



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH WAKTU BORONISASI DENGAN TEKNIK
POWDER-PACK TERHADAP KETAHANAN ABRASIF PADA
ST37 DAN S45C**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains

**DIZI MARDIANSYAH
0806420612**

**PROGRAM PASCASARJANA
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS INDONESIA
SALEMBA
2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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



Dizi Mardiansyah
0806420612

Juli 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh

Nama : Dizi Mardiansyah
NPM : 0806420612
Program Studi : Ilmu Material
Judul : Pengaruh Waktu Boronisasi Dengan Teknik *Powder-Pack*
Terhadap Ketahanan Abrasif Pada ST37 Dan S45C

Telah dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Studi Ilmu Material Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Ketua Program Studi : Dr. Bambang Soegijono ()
Pembimbing : Dr. Bambang Soegijono ()
Penguji I : Dr. Azwar Manaf, M.Met ()
Penguji II : Dr. Muhammad Hikam ()
Penguji III : Dr. Suhardjo Poertadji ()

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal : Juli 2010

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur terpanjatkan kepada Allah SWT, Rabb semesta alam yang telah memberikan berbagai kenikmatan kepada umat manusia, termasuk penulis sehingga dapat menyelesaikan tesis ini dengan sebaik-baiknya. Tesis dengan judul '**Pengaruh Waktu Boronisasi Dengan Teknik *Powder-Pack* Terhadap Ketahanan Abrasif Pada ST37 Dan S45C**' ini dibuat sebagai syarat yang harus dipenuhi dalam menyelesaikan mata kuliah tesis dan untuk mencapai gelar Magister Sains di Program Studi Ilmu Material pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia.

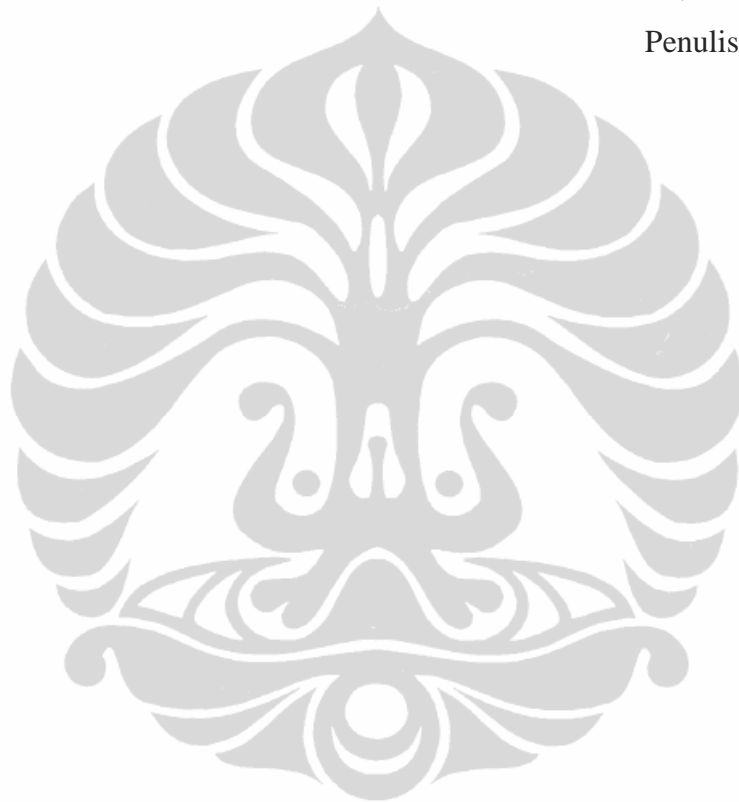
Selama proses penyusunan tesis ini, penulis telah banyak mendapatkan masukan maupun bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Bambang Soegijono, selaku pembimbing dan selaku Ketua Program Studi Ilmu Material atas bimbingan dan ilmu yang bermanfaat bagi penulis.
2. Bapak Budi Briyatmoko, selaku Kepala Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN yang telah mengizinkan penggunaan fasilitas untuk menyelesaikan tesis ini.
3. Bapak Soegondo, M.Eng, selaku pembimbing teknis dengan penuh semangat memberikan inspirasi, motivasi, dan bimbingan.
4. Ibu Ratih Langgenati yang memberikan motivasi dan membantu dalam kemudahan penyediaan bahan untuk menyelesaikan tesis ini.
5. Mba Siti dan Staf Tata Usaha Program Studi Ilmu Material yang telah membantu dalam segala hal administrasi.
6. Papa, Mama, Ka Ari, Ka Agus, Bembi, Ade Rayhan dan keluarga besar atas doa dan dukungannya.
7. Devi Apriliani istriku tercinta, yang selalu berdoa dan memberi motivasi yang tak kenal lelah.
8. Teman-teman Ilmu Material seangkatan yang penuh keriang dan canda tawanya yang selalu memberikan warna tersendiri selama perkuliahan.

Penulis menyadari masih terdapat banyak kekuarangan dalam penyusunan tesis ini, untuk itu, saran dan kritik yang konstruktif sangat penulis harapkan untuk memperbaiki penulisan dan membawa manfaat bagi pengembangan ilmu dimasa yang akan datang.

Salemba, Juli 2010

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA
ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMISI**

Sebagai civitas akademik Universitas Indonesia, saya bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Dizi Mardiansyah
NPM : 0806420612
Program Studi : Ilmu Material
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis Karya : Tesis

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 Waktu Boronisasi Dengan Teknik *Powder-Pack* Terhadap Ketahanan Abrasif Pada ST37 Dan S45C”

beserta perangkat yang ada (bila 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/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta
Pada tanggal : Juli 2010
Yang menyatakan

(Dizi Mardiansyah)

ABSTRAK

Nama : Dizi Mardiansyah
Program Studi : Ilmu Material
Judul : Pengaruh waktu boronisasi dengan teknik *powder-pack* terhadap ketahanan abrasif pada ST37 dan S45C

Boronisasi merupakan perlakuan termokimia yang mampu membentuk lapisan yang sangat keras dan tahan aus pada permukaan logam. Teknik boronisasi dapat dilakukan pada berbagai macam bahan, seperti *ferrous metal*, *non-ferrous metal* dan bahan *cermet*. Pelapisan boron dilakukan dengan harapan dapat menjadi alternatif untuk menggantikan pelapisan dengan bahan lain, sehingga dapat menghasilkan bahan yang lebih baik dan murah. Dalam thesis ini, akan menentukan ketahanan abrasif lapisan borid pada baja karbon ST37 dan S45C dengan variasi waktu boronisasi. Proses boronisasi pada baja karbon ST37 dan S45C dilakukan pada temperatur 1000°C selama 6, 8 dan 12 jam dalam kondisi inert (menggunakan gas argon). Teknik boronisasi yang digunakan adalah *powder-pack boronizing* dengan komposisi serbuk 5% B₄C, 5% KBF₄ dan 90% SiC. Morfologi lapisan borid pada kedua baja menyerupai bentuk gigi gergaji. Pada permukaan lapisan dari masing-masing baja karbon menghasilkan beberapa fasa yaitu FeB, Fe₂B dan CrB. Pengujian keausan abrasif menggunakan metode piringan berputar, dimana pengoprasiaannya dengan kertas abrasif dan kekuatan antara beban gesek dan bahan uji. Berdasarkan jumlah abrasif dan ketahanan aus, lapisan borid pada baja S45C dan waktu boronisasi 8 jam menghasilkan lapisan borid yang memiliki ketahanan abrasif yang terbaik, dengan jumlah abrasif yang rendah dan ketahanan aus yang tinggi.

Kata kunci : *powder-pack boronizing*, abrasif, fasa FeB, Fe₂B dan CrB .

ABSTRACT

Name : Dizi Mardiansyah
Study Program : Material Science
Title : Effect of time boronized with powder-pack technique of abrasive resistance of the ST37 and S45C

Boronizing is a thermochemical treatment that is able to form a layer of very hard and wear resistant metal surfaces. Boronizing techniques can be performed on various materials, such as ferrous metal, non-ferrous metal and cermets material. Boron coatings made with the hope to be an alternative to replace the coating with other materials, which can lead to better materials and cheap. In this thesis, will determine the resistance to abrasive layer borid on ST37 and S45C carbon steel with various boronizing time. Boronizing process on carbon steel ST37 and 1000°C S45C held at temperature for 6, 8 and 12 hours in an inert conditions (argon gas using). Boronizing technique used is powder-pack boronizing with B₄C powder composition 5%, 5% and 90% SiC KBF₄. The morphology of the second layer on the steel borid sawtooth-like shape. On the surface of each layer of carbon steel resulted in several phases of FeB, Fe₂B and CrB. Abrasive wear testing using a rotating disc method, where the operation with abrasive paper and the friction force between the load and test materials. Based on the number of abrasive and wear resistance, coating on steel S45C borid and time boronisasi 8 hours produces borid layer that has the best abrasive resistance, with the result of a low abrasive and high wear resistance.

Keywords: powder-pack boronizing, abrasive, FeB phase, Fe₂B and CrB.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
2 TINJAUAN LITERATUR	5
2.1 Boronisasi <i>Powder Pack</i>	5
2.1.1 Proses Boronisasi <i>Powder Pack</i>	5
2.1.2 Mekanisme Pembentukan Lapisan Besi Borid Dengan Boronisasi <i>Powder Pack</i>	6
2.2 Karakteristik Lapisan Besi Borid	11
2.3 Keausan Logam.....	13
2.4 Mekanisme Keausan	14
2.4.1 Keausan Adesif	15
2.4.2 Keausan Abrasif.....	16
2.4.3 Keausan Oksidasi / Korosif	17
2.4.4 Keausan Lelah Permukaan	17
2.4.5 Keausan Erosi	18
2.5 Keausan Abrasif	19
2.5.1 Pengaruh Sifat Material Pada Keausan Abrasif.....	20
2.5.2 Pengaruh Lingkungan Terhadap Keausan Abrasif	21
2.6 Karakteristik Lapisan	23
2.6.1 Ketebalan Lapisan	23
2.6.2 Sifat Mekanis Lapisan	24
2.7 Alat Uji Keausan Abrasif Untuk Pelapisan Logam	25

3	METODE PENELITIAN	27
	3.1 Metode Penelitian.....	27
	3.2 Preparasi Bahan Dan Alat	28
	3.3 Prosedur Penelitian.....	28
	3.3.1 Proses Boronisasi	28
	3.3.2 Pengujian Sampel.....	30
	3.4 Analisis Data Uji	32
4	HASIL DAN PEMBAHASAN	34
	4.1 Hasil Proses Boronisasi.....	34
	4.1.1 Lapisan Borid Pada Baja ST37	34
	4.1.2 Lapisan Borid Pada Baja S45C	36
	4.2 Hasil Uji Abrasif	37
	4.2.1 Pengujian Abrasif Sampel ST37	37
	4.2.2 Pengujian Abrasif Sampel S45C.....	41
	4.2.3 Perbandingan Uji Abrasif Antara ST37 Dan S45C.....	45
	4.3 Hasil Abrasif Pada Lapisan Borid.....	48
	4.3.1 Hasil Abrasif Pada Baja ST37.....	48
	4.3.2 Hasil Abrasif Pada Baja S45C	50
5	KESIMPULAN DAN SARAN	52
	5.1 Kesimpulan.....	52
	5.2 Saran	53
	DAFTAR REFERENSI.....	54
	LAMPIRAN.....	56

DAFTAR GAMBAR

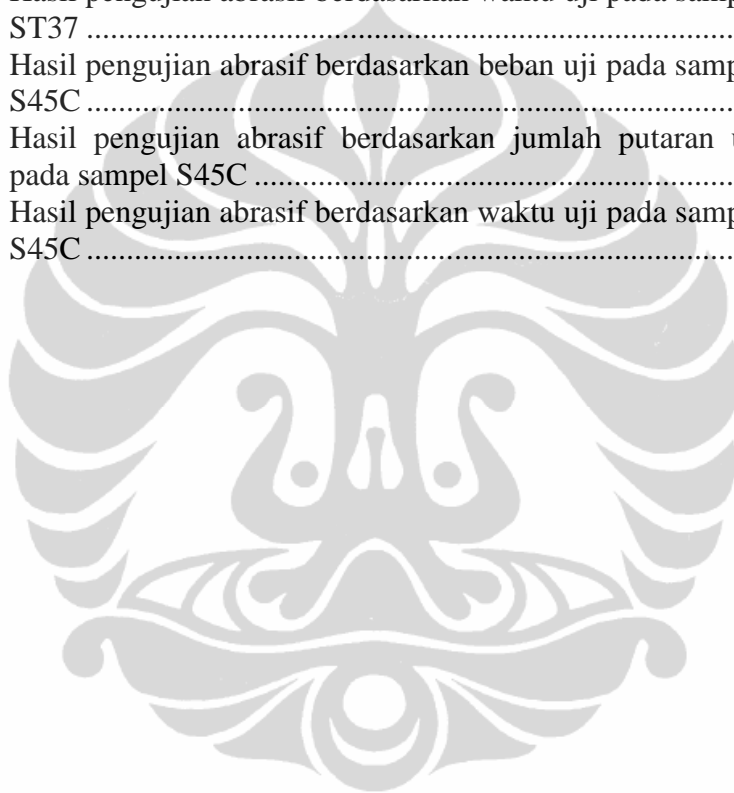
Gambar 2.1	Skema proses pertumbuhan dua lapisan borid	9
Gambar 2.2	Pengaruh unsur-unsur dalam baja terhadap ketebalan borid	12
Gambar 2.3	Daerah kontak antara dua permukaan	14
Gambar 2.4	Keausan adesif	15
Gambar 2.5	Keausan abrasif	16
Gambar 2.6	Keausan iksidasi / korosif	17
Gambar 2.7	Keausan lelah permukaan	18
Gambar 2.8	Keausan erosi	19
Gambar 2.9	Abrasi (a) beban rendah dan (b) beban tinggi	20
Gambar 2.10	Abrasi (c) pengelupasan	20
Gambar 2.11	Ketahanan aus vs kekerasan dari beberapa logam	21
Gambar 2.12	Kekerasan dari beberapa mineral dan paduan	22
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	27
Gambar 3.2	Sampel dan serbuk di dalam kontainer SS	29
Gambar 3.3	Tanur annealing K2/H Noberterm	29
Gambar 3.4	Abrasif tester merk Adamel Lhomargy	31
Gambar 3.5	Mikroskop optik Nikon type 114 yang dilengkapi kamera digital	32
Gambar 4.1	Struktur mikro (a) baja ST37 dan (b) lapisan borid pada baja ST37, dengan mikroskop optik pada pembesaran 200x	34
Gambar 4.2	SEI (Secondary Electron Image) lapisan borid pada baja ST37 dengan menggunakan SEM JEOL/JSM 6510 pada pembesaran 250x	35
Gambar 4.3	Struktur mikro (a) baja S45C dan (b) lapisan borid pada baja S45C, dengan mikroskop optik pada pembesaran 200x	36
Gambar 4.4	SEI (Secondary Electron Image) lapisan borid pada baja S45C dengan menggunakan SEM JEOL/JSM 6510 pada pembesaran 250x	36
Gambar 4.5	Pengaruh variasi beban uji pada jumlah abrasif pada sampel ST37	38
Gambar 4.6	Pengaruh variasi jumlah putaran uji pada jumlah abrasif pada sampel ST37	39
Gambar 4.7	Pengaruh variasi waktu uji pada ketahanan aus pada sampel ST37	41
Gambar 4.8	Pengaruh variasi beban uji pada jumlah abrasif pada sampel S45C	42
Gambar 4.9	Pengaruh variasi jumlah putaran uji pada jumlah abrasif pada sampel S45C	43
Gambar 4.10	Pengaruh variasi waktu uji pada ketahanan aus pada sampel S45C	45

Gambar 4.11	Perbandingan variasi beban uji pada jumlah abrasif pada sampel ST37 dan S45C	45
Gambar 4.12	Perbandingan variasi jumlah putaran uji pada jumlah abrasif pada sampel ST37 dan S45C	46
Gambar 4.13	Perbandingan variasi waktu uji pada ketahanan aus pada sampel ST37 dan S45C	47
Gambar 4.14	Hasil abrasif lapisan borid pada baja ST37 berdasarkan waktu boronisasi.....	48
Gambar 4.15	Abrasif lapisan borid pada baja ST37 berdasarkan waktu boronisasi dengan mikroskop optik.....	49
Gambar 4.16	Hasil abrasif lapisan borid pada baja S45C berdasarkan waktu boronisasi.....	50
Gambar 4.17	Abrasif lapisan borid pada baja S45C berdasarkan waktu boronisasi dengan mikroskop optik.....	50



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Karakteristik Lapisan Borid (FeB dan Fe ₂ B)	11
Tabel 2.2	Data termodinamika FeB dan Fe ₂ B	11
Tabel 4.1	Hasil pengujian abrasif berdasarkan beban uji pada sampel ST37	38
Tabel 4.2	Hasil pengujian abrasif berdasarkan jumlah putaran uji pada sampel ST37.....	39
Tabel 4.3	Hasil pengujian abrasif berdasarkan waktu uji pada sampel ST37	40
Tabel 4.4	Hasil pengujian abrasif berdasarkan beban uji pada sampel S45C	42
Tabel 4.5	Hasil pengujian abrasif berdasarkan jumlah putaran uji pada sampel S45C	43
Tabel 4.6	Hasil pengujian abrasif berdasarkan waktu uji pada sampel S45C	44



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Data Hasil Uji Abrasif	56
Lampiran 2	Diagram Fasa C-Fe	57
Lampiran 3	Diagram Fasa B-Fe	58
Lampiran 4	Diagram Fasa B-C-Fe	59



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Secara umum untuk meningkatkan kekuatan permukaan logam dapat dilakukan hal seperti: (1) mendifusikan atom-atom yang kecil pada permukaan logam agar terbentuk lapisan interstisial larutan padat, (2) mereaksikan secara kimiawi atom-atom yang didifusikan dengan logam dasar sehingga terbentuk fasa baru pada lapisan *superficial* (Ozdemir, 2009). Mereaksikan secara kimiawi atom-atom yang didifusikan dengan logam dasar sangat umum dilakukan di dunia industri (Petrova, 2008). Teknik peningkatan sifat permukaan logam yang sangat populer adalah teknik karbonisasi, nitridasi dan boronisasi.

Boronisasi merupakan perlakuan termokimia yang mampu membentuk lapisan yang sangat keras dan tahan aus pada permukaan logam. Teknik boronisasi dapat dilakukan pada berbagai macam bahan, seperti *ferrous metal*, *non-ferrous metal* dan bahan *cermet*. Teknik boronisasi pada bahan logam, umumnya dilakukan pada temperatur 700–1000 °C selama 1–10 jam (Ozdemir, 2009; Jain, 2002). Proses boronisasi dapat dilakukan dalam media padat, cair ataupun gas.

Pada penelitian ini pelapisan boron dilakukan dengan teknik *powder pack* pada baja karbon S45C dan baja karbon ST37 sebagai pembandingnya yang mudah diperoleh dipasaran. Pemilihan teknik pelapisan boron karena telah diketahui bahwa bahan boron karbida mempunyai kekerasan yang tinggi (ketiga setelah intan dan BN) dan mempunyai sifat stabil pada suhu tinggi (titik leleh lebih dari 2400°C), tekanan tinggi dan tahan aus. Proses boronisasi yang dilakukan adalah pada temperatur 1000°C selama 6, 8 dan 12 jam. Adapun analisis yang dilakukan salah satunya pengujian ketahanan abrasif. Karena uji ketahanan abrasif pada lapisan borid ini menjadi salah satu pengujian yang sangat penting, jika dilihat dari kegunaan dan tujuan dari pelapisan borid nanti.

Pelapisan boron dilakukan dengan harapan dapat menjadi alternatif untuk menggantikan pelapisan dengan bahan lain, sehingga dapat menghasilkan bahan yang lebih baik, murah dan mampu dibuat 100% kandungan lokal.

1.2 Perumusan Masalah

Dalam proses boronisasi dengan teknik *powder-pack* pada baja karbon digunakan serbuk B_4C sebagai pendonor boron, KBF_4 sebagai aktivator dan SiC sebagai bahan untuk pengencer. Komposisi tiap-tiap bahan dapat divariasikan, namun dalam penelitian ini digunakan satu perbandingan komposisi, yang disesuaikan dengan komposisi serbuk boronisasi yang dijual secara komersial. Perbandingan serbuk tersebut adalah 5% B_4C , 5% KBF_4 , dan 90% SiC. Proses boronisasi dilakukan pada temperatur 1000 °C selama 6, 8 dan 12 jam. Baja karbon yang digunakan adalah ST37 dengan S45C. Pada permukaan baja karbon akan terbentuk lapisan borid yaitu Fe_2B dan FeB.

Untuk memastikan lapisan borid yang terbentuk memiliki tingkat keausan abrasif yang baik, perlu dilakukan analisis mekanik pada lapisan borid tersebut. Komposisi *iron boride* yang terbentuk sangat mempengaruhi sifat mekanik khususnya keausan abrasif. Ketebalan lapisan merupakan salah satu parameter yang cukup penting dalam proses lapisan borid. Tebal lapisan yang terbentuk erat kaitannya dengan ketahanan korosi suatu produk proses lapisan borid. Oleh karena itu dimulai dari keausan abrasif inilah yang nantinya dapat digunakan sebagai acuan tingkat korosifitas dari material tersebut. Selain itu bila diketahui perilaku lapisan borid yang terbentuk dapat meningkatkan keefektifan dalam proses boronisasi pada baja karbon, terutama pada baja karbon ST37 dan S45C.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini dilakukan, untuk mengetahui hasil boronisasi dan hasil uji abrasif, yaitu:

1. Mempelajari performa ketahanan aus dari lapisan borid pada baja ST37 dan lapisan borid pada baja S45C.

2. Mempelajari performa ketahanan aus dari lapisan borid pada masing-masing waktu boronisasi.
3. Mengetahui secara visual hasil abrasif dari lapisan borid pada baja ST37 dan baja S45C dengan berbagai waktu boronisasi.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini, dapat mengetahui sifat mekanik lapisan borid yang memiliki tingkat keausan abrasif yang paling rendah pada kondisi proses tertentu, sehingga pada proses pelapisan selanjutnya dapat dilakukan lebih optimal dalam membentuk lapisan borid tersebut.

1.5 Batasan Penelitian

Dalam penelitian ini dilakukan analisis keausan abrasif lapisan borid yang terbentuk saat pelapisan boron pada baja karbon S45C dan ST37 dengan teknik *powder pack* pada temperatur 1000°C selama 6, 8 dan 12 jam. Analisis yang dilakukan adalah melakukan pengujian keausan abrasif dan pengamatan mikro struktur terhadap hasil abrasif yang telah dilakukan.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tesis ini disusun sebagai berikut:

Abstrak

Bab 1 Pendahuluan

Dalam bab ini disampaikan latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan penelitian dan sistematika penulisan.

Bab 2 Tinjauan Pustaka

Dalam bab ini disampaikan mengenai metode boronisasi *powder pack*, karakterisasi lapisan borid, keausan logam, mekanisme keausan, keausan abrasif, karakteristik lapisan dan alat uji keausan abrasif untuk pelapisan logam.

Universitas Indonesia

Bab 3 Metode Penelitian

Dalam bab ini dijelaskan metode penelitian, preparasi bahan dan alat, prosedur penelitian dan analisis data uji.

Bab 4 Hasil dan Pembahasan

Dalam bab ini disampaikan hasil-hasil karakterisasi dan analisisnya serta pembahasannya.

Bab 5 Kesimpulan dan Saran

Dalam bab ini disampaikan inti sari dari seluruh kegiatan penelitian dan merupakan jawaban dari tujuan yang ingin dicapai.



BAB 2 TINJAUAN LITERATUR

2.1 Boronisasi *Powder Pack*

Dalam boronisasi *powder pack* akan dijelaskan mengenai proses boronisasi dan mekanisme pembentukan lapisan besi borid dengan boronisasi *powder pack*.

2.1.1 Proses Boronisasi *Powder Pack*

Proses boronisasi yang dilakukan menggunakan serbuk yang terdiri atas campuran serbuk pendonor boron, aktivator dan diluen. Bahan yang diboronisasi diletakkan di dalam serbuk ini dalam sebuah kontainer. Selanjutnya keseluruhan kontainer dipanaskan pada temperatur antara 700 °C sampai 1000 °C selama 1 jam sampai 10 jam (Odzemir, 2009; Petrova, 2008; Jain, 2002). Pemanasan pada proses boronisasi dilakukan dalam kondisi gas inert. Pemanasan dilakukan sampai temperatur yang diinginkan dalam jangka waktu yang ditentukan. Kemudian didinginkan mencapai temperatur ruangan atau bila menginginkan pendinginan yang lebih cepat dapat menggunakan media pendingin tertentu. Teknik *powder pack* lebih mudah dilakukan dan lebih efektif dari segi pembiayaan dibanding teknik boronisasi lainnya (Odzemir, 2009). Namun, kesulitan yang dihadapi pada teknik boronisasi gas adalah penanganan gas pendonor boron yang sifatnya beracun (*diborane*, *boron trichloride* atau *boron trifluoride*). Berikut ini komposisi serbuk boronisasi yang tersedia secara komersial (Sinha, 1999):

1. 5% B₄C, 90% SiC, 5% KBF₄
2. 50% B₄C, 45% SiC, 5% KBF₄
3. 85% B₄C, 15% Na₂CO₃
4. 95% B₄C, 5% Na₂B₄O₇
5. Boron amorf (mengandung 95% sampai 97% B)

Penelitian yang menggunakan komposisi serbuk yang berbeda dari komposisi serbuk yang komersial sudah dilakukan diantaranya:

1. Gopalakrishnan (2002), yang melakukan perbandingan hasil pada proses boronisasi dengan temperatur proses yang kontinu terhadap temperatur proses yang disikluskan. Temperatur proses boronisasi kontinu dilakukan pada temperatur 1223 K selama 4 jam. Sedangkan temperatur proses boronisasi yang disikluskan, temperatur tungku dinaikan ke 1223 K, setelah tercapai ditahan selama 1 jam. Kemudian, tungku didinginkan sampai 873 K, saat tercapai temperatur tungku dinaikan kembali ke 1223 K. Bila sudah tercapai ditahan selama 1 jam pada temperatur tersebut. Siklus ini diulangi sampai siklus ke-empat. Diakhir siklus, saat diturunkan ke temperatur 873 K, temperatur ditahan terlebih dahulu selama 1 jam. Setelah tercapai, temperatur diturunkan kembali ke temperatur ruangan secara alami.
2. Martini (2004) melakukan boronisasi pada besi murni 99.9% dengan temperatur 850 °C selama 15 jam, menggunakan tiga macam komposisi serbuk, yaitu: 1) 10% B₄C, 90% SiC, 2) 100% B₄C dan 3) 90% B₄C, 10% KBF₄.
3. Bejar (2006) melakukan boronisasi pada SAE 1020, 1040, 4140, dan 4340 menggunakan tungku tahanan listrik. Proses dilakukan pada interval temperatur 1223 sampai 1323 K dengan lama pemanasan 2 dan 8 jam. Komposisi serbuk yang digunakan, yaitu: 1) 88.26% borax, 1.22% NH₄Cl, 46% NaCl, dan 9.06% SiC, 2) 73.26% borax, 1.22% NH₄Cl, 46% NaCl, dan 24.06% SiC dan 3) 63.26% borax, 1.22% NH₄Cl, 46% NaCl, dan 34.06% SiC.

2.1.2 Mekanisme Pembentukan Lapisan Besi Borid Dengan Boronisasi Powder Pack

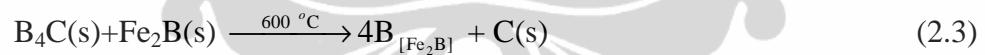
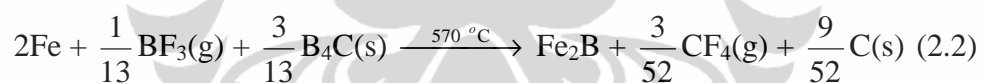
Boronisasi pada baja merupakan proses termokimia yang dikendalikan oleh reaksi permukaan dan difusi untuk membentuk lapisan besi borid yang tahan aus pada permukaan baja. Lapisan besi borid yang terbentuk bisa berupa fasa tunggal FeB, fasa Fe₂B atau gabungan antara keduanya. Begitu juga dengan unsur pepadu pada baja, dapat terbentuk sebagai fasa borid. Berikut ini

Universitas Indonesia

mekanisme yang disampaikan oleh Spence (2005) mengenai proses boronisasi *powder pack*. Informasi umum mengenai boronisasi *powder pack*:

1. Lapisan Fe₂B terbentuk pada potensial boron yang cukup rendah, dan berada diantara lapisan FeB (bila terbentuk) dengan matriks (logam dasar). Kemampuan difusi yang rendah pada lapisan FeB membatasi fluks boron yang bergerak menuju baja dan memicu terbentuknya pertumbuhan Fe₂B yang terarah.
2. Konsentrasi boron karbida dalam campuran mempengaruhi jenis lapisan borid yang terbentuk. Dengan demikian, konsentrasi boron karbida ini dapat diasumsikan sebagai komponen yang aktif dalam mekanisme reaksi.

Informasi ini digunakan sebagai dasar untuk menjelaskan bagaimana KBF₄ mengaktivasi proses boronisasi pada baja. Mekanisme aktivasi ini terdiri atas tiga tahap, yang digambarkan oleh persamaan 2.1, 2.2 dan 2.3, berikut ini (Spence, 2005):



Persamaan 2.1, menjelaskan terjadinya proses boronisasi diawali dengan pelepasan gas BF₃ pada temperatur 530 °C. setelah terbebas, gas BF₃ bebas untuk bereaksi dengan unsur lain dalam *powder pack* dan baja. Berdasarkan analisis termodinamika reaksi antara BF₃ dengan baja ataupun dengan SiC tidak dapat langsung terjadi.

Persamaan 2.2, menggambarkan pembentukan besi borid pada permukaan baja yang disebabkan oleh reaksi antara BF₃ dengan B₄C dan besi. Lapisan besi borid yang terbentuk pertama kali adalah Fe₂B, dan setelah terbentuk, lapisan ini akan menjadi pembatas antara matriks dengan serbuk dan menghambat reaksi

lebih lanjut antara serbuk dengan baja. Oleh karena, BF_3 tidak dapat bereaksi langsung dengan lapisan besi borid. Pertumbuhan lapisan besi borid terjadi melalui mekanisme reaksi yang berbeda.

Persamaan 2.3, menggambarkan pertumbuhan lapisan borid selanjutnya. Reaksi ini didukung data empiris dan analisis termodinamika, dimana pertumbuhan lapisan besi borid disebabkan reaksi antara besi borid dengan B_4C . Reaksi ini akan melepaskan boron dan karbon. Fasa FeB dan Fe_2B dapat terjadi, kemungkinan tersebut sangat dipengaruhi konsentrasi boron yang berada diluar. Sepanjang reaksi pada persamaan 2.3 berlangsung, boron mampu berdifusi melalui lapisan Fe_2B sampai batas lapisan Fe_2B dengan matriks. Bila konsentrasi boron diluar permukaan Fe_2B berkisar 9%, hanya fasa Fe_2B yang akan terus tumbuh. Bila konsentrasi boron mencapai 16%, fasa FeB akan terbentuk dan tumbuh di atas lapisan Fe_2B menghasilkan lapisan besi borid dengan dua fasa. Kelebihan boron yang mampu berdifusi akan membentuk zona difusi di bawah lapisan borid. SiC sebagai diluen B_4C membantu dalam mempertahankan konsentrasi boron yang bebas tetap rendah. Selain itu, SiC mencegah pengerasan dan *sintering* pada *powder pack*.

Reaksi pada persamaan 2.4 harus dihindari. Pembentukan *oxygenyl boron flouride* dapat menghambat proses boronisasi. *Oxygenyl boron flouride* akan menghambat pembebasan gas BF_3 . Terhambatnya pembentukan gas BF_3 akan menghambat juga pembentukan boron bebas. Dengan demikian pembentukan awal lapisan besi borid pada permukaan baja akan terhambat dan mungkin tidak akan terjadi. Reaksi tersebut dapat dihambat bila atmosfer proses boronisasi menggunakan gas inert.



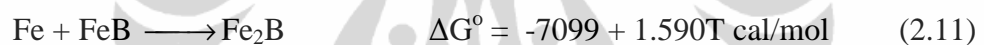
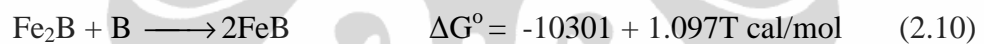
Persamaan 2.5 dan 2.6 merupakan reaksi yang menunjukkan bila B_4C bereaksi langsung dengan Fe. Hal ini sangat mungkin, tetapi reaksi ini akan

menghasilkan endapan C dan tidak akan membentuk pertumbuhan lapisan borid seperti kenyataannya. Sehingga mekanisme pelepasan gas BF_3 lebih direkomendasikan dalam menjelaskan mekanisme boronisasi *powder pack*.

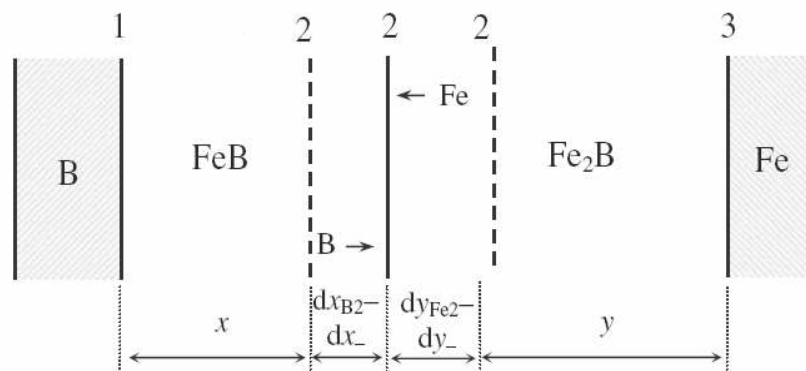


Persamaan 2.7 dan 2.8 merupakan reaksi yang menunjukkan bila gas BF_3 bereaksi langsung dengan Fe. Reaksi ini akan menghasilkan gas F_2 yang tidak memenuhi proses reduksi pada energi bebas Gibbs

Selanjutnya Bindal (1999) menggambarkan pertumbuhan lapisan borid selanjutnya setelah terbentuk dipermukaan pada persamaan 2.10 dan 2.11, sebagai berikut:



Kedua persamaan ini menggambarkan reaksi B dengan lapisan Fe_2B yang akan membentuk FeB dan juga reaksi Fe dengan FeB yang akan membentuk Fe_2B dapat terjadi dengan spontan. Gambar 2.1 memberikan ilustrasi bagaimana mekanisme pertumbuhan lapisan borid didalam matriks melalui persamaan 2.9 sampai persamaan 2.10:



Gambar 2.1 Skema proses pertumbuhan dua lapisan borid.

Pada awal proses boronisasi, konsentrasi boron yang cukup untuk membentuk dua lapisan borid berdifusi ke dalam baja. Saat itu terbentuk lapisan Fe_2B pada permukaan 3 sesuai dengan reaksi pada persamaan 2.9. Selama proses boronisasi berlangsung dan konsentrasi boron yang cukup, reaksi terus berlangsung sesuai dengan reaksi pada persamaan 2.10, membentuk lapisan FeB diatas permukaan 2, sehingga lapisan Fe_2B tidak mendapatkan sumber boron dari diluar untuk tumbuh.

Seperti yang dituliskan oleh L.G. Yu (2005), pada saat konsentrasi efektif boron pada *powder pack* cukup tinggi untuk membentuk fasa FeB , maka fasa FeB dan Fe_2B akan terbentuk dan pertumbuhan terus terjadi. Selama proses boronisasi terjadi, ada kemungkinan lapisan FeB terdekomposisi menjadi Fe_2B dengan melepaskan boron pada permukaan 2. Namun, konsentrasi boron ini tidak cukup untuk menembus lapisan Fe_2B menuju ke permukaan 3. Pada kondisi ini boron akan bereaksi dengan Fe_2B membentuk FeB kembali seperti dituliskan pada persamaan 2.10. Meskipun total reaksi terlihat seimbang antara pembentukan FeB dan Fe_2B , ternyata kondisi permukaan antara lapisan FeB dengan permukaan lapisan Fe_2B dalam kondisi yang dipenuhi (*oversaturated*) oleh atom boron, dengan demikian selain bereaksi dengan Fe_2B , ada atom-atom boron yang mampu berdifusi ke permukaan 3. Atom-atom boron ini yang akan menjadi satu-satunya sumber untuk pertumbuhan kedua lapisan. Sehingga satu ketika pertumbuhan lapisan FeB terhenti dan cenderung berkurang dengan bertambahnya lapisan Fe_2B . Serupa dengan atom Fe yang mampu berdifusi ke permukaan 2 dan bereaksi dengan FeB menjadi Fe_2B . Tetapi, atom Fe ini tidak bisa bereaksi dengan FeB yang berada di permukaan 1. Dengan demikian setiap lapisan hanya akan tumbuh di masing-masing permukaannya dengan mendorong lapisan yang lain ke arah yang berlawanan. Proses pertumbuhan Fe_2B yang terus bertambah bila konsentrasi efektif boron berkisar antara batas atas konsentrasi boron pada fasa Fe_2B dengan batas bawah konsentrasi boron pada fasa FeB , fasa FeB akan cenderung berkurang, tetapi total keseluruhan lapisan borid terus bertambah sampai konsentrasi efektif boron lebih rendah dari batas bawah konsentrasi boron pada fasa Fe_2B atau fasa FeB sudah berubah seluruhnya bergantung mana yang

lebih dulu terpenuhi. Pada kondisi akhirnya pertumbuhan lapisan borid akan terhenti.

2.2 Karakteristik Lapisan Besi Borid

Pembentukan lapisan tunggal fasa Fe_2B lebih diinginkan daripada lapisan dua fasa FeB dan Fe_2B . Lapisan fasa FeB memiliki karakteristik yang lebih getas dibanding dengan Fe_2B . Dimana fasa FeB terbentuk akibat tegangan tarik dan fasa Fe_2B terbentuk akibat tegangan kompresi (Bindal, 2008). Tabel 2.1 dan tabel 2.2 memberikan beberapa perbandingan sifat-sifat umum antara fasa FeB dengan Fe_2B (Sinha 1999, Binnewies 2002):

Tabel 2.1 Karakteristik Lapisan Borid (FeB dan Fe_2B).

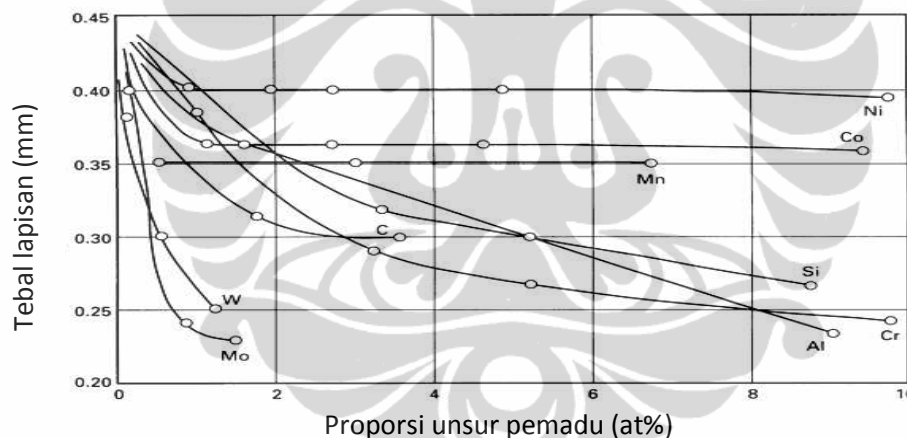
Sifat	FeB	Fe_2B
Kekerasan mikro	19-21 Gpa	18-20 Gpa
Modulus elastis	590 Gpa	285-295 Gpa
Densitas	6.75 g/cm ³	7.43 g/cm ³
Koef. muai panjang*	23 ppm/°C	7.85 ppm/°C
Komposisi	16.23 wt%B	8.83 wt%B
Struktur kristal	Orthorombik	Tetragonal
Parameter kisi	a=4.053 Å b=5.495 Å c=2.946 Å	a=5.078 Å c=4.249 Å

* pada temperatur 200 °C sampai 600 °C.

Tabel 2.2 Data termodinamika FeB dan Fe_2B .

	FeB	Fe_2B
ΔH_{298}° (padat)	-72.8 kJ / mol	-102.5 kJ / mol
S_{298}° (padat)	31 J / (mol K)	51.7 J / (mol K)
C_p (298K– titik leleh)	$49.96 + 10 \times 10^{-3} T - 1.06 \times 10^{-6} T^2$ J / (mol K)	$78.87 + 14.14 \times 10^{-3} T - 1.46 \times 10^{-6} T^2$ J / (mol K)
Titik leleh	1863 K	1662 K

Sifat-sifat mekanik dari besi borid sangat ditentukan oleh komposisi matriksnya. Bentuk gigi gergaji sangat dominan terbentuk pada matriks besi murni, baja karbon rendah tanpa padamu, dan baja paduan rendah. Karbon, silikon dan aluminium tidak terlarut di dalam lapisan borid. Unsur-unsur ini akan terdorong oleh boron, dari permukaan dan keluar dari lapisan borid menuju matriks. Unsur-unsur ini akan menurunkan ketahanan aus lapisan borid. Unsur nikel akan menurunkan kedalaman lapisan borid dan memperhalus stuktur gigi gergaji dari lapisan borid (Sinha, 1999). Unsur nikel juga ditemukan sebagai presipitat Ni_3B pada lapisan fasa FeB . Keberadaan krom mampu merubah struktur dan sifat besi borid. Mn, W, Mo dan W akan menurunkan kedalaman lapisan borid dan memperhalus stuktur gigi gergaji lapisan borid. Gambar 2.2 merupakan grafik yang menggambarkan pengaruh beberapa unsur padamu pada baja terhadap ketebalan lapisan borid:



Gambar 2.2 Pengaruh unsur-unsur dalam baja terhadap ketebalan lapisan borid.

Peningkatan konsentrasi karbon di dalam baja akan menurunkan ketebalan lapisan borid dan meningkatkan kekerasannya. Unsur karbon tidak terlarut di dalam FeB dan Fe_2B sehingga akan terdorong oleh lapisan borid, membentuk zona poli-fasa yang terdiri atas karbida dan borokarbida antara lapisan Fe_2B dengan matriks. Salah satu pengaruh unsur krom sebagai unsur padamu dalam baja saat boronisasi adalah mendorong terbentuknya fasa FeB (Bejar, 2006). Pengaruh lainnya adalah meningkatkan kekerasan dan kegetasan lapisan permukaan.

2.3 Keausan Logam

Sifat yang dimiliki oleh material terkadang membatasi kinerjanya. Namun demikian, jarang sekali kinerja suatu material hanya ditentukan oleh satu sifat, tetapi lebih kepada kombinasi dari beberapa sifat. Salah satu contohnya adalah ketahanan-aus (wear resistance) merupakan fungsi dari beberapa sifat material (kekerasan, kekuatan, dll), friksi serta pelumasan.

Keausan dapat didefinisikan sebagai kerusakan permukaan akibat atau lingkungan dan sering ditemukan pada komponen mesin yang bergerak. Keausan juga dapat dianggap suatu fenomena permukaan berupa terlepasnya fragmen dari permukaan. Dengan demikian keausan adalah pelepasan materi dari permukaan padat akibat adanya kontak permukaan dan aksi mekanis (Gabe, 1978).

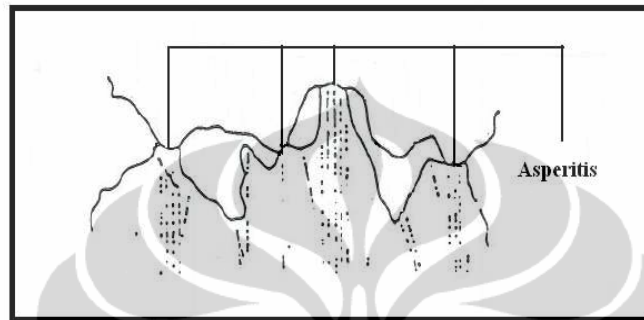
Keausan bukan merupakan sifat dasar material, melainkan respon material terhadap sistem luar (kontak permukaan). Keausan merupakan hal yang biasa terjadi pada setiap material yang mengalami gesekan dengan material lain. Material apapun dapat mengalami keausan disebabkan oleh mekanisme yang beragam.

Berdasarkan jenis kontak yang menyebabkan perpindahan dan lepasnya partikel-partikel logam dari permukaannya, keausan dapat dibagi menjadi tiga jenis, yaitu:

1. Keausan adesif (adhesive wear), yang disebabkan oleh kontak dengan logam lain.
2. Keausan abrasif (abrasive wear), yang disebabkan oleh kontak dengan partikel abrasif logam maupun non-logam.
3. Keausan erosi (erosion wear), yang disebabkan oleh kontak dengan cairan atau gas yang bergerak dan biasanya diikuti dengan beberapa bentuk korosi.
4. Keausan lelah (fatigue wear), yang disebabkan akibat interaksi permukaan dimana permukaan yang mengalami beban berulang.
5. Keausan oksidasi/korosif (corrosive wear), yang disebabkan adanya perubahan kimiawi material di permukaan oleh faktor lingkungan.

2.4 Mekanisme Keausan

Permukaan benda padat sebenarnya terdiri dari kekasaran-kekasaran. Saat dua permukaan saling kontak, daerah kontak sebenarnya sama dengan jumlah kontak individu kekasaran-kekasarannya. Puncak kekasaran yang ada yang menjadi titik singgung antara dua permukaan disebut asperitis.



Gambar 2.3 Daerah kontak antara dua permukaan.

Keausan biasanya ditimbulkan oleh adanya aksi mekanis berupa gesekan. Faktor adesi dan deformasi merupakan dua faktor penting yang menimbulkan gesekan antara dua permukaan yang saling kontak dalam kondisi bergerak relatif dan tanpa pelumasan. Gesekan mengakibatkan lepasnya sejumlah fragmen dari materi yang bergesekan. Dengan kata lain, selama gesekan berlangsung terjadi perpindahan logam dari satu permukaan logam ke permukaan logam lain.

Perpindahan logam dalam skala makro diawali dengan perlekatan antara permukaan logam akibat gaya tekan. Adanya pergerakan relatif antara dua permukaan logam menimbulkan perpatahan pada logam yang lunak. Bagian logam yang lunak dipindahkan ke logam yang lebih keras di atasnya. Sedangkan dalam skala mikro perpindahan logam terjadi melalui proses difusi atom antar logam melewati kontak antar permukaan logam.

Dengan demikian gesekan akan menyebabkan terjadinya kerusakan pada daerah saling kontak. Kerusakan tersebut dapat berupa aksi potong, deformasi berulang, serta kedalaman koyakan. Kerusakan inilah yang menyebabkan lepasnya fragmen dari permukaan logam.

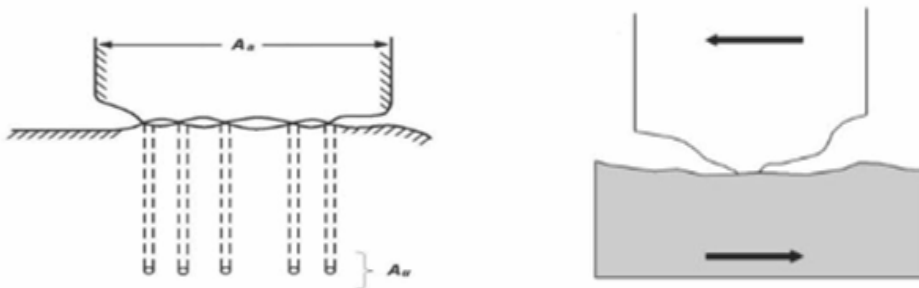
Sebagaimana telah disebutkan pada bagian pengantar, material jenis apapun akan mengalami keausan dengan mekanisme yang beragam, yaitu keausan adesif, keausan abrasif, keausan erosi, keausan fatik dan keausan oksidasi/korosi (Gabe, 1978).

2.4.1 Keausan Adesif

Keausan adesif terjadi jika material padat tergelincir di atas material padat lain sehingga timbul pelekatan. Pada saat dua permukaan padatan tersebut. Semakin besar padatan semakin banyak tonjolan pada permukaannya, yang berarti daerah kontak antar permukaan semakin besar. Adanya interfensi mekanis dapat berarti adanya gaya horizontal yang memisahkan kedua permukaan tersebut. Sebagai reaksi, gaya tarik menarik kedua permukaan tersebut akan menarik materi dari permukaan dengan gaya adesi yang lebih lemah ke permukaan lain yang berdaya adesi lebih kuat, sehingga menimbulkan pelepasan materi atau fragmen. Apabila fragmen tersebut masuk diantara permukaan kontak, dapat timbul keausan adesif.

Ketahanan suatu logam terhadap keausan adesif dapat diperbaiki dengan cara antara lain:

1. Menjaga kebersihan permukaan logam.
2. Menghindari kontak antar logam.
3. Meningkatkan kekerasan bahan untuk menahan indentasi awal.
4. Meningkatkan ketangguhan logam untuk menahan koyaknya partikel logam.
5. Memperhalus permukaan untuk menghilangkan tonjolan.



Gambar 2.4 Keausan adesif.

2.4.2 Keausan Abrasif

Keausan abrasif berlangsung bila partikel-partikel keras meluncur atau bergulir di bawah tekanan melintasi suatu permukaan, atau bila suatu permukaan keras menggesek permukaan lain. Partikel abrasif dari objek yang lebih keras cenderung menggores atau mencungkil bahan yang lebih lunak sehingga menyebabkan koyaknya logam lunak tersebut. Kekerasan bahan merupakan faktor utama yang mempengaruhi keausan abrasif disamping ketangguhannya.

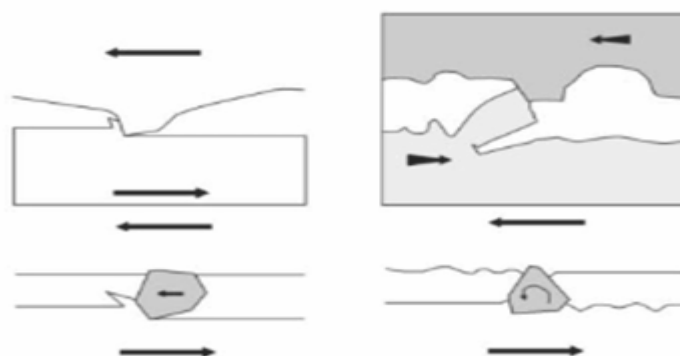
Partikel pengabrasi dapat berupa fragmen lepas atau material non-logam seperti karbida silikon, pasir dan oksida. Akibat proses ini akan terbentuk celah keausan yang searah dengan gerakan partikel atau padatan pengabrasi. Biasanya keausan suatu logam tidak hanya melibatkan satu jenis mekanisme keausan. Kebanyakan keausan adesif dan keausan abrasif berlangsung bersama-sama.

Faktor yang berperan dalam kaitannya dengan ketahanan material terhadap keausan abrasif antara lain:

1. Material hardness.
2. Kondisi struktur mikro.
3. Ukuran abrasive.
4. Bentuk abrasif.

Bentuk kerusakan permukaan akibat keausan abrasif, antara lain:

1. Scratching.
2. Scoring.
3. Gouging.



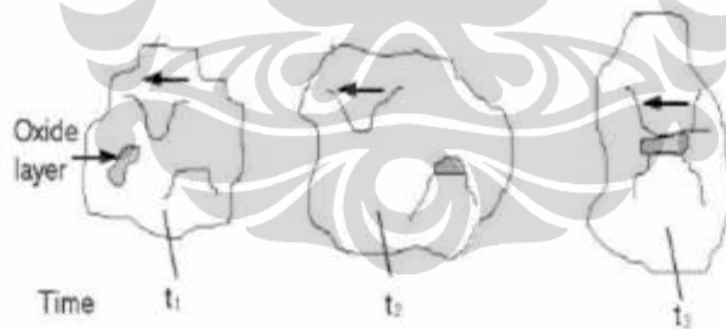
Gambar 2.5 Keausan abrasif.

2.4.3 Keausan Oksidasi / Korosif

Selain kontak antar logam dan pergerakan relatif, interaksi dengan lingkungan juga menjadi faktor utama penyebab timbulnya keausan korosif. Proses kerusakan dimulai dengan adanya perubahan kimiawi material di permukaan oleh faktor lingkungan. Kontak dengan lingkungan ini menghasilkan pembentukan lapisan pada permukaan dengan sifat yang berbeda-beda dengan material induk. Sebagai konsekuensinya, material akan mengarah kepada pepatahan interface antara lapisan permukaan dan material induk dan akhirnya seluruh lapisan permukaan itu akan tercabut

Proses keausan ini berlangsung melalui tahapan-tahapan berikut:

1. Terjadi reaksi antara permukaan logam dengan lingkungan yang mengakibatkan kekasaran.
2. Terjadi proses keausan, baik akibat proses adesi atau abrasi, pada akibat reaksi dengan lingkungan tersebut.
3. Selanjutnya permukaan materi bereaksi kembali dengan lingkungan, tahapan ini berlangsung berulang-ulang.

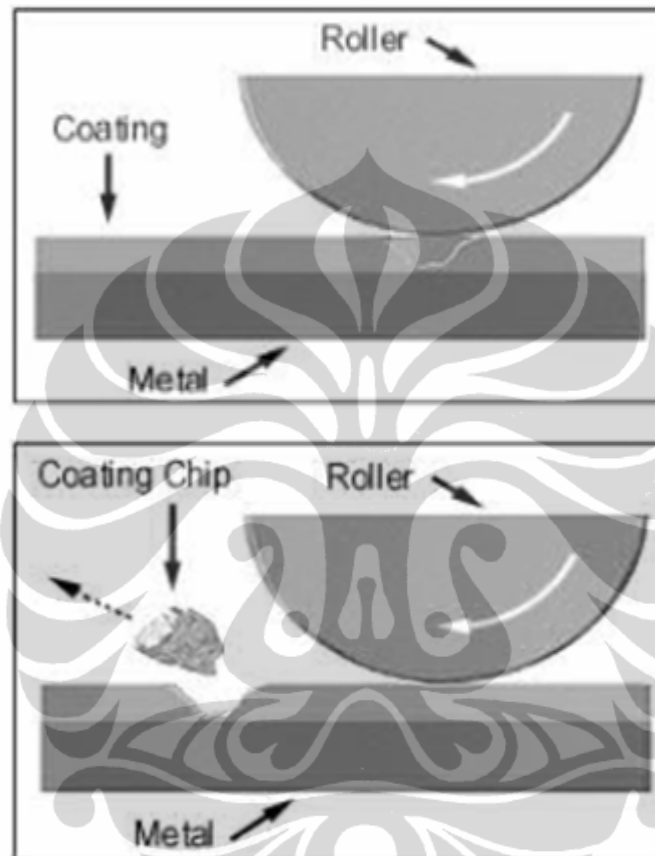


Gambar 2.6 Keausan oksidasi / korosif.

2.4.4 Keausan Lelah Permukaan

Merupakan mekanisme yang relatif berbeda dibandingkan dengan dua mekanisme sebelumnya, yaitu dalam hal interaksi permukaan. Baik keausan adesif maupun keausan abrasif melibatkan hanya satu interaksi, sementara pada keausan lelah permukaan dibutuhkan interaksi multi.

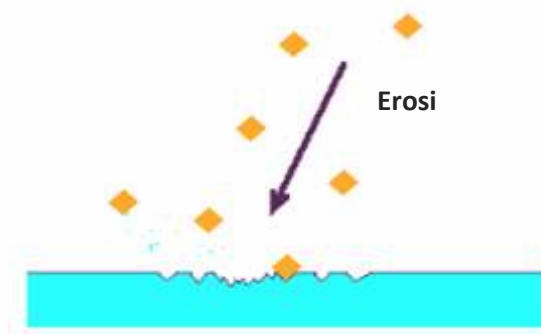
Keausan ini terjadi apabila materi padat mengalami pembebanan dinamis, sehingga timbul tegangan yang berubah-ubah. Retakan kecil pada permukaan atau sub permukaan serta sudut-sudut atau taktik pada disain menjadi tempat terjadinya konsentrasi tegangan yang merupakan awal keausan. Akibat pembebanan dinamis, akan terjadi penjalaran retak hingga terbentuk fragmen keausan.



Gambar 2.7 Keausan lelah permukaan.

2.4.5 Keausan Erosi

Proses erosi disebabkan oleh gas dan cairan yang membawa partikel padatan yang membentur permukaan material. Jika sudut benturannya kecil, keausan yang dihasilkan analog dengan abraif. Namun, jika sudut benturannya membentuk sudut gaya normal (90°), maka keausan yang terjadi akan mengakibatkan *brittle failure* pada permukaannya, seperti terlihat pada gambar 2.8:



Gambar 2.8 Keausan erosi.

2.5 Keausan Abrasif

Keausan abrasif oleh ASTM didefinisikan sebagai pergerakan partikel keras terhadap partikel yang lebih lunak yang bergerak sepanjang permukaan partikel lunak tersebut. Keausan dapat juga diartikan sebagai kerusakan pada permukaan yang umumnya meliputi kehilangan material yang terhadap dan pergerakan relatif diantara permukaan dan kontak permukaan.

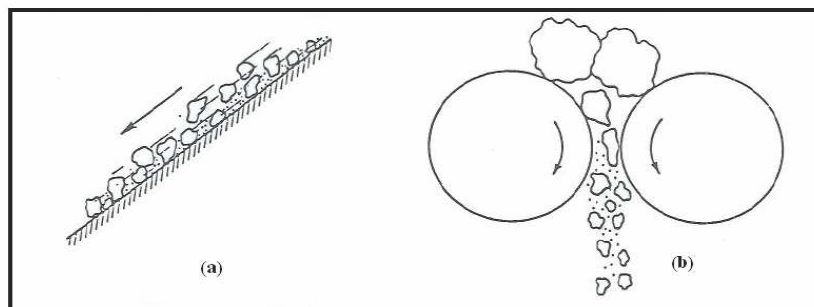
Ketika dua permukaan saling bersentuhan, keausan terjadi pada kedua permukaan. Harga keausan dari permukaan material yang berabrasi tergantung dari karakteristik dari masing-masing permukaan, kehadiran abrasif diantara permukaan pertama dan kedua, kecepatan kontak dan pengaruh lingkungan lainnya.

Abrasif dikategorikan menurut jenis dari kontak yang terjadi, termasuk juga hubungan dengan lingkungan. Jenis dari kontak ini adalah keausan dua benda dan keausan tiga benda. Pembentukan terjadi ketika material abrasif tergelincir sepanjang permukaan dan akhirnya partikel abrasif akan terjebak diantara permukaan yang satu dan permukaan lainnya.

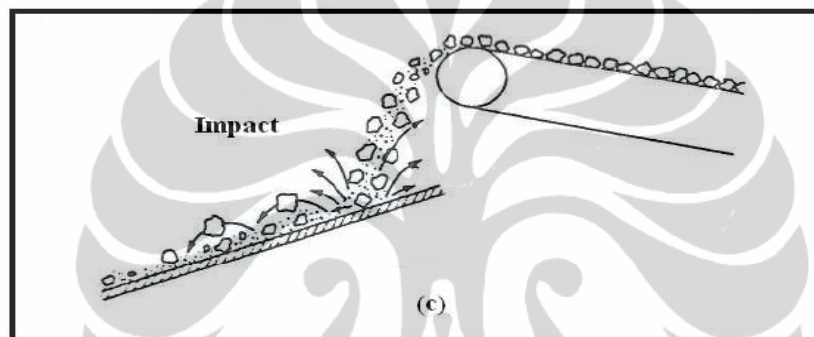
Abrasif dapat dibedakan atas tiga jenis, yaitu:

1. Abrasif beban rendah, terjadi ketika abrasif yang tertinggal relative utuh, sebagai contoh pada kayu dengan kertas pasir.
2. Abrasif beban tinggi, terjadi ketika partikel abrasive dihancurkan, sebagai contoh dalam bola gilingan dimana kedua-duanya, baik bola pengiling dan bijih mengalami keausan.

3. Abrasif pengelupasan, terjadi ketika material kasar mengelupas partikel dari permukaan yang mengalami keausan.



Gambar 2.9 Abrasi (a) beban rendah dan (b) beban tinggi.



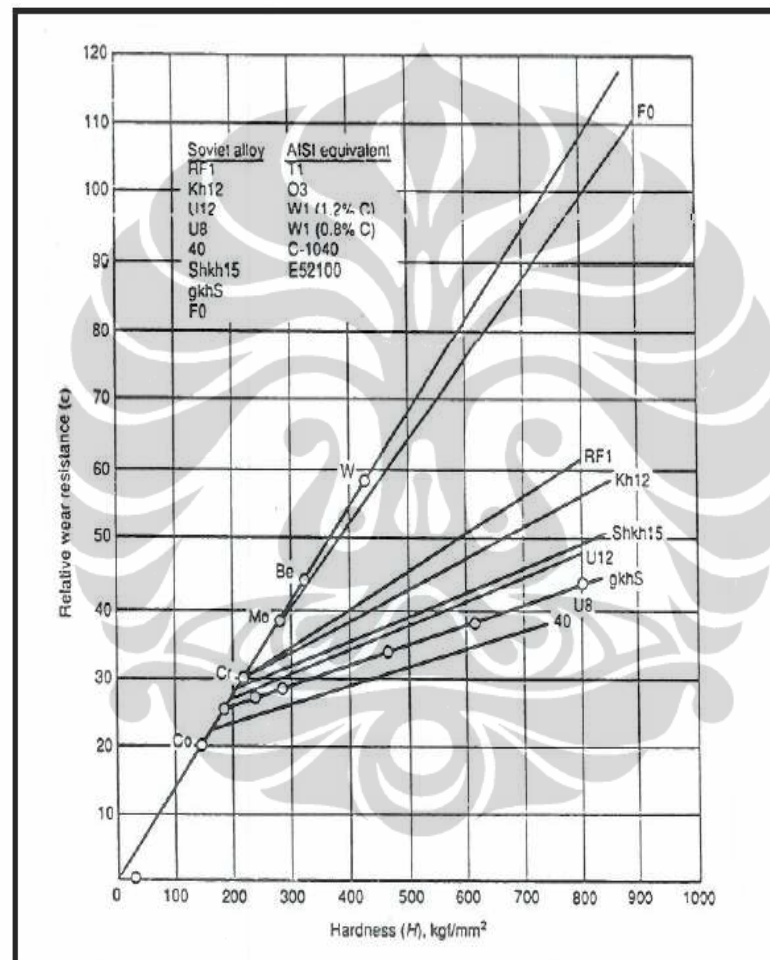
Gambar 2.10 Abrasi (c) pengelupasan.

2.5.1 Pengaruh Sifat Material Pada Keausan Abrasif

Sifat-sifat material berhubungan dengan sifat keausan abrasive dari material. Sifat-sifat material yang dimaksud disini adalah: kekerasan, modulus elastisitas, kekuatan luluh, temperatur lebur, struktur kristal, struktur mikro dan komposisi.

Dari beberapa percobaan yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa kekerasan sebanding dengan ketahanan aus dari suatu material. Semakin tinggi kekerasan permukaan logam, maka semakin tinggi ketahanan logam tersebut terhadap keausan. Keausan abrasif juga tergantung dari struktur kristal dan orientasi. Alison memperlihatkan bahwa logam dengan struktur kubik memiliki keausan lebih tinggi dibandingkan dengan logam yang memiliki struktur hexagonal.

Endapan inkoheren yang keras atau partikel seperti karbida dapat digunakan untuk menurunkan keausan abrasif. Bila partikel inkoheren lebih besar dari butir abrasif yang mengabrasif permukaan, akan menurunkan material yang aus. Hubungan antara ukuran partikel dan ukuran butiran abrasif juga merupakan faktor yang penting. Butir abrasif yang besar cenderung akan menghasilkan bentuk keausan yang besar. Ukuran abrasif yang kecil, relatif terhadap partikel keras dan celah antara partikel besar (Avner, 1988).



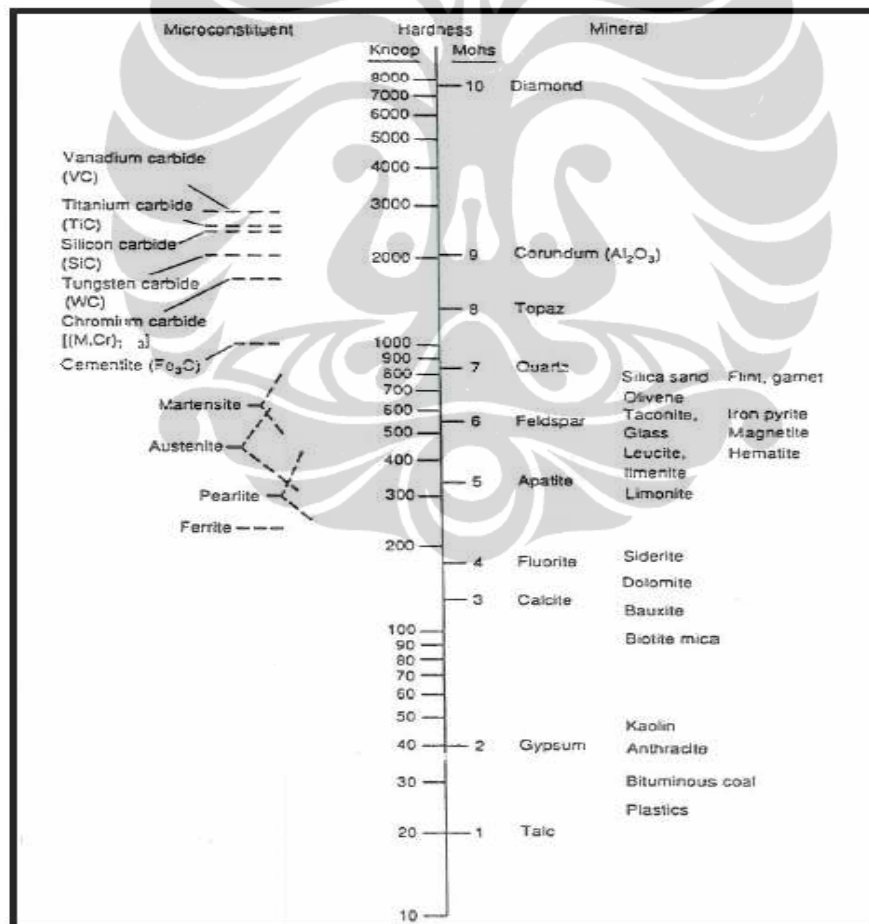
Gambar 2.11 Ketahanan aus vs kekerasan dari beberapa logam.

2.5.2 Pengaruh Lingkungan Terhadap Keausan Abrasif

Lingkungan memiliki pengaruh yang besar terhadap keausan abrasif. Faktor lingkungan yang mempengaruhi keausan abrasif adalah: jenis abrasif dan karakteristiknya, temperatur, kecepatan kontak dan beban.

1. Abrasif

Abrasif yang digunakan dalam keausan abrasif tertentu jenis dan ukurannya, dimana penggantian abrasif akan menyebabkan perubahan harga keausannya. Kekerasan dari partikel abrasif sangat penting dalam hal ketahanan material terhadap keausan abrasif. Kekerasan partikel abrasif harus lebih tinggi dari kekerasan logam yang mengalami keausan. Selama kekerasan abrasif melebihi kekerasan material maka abrasif sanggup untuk menembus permukaan dan memotong material. Bentuk dari partikel abrasif penting karena akan mempengaruhi bentuk dari jejak keausan yang terjadi pada permukaan logam. Hal ini juga akan mempengaruhi beban kontak dan transisi dari kontak elastik ke plastik. Keausan akan lebih sedikit terjadi bila bentuk abrasif bulat jika dibandingkan dengan bentuk abrasif yang runcing/tajam (Avner, 1988).



Gambar 2.12 Kekerasan dari beberapa mineral dan paduan.

2. Temperatur

Keausan abrasif akan meningkat bila temperatur meningkat, karena kekerasan dan tegangan luluh akan menurun dengan meningkatnya temperatur tersebut. Hal ini terjadi karena pada saat pengabrasian sejumlah kecil daerah akan mengalami panas secara adiabatik. Pada saat temperatur tinggi, aliran tegangan logam akan mengalami pengurangan. Sebagai hasil akhir, daerah sektor material yang digesek mempunyai temperatur yang hampir sama, tidak tergantung temperatur awal dan laju keausan yang serupa.

3. Kecepatan Kontak

Laju keausan abrasif akan meningkat dengan meningkatnya kecepatan kontak dalam range 0-2.5 m/s. Peningkatan laju keausan ini kemungkinan diakibatkan oleh pemanasan gesekan. Pengaruh dari kecepatan kontak ini sebenarnya cukup kecil karena semua abrasif terjadi pada daerah dekat proses adiabatik.

4. Beban

Keausan abrasif sebanding dengan beban yang diterima oleh material yang terabrasi, tetapi hal ini tidak berarti bila beban yang diberikan untuk menghancurkan partikel abrasif cukup besar.

2.6 Karakteristik Lapisan

Dalam karakteristik lapisan menjelaskan mengenai ketebalan lapisan dan sifat mekanis lapisan.

2.6.1 Ketebalan Lapisan

Ketebalan lapisan merupakan salah satu parameter yang cukup penting dalam proses lapisan borid. Tebal lapisan yang terbentuk erat kaitannya dengan ketahanan korosi suatu produk proses lapisan borid. Ketebalan lapisan suatu bahan/benda logam haruslah memberikan toleransi untuk kemungkinan terjadinya cacat pada lapisan. Jika terjadi lubang-lubang yang menembus sampai ke logam dasar, yang sifatnya lebih anodik korosi lebih cepat. Pada lapisan yang sifatnya anodik, ketebalan lapisan berbanding lurus dengan lamanya pencegahan korosi

Universitas Indonesia

yang dilakukan terhadap logam dasar. Dengan kata lain bahwa semakin tebal lapisan, maka perlindungan terhadap korosi logam dasar juga akan semakin lama. Namun untuk ekonomisnya, sasarannya adalah tebal seminimum mungkin untuk penghematan biaya dan sebagainya.

2.6.2 Sifat Mekanis Lapisan

Diantara sifat mekanis yang ada, kekerasan lapisan lebih diperhatikan dengan alasan sebagai pelindung logam dasar terhadap keausan/gesekan. Penyebab terbentuknya tingkat kekerasan yang tinggi pada lapisan, dikarenakan:

1. Penyisipan atom hidrogen

Atom hidrogen hasil reduksi sebagian terdifusi dan terjebak pada kristal logam secara intertisi yang akan menimbulkan distorsi pada kisi kristal logam. Akibat distorsi tersebut terjadi tegangan kompresi di dalam kristal yang menyebabkan kekerasan jadi tinggi.

2. Dislokasi

Selain dari penyisipan hidrogen, penumpukkan dislokasi dinyatakan sebagai salah satu penyebab tingginya kekerasan deposit. Dislokasi terbentuk karena pengendapan logam yang sangat cepat, sehingga menghasilkan kekosongan. Kekosongan ini akan mengarah pada pembentukan dislokasi sisi. Selanjutnya, penumpukkan dislokasi akan meningkatkan kekerasan lapisan.

3. Penyusutan kristal

Glasston dan Graham mengemukakan bahwa ion logam yang terhidrasi di larutan harus mempunyai suatu tingkat energi tertentu untuk mengalahkan energi aktivasi dehidrasi dan deposisi. Setelah terjadi reduksi, kelebihan energi aktivasi diubah dalam bentuk panas, sehingga proses kristalisasi terjadi pada temperatur yang lebih tinggi. Pada saat pendinginan akan terjadi penyusutan dan antara atom di dalam kisi Kristal akan saling berkontraksi satu sama lainnya, yang menghasilkan tegangan kompresi. Dengan adanya tegangan kompresi ini kekerasan menjadi meningkat.

2.7 Alat Uji Keausan Abrasif Untuk Pelapisan Logam

Metode yang digunakan untuk pengujian ketahanan aus lapisan tipis logam atau non-logam pada logam menurut standar ini dapat dilakukan dengan 5 macam metode yang berbeda, yaitu:

1. Pengujian keausan abrasif dengan metode penekanan abrasif.

Pengujian ini adalah untuk menguji ketahanan aus dari lapisan tipis logam dengan metode dimana abrasif diinjeksikan ke permukaan sampel yang dipercepat dengan udara bertekanan. Abrasif yang digunakan adalah karbida silikon dengan ukuran 100 mesh.

2. Pengujian keausan abrasif dengan metode gerakan berbalasan.

Pengujian ini bertujuan untuk melakukan pengujian ketahanan aus dari suatu lapisan tipis logam terhadap beban gesek yang digunakan melalui suatu gerakan membalas ke sampel dan cincin gesekan dengan suatu abrasif yang menempel padanya.

3. Pengujian keausan abrasif dengan metode piringan berputar.

Pengujian ini adalah untuk menguji ketahanan aus dari lapisan tipis logam dengan metode pengujian dimana sampel ditempatkan pada sebuah piringan horizontal yang berputar dan gesekan dari arah beban yang ditentukan diberikan pada sampel dengan sepasang cincin gesekan dengan kertas abrasif menempel pada piringan.

4. Pengujian keausan abrasif dengan metode pergerakan dua cincin.

Ketahanan aus dari lapisan tipis logam di uji dengan metode pengujian dimana beban diletakan diantara sampel dalam cincin gesekan yang akan menyebabkan suatu gesekan yang berputar atau gesekan yang meluncur dengan 10% faktor luncuran dibawah kondisi kering atau basah.

5. Pengujian keausan abrasif dengan metode penjatuhan abrasif.

Prinsip dari alat uji ketahanan aus dengan metode penjatuhan abrasif ini pada dasarnya adalah gerak jatuh bebas. Gerak jatuh bebas merupakan suatu gerak jatuhnya benda dari suatu ketinggian tertentu dengan percepatan (hampir) konstan. Bila tidak ada gesekan udara, ternyata semua benda yang jatuh di

Universitas Indonesia

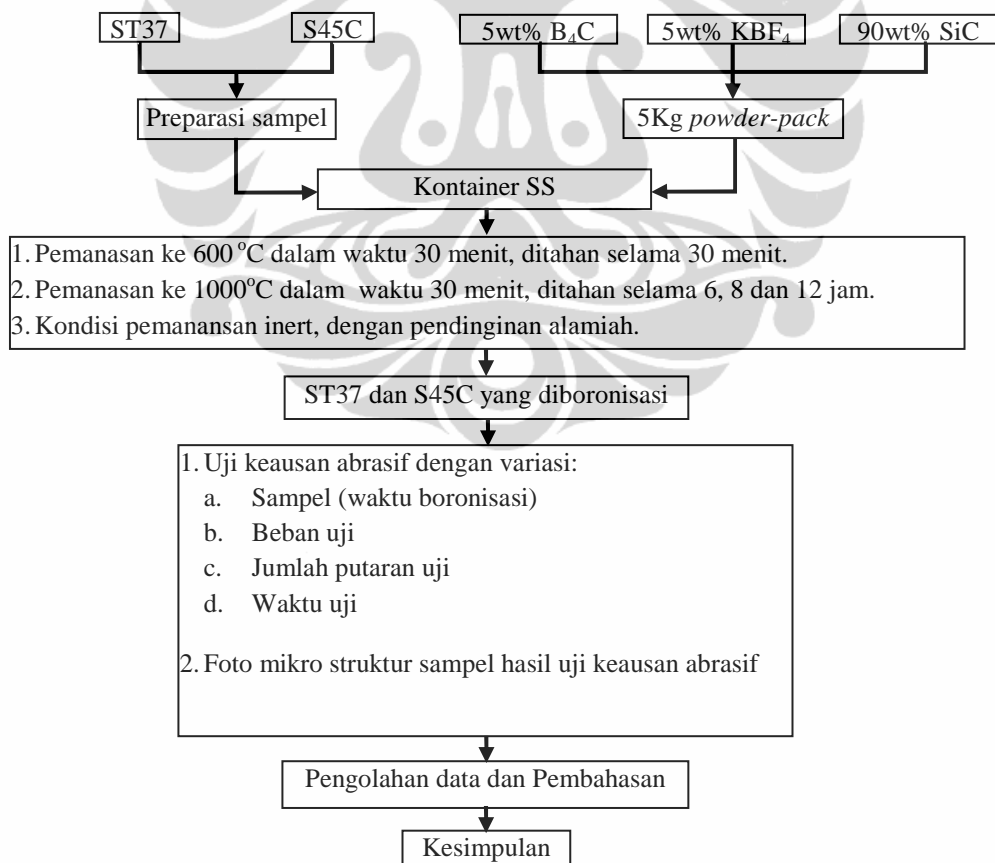
tempat yang sama di permukaan bumi mengalami percepatan yang sama, tidak tergantung pada ukuran, berat maupun susunan benda, dan jika jarak yang ditempuh selama jatuh tidak terlalu besar, maka percepatannya dianggap konstan selama jatuh.

Dalam pengujian ini sampel harus diambil dari permukaan yang penting (mewakili) dari produk itu sendiri. Kadangkala ketika pengujian terhadap produk tersebut sulit untuk dilakukan pemotongan bagian yang dianggap cukup mewakili. Dalam hal ini potongan sampel yang digunakan harus representatif dengan produk dan harus mempunyai lapisan permukaan yang sama serta mengalami kondisi perlakuan pelapisan logam yang sama pula dengan produknya. Sampel pengujian disini harus diperlakukan pada kondisi yang sama seperti produk sehingga efek yang sama sebelum perlakuan dan kondisi operasi dari pelapisan logam dapat terefleksi pada sampel uji. Bentuk sampel yang akan digunakan harus disesuaikan dengan metode pengujian yang ada.

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metodologi penelitian yang dilakukan pada penelitian ini bertujuan untuk menetapkan langkah-langkah yang akan ditempuh untuk mencapai tujuan dari penelitian. Penelitian ini dilakukan di Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN, Serpong. Dalam penelitian ini akan dilakukan proses boronisasi terlebih dahulu, kemudian diikuti dengan uji keausan abrasif lapisan logam hasil boronisasi melalui berbagai variasi uji dan sampel hasil uji keausan abrasif di foto struktur mikronya. Diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.1 dibawah ini:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.

3.2 Preparasi Bahan Dan Alat

Preparasi bahan dan alat adalah tahapan terpenting dalam penelitian, sebab kesalahan analisis dapat terjadi karena adanya kesalahan dari preparasi sampel. Bahan yang digunakan untuk penelitian ini adalah serbuk B_4C , serbuk KBF_4 , serbuk SiC dan gas argon (Ar). Sampel baja ST37 dan S45C dibuat dalam beberapa potong dengan bentuk silinder. Dimensi silinder sampel yang disiapkan berdiameter 3.2 cm dan tinggi 1 cm.

Peralatan yang digunakan pada penelitian adalah kontainer SS yang berukuran 21 cm x 18 cm x 20 cm, tanur merk Naberterm, abrasif tester merk Adamel Lhomargy, neraca analitik merk Adventure Ohaus dengan ketelitian ± 0.1 mg dan mikroskop optik Nikon type 114 yang dilengkapi kamera digital.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian terdiri dari proses boronisasi dan pengujian sampel. Preparasi sampel terdiri atas preparasi *powder pack* dan proses pemanasan dalam tanur.

Prosedur pengujian sampel terdiri dari penentuan uji keausan abrasif sampel, penimbangan hasil uji keausan abrasif dan foto mikro struktur hasil uji keausan abrasif. Berikut ini adalah penjelasan secara terperinci dari prosedur penelitian yang dilakukan.

3.3.1 Proses Boronisasi

Dalam proses boronisasi terdapat preparasi powder pack dan proses pemanasan yang dilakukan di dalam tanur.

1. Preparasi *powder pack*

Campuran serbuk yang digunakan adalah serbuk B_4C , KBF_4 dan SiC dengan komposisi wt%, masing-masing adalah 5%, 5% dan 90%. Serbuk yang dibuat seberat 5Kg untuk mengisi kontainer SS. Pengisian serbuk dan peletakan sampel di dalam kontainer SS diilustrasikan pada gambar 3.2.

Universitas Indonesia



Gambar 3.2 Sampel dan serbuk di dalam kontainer SS.

2. Proses pemanasan dalam tanur

Kontainer SS yang telah siap, dimasukkan ke dalam tanur *annealing* K2/H Naberterm. Gambar 3.3 menunjukkan bentuk dari tanur tersebut. Pemanasan pada tanur ini dapat terprogram dan gas dapat dialirkan ke dalam tanur. Pada proses boronisasi yang dilakukan, gas yang digunakan adalah argon (Ar).



Gambar 3.3 Tanur *annealing* K2/H Naberterm.

Berikut langkah-langkah proses pemanasan yang diberikan pada tanur *annealing* K2/H Naberterm:

1. Dimulai dari temperatur kamar, temperatur tanur dinaikan ke temperatur 600°C dalam waktu 30 menit. Dengan mengalirkan gas argon kedalam tanur.
2. Setelah tercapai temperatur pemanasan yang diinginkan ($T = 600^{\circ}\text{C}$), temperatur pemanasan tersebut ditahan selama 30 menit.
3. Setelah temperatur 600°C stabil, temperatur pemanasan dinaikan kembali ke temperatur 1000°C dalam waktu 30 menit.

4. Setelah tercapai temperatur pemanasan yang diinginkan, pada temperatur pemanasan 1000°C tersebut ditahan selama 8 jam.
5. Setelah tercapai, pemberian temperatur pada tanur dihentikan.
6. Dilakukan pendinginan secara alamiah di dalam tanur, tanpa menggunakan bantuan media pendingin tambahan.
7. Kemudian aliran gas argon yang masuk kedalam tanur dihentikan.
8. Bila indikator temperatur di dalam tanur sudah menunjukkan temperatur kamar, kontainer SS dapat dikeluarkan dari dalam tanur.

3.3.2 Pengujian Sampel

Pada pengujian sampel yang dilakukan adalah preparasi sampel, pengujian ketahanan abrasif dengan metode piringan berputar dan penguji visual.

1. Preparasi sampel.

Sebelum dilakukan pengujian sampel terlebih dahulu harus dibersihkan dengan menggunakan kain halus yang dibasahi dengan suatu larutan yang sesuai dengan jenis noda yang ada pada permukaan lapisan sampel. Larutan yang digunakan adalah: aseton, etil alkohol, etil eter dan lain sebagainya yang berfungsi untuk mencegah sampel dari korosi atau membentuk lapisan film yang bersifat melindungi.

Pengujian dilakukan pada kondisi kamar dijaga pada temperatur $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ dan kelembaban relative maksimum 65%. Alat pengujian ketahanan aus harus benar-benar diset horizontal pada suatu meja laboratorium yang solid dan distabilkan untuk menjamin tidak terjadinya gerakan yang tidak normal yang menyebabkan getaran yang dapat mengganggu jalannya pengujian.

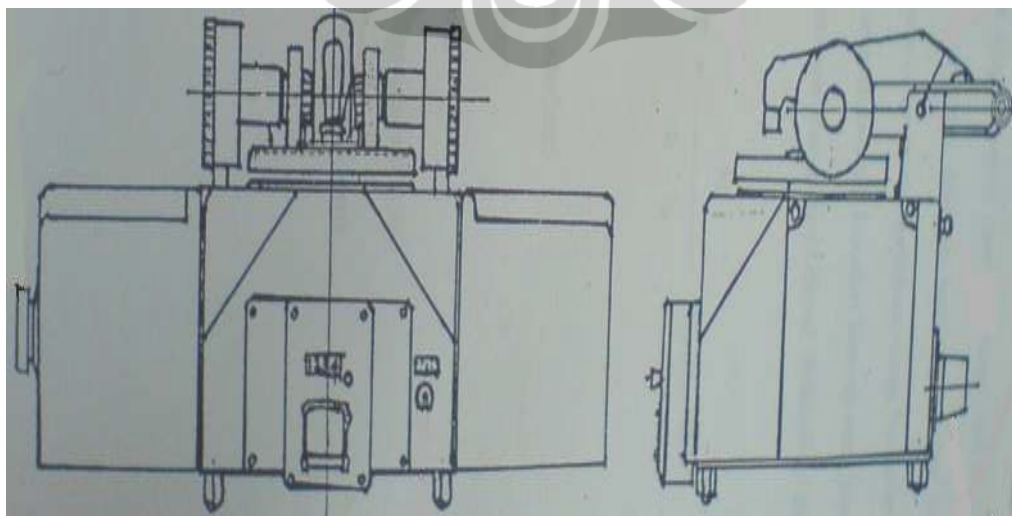
2. Pengujian ketahanan abrasif dengan metode piringan berputar.

Pengujian ini bertujuan untuk melakukan pengujian ketahanan aus dari suatu lapisan tipis logam terhadap beban gesek yang digunakan melalui suatu gerakan membalas ke sampel dan cicin gesekan dengan suatu abrasif yang menempel padanya.

Abrasif yang digunakan dalam pengujian ini adalah dengan ukuran pertikel #240 - #600. Kertas abrasif yang akan digunakan terlebih dahulu harus digunting menjadi ukuran 12mm x 158mm sebelum digunakan.

Dalam menentukan ketahanan aus dari sampel yang diuji dapat dilakukan dengan menggunakan cara, yaitu:

1. Terlebih dahulu dilakukan penimbangan sampel dengan menggunakan neraca analitik, untuk mengetahui berat sampel awal dari sampel tersebut.
2. Kemudian dipilih kertas abrasif yang sesuai dengan jenis dari lapisan tipis logam.
3. Dipasang beban uji tertentu pada alat uji, untuk mengukur ketahanan aus dari lapisan tipis logam.
4. Selanjutnya disetting kecepatan abrasif tertentu pada alat uji abrasif.
5. Pengujian dilakukan berdasarkan waktu tertentu, waktu dari mulainya sampel tergores sampai selesai dihitung dengan menggunakan stop watch.
6. Dari sampel yang sudah diuji ditimbang kembali sampai diperoleh berat sampel akhir, sehingga dapat ditentukan pengurangan beratnya dan dapat dilihat permukaan yang mengalami pengelupasan.
7. Pengujian dilanjutkan dengan dengan berbagai variasi uji, sampai berat dari keausan dapat diukur dengan jelas atau sampai lapisannya terbuka.



Gambar 3.4 Abrasif tester merk Adamel Lhomargy.

3. Pengujian visual

Untuk mendapatkan ketahanan aus apakah permukaan lapisan boronisasi terkelupas atau tidak dengan cincin gesekan dalam frekuensi yang ditentukan akan ditentukan secara visual. Selanjutnya kedua sampel ini di foto struktur mikronya menggunakan mikroskop optik Nikon pada gambar.



Gambar 3.5 Mikroskop optik Nikon type 114 yang dilengkapi kamera digital.

3.4 Analisis Data Uji

Dari pengujian dan karakterisasi yang dilakukan, diperoleh data ketahanan aus dari berbagai variasi uji, yaitu: perbedaan sampel (sampel baja dan waktu proses boronisasi), perbedaan waktu uji, perbedaan beban uji dan perbedaan jumlah putaran uji. Selain itu juga diperoleh pengamatan struktur mikro hasil uji abrasif dari masing-masing waktu boronisasi.

Ketahanan ausnya dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$WR = \frac{T}{w_1 - w_2} \quad \text{atau} \quad WR = \frac{T}{t_1 - t_2}$$

Dimana: WR = ketahanan aus (detik/mg) atau (detik/ μm)
T = waktu pengujian (detik)
 w_1 = berat sampel sebelum pengujian (mg)
 w_2 = berat sampel setelah pengujian (mg)
 t_1 = ketebalan lapisan sampel sebelum pengujian (μm)
 t_2 = ketebalan lapisan sampel setelah pengujian (μm)



BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

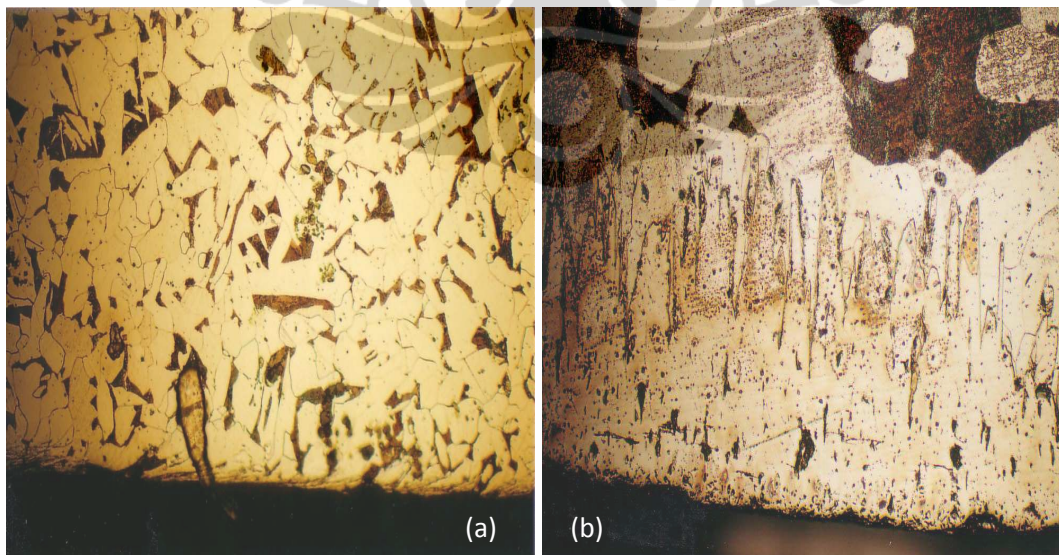
Pada bab ini, akan di bahas mengenai hasil pelapisan borid pada baja ST37 dan baja S45C sebagai bahan dasar, pengaruh uji abrasif terhadap lapisan borid dengan berbagai variasi uji dan pengamatan mikro struktur (mikroskop optik) dari hasil uji abrasif lapisan borid tersebut.

4.1 Hasil Proses Boronisas

Proses boronisasi *powder pack* dilakukan pada temperatur 1000°C dengan variasi 6 jam, 8 jam dan 12 jam. Berikut ini ditampilkan struktur lapisan borid yang terbentuk pada permukaan sampel baja ST37 dan S45C.

4.1.1 Lapisan Borid Pada Baja ST37

Struktur mikro dari baja ST37 yang diamati dengan mikroskop optik pada perbesaran 200x ditampilkan dalam gambar 4.1.



Gambar 4.1 Struktur mikro (a) baja ST37 dan (b) lapisan borid pada baja ST37, dengan mikroskop optik pada pembesaran 200x.

Pada gambar 4.1, tersebut sangat jelas menampilkan unsur terbesarnya adalah Fe pada baja ST37. Struktur baja ST37 yang lebih didominasi oleh fasa Fe dikarenakan komposisi karbon yang lebih sedikit. Gambar 4.1 menunjukkan lapisan borid sampel ST37 pada perbesaran 200x menggunakan mikroskop optik. Dapat dilihat morfologi lapisan borid yang berbentuk gigi gergaji, yang keruncingan dan kedalamannya sangat dipengaruhi oleh proses boronisasi serta unsur-unsur yang terkandung di dalam sampel baja ST37. Kedalaman lapisan borid relatif merata, meskipun pada titik-titik tertentu ada yang tidak terlalu dalam. Terlihat pada gambar 4.1 matriks yang berada disekitar lapisan borid mengalami perubahan struktur mikro. Fasa perlit menjadi lebih banyak dibandingkan fasa Fe yang semula lebih banyak dari pada fasa perlitnya (Setiawan, 2010).



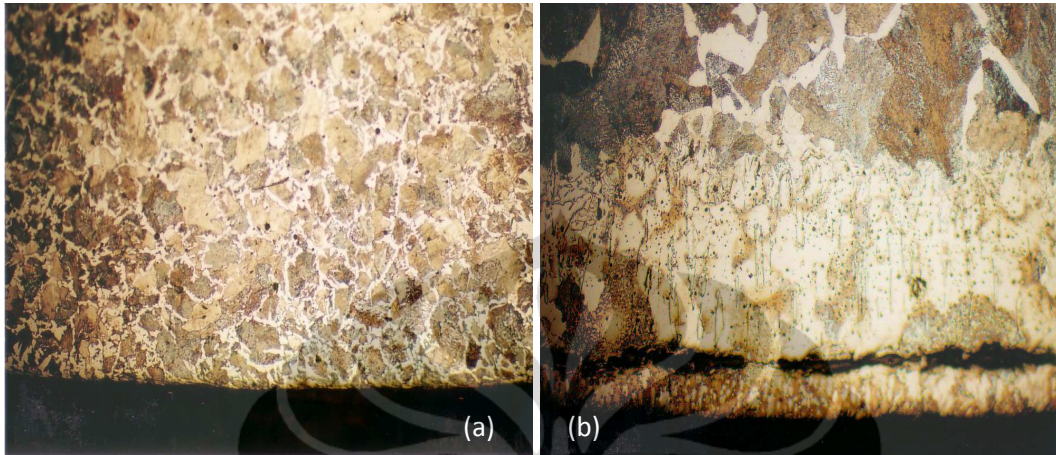
Gambar 4.2 SEI (*Secondary Electron Image*) lapisan borid pada baja ST37 dengan menggunakan SEM JEOL/JSM 6510 pada perbesaran 250x.

Pada gambar 4.2 ditampilkan SEI lapisan borid dari sampel baja ST37. Dari gambar 4.2 ini diperoleh informasi mengenai gradasi lapisan borid yang berbeda fasa. Pada sampel baja ST37, akan terbentuk satu atau dua lapisan di dalam baja, yang bergantung pada proses boronisasi dan sampel baja yang digunakan. Memang pada gambar 4.2 tidak menunjukkan gradasi yang baik. Pada gambar 4.2 terbentuk satu lapisan di atas permukaan baja ST37, lapisan ini dikenal lapisan transien dan dua lapisan di dalam baja, dimana lapisan pertama adalah dominan fasa FeB, dan lapisan berikutnya adalah dominan fasa Fe₂B.

Universitas Indonesia

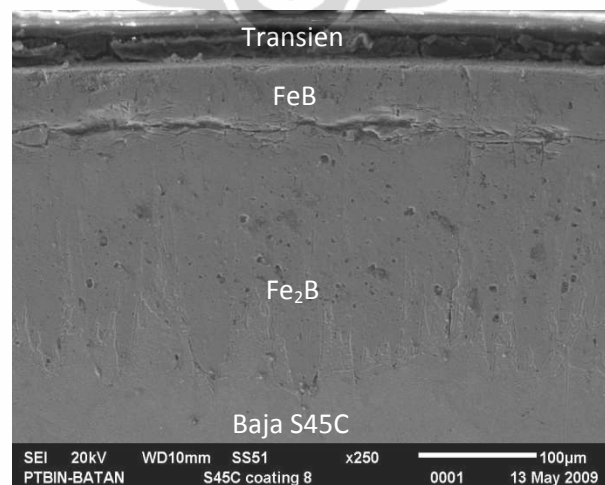
4.1.2 Lapisan Borid Pada Baja S45C

Struktur mikro dari baja S45C yang diamati dengan mikroskop optik pada perbesaran 200x ditampilkan pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Struktur mikro (a) baja S45C dan (b) lapisan borid pada baja S45C, dengan mikroskop optik pada pembesaran 200x.

Struktur mikro baja S45C berbeda dengan baja ST37. Perbedaannya ini dikarenakan kandungan karbon (C) pada baja S45C yang lebih banyak dibandingkan baja ST37. Selain karbon yang terdapat dalam baja S45C, terdapat pula kandungan krom (Cr) yang memiliki afinitas yang lebih besar dibandingkan Fe terhadap boron bebas. Pada baja S45C, fasa Fe berkurang dan perlit lebih mendominasi (Setiawan, 2010).



Gambar 4.4 SEI (*Secondary Electron Image*) lapisan borid pada baja S45C dengan menggunakan SEM JEOL/JSM 6510 pada perbesaran 250x.

Universitas Indonesia

Lapisan transien yang terbentuk pada baja S45C lebih tipis dibanding pada baja ST37. Serupa dengan sampel baja ST37, di dalam baja, terbentuk dua lapisan, yaitu lapisan FeB dan Fe₂B. Jika dilihat morfologi lapisan borid pada baja S45C berbeda dengan baja ST37, dari gambar terlihat struktur gigi gergaji lapisan boridnya lebih halus (Setiawan, 2010).

4.2 Hasil Uji Abrasif

Setelah pengujian keausan abrasif dengan metode piringan berputar dilakukan maka akan terlihat pengurangan berat awal pada sampel. Selisih antara massa sebelum dan sesudah pengujian inilah yang disebut dengan jumlah abrasif, akibat adanya friksi yang terjadi. Untuk jenis sampel, jumlah putaran uji, beban uji, dan waktu uji yang berbeda akan mengakibatkan jumlah abrasif sampel dengan karakteristik yang berbeda pula. Jumlah abrasif inilah yang akan dianalisis sehingga dapat diketahui sampel dengan waktu boronisasi mana yang lebih baik dalam menahan friksi dan mengurangi keausan untuk jumlah putaran uji, beban uji dan waktu uji yang berbeda-beda.

Analisis untuk menentukan performa dari lapisan boronisasi tersebut juga didukung dengan analisis perhitungan ketahanan aus yang terjadi selama pengujian. Seberapa baik lapisan boron ini melindungi permukaan kontak akan terlihat pada jumlah abrasif serta ketahanan aus yang dihasilkan.

4.2.1 Pengujian Abrasif Sampel ST37

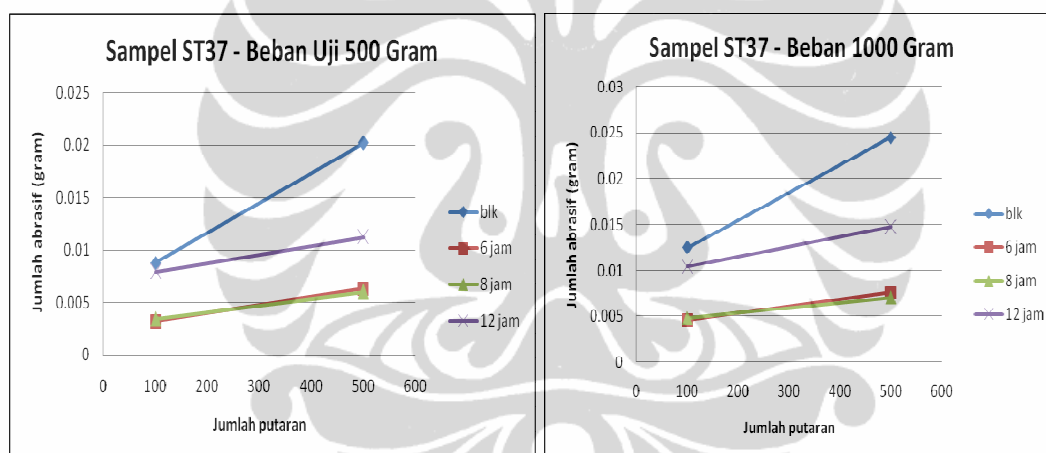
Pada Pengujian ini akan menentukan jumlah abrasif dari hasil penimbangan dan ketahanan aus lapisan borid pada baja ST37 berdasarkan variasi beban uji, variasi jumlah putaran uji dan variasi waktu uji pada masing-masing waktu boronisasi.

1. Berdasarkan Beban Uji

Data mengenai jumlah abrasif yang dihasilkan berdasarkan beban uji dapat dilihat pada tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Hasil pengujian abrasif berdasarkan beban uji pada sampel ST37.

Waktu boronisasi	Beban 500 gram		Beban 1000 gram	
	100 putaran	500 putaran	100 putaran	500 putaran
	Jumlah abrasif (gram)	Jumlah abrasif (gram)	Jumlah abrasif (gram)	Jumlah abrasif (gram)
Blk	0.0088	0.0202	0.0125	0.0245
6 jam	0.0032	0.0063	0.0046	0.0076
8 jam	0.0034	0.006	0.0048	0.0071
12 jam	0.0079	0.0112	0.0104	0.0148



Gambar 4.5 Pengaruh variasi beban uji pada jumlah abrasif pada sampel ST37.

Dari tabel 4.1 dan gambar 4.5 diatas bisa dilihat bahwa waktu boronisasi 6 dan 8 jam yang memiliki jumlah absrif yang terbaik pada beban uji 500 dan 1000 gram, sedangkan waktu boronisasi 12 jam dan blanko memberikan jumlah abrasif yang terburuk baik pada beban uji 500 gram maupun 1000 gram.

Pada beban 500 dan 1000 gram menunjukkan bahwa waktu boronisasi 6 dan 8 jam merupakan waktu yang optimal, dimana jumlah abrasif yang dihasilkan sangatlah kecil. Namun pada beban uji 500 dan 1000 gram jumlah abrasif waktu boronisasi 12 jam tidaklah sebaik waktu boronisasi 6 dan 8 jam. Hal ini bisa terjadi karena tipisnya lapisan transien yang berada pada permukaan lapisan borid

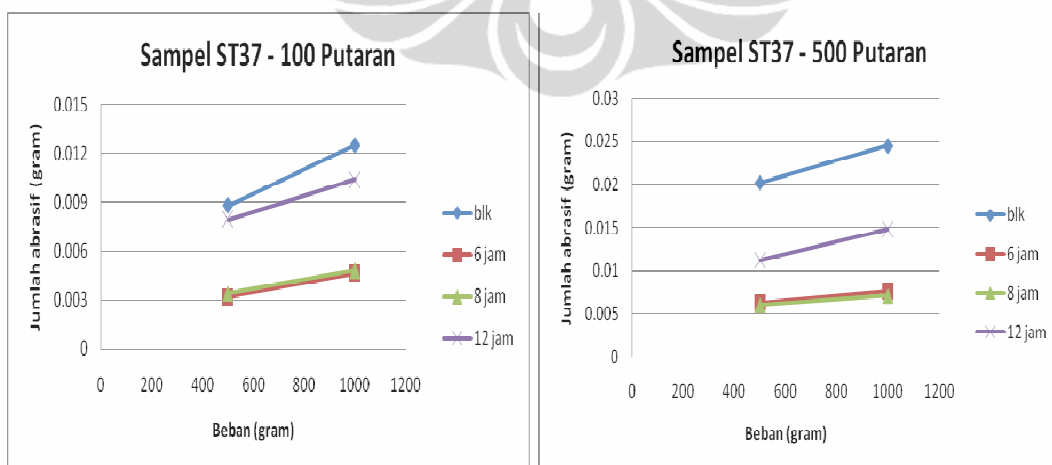
dan sedikitnya kandungan FeB yang terbentuk, sehingga kekerasan dari lapisan menjadi lebih kecil. Hal ini sesuai dengan teori bahwa harga ketahanan aus berbanding lurus dengan kekerasan lapisan, dimana semakin tinggi kekerasan suatu lapisan maka semakin tinggi pula ketahanan ausnya.

2. Berdasarkan Jumlah Putaran Uji

Pada pengujian ini menggunakan jumlah putaran uji 100 dan 500 putaran dengan variasi beban uji pada masing-masing jumlah putaran uji. Data mengenai jumlah abrasif yang dihasilkan berdasarkan jumlah putaran uji dapat dilihat pada tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Hasil pengujian abrasif berdasarkan jumlah putaran uji pada sampel ST37.

Waktu boronisasi	100 putaran		500 putaran	
	Beban 500 gram	Beban 1000 gram	Beban 500 gram	Beban 1000 gram
	Jumlah abrasif (gram)	Jumlah abrasif (gram)	Jumlah abrasif (gram)	Jumlah abrasif (gram)
Blk	0.0088	0.0125	0.0202	0.0245
6 jam	0.0032	0.0046	0.0063	0.0076
8 jam	0.0034	0.0048	0.006	0.0071
12 jam	0.0079	0.0104	0.0112	0.0148



Gambar 4.6 Pengaruh variasi jumlah putaran uji pada jumlah abrasif pada sampel ST37.

Dari tabel 4.2 dan gambar 4.6 diatas dapat dilihat bahwa kecenderungan waktu boronisasi 6 dan 8 jam memiliki hasil uji yang sama, yaitu jumlah abrasif yang lebih kecil dengan jumlah putaran uji 100 dan 500 putaran. Sedangkan waktu boronisasi 12 jam dan blanko diperoleh jumlah abrasif yang sangat besar dengan jumlah putaran uji 100 dan 500 putaran.

Kecilnya jumlah abrasif yang dihasilkan waktu boronisasi 6 dan 8 jam, dikarenakan kandungan FeB yang terbentuk pada sampel ST37 lebih banyak dibandingkan dengan kandungan Fe₂B yang memiliki tingkat kekerasan lebih rendah. Selain itu pengaruh waktu boronisasi juga dapat mempengaruhi jumlah FeB yang terbentuk, dimana dengan waktu boronisasi yang cukup lama dapat menyebabkan konsentrasi boron menjadi kecil sehingga tidak lagi membentuk FeB melainkan terbentuknya kembali Fe₂B.

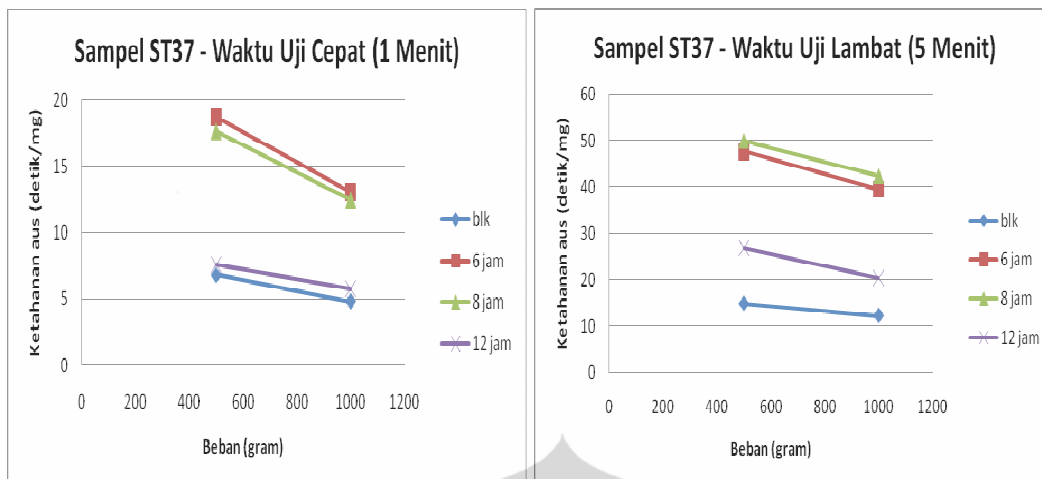
3. Berdasarkan Waktu Uji

Data mengenai jumlah abrasif yang dihasilkan berdasarkan waktu uji dapat dilihat pada tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 Hasil pengujian abrasif berdasarkan waktu uji pada sampel ST37.

Waktu boronisasi	Waktu uji cepat (1 menit)		Waktu uji lambat (5 menit)	
	Beban 500 gram	Beban 1000 gram	Beban 500 gram	Beban 1000 gram
	Ketahanan aus (detik/mg)	Ketahanan aus (detik/mg)	Ketahanan aus (detik/mg)	Ketahanan aus (detik/mg)
Blk	7	5	15	12
6 jam	19	13	48	39
8 jam	18	13	50	42
12 jam	8	6	27	20

Pada pengujian dengan menggunakan waktu pengujian cepat (1 menit) dan pengujian lambat (5 menit) diperoleh hasil yang tidak sama, dimana terlihat bahwa ketahanan aus dari lapisan borid yang diuji dengan waktu lama (5 menit) lebih besar dibandingkan dengan pengujian dengan menggunakan waktu cepat (1 menit).



Gambar 4.7 Pengaruh variasi waktu uji pada ketahanan aus pada sampel ST37.

Dari tabel 4.3 dan gambar 4.7 di atas bisa dilihat bahwa waktu boronisasi 6 jam yang memiliki ketahanan aus yang terbaik pada waktu uji cepat (1 menit) dan pada waktu uji lambat (5 menit) waktu boronisasi 8 jam adalah waktu boronisasi yang memiliki ketahanan aus terbaik, sedangkan waktu boronisasi 12 jam dan blanko memberikan ketahanan aus yang terburuk baik pada pengujian cepat (1 menit) maupun pengujian lambat (5 menit).

Pengujian dengan menggunakan waktu cepat akan menghasilkan pengurangan berat yang cukup kecil dan hal ini akan menyulitkan sewaktu melakukan penimbangan karena selisihnya cukup kecil. Hal ini merupakan faktor yang menyebabkan terjadinya perbedaan harga ketahanan aus antara waktu 1 menit dengan 5 menit. Sedangkan pengujian dengan waktu 5 menit akan menghasilkan pengurangan berat yang lebih besar sehingga memudahkan sewaktu penimbangan dan hasil penimbangan yang diperoleh lebih akurat.

4.2.2 Pengujian Abrasif Sampel S45C

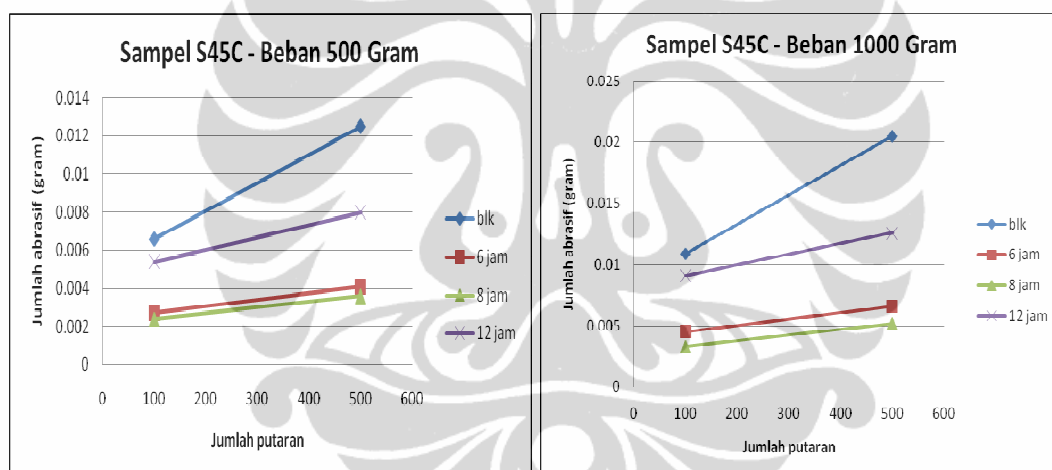
Pada Pengujian ini akan menentukan jumlah abrasif dari hasil penimbangan dan ketahanan aus lapisan borid pada baja S45C berdasarkan variasi beban uji, variasi jumlah putaran uji dan variasi waktu uji pada masing-masing waktu boronisasi.

1. Berdasarkan Beban Uji

Data mengenai jumlah abrasif yang dihasilkan berdasarkan beban uji dapat dilihat pada tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4 Hasil pengujian abrasif berdasarkan beban uji pada sampel S45C.

Waktu boronisasi	Beban 500 gram		Beban 1000 gram	
	100 putaran	500 putaran	100 putaran	500 putaran
	Jumlah abrasif (gram)	Jumlah abrasif (gram)	Jumlah abrasif (gram)	Jumlah abrasif (gram)
Blk	0.0066	0.0125	0.0109	0.0205
6 jam	0.0027	0.0041	0.0045	0.0066
8 jam	0.0024	0.0036	0.0033	0.0052
12 jam	0.0054	0.008	0.0091	0.0126



Gambar 4.8 Pengaruh variasi beban uji pada jumlah abrasif pada sampel S45C.

Dari tabel 4.4 dan gambar 4.8 diatas menggambarkan perbandingan jumlah abrasif masing-masing waktu boronisasi pada sampel S45C berdasarkan beban uji 500 dan 1000 gram. Dari produk yang telah dibuat, ternyata produk dengan waktu boronisasi 8 jam yang memiliki jumlah abrasif terendah, sedangkan blanko dan waktu boronisasi 12 jam memiliki jumlah abrasif tertinggi berdasarkan beban uji 500 dan 1000 gram.

Rendahnya jumlah abrasif pada waktu boronisasi 8 jam dikarenakan kandungan fasa FeB yang terbentuk lebih besar, sehingga memiliki sifat yang lebih keras dan getas dibandingkan dengan waktu boronisasi 6 dan 12 jam. Selain

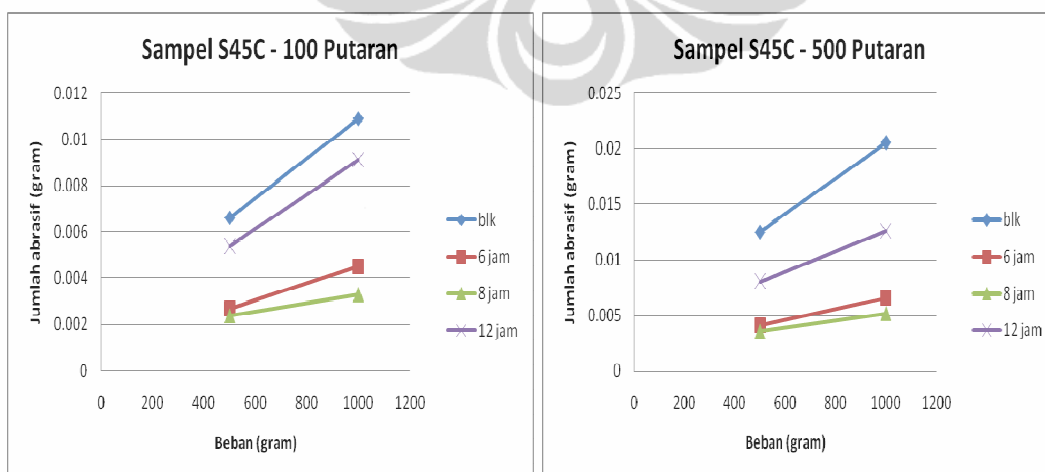
kandungan fasa FeB, dalam lapisan borid tersebut terdapat kandungan fasa CrB yang besar pula yang memiliki kekerasan yang lebih besar dibandingkan fasa Fe₂B. Terbentuknya fasa CrB pada lapisan terluar baja S45C dikarenakan konsentrasi Cr yang besar dan afinitas Cr ke B yang lebih besar daripada Fe ke B. Konsentrasi yang besar ini memungkinkan Cr untuk bergerak menuju permukaan sampel selama proses boronisasi berlangsung.

2. Berdasarkan Jumlah Putaran Uji

Data mengenai jumlah abrasif yang dihasilkan berdasarkan beban uji dapat dilihat pada tabel 4.5 berikut.

Tabel 4.5 Hasil pengujian abrasif berdasarkan jumlah putaran uji pada sampel S45C.

Waktu boronisasi	100 putaran		500 putaran	
	Beban 500 gram	Beban 1000 gram	Beban 500 gram	Beban 1000 gram
	Jumlah abrasif (gram)	Jumlah abrasif (gram)	Jumlah abrasif (gram)	Jumlah abrasif (gram)
Blk	0.0066	0.0109	0.0125	0.0205
6 jam	0.0027	0.0045	0.0041	0.0066
8 jam	0.0024	0.0033	0.0036	0.0052
12 jam	0.0054	0.0091	0.008	0.0126



Gambar 4.9 Pengaruh variasi jumlah putaran uji pada jumlah abrasif pada sampel S45C.

Dilihat pada tabel 4.5 dan gambar 4.9 diatas dimana jumlah abrasif berdasarkan jumlah putaran uji 100 dan 500 putaran pada sampel S45C. Pada pengujian ini waktu boronisasi 8 jam memiliki jumlah abrasif yang lebih kecil, dibandingkan dengan waktu boronisasi 12 jam dan blanko yang memiliki umlah abrasif yang lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa waktu boronisasi 8 jam merupakan waktu proses yang paling optimal untuk mendapatkan produk yang memiliki ketahanan aus yang tinggi, jika waktu boronisasi yang dilakukan lebih cepat diperoleh fasa FeB yang terbentuk tidak sempurna dan lebih sedikit dibandingkan fasa Fe₂B. Sedangkan jika waktu boronisasi yang dilakukan lebih lama konsentrasi boron akan membentuk fasa CrB dan Fe₂B yang lebih banyak, karena afinitas Cr ke B lebih besar dibandingkan Fe ke B. Hal inilah yang akan menyebabkan sifat dari lapisan tidak getas dan kekerasanya menjadi berkurang.

3. Berdasarkan Waktu Uji

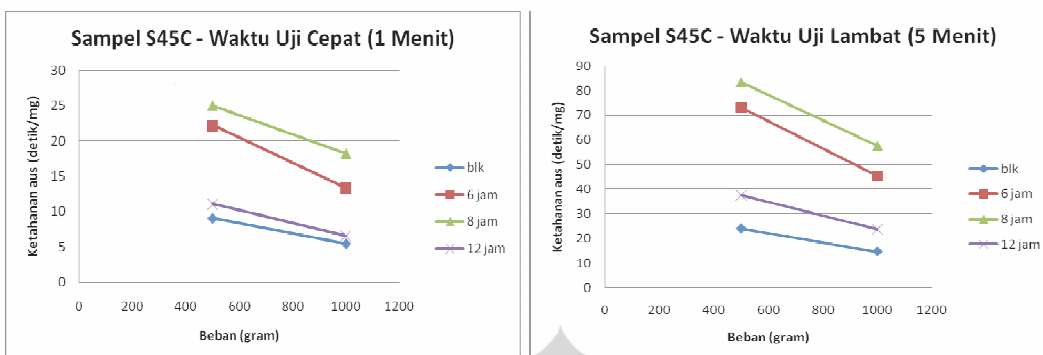
Data mengenai jumlah abrasif yang dihasilkan berdasarkan waktu uji dapat dilihat pada tabel 4.6 berikut.

Tabel 4.6 Hasil pengujian abrasif berdasarkan waktu uji pada sampel S45C.

Waktu boronisasi	Waktu uji cepat (1 menit)		Waktu uji lambat (5 menit)	
	Beban 500 gram	Beban 1000 gram	Beban 500 gram	Beban 1000 gram
	Ketahanan aus (detik/mg)	Ketahanan aus (detik/mg)	Ketahanan aus (detik/mg)	Ketahanan aus (detik/mg)
Blk	9	6	24	15
6 jam	22	13	73	45
8 jam	25	18	83	58
12 jam	11	7	38	24

Dilihat dari tabel 4.6 dan gambar 4.10 diperoleh waktu boronisasi 8 jam memiliki ketahanan aus yang lebih tinggi dibandingkan dengan waktu boronisasi 12 jam dan blanko baik pada waktu uji cepat (1 menit) dan waktu uji lambat (5 menit). Dari hasil pengujian terhadap beberapa sampel dapat dilihat kecenderungan bahwa semakin tinggi kekerasan lapisan yang digunakan maka semakin tinggi pula ketahanan aus dari sampel tersebut. Harga ketahanan aus

berbanding lurus dengan kekerasan lapisan, dimana semakin tinggi kekerasan suatu lapisan maka semakin tinggi pula ketahanan ausnya.



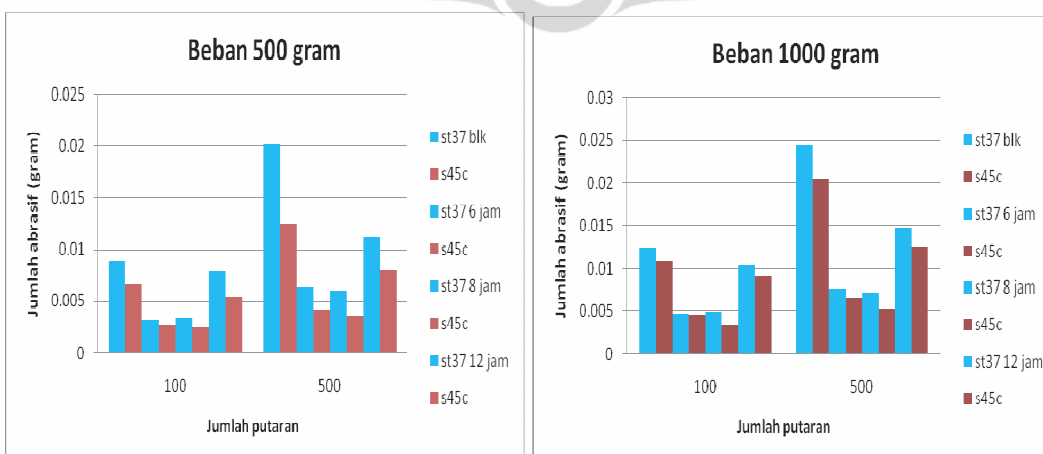
Gambar 4.10 Pengaruh variasi waktu uji pada ketahanan aus pada sampel S45C.

4.2.3 Perbandingan Uji Abrasif Antara ST37 Dan S45C

Pada Pengujian ini membandingkan jumlah abrasif antara lapisan borid pada baja ST37 dengan lapisan borid pada baja S45C berdasarkan variasi beban uji, variasi jumlah putaran uji dan variasi waktu uji pada masing-masing waktu boronisasi.

1. Berdasarkan Beban Uji

Data mengenai jumlah abrasif yang dihasilkan berdasarkan beban uji dapat dilihat pada gambar 4.11 berikut.



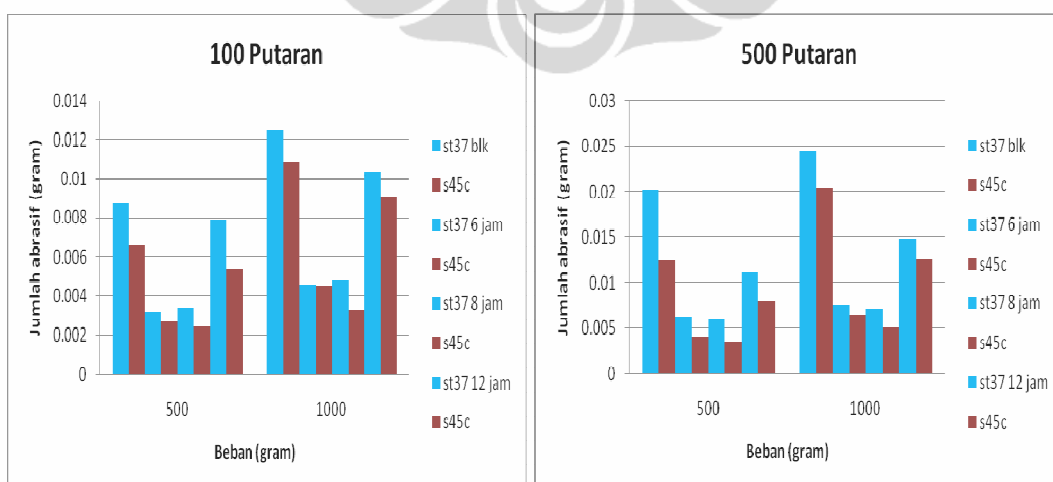
Gambar 4.11 Perbandingan variasi beban uji pada jumlah abrasif pada sampel ST37 dan S45C.

Dilihat pada gambar 4.11 diatas menunjukkan bahwa jumlah abrasif pada lapisan borid dengan baja S45C memiliki jumlah abrasif terkecil pada setiap waktu boronisasi dibandingkan dengan jumlah abrasif pada lapisan borid dengan baja ST37 berdasarkan pada beban uji 500 dan 1000 gram.

Hal ini dikarenakan pada baja S45C memiliki kandungan Cr dan C yang cukup tinggi jika dibandingkan dengan ST37, walaupun kandungan utama dari kedua baja tersebut adalah Fe (besi). Kandungan Cr pada baja S45C sangat berpengaruh sekali terhadap sifat kekerasan dan ketahanan aus dari lapisan yang akan terbentuk, selain Cr memiliki afinitas yang tinggi terhadap boron dibandingkan dengan Fe terhadap boron, tetapi sifat kekerasan FeB lebih tinggi jika dibandingkan dengan CrB. Kandungan CrB pada lapisan borid sebenarnya dapat mengganggu terbentuknya fasa FeB, di karenakan konsentrasi boron bebas dapat dengan mudah bereaksi dengan Cr membentuk CrB. Oleh karena itu konsentrasi boron bebas harus dikontrol dan dipertahankan dengan penambahan SiC agar boron bebas tetap dalam konsentrasi rendah, sehingga dapat membentuk FeB dengan sempurna.

2. Berdasarkan Jumlah Putaran Uji

Data mengenai jumlah abrasif yang dihasilkan berdasarkan jumlah putaran uji dapat dilihat pada gambar 4.12 berikut.



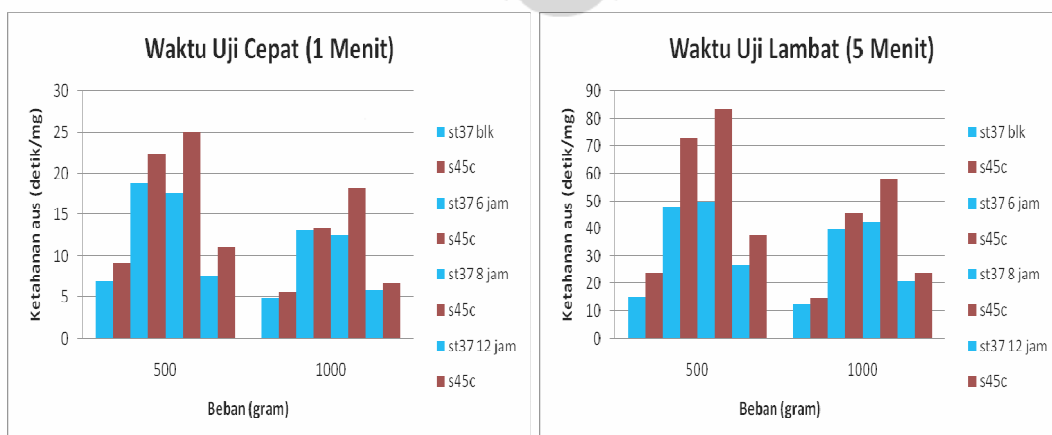
Gambar 4.12 Perbandingan variasi jumlah putaran uji pada jumlah abrasif pada sampel ST37 dan S45C.

Dari gambar 4.12 diatas, lapisan borid pada baja S45C dengan variasi jumlah putaran uji tetap memiliki jumlah abrasif terendah dibandingkan dengan lapisan borid pada baja ST37. Dari kedua gambar ini dapat dilihat bagaimana kecenderungan komposisi FeB, Fe₂B dan CrB mempengaruhi nilai kekerasan lapisan boridnya, terlihat bahwa kekerasan pada lapisan transien selain dipengaruhi komposisi lapisannya ada faktor lain yang mempengaruhinya. Pada lapisan transien, untuk baja ST37 fasa CrB tidak teridentifikasi, hal ini berbeda sekali dengan baja S45C dimana fasa CrB teridentifikasi. Kemunculan fasa CrB menimbulkan konsekuensi berkurangnya fasa FeB pada lapisan borid yang bersangkutan.

Selain faktor dari komposisi lapisannya yang mempengaruhi jumlah abrasif, faktor dari proses boronisasi juga bisa terjadi, salah satunya adanya oksigen dalam proses boronisasi. Oksigen pada boronisasi akan membentuk *oxygenyl borone fluoride*, dimana akan menghambat pembebasan gas BF₃ yang akan membentuk gas boron yang juga akan terhambat pula. Sehingga pembentukan fasa FeB dan Fe₂B tidak sempurna yang akan menyebabkan sifat kekerasannya menjadi rendah.

3. Berdasarkan Waktu Uji

Data mengenai jumlah abrasif yang dihasilkan berdasarkan waktu uji dapat dilihat pada gambar 4.13 berikut.



Gambar 4.13 Perbandingan variasi waktu uji pada ketahanan aus pada sampel ST37 dan S45C.

Berdasarkan variasi waktu uji baik waktu uji cepat (1 menit) maupun waktu uji lambat (5 menit), lapisan borid pada baja S45C yang memiliki ketahanan aus yang lebih tinggi dibandingkan dengan lapisan borid pada ST37. Hal ini dikarenakan sifat kekerasan pada S45C yang lebih besar dari pada ST37, yang terlihat dari komposisinya dimana pada S45C terdapat kandungan FeB, Fe₂B dan CrB. Selain sifat kekerasan, struktur lapisan borid yang terbentuk untuk baja umumnya berbentuk gigi gergaji, yang keruncingan dan kedalamannya sangat dipengaruhi oleh proses boronisasi serta unsur-unsur yang terkandung di dalam sampel. Morfologi lapisan borid pada baja S45C berbeda dengan baja ST37, terlihat dari struktur gigi gergaji lapisan boridnya lebih halus.

Dari kedua waktu pengujian yang dilakukan, sebaiknya yang dipilih adalah pengujian dengan menggunakan waktu yang lebih lambat, karena akan menghasilkan pengurangan berat yang lebih banyak sehingga memudahkan dalam penimbangan dan diperoleh hasil yang lebih akurat.

4.3 Hasil Abrasif Pada Lapisan Borid

Berdasarkan hasil uji abrasif, berikut akan diperlihatkan hasil abrasif antara lapisan borid pada baja ST37 dengan lapisan borid pada baja S45C pada masing-masing waktu boronisasi.

4.3.1 Hasil Abrasif Pada Baja ST37

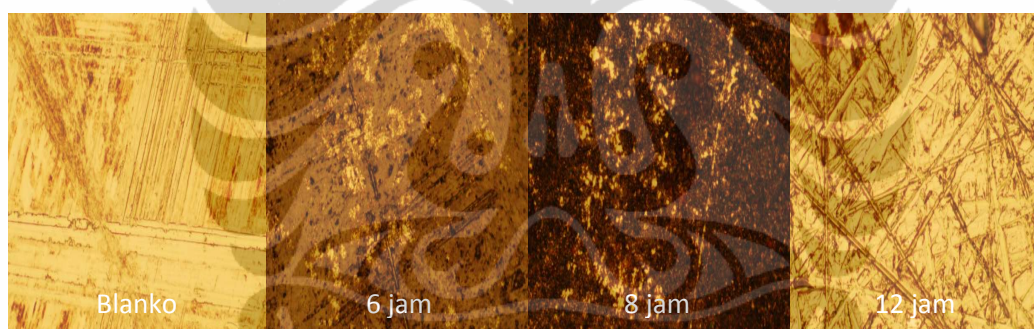
Gambar 4.14 dibawah ini merupakan perbedaan hasil abrasif dari masing-masing waktu boronisasi pada lapisan borid ST37.



Gambar 4.14 Hasil abrasif lapisan borid pada baja ST37 berdasarkan waktu boronisasi.

Dari gambar 4.14 diatas dapat dilihat bahwa hasil abrasif pada waktu boronisasi 8 jam lebih baik, karena lapisan borid pada permukaan waktu boronisasi 8 jam masih terlapisi dengan merata. Jika dibandingkan dengan hasil abrasif pada waktu boronisasi 6 jam, 12 jam dan blanko, dimana lapisan borid pada masing-masing permukaan sudah mulai terkikis dan bahkan sampai hilangnya lapisan borid pada baja ST37.

Banyak hal yang menyebabkan perbedaan ini terjadi, salah satunya waktu proses boronisasi. Dengan waktu boronisasi yang terlalu cepat dapat menyebabkan pembentukan fasa FeB dan Fe₂B tidak sempurna, karena masih banyak konsentrasi boron bebas yang akan bereaksi dengan fasa Fe terhambat akibat waktu proses boronisasi yang terlalu cepat. Sehingga sifat kekerasan dari produk yang dibuat menjadi lebih rendah dan memiliki ketahanan aus yang rendah pula.

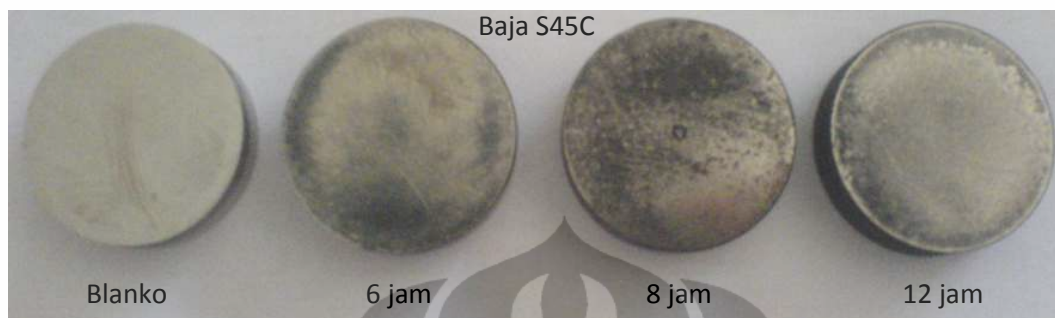


Gambar 4.15 Abrasif lapisan borid pada baja ST37 berdasarkan waktu boronisasi dengan mikroskop optik.

Pada gambar 4.15 terlihat goresan-goresan hasil uji abrasif pada masing-masing waktu boronisasi. Dilihat dari goresan tersebut blanko dan waktu boronisasi 12 jam lebih banyak goresan yang terjadi dibandingkan dengan waktu boronisasi 6 dan 8 jam, dikarenakan lapisan borid yang terbentuk kandungan fasa FeB dan Fe₂B yang rendah, sehingga memiliki tingkat kekerasan yang rendah pula. Hal ini yang menyebabkan semakin mudahnya lapisan borid tersebut terabrasif

4.3.2 Hasil Abrasif Pada Baja S45C

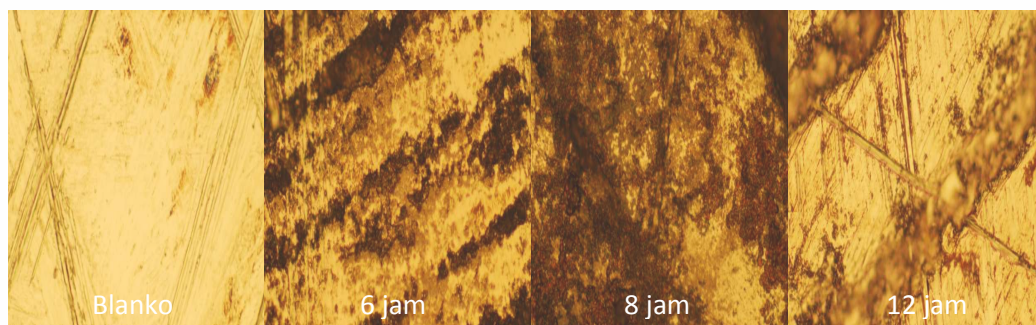
Gambar 4.16 dibawah ini merupakan perbedaan hasil abrasif dari masing-masing waktu boronisasi pada lapisan borid S45C.



Gambar 4.16 Hasil abrasif lapisan borid pada baja S45C berdasarkan waktu boronisasi.

Pada gambar 4.16 diatas juga terlihat waktu boronisasi 8 jam yang memiliki ketahanan aus yang tinggi pada lapisan borid S45C, walaupun ada sebagian permukaan yang sudah mulai terkikis akibat uji abrasif. Tetapi terkikisnya tidak sebanyak waktu boronisasi 6 jam dan 12 jam. Hal ini dikarenakan fasa FeB dan fasa Fe₂B yang terbentuk lebih banyak waktu boronisasi 8 jam dibandingkan dengan waktu boronisasi 6 dan 12 jam.

Hal ini juga mengakibatkan ketahanan aus waktu boronisasi 8 jam lebih baik dibandingkan waktu boronisasi 6 dan 12 jam, terlihat dari jumlah abrasif yaitu selisih antara hasil penimbangan sebelum abrasif dan sesudah abrasif, dimana memiliki nilai yang sangat rendah untuk waktu boronisasi 8 jam.



Gambar 4.17 Abrasif lapisan borid pada baja S45C berdasarkan waktu boronisasi dengan mikroskop optik.

Terlihat pula pada gambar 4.17 dimana goresan pada waktu boronisasi 8 jam lebih sedikit dibandingkan dengan waktu boronisasi 6 dan 12 jam. Selain itu terlihat lapisan borid pada waktu boronisasi 8 jam masih lebih tebal, sehingga lapisan yang terkikis akibat uji abrasif lebih sedikit dibandingkan dengan waktu boronisasi 6 dan 12 jam.



BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari keseluruhan pembahasan dalam penelitian ini dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Morfologi lapisan borid pada kedua baja menyerupai bentuk gigi gergaji. Pada baja ST37 bentuk gigi gergaji lapisan borid lebih runcing dan lebih panjang dibandingkan pada baja S45C. Morfologi seperti ini disebabkan oleh komposisi Cr yang lebih rendah pada baja ST37 dibanding komposisi Cr pada baja S45C. Pada baja ST37 dan baja S45C lapisan borid yang terbentuk dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu Lapisan transien terbentuk diluar sampel baja. Lapisan transien baja ST37 lebih tebal daripada lapisan transien yang terbentuk pada baja S45C. Lapisan dibawah lapisan transien adalah lapisan yang fasa dominannya adalah fasa FeB. Lapisan berikutnya adalah lapisan Fe₂B, yang terbentuk memanjang kedalam dan berbentuk gigi gergaji sampai bertemu dengan matrik.
2. Berdasarkan jumlah abrasif dan ketahanan aus, lapisan borid pada baja S45C adalah lapisan borid yang terbaik, terlihat dari jumlah abrasif yang rendah dan ketahanan aus yang tinggi dengan berbagai variasi uji abrasif. Hal ini dikarenakan fasa CrB teridentifikasi dalam lapisan borid pada baja S45C, sehingga kemunculan fasa CrB mengurangi fasa FeB yang terbentuk.
3. Untuk waktu boronisasi terbaik yang memiliki jumlah abrasif yang rendah dan ketahanan aus yang tinggi pada berbagai variasi uji abrasif adalah waktu boronisasi 8 jam. Dimana waktu boronisasi 8 jam merupakan waktu yang optimal untuk proses boronisasi untuk membentuk lapisan borid yang memiliki kandungan fasa FeB dan fasa Fe₂B yang sempurna, sehingga memiliki tingkat kekerasan dan ketahanan abrasif yang tinggi pula.

5.2. Saran

1. Melakukan percobaan dengan menggunakan alat pengujian yang berstandar internasional sehingga hasil yang diperoleh dapat diperbandingkan secara umum.
2. Perlu dipertimbangkan juga penelitian tentang pengaruh temperatur proses boronisasi terhadap sifat abrasif lapisan borid yang terbentuk.



DAFTAR REFERENSI

Avner, H. Sidney. Introduction To Physical Metallurgy. Mcgraw Hill. Singapore, 1988.

Bejar, M.A., E. Moreno. Abrasive Wear Resistance Of Boronized Carbon and Low-Alloy Steels. Journal of Materials Processing Technology, 173, 352-358, 2006.

Bindal, C., A.H. Ucisik. Characterization of boriding of 0.3% C, 0.02% P Plain Carbon Steel. Vacuum, 82, 90-94, 2008.

Czihos, Horst. Importance Of Properties Of Steel To friction And Welding New Direction In Lubrication, Material, Wear And Surface Interaction Tribology In 80's. Noye Publication. Park Ridge. New Jersey.

Gabe, G.R. Principles Of Metal Surface Treatment And Protection. Pergamon Press. Oxford, 1978.

Gopalakrishnan, P., P. Shankar, M. Palaniappa, S.S.Ramakrishnan. Interrupted Boriding of Medium-Carbon Steels. Metallurgical and Material Transactions A, 33A, 1475-1485, 2002.

Jain, Vipin, G. Sundararajan. Influence of The Pack Thickness of The boronizing Mixture On The Boriding of Steel. Surface and Coatings Technology, 149, 21-26, 2002.

Japanese Industrial Standard. Methods Of Wear Resistance Test For Metallic Coating, 1989.

L.G. Yu, X.J. Chen, K.A. Khor, G. Sundararajan. FeB/Fe₂B Phase Transformation During SPS Pack-Boriding: Boride Layer Growth Kinetics. *Acta Materialia*, 53, 2361-2368, 2005

Martini, C.,G. Palombarini, G. Poli, M. Carbucicchio. Mechanism of Thermochemical Growth of Iron Borides On Iron. *Journal of Materials Science*, 39, 933-937, 2004.

Ozdemir, O., M.A. Omar, M.Usta, S. Zeytin, C.Bindal, A.H. Ucisik. An Investigation On Boriding Kinetics of AISI 316 Stainless Steel. *Vaccum*, 83, 175-179, 2009.

Petrova, Roumina S., Naruemon Suwattananont, Veljko Samardzic. The Effect of Boronizing On Metallic Alloys For Automotive Applications. *JMEPEG*, 17, 340-345, 2008.

Setiawan, Jan. Analisis Lapisan Besi Borid pada ST37 dan S45C yang Diboronisasi dengan Teknik *Powder Pack*, Universitas Indonesia, 2010.

Sinha, A.K. Boriding (Boronizing) of Steels, *ASM Handbook Vol 4: Heat Treating*, ASM International, 1999.

Spence, T.W., M.M. Makhlof. Characterization of The Operative mechanism In Pottasium Flouborate Activated Pack Boriding of Steels. *Journal of Material processing Technology*, 168, 127-136, 2005.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Hasil Uji Abrasif.

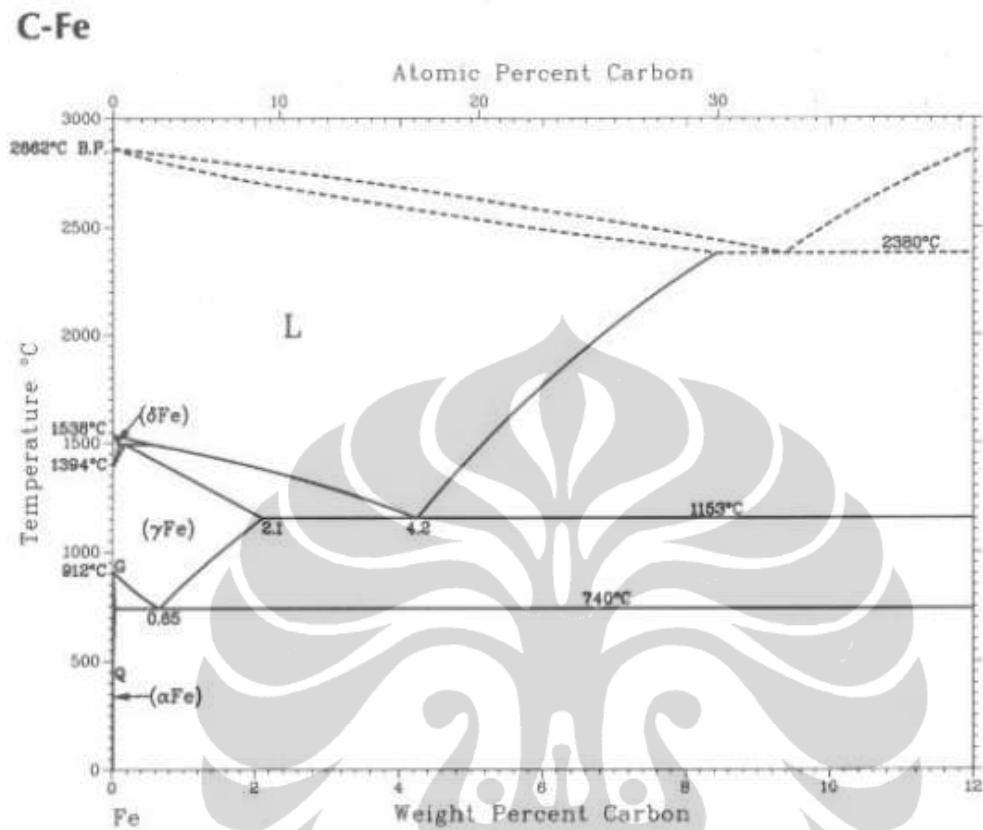
KODE SAMPEL		BEBAN 500 gram					KETERANGAN
		Berat (gram)					
		awal	100 ptr	selisih	500 ptr	selisih	
ST 37	Blanko	63,2728	63,2640	0,0088	63,2526	0,0202	Perm.: halus Amplas grit 320
	6	68,1724	68,1692	0,0032	68,1661	0,0063	
	8	68,6317	68,2689	0,0034	68,6257	0,0060	
	12	68,6041	68,5962	0,0079	68,5929	0,0112	
S 45 C	Blanko	58,6740	58,6674	0,0066	58,6945	0,0125	Perm.: halus Amplas grit 320
	6	66,1247	66,1220	0,0027	66,1206	0,0041	
	8	65,2578	65,2554	0,0024	65,2614	0,0036	
	12	66,5077	66,5023	0,0054	66,4997	0,0080	

KODE SAMPEL		BEBAN 1000 gram					KETERANGAN
		Berat (gram)					
		awal	100 ptr	selisih	500 ptr	selisih	
ST 37	Blanko	63,2973	63,2848	0,0125	63,2728	0,0245	Perm.: kasar/etsa Amplas grit 320
	6	68,1661	68,1615	0,0046	68,1585	0,0076	
	8	68,6257	68,6209	0,0048	68,6186	0,0071	
	12	68,5929	68,5825	0,0104	68,5781	0,0148	
S 45 C	Blanko	58,6945	58,6836	0,0109	58,6740	0,0205	Perm.: kasar/etsa Amplas grit 320
	6	66,1206	66,1161	0,0045	66,1140	0,0066	
	8	65,2614	65,2581	0,0033	65,2562	0,0052	
	12	66,4997	66,4906	0,0091	66,4871	0,0126	

Peralatan; Abrasif Tester : Merk ADAMEL LHOMARGY

Neraca Analitik : Merk Adventure OHAUS (ketelitian : ± 0,1 mg)

Lampiran 2 Diagram Fasa C-Fe.

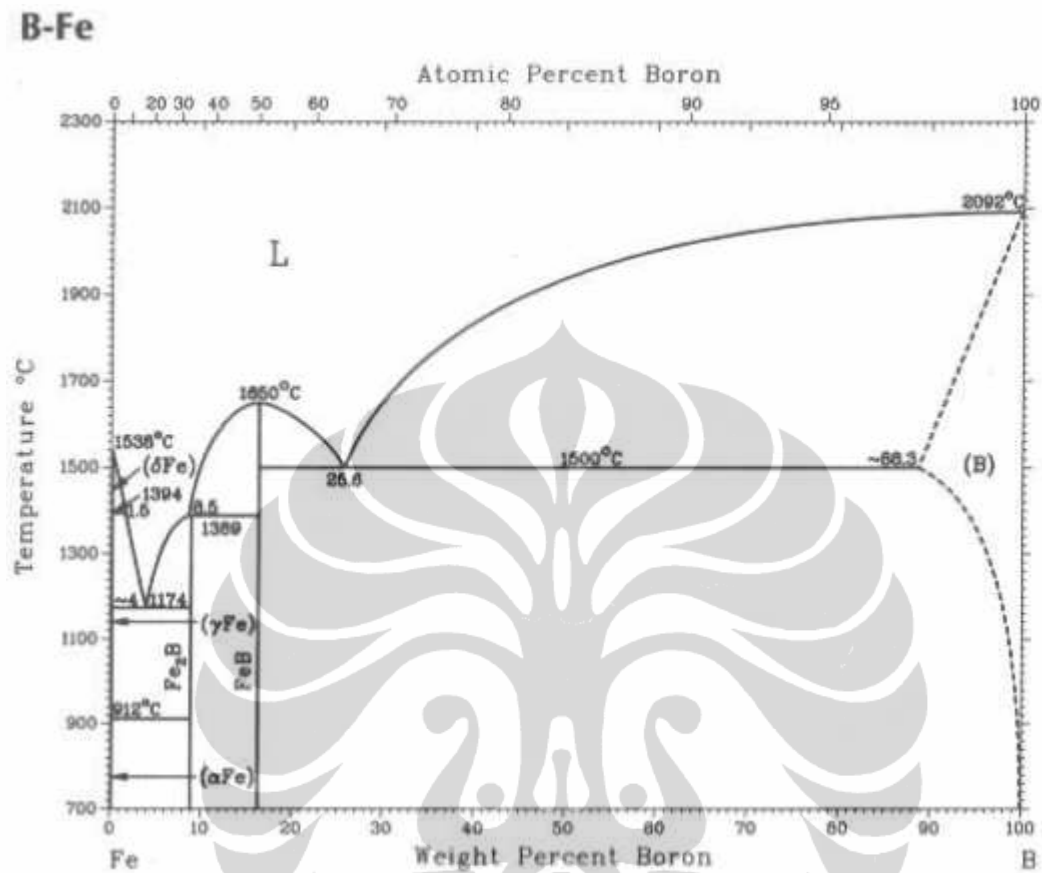


H. Okamoto, 1992

Phase	Composition, wt% C	Pearson symbol	Space group
(δ Fe)	0 to 0.09	<i>cI2</i>	<i>Im$\bar{3}m$</i>
(γ Fe)	0 to 2.1	<i>cF4</i>	<i>Fm$\bar{3}m$</i>
(α Fe)	0 to 0.021	<i>cI2</i>	<i>Im$\bar{3}m$</i>
(C)	100	<i>hP4</i>	<i>P6$_3$/mmc</i>
Metastable/high-pressure phases			
(ϵ Fe)	0	<i>hP2</i>	<i>P6$_3$/mmc</i>
Martensite	<2.1	<i>tI4</i>	<i>I4/mmm</i>
Fe ₄ C	5.1	<i>cP5</i>	<i>P$\bar{4}3m$</i>
Fe ₃ C (θ)	6.7	<i>oP16</i>	<i>Pnma</i>
Fe ₅ C ₂ (χ)	7.9	<i>mC28</i>	<i>C2/c</i>
Fe ₇ C ₃	8.4	<i>hP20</i>	<i>P6$_3$mc</i>
Fe ₇ C ₃	8.4	<i>oP40</i>	<i>Pnma</i>
Fe ₂ C (η)	9.7	<i>oP6</i>	<i>Pnmm</i>
Fe ₂ C (ϵ)	9.7	<i>hP*</i>	<i>P6$_3$22</i>
Fe ₂ C	9.7	<i>hP*</i>	<i>P$\bar{3}m1$</i>
(C)	100	<i>cF8</i>	<i>Fd$\bar{3}m$</i>

Universitas Indonesia

Lampiran 3 Diagram Fasa B-Fe.



P.K. Liao and K.E. Spear, unpublished

Phase	Composition, wt% Fe	Pearson symbol	Space group
(αFe)	0	<i>cf</i> 2	<i>Im</i> $\bar{3}$ <i>m</i>
Fe ₂ B	8.8	<i>I</i> 12	<i>I</i> 4/ <i>mcm</i>
FeB	16.0 to 16.2	<i>oP</i> 8	<i>Pbma</i>
(βB)	100	<i>hR</i> 108	<i>R</i> $\bar{3}$ <i>m</i>
Metastable phases			
Fe ₃ B	-6	<i>oP</i> 16	<i>Pnma</i>
Fe ₃ B(HT)	-6	(a)	...
Fe ₃ B(LT)	-6	(b)	...

(a) bct. (b) Tetragonal

Lampiran 4 Diagram Fasa B-C-Fe.

B-C-Fe isothermal section at 1000 °C [73Bre]

