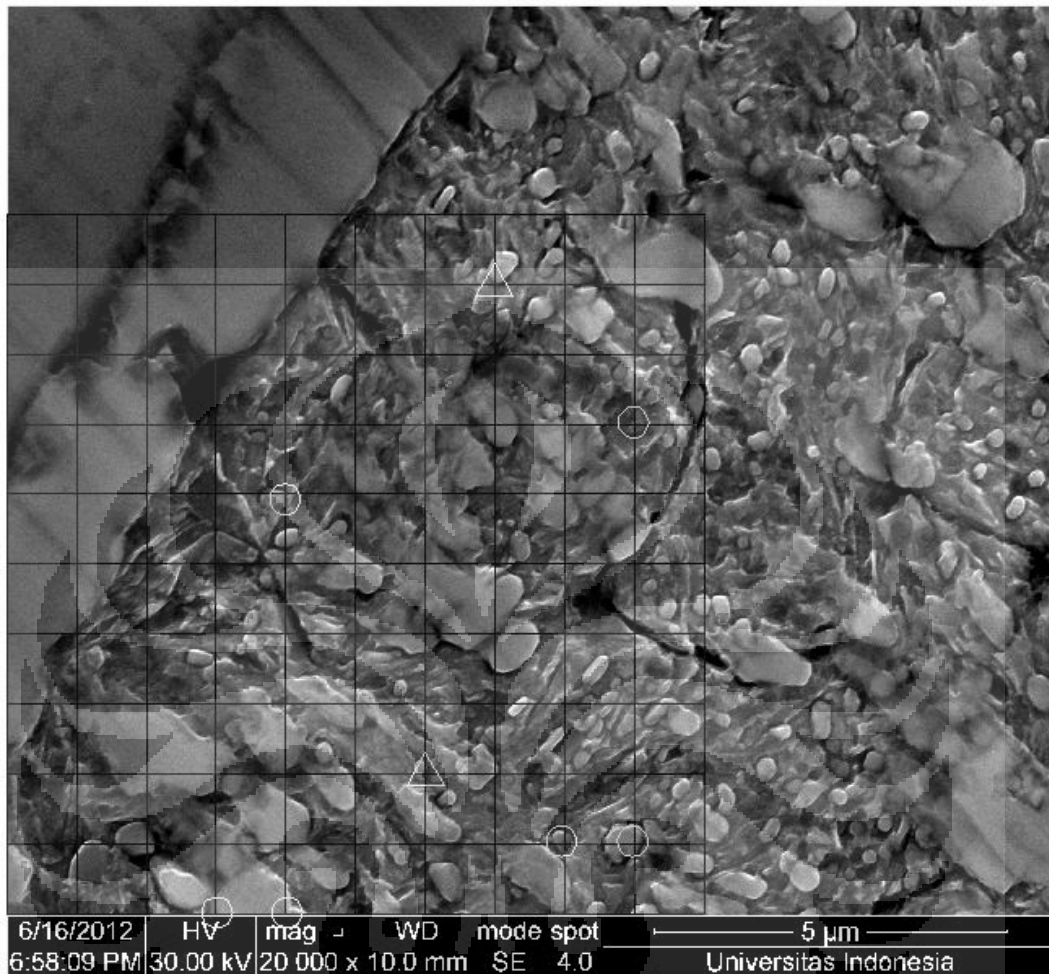
Perhitungan karbida sekunder material A *as-tempered* kondisi waktu tahan destablilisasi 5 jam temperatur 950°C. Lokasi 2



	Jumlah Titik	Perhitungan
○	1	1
△	2	1
		2%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

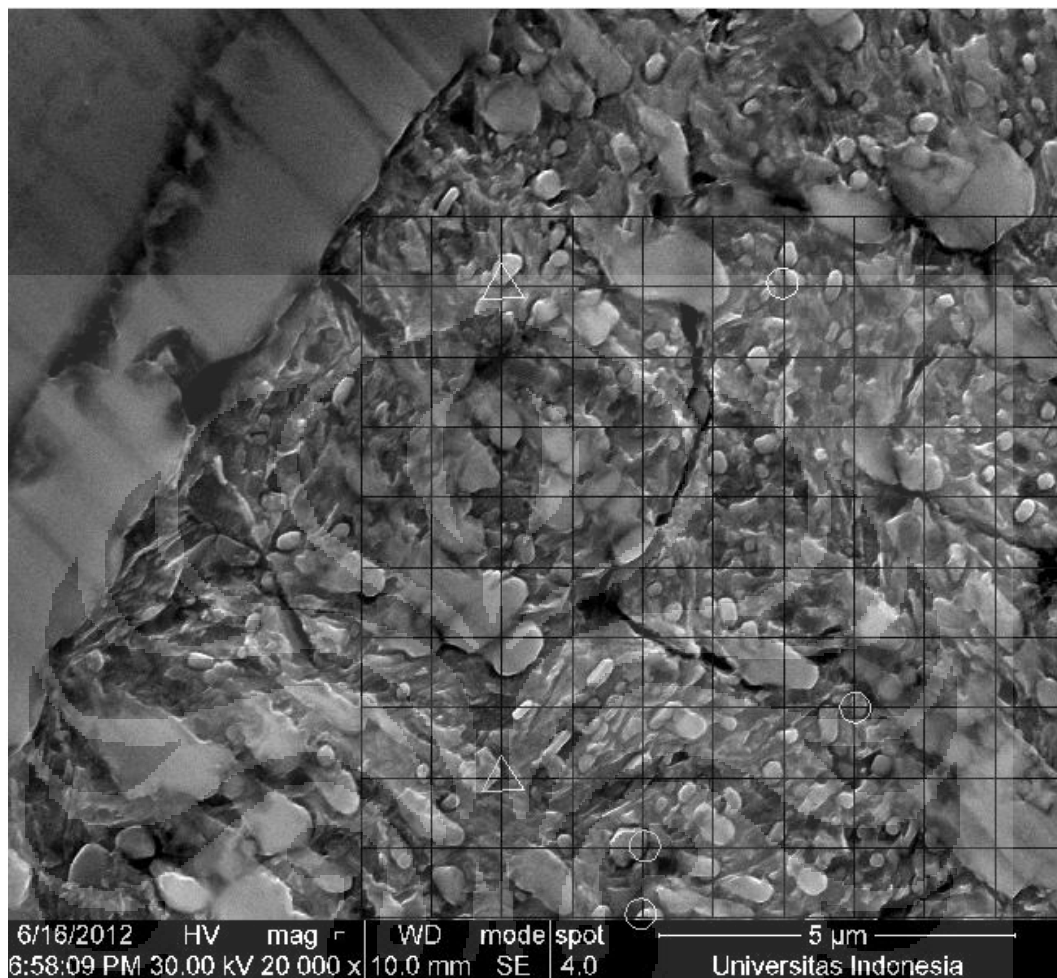
Perhitungan karbida sekunder material A *as-tempered* kondisi waktu tahan destablilisasi 5 jam temperatur 950°C . Lokasi 3



	Jumlah Titik	Perhitungan
○	6	6
△	2	1
		7%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

Perhitungan karbida sekunder material A *as-tempered* kondisi waktu tahan destablisasi 5 jam temperatur 950°C . Lokasi 4

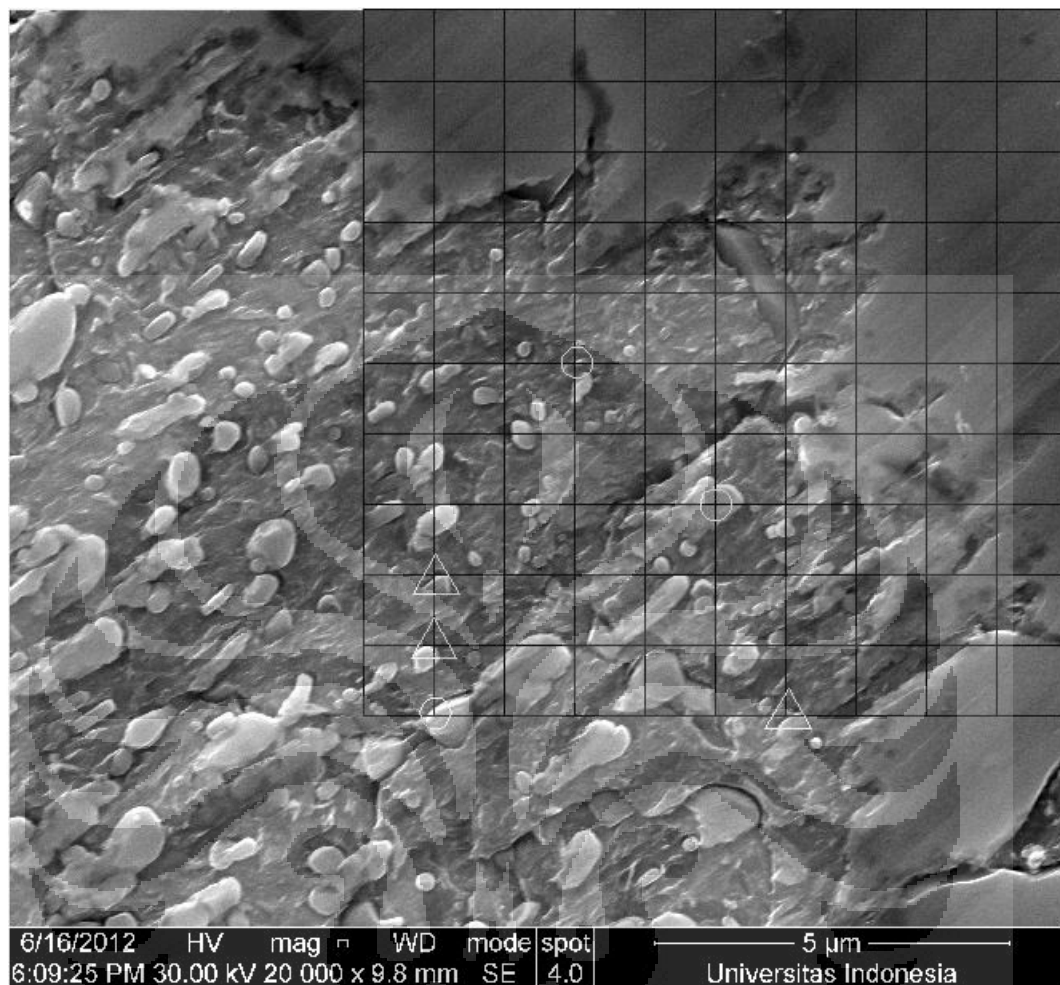


	Jumlah Titik	Perhitungan
○	4	4
△	2	1
		5%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

Total perhitungan	
Lokasi 1	3.5%
Lokasi 2	2%
Lokasi 3	7%
Lokasi 4	5%
Nilai rata-rata	4.4%

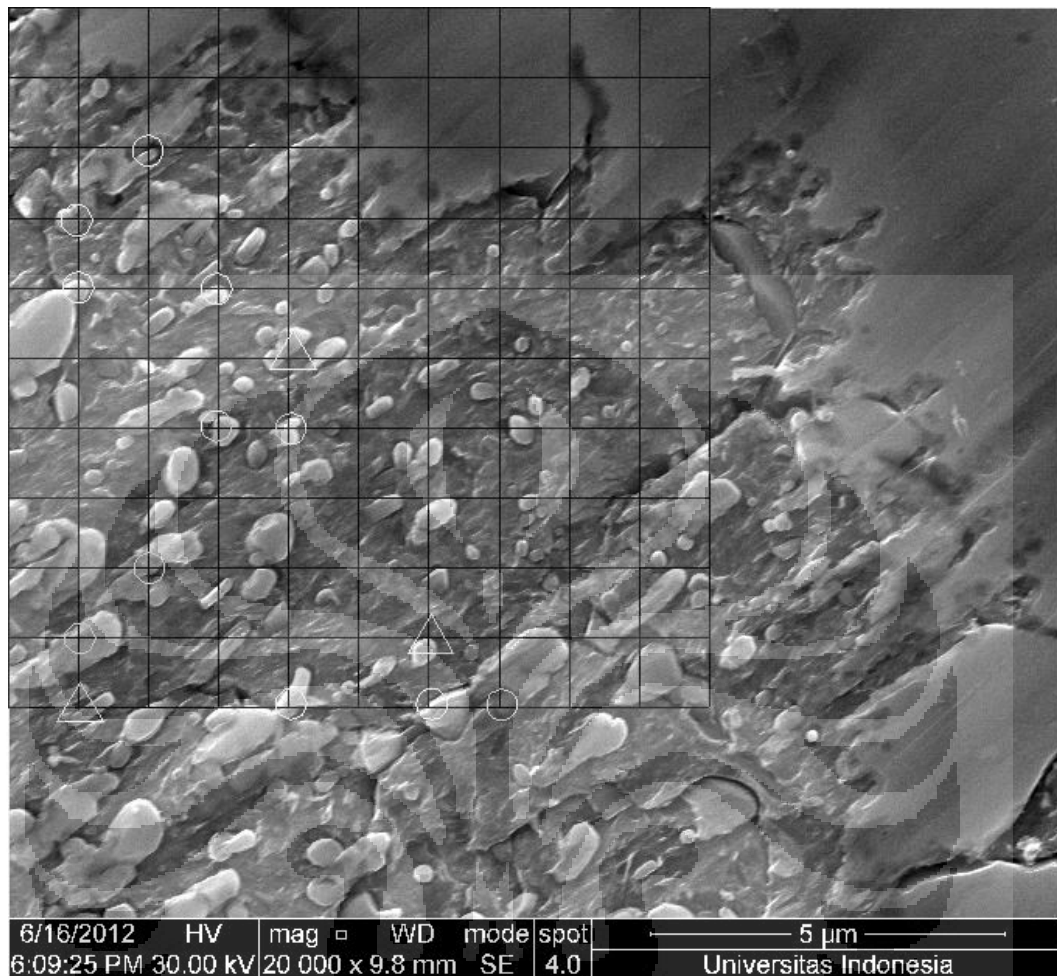
Perhitungan karbida sekunder material A *as-tempered* kondisi waktu tahan destabilisasi 6 jam temperatur 950°C. Lokasi 1



	Jumlah Titik	Perhitungan
○	3	3
△	3	1.5
		4.5%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

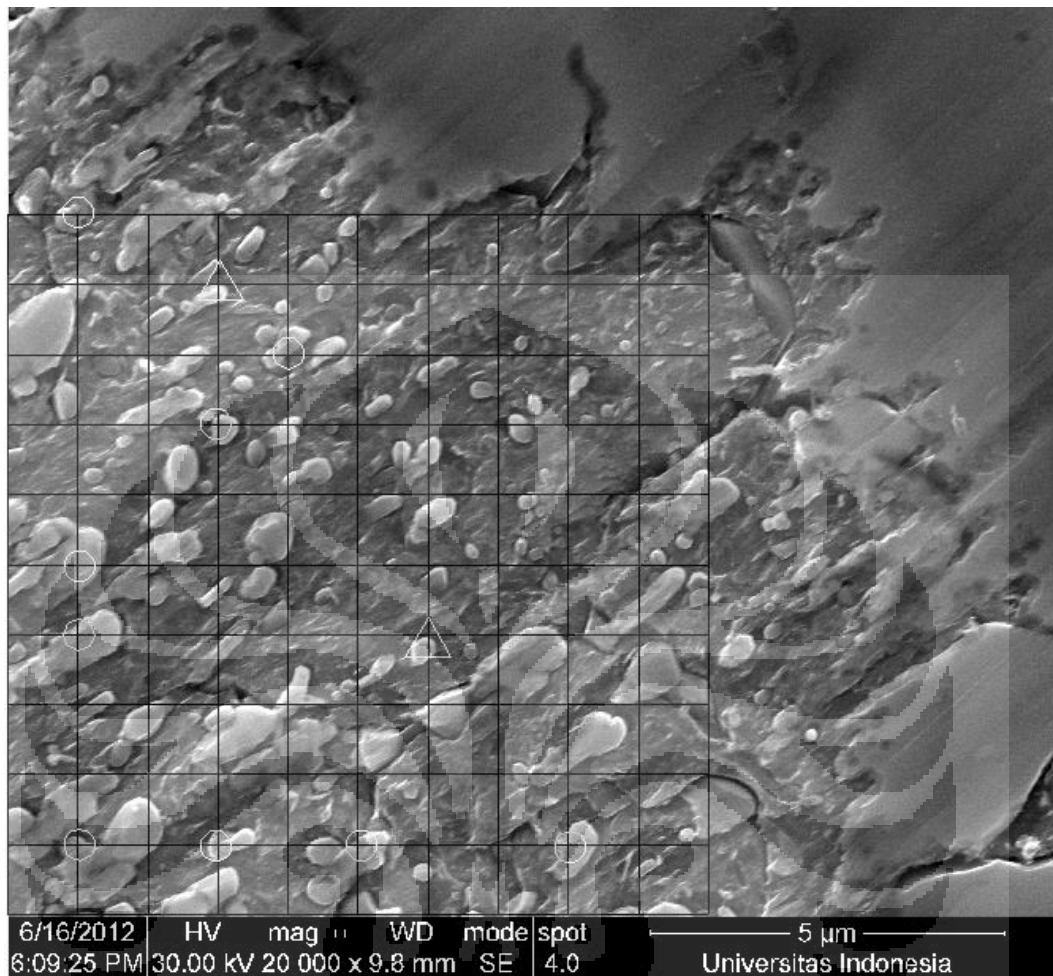
Perhitungan karbida sekunder material A *as-tempered* kondisi waktu tahan destabilisasi 6 jam temperatur 950°C. Lokasi 2



	Jumlah Titik	Perhitungan
○	11	11
△	3	1.5
		12.5%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

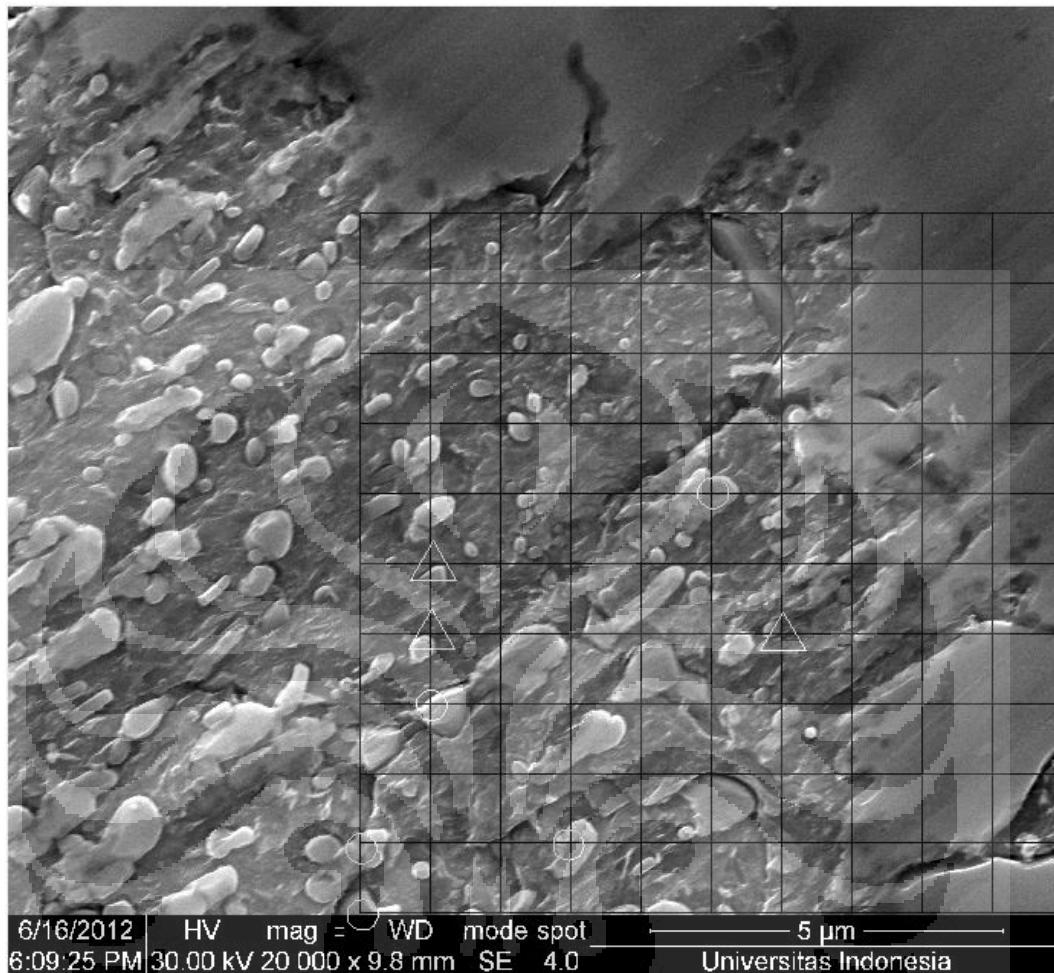
Perhitungan karbida sekunder material A *as-tempered* kondisi waktu tahan destablilisasi 6 jam temperatur 950°C. Lokasi 3



	Jumlah Titik	Perhitungan
○	9	9
△	2	1
		10%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

Perhitungan karbida sekunder material A *as-tempered* kondisi waktu tahan destablilisasi 6 jam temperatur 950°C. Lokasi 4

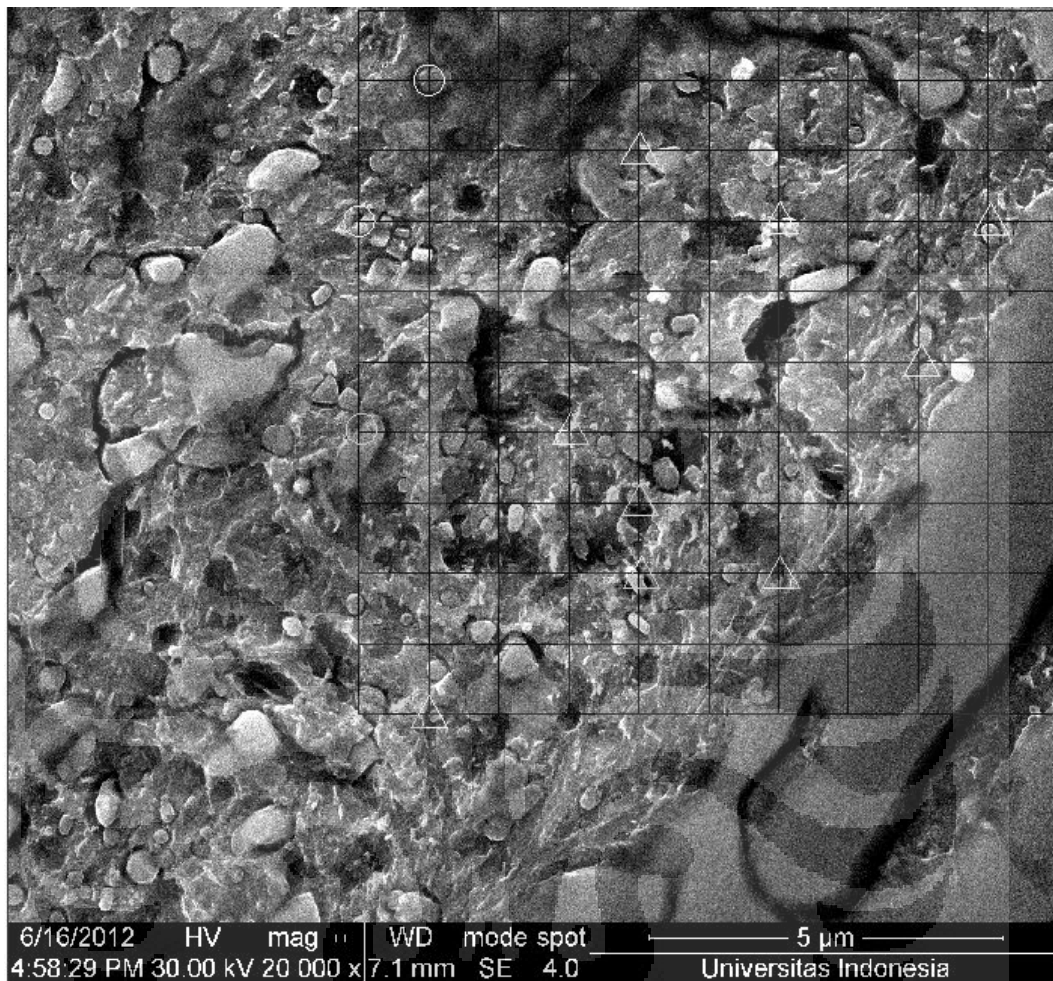


	Jumlah Titik	Perhitungan
○	5	5
△	3	1.5
		6.5%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

Total perhitungan	
Lokasi 1	4.5%
Lokasi 2	12.5%
Lokasi 3	10%
Lokasi 4	6.5%
Nilai rata-rata	8.4%

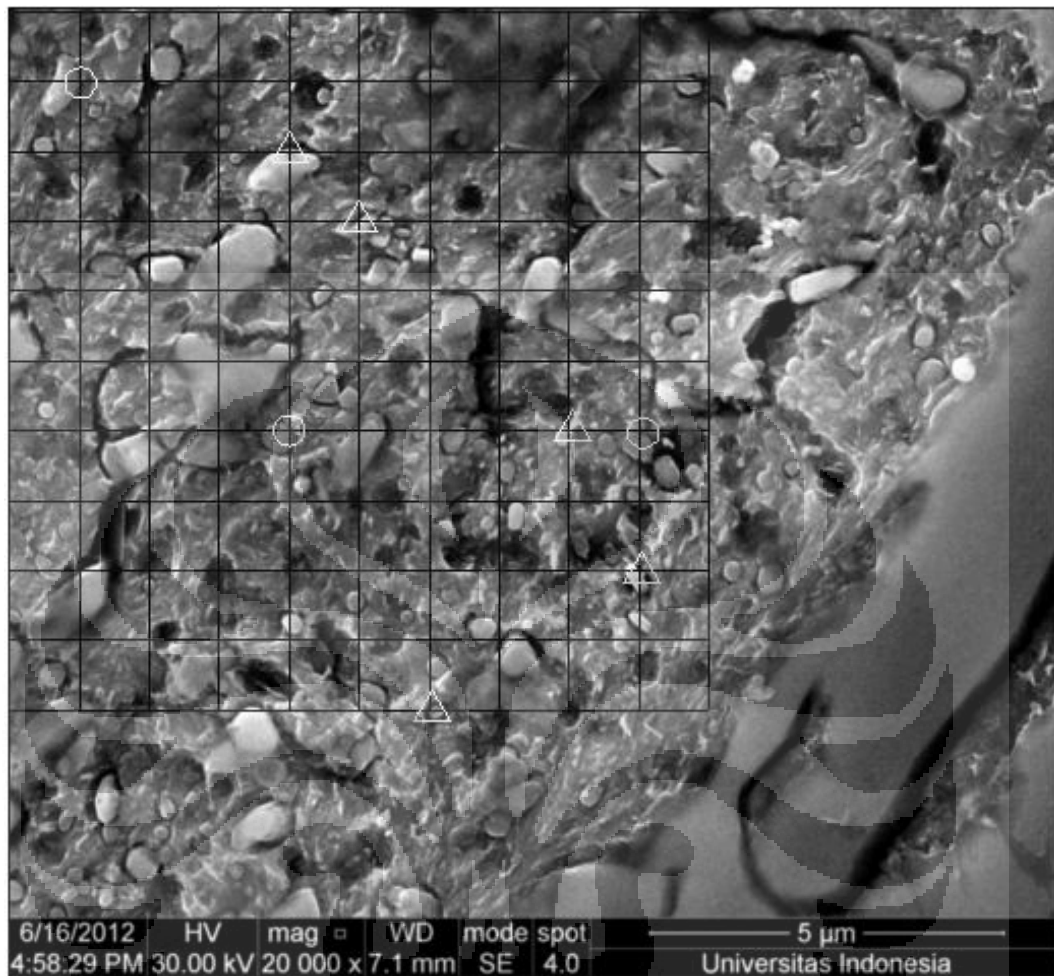
Perhitungan karbida sekunder material B *as-tempered* kondisi waktu tahan destablilisasi 4 jam temperatur 950°C . Lokasi 1



	Jumlah Titik	Perhitungan
○	3	3
△	9	4.5
		7.5%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

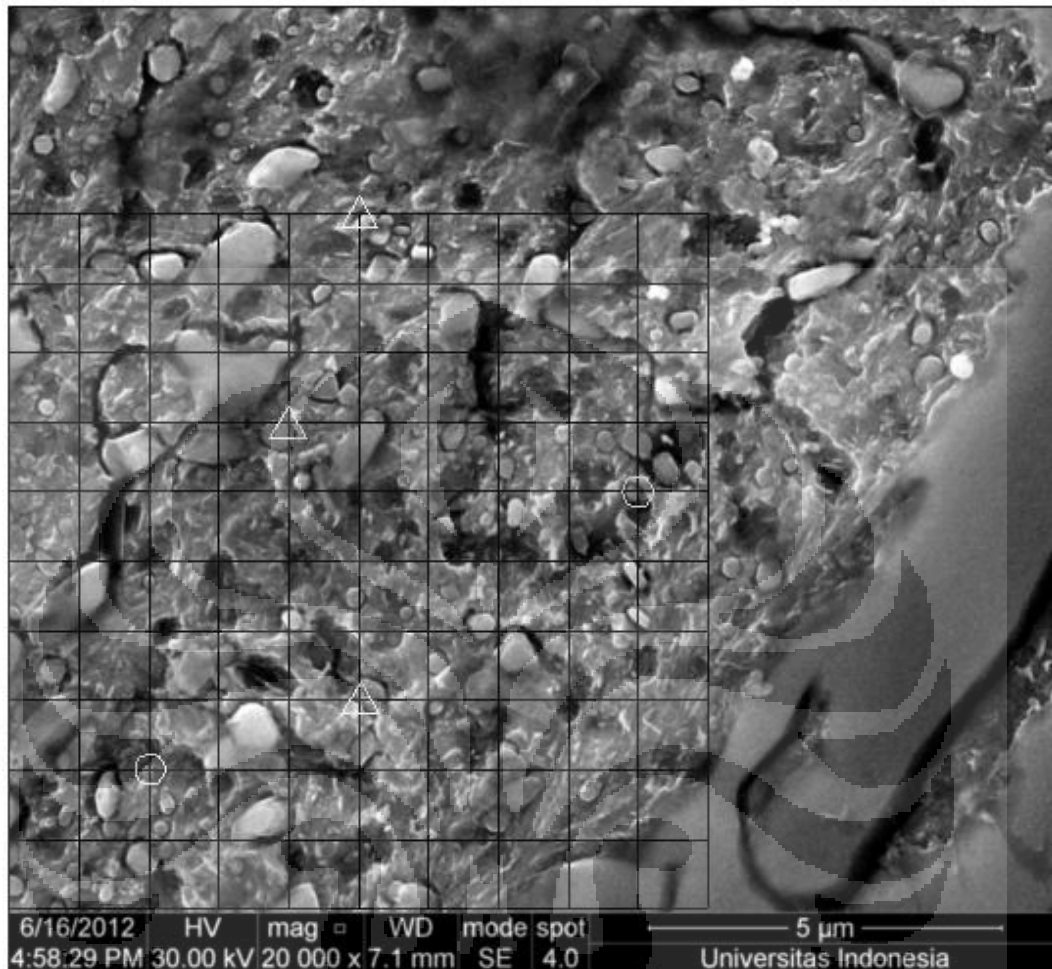
Perhitungan karbida sekunder material B *as-tempered* kondisi waktu tahan destablilisasi 4 jam temperatur 950°C. Lokasi 2



	Jumlah Titik	Perhitungan
○	3	3
△	5	2.5
		5.5%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

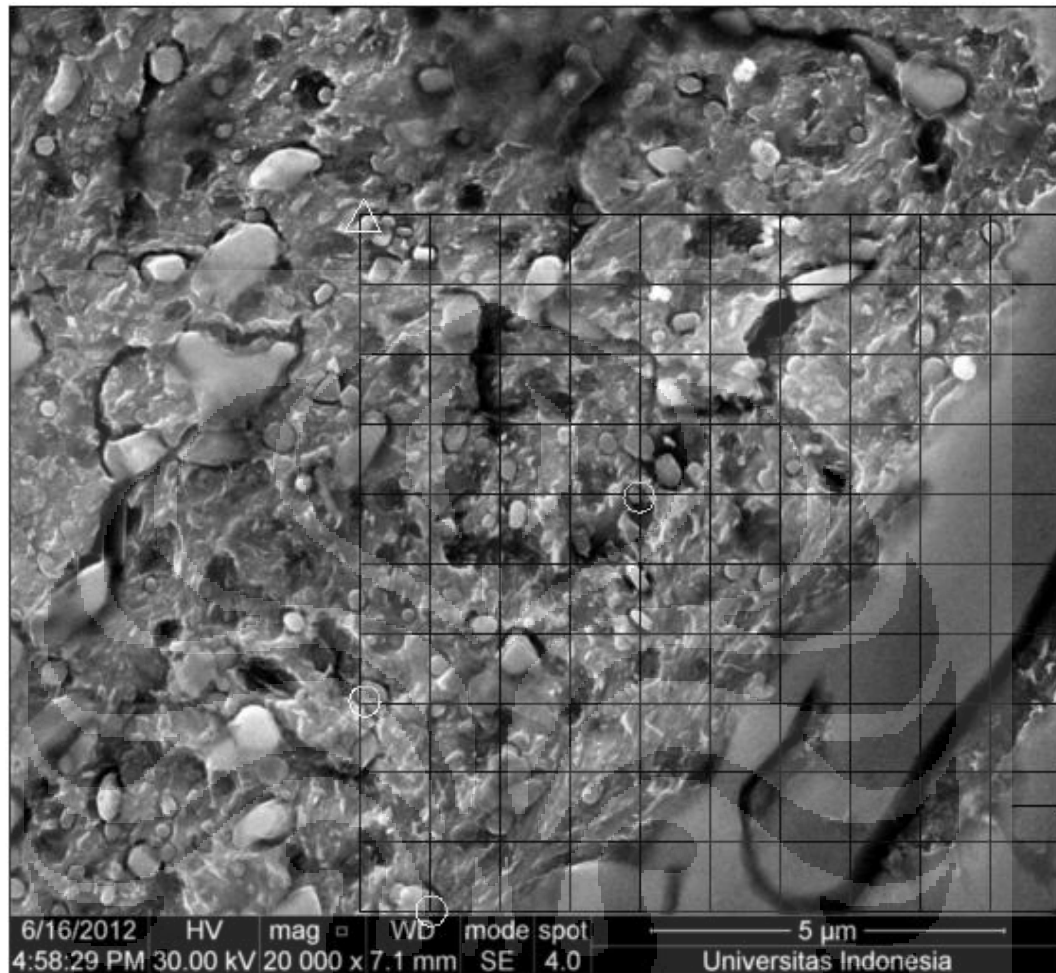
Perhitungan karbida sekunder material B *as-tempered* kondisi waktu tahan destabilisasi 4 jam temperatur 950°C. Lokasi 3



	Jumlah Titik	Perhitungan
○	2	2
△	3	1.5
		3.5%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

Perhitungan karbida sekunder material B *as-tempered* kondisi waktu tahan destablilisasi 4 jam temperatur 950°C. Lokasi 4

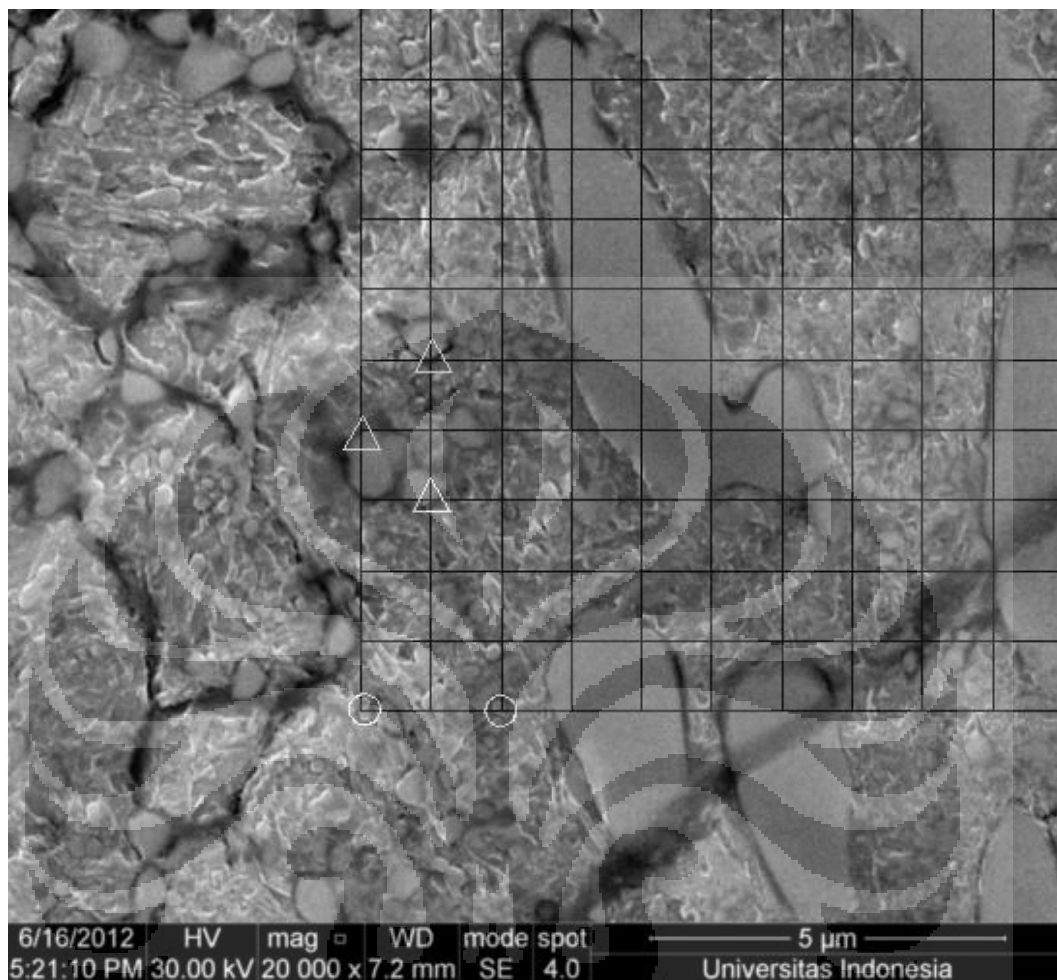


	Jumlah Titik	Perhitungan
○	3	3
△	1	0.5
		3.5%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

Total perhitungan	
Lokasi 1	7.5%
Lokasi 2	5.5%
Lokasi 3	3.5%
Lokasi 4	3.5%
Nilai rata-rata	5.0%

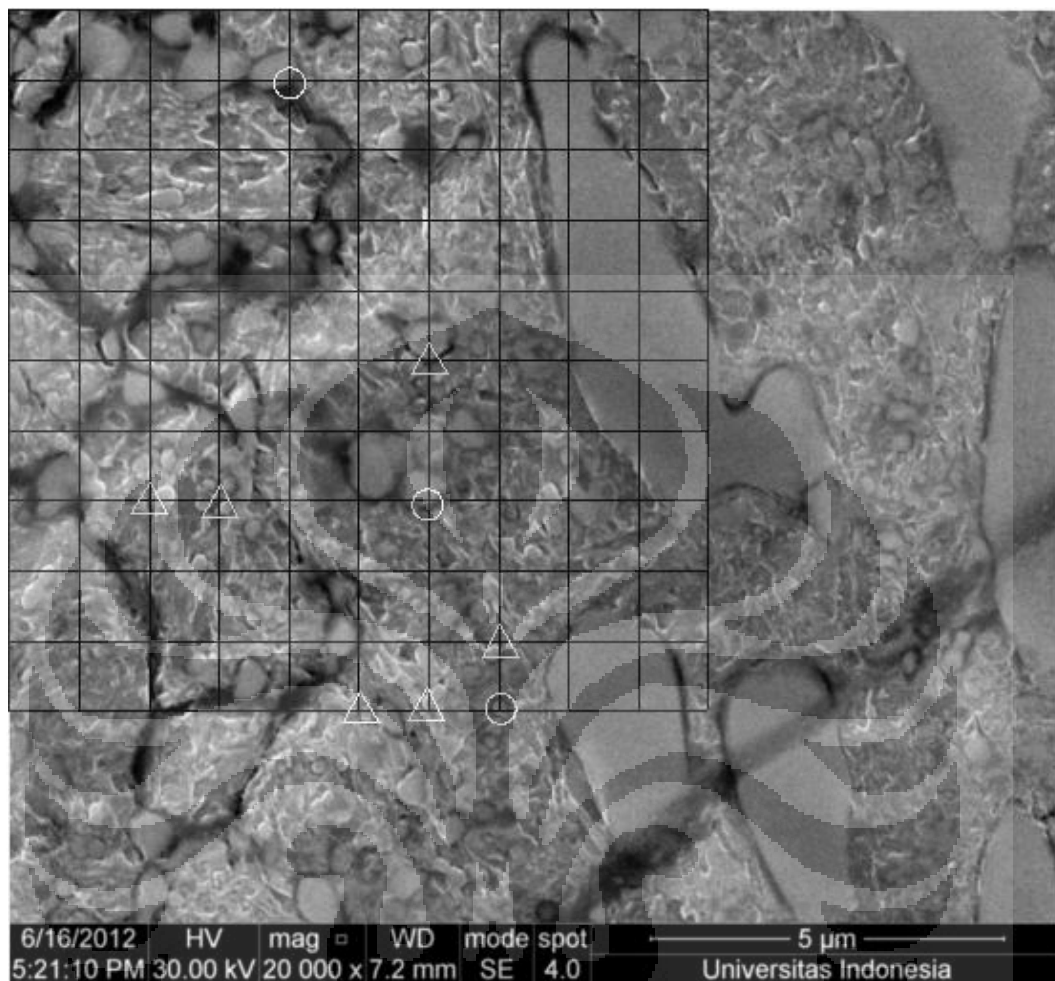
Perhitungan karbida sekunder material B *as-tempered* kondisi waktu tahan destablisasi 5 jam temperatur 950°C. Lokasi 1



	Jumlah Titik	Perhitungan
○	2	2
△	3	1.5
		3.5%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

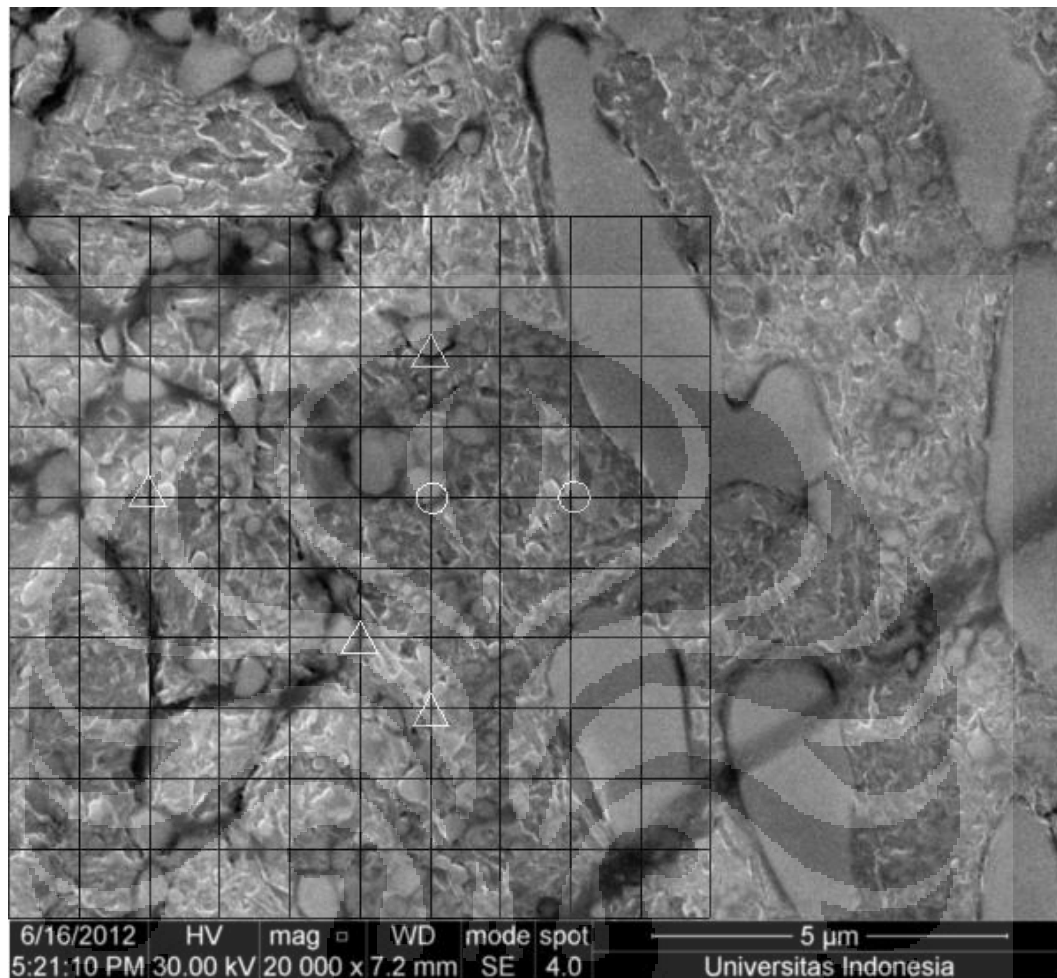
Perhitungan karbida sekunder material B *as-tempered* kondisi waktu tahan destablisasi 5 jam temperatur 950°C. Lokasi 2



	Jumlah Titik	Perhitungan
○	3	3
△	6	3
		6%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

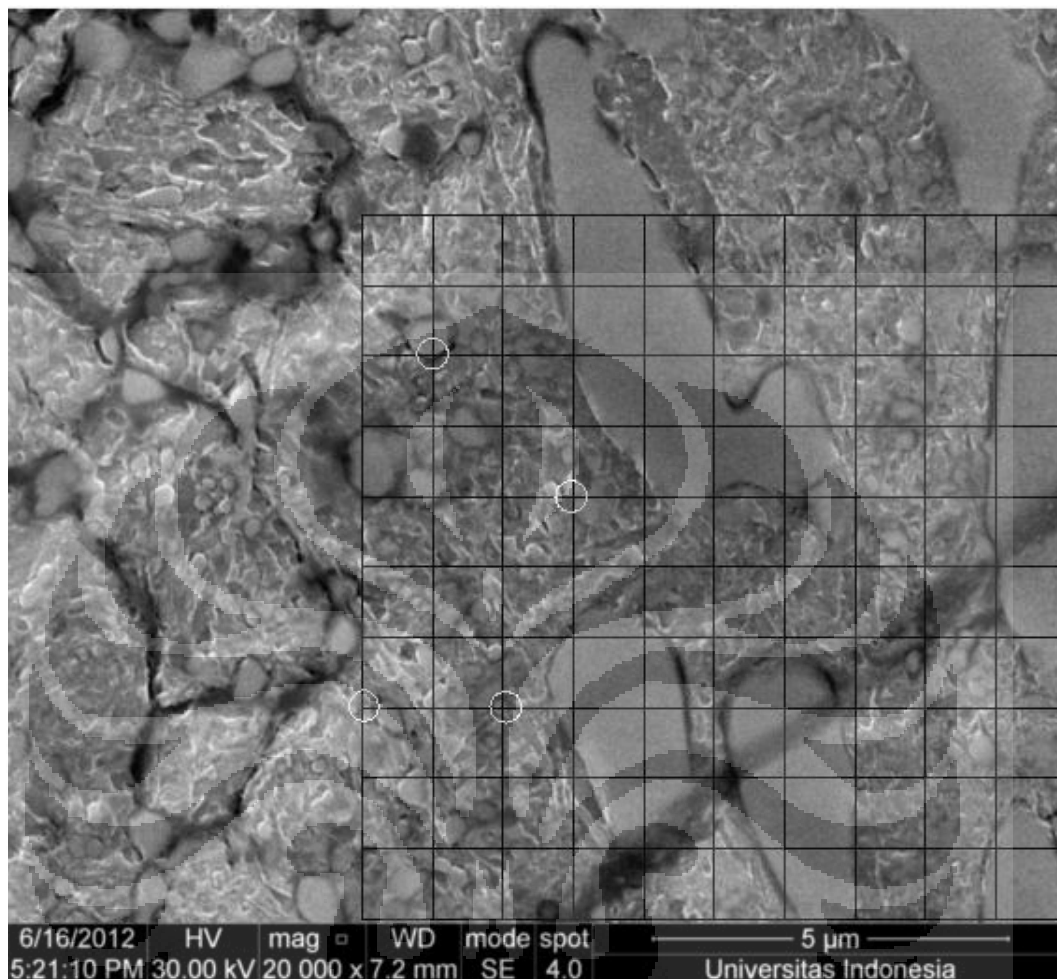
Perhitungan karbida sekunder material B *as-tempered* kondisi waktu tahan destabilisasi 5 jam temperatur 950°C. Lokasi 3



	Jumlah Titik	Perhitungan
○	2	2
△	4	2
		4%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

Perhitungan karbida sekunder material B *as-tempered* kondisi waktu tahan destablilisasi 5 jam temperatur 950°C. Lokasi 4

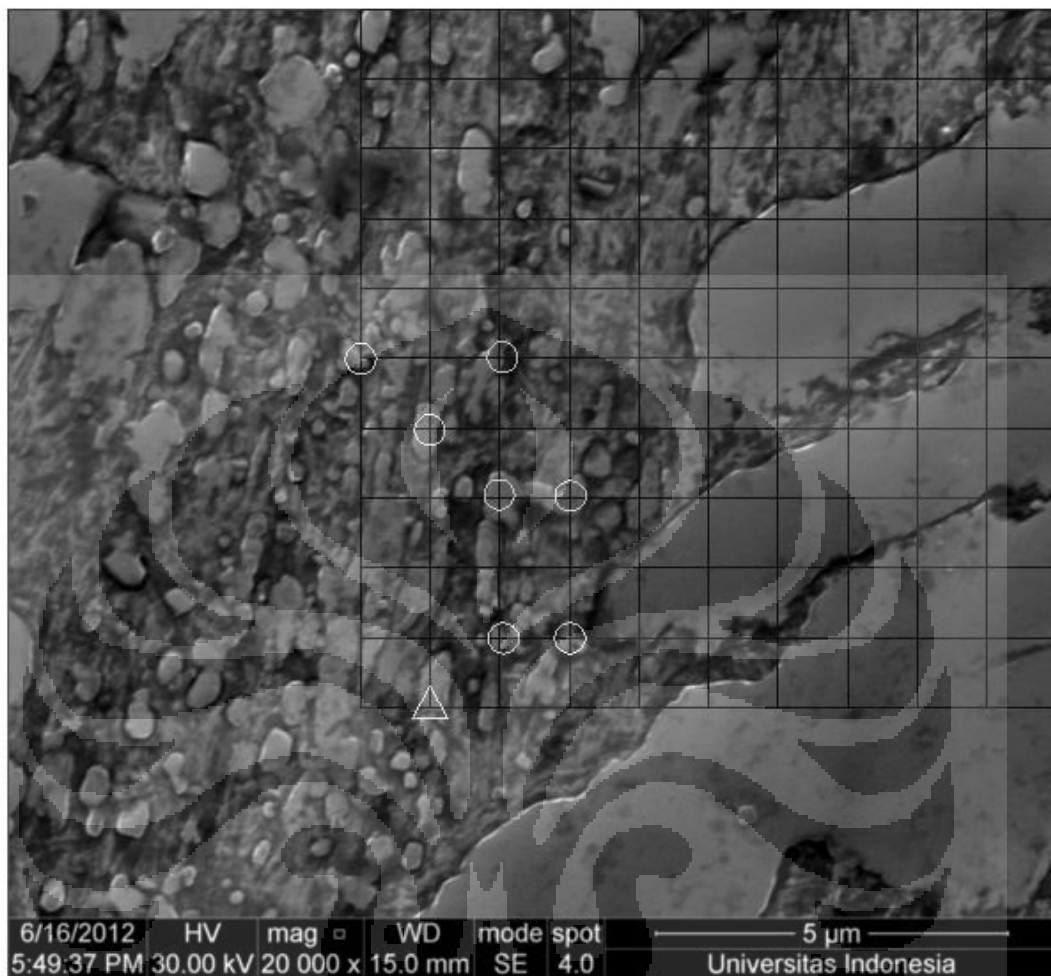


	Jumlah Titik	Perhitungan
○	4	4
△	0	0
		4%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

Total perhitungan	
Lokasi 1	3.5%
Lokasi 2	6%
Lokasi 3	4%
Lokasi 4	4%
Nilai rata-rata	4.4%

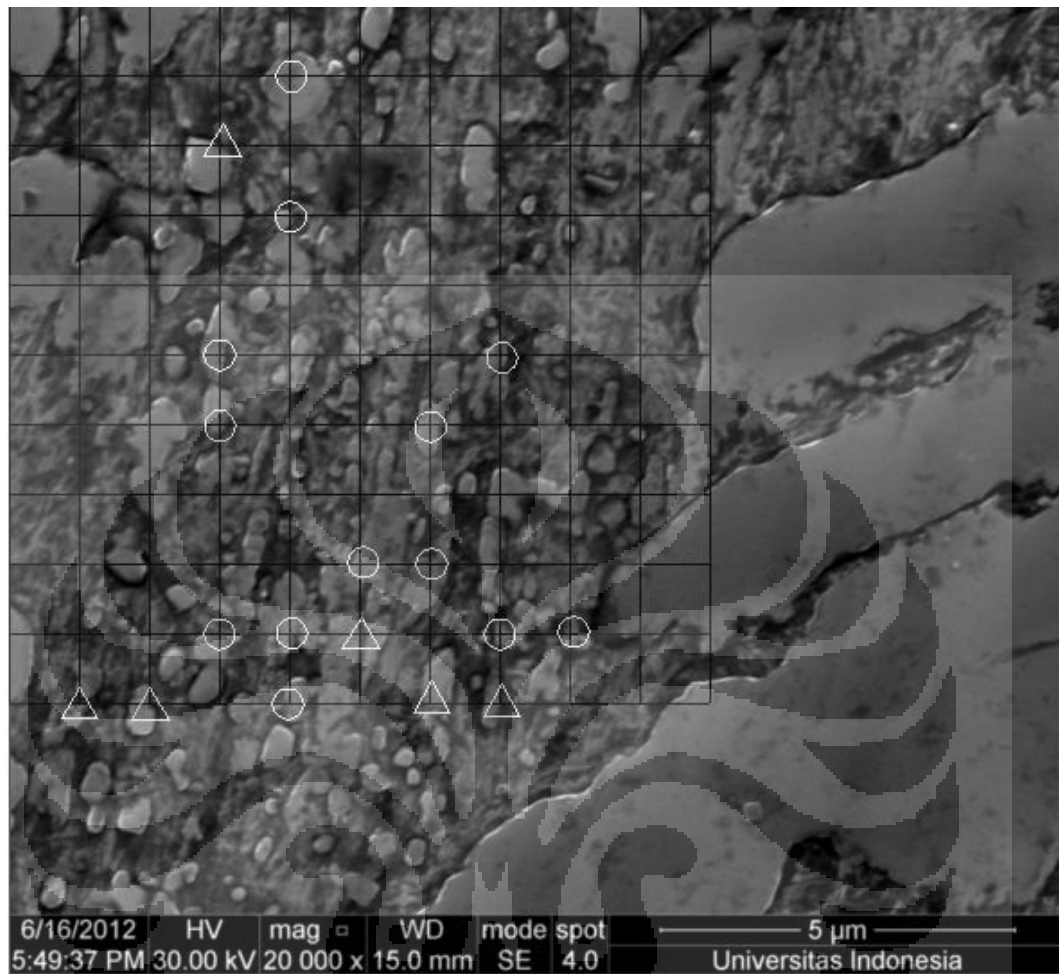
Perhitungan karbida sekunder material A *as-tempered* kondisi waktu tahan destabilisasi 6 jam temperatur 950°C. Lokasi 1



	Jumlah Titik	Perhitungan
○	7	7
△	1	0.5
		7.5%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

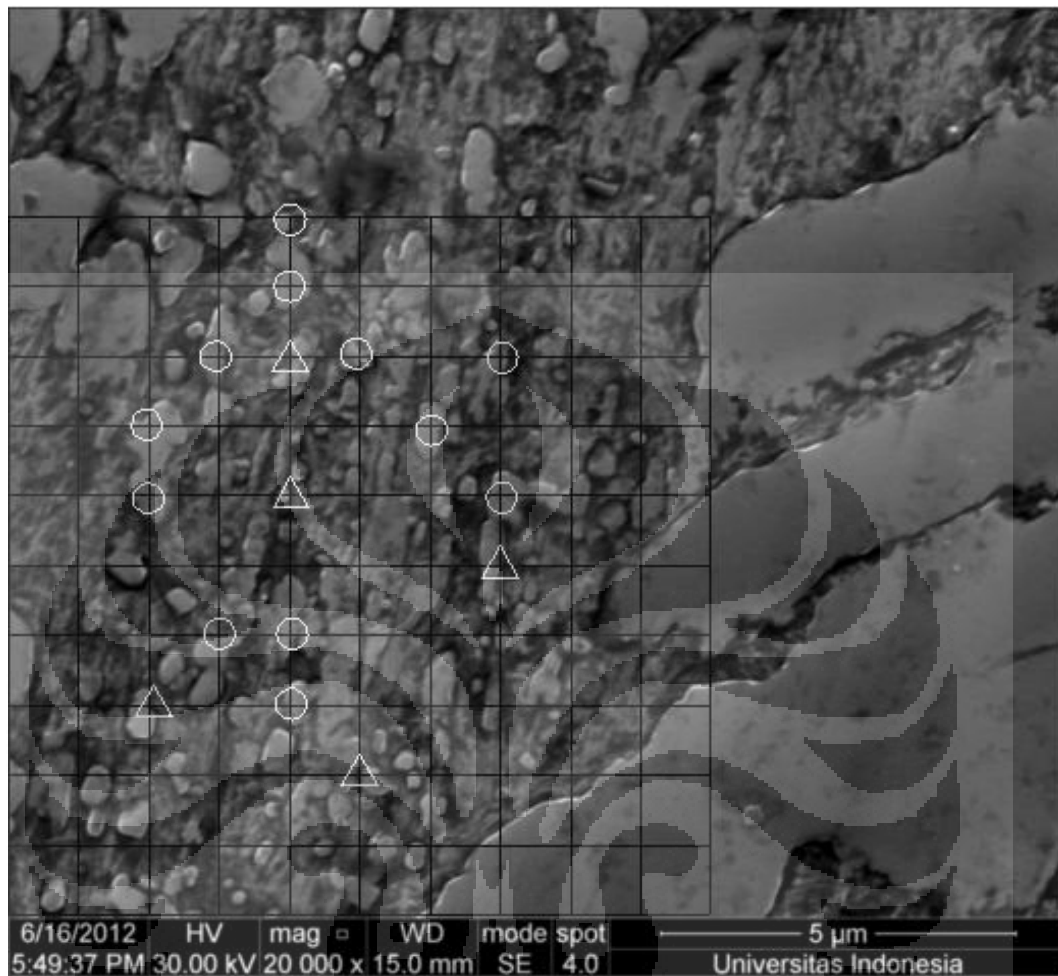
Perhitungan karbida sekunder material B *as-tempered* kondisi waktu tahan destabilisasi 6 jam temperatur 950°C. Lokasi 2



	Jumlah Titik	Perhitungan
○	13	13
△	6	3
		16%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

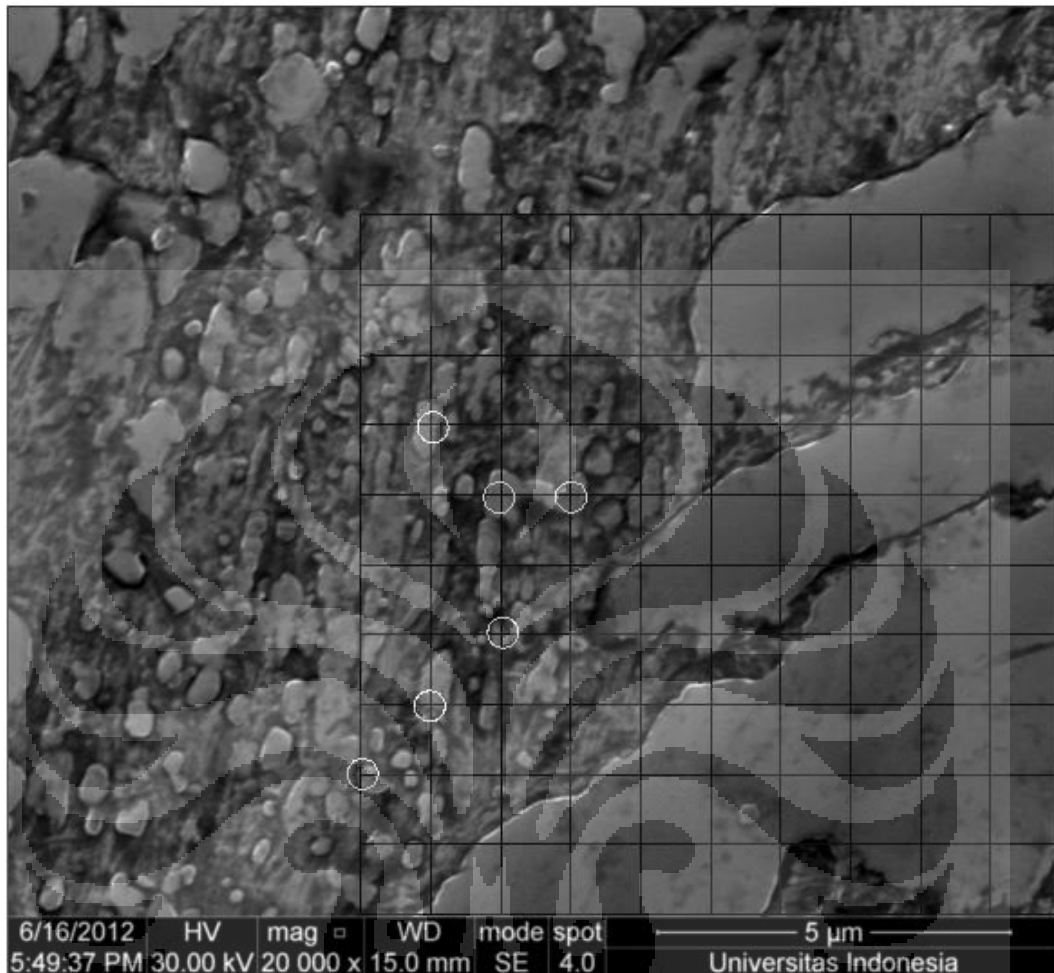
Perhitungan karbida sekunder material B *as-tempered* kondisi waktu tahan destabilisasi 6 jam temperatur 950°C. Lokasi 3



	Jumlah Titik	Perhitungan
○	12	12
△	5	2.5
		14.5%

○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

Perhitungan karbida sekunder material B *as-tempered* kondisi waktu tahan destablilisasi 6 jam temperatur 950°C. Lokasi 4



	Jumlah Titik	Perhitungan
○	6	6
△	0	0
		6%

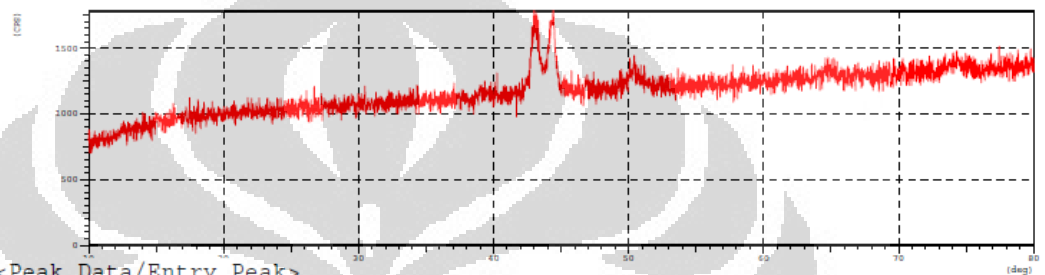
○	: Memotong (x 1)
△	: Bersinggungan (x 0.5)

Total perhitungan	
Lokasi 1	7.5%
Lokasi 2	16%
Lokasi 3	14.5%
Lokasi 4	6%
Nilai rata-rata	8.4%

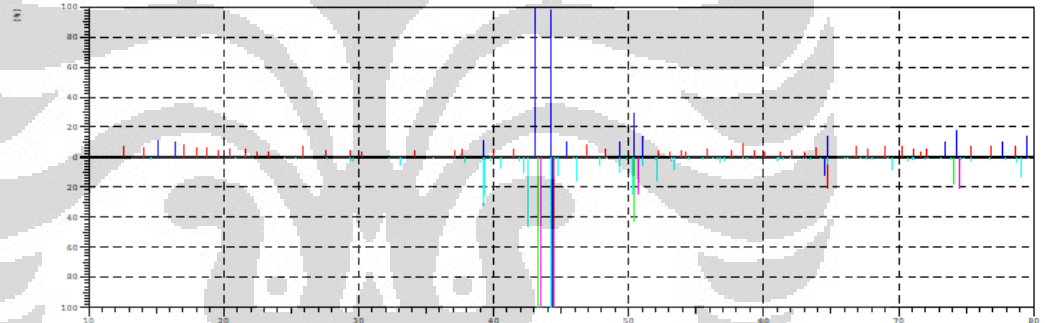
Material A *as-cast*

```
***** SEARCH / MATCH RESULT *****  
<Unknown Data>  
Group Name : 23  
Data Name : A1-AS-CAST  
File Name : A1-AS-CAST.PKR  
Sample Name : A1-AS-CAST  
Comment :  
Date & Time : 03-21-12 13:24:50
```

```
<Raw Data>
```



```
<Peak Data/Entry Peak>
```



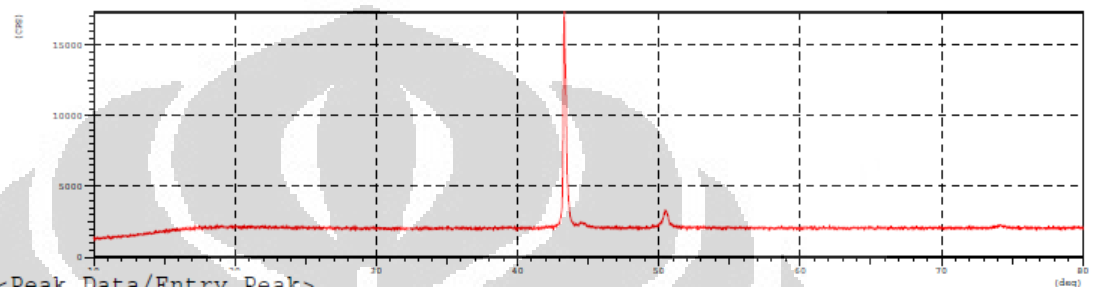
Material B *as-cast*

***** SEARCH / MATCH RESULT *****

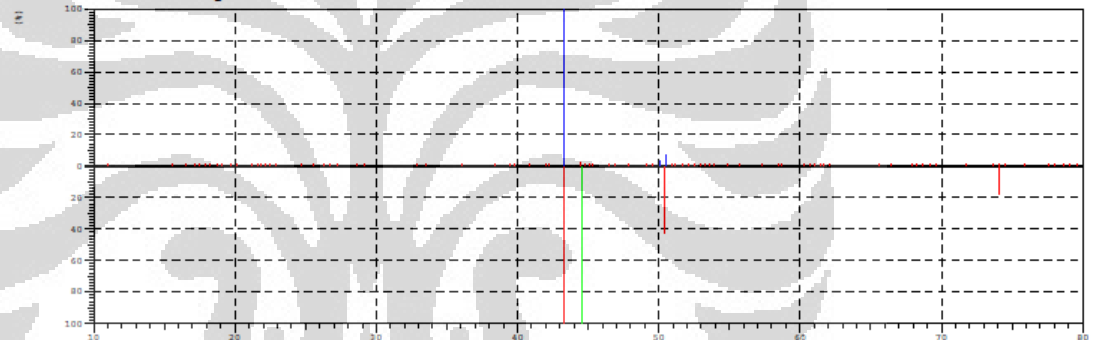
<Unknown Data>

Group Name : 23
Data Name : B1-AS-CAST
File Name : B1-AS-CAST.PKR
Sample Name : B1-AS-CAST
Comment :
Date & Time : 03-21-12 11:26:08

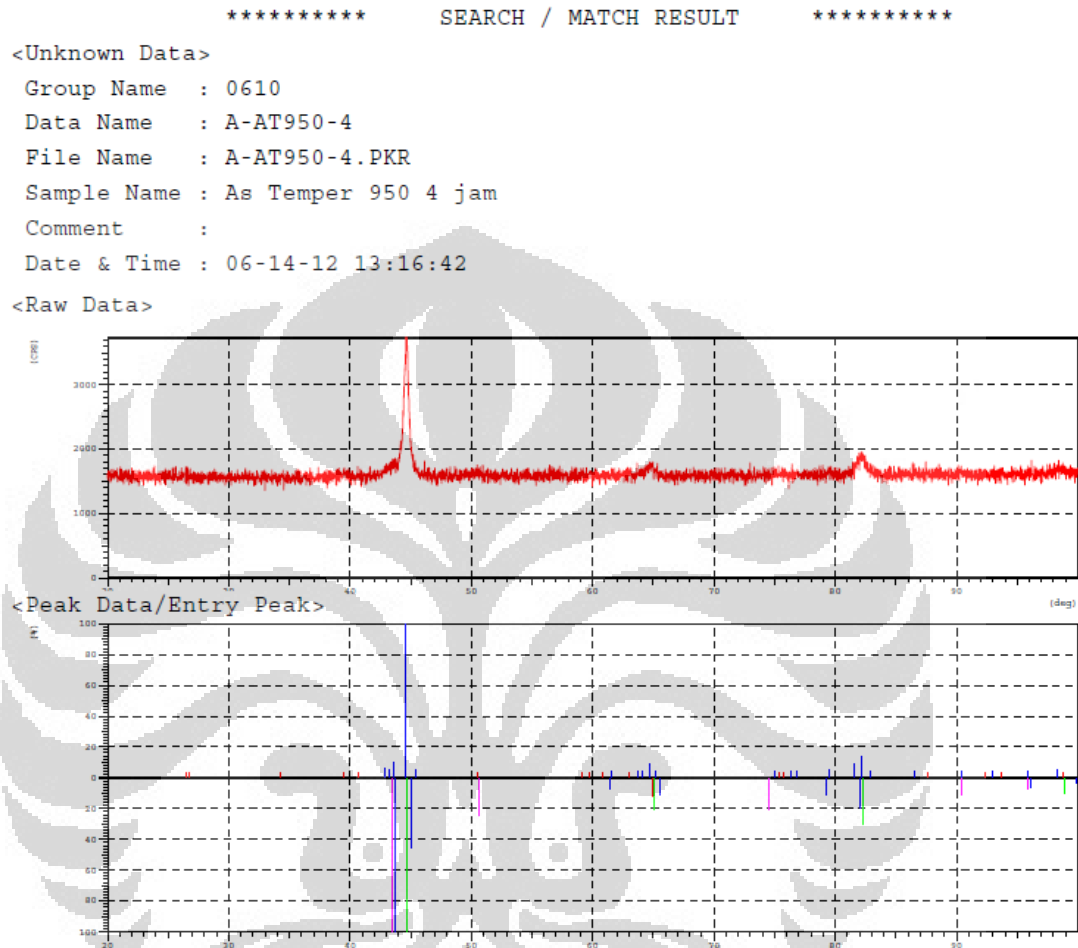
<Raw Data>



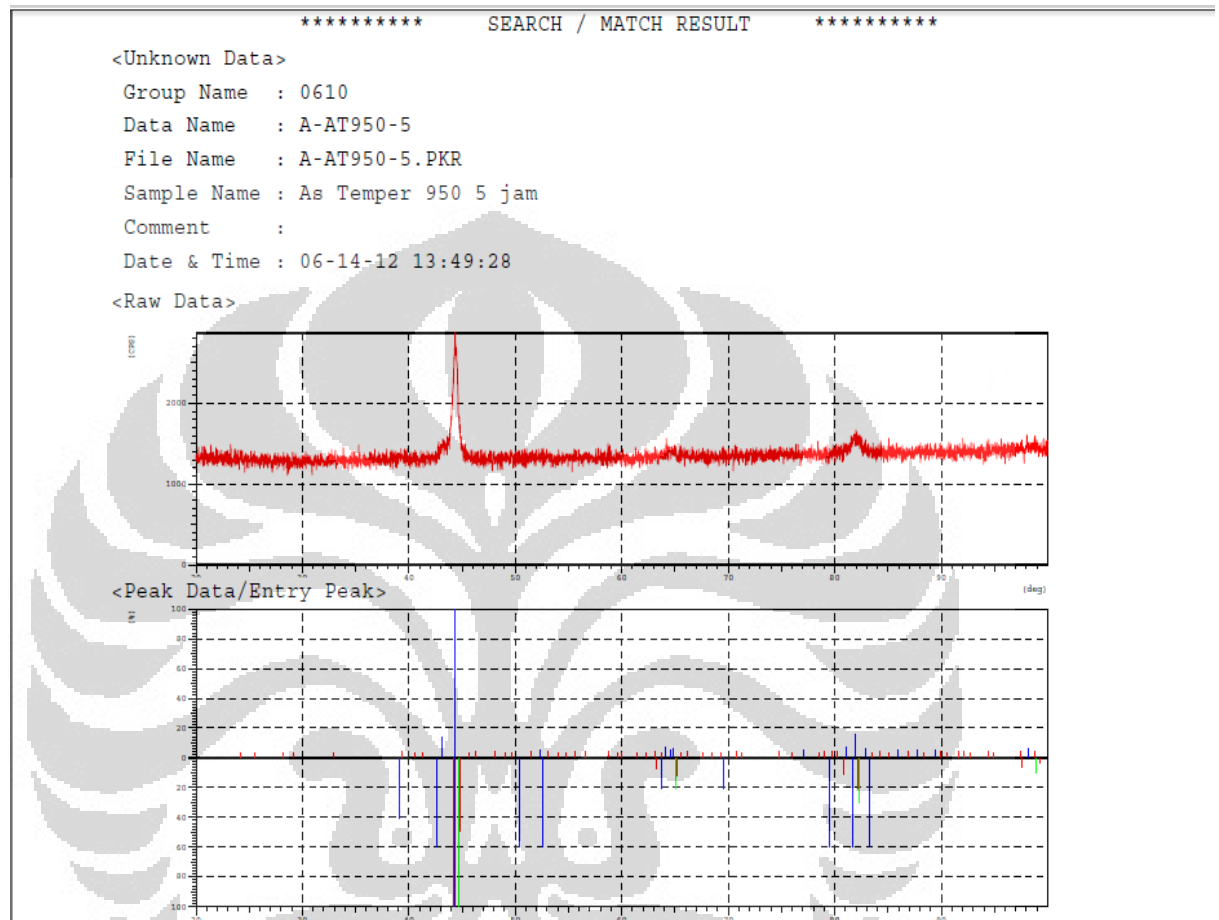
<Peak Data/Entry Peak>



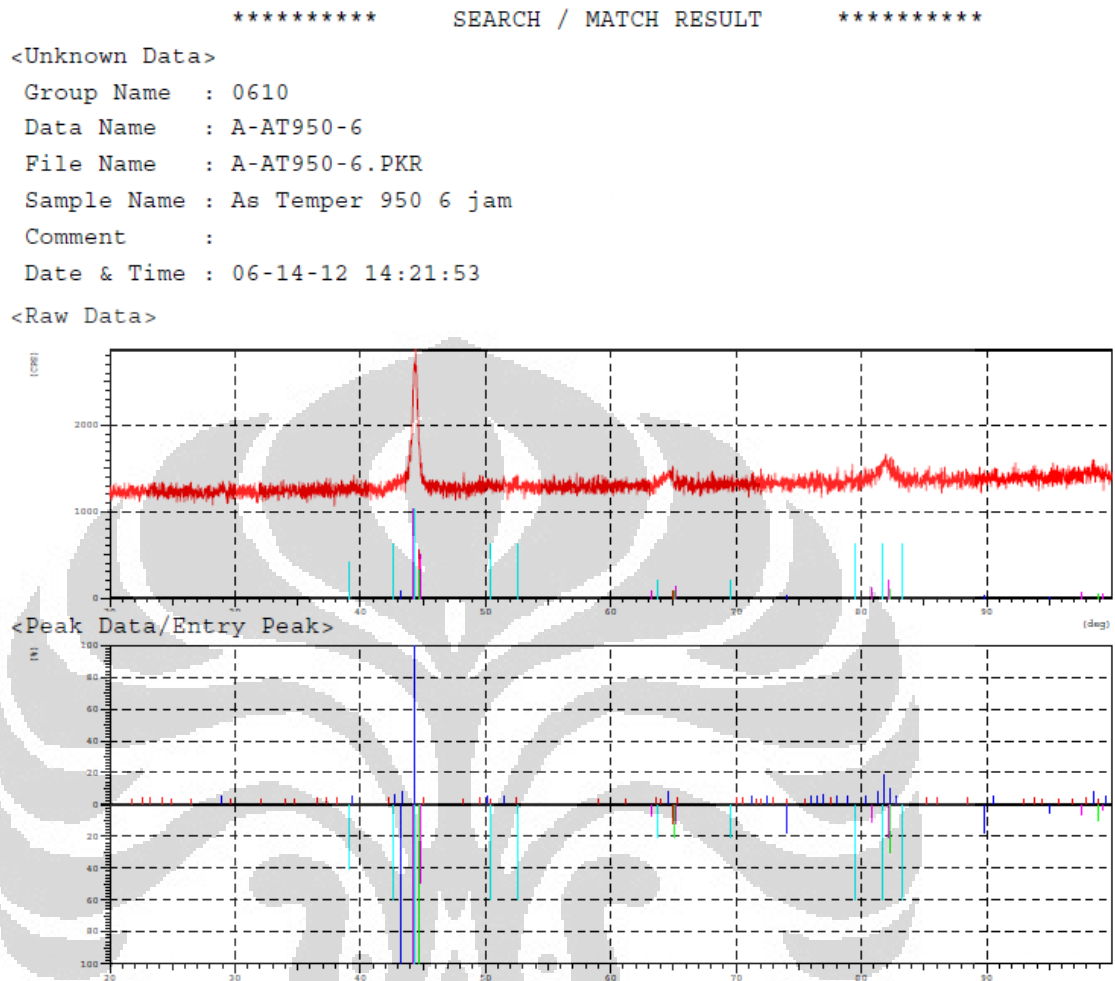
Material A *as-tempered* kondisi waktu tahan destabilisasi 4 jam temperatur 950°C



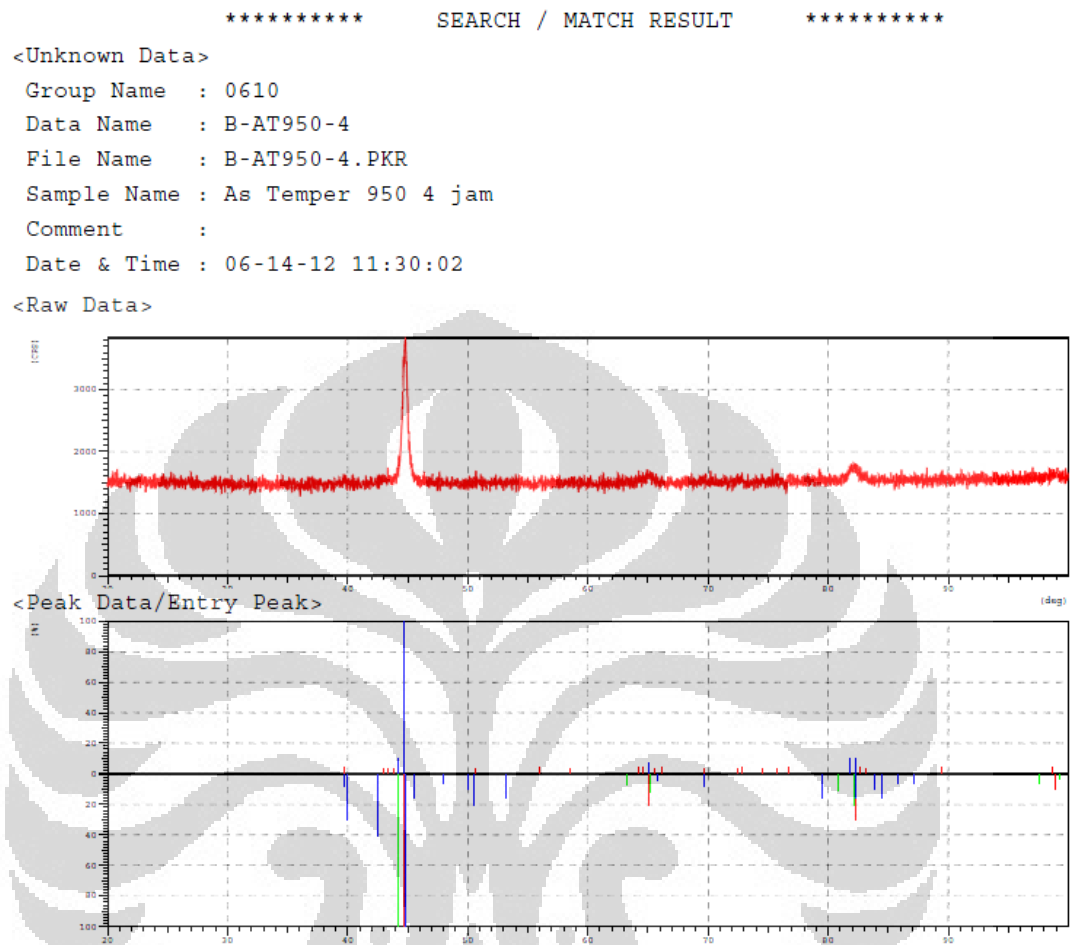
Material A *as-tempered* kondisi waktu tahan destabilisasi 5 jam temperatur 950°C



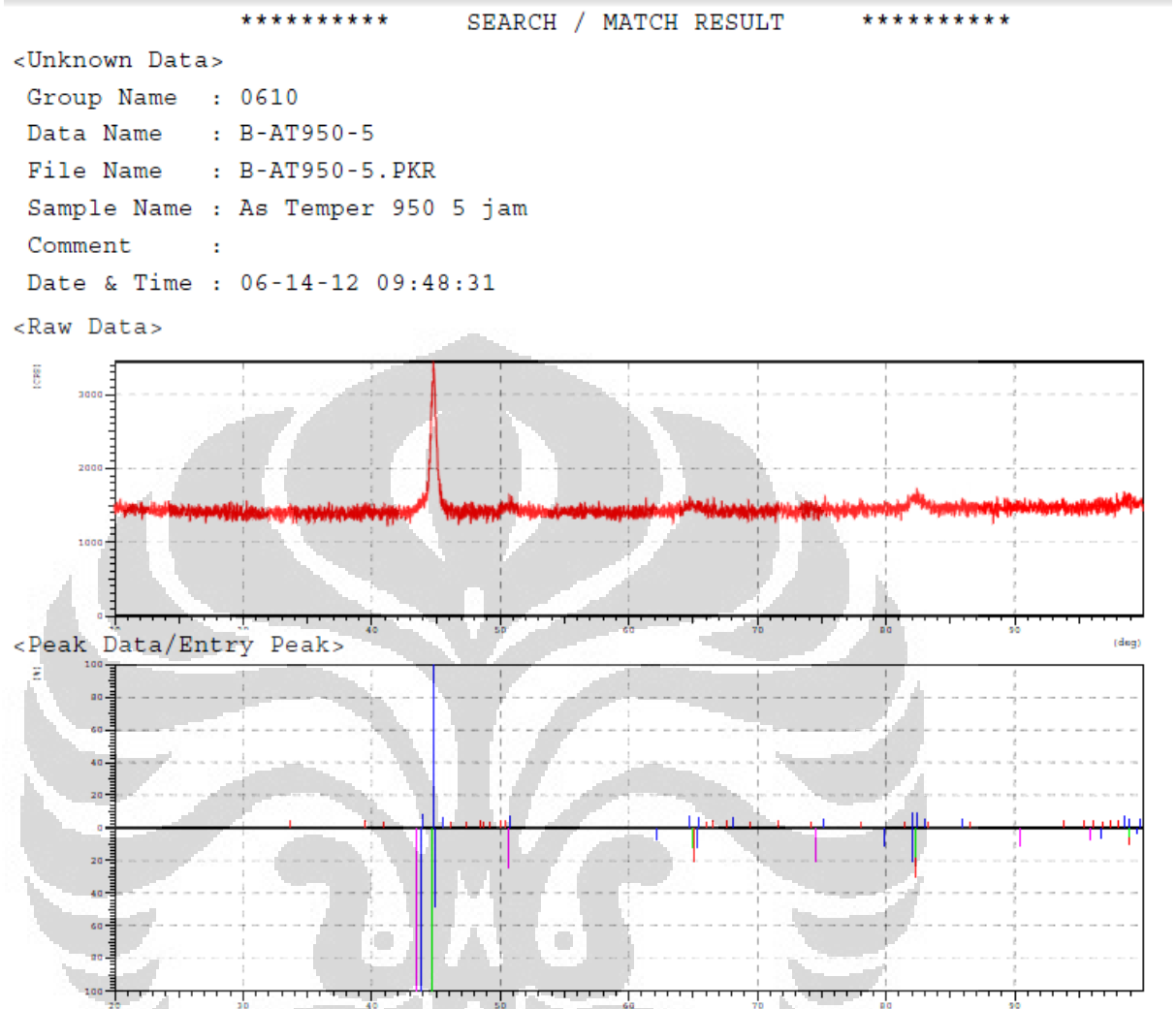
Material A *as-tempered* kondisi waktu tahan destabilisasi 6 jam temperatur 950°C



Material B *as-tempered* kondisi waktu tahan destabilisasi 4 jam temperatur 950°C



Material B *as-tempered* kondisi waktu tahan destabilisasi 5 jam temperatur 950°C



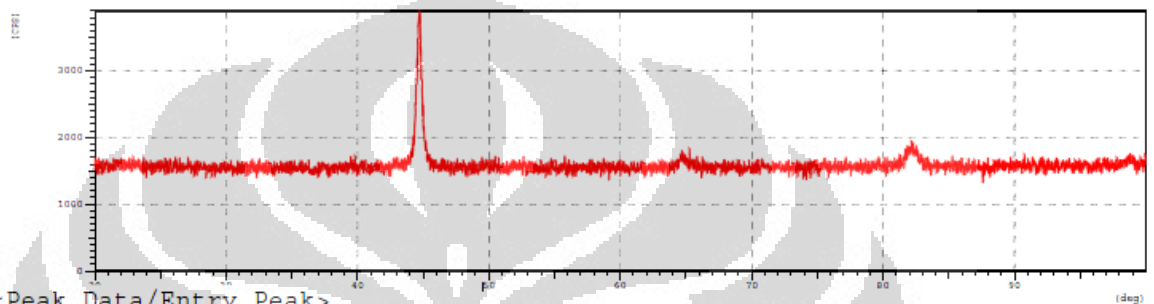
Material B *as-tempered* kondisi waktu tahan destabilisasi 6 jam temperatur 950°C

***** SEARCH / MATCH RESULT *****

<Unknown Data>

Group Name : 0610
Data Name : B-AT950-6
File Name : B-AT950-6.PKR
Sample Name : As Temper 950 6 jam
Comment :
Date & Time : 06-14-12 09:13:00

<Raw Data>



<Peak Data/Entry Peak>

