

LAPORAN PENELITIAN

SELF DEVELOPMENT PROJECT FUNDING
HESD-PROJECT JICA

**PENGARUH STRUKTUR MIKRO LAPISAN
CHROMIZED PADA BAJA 42CrMo4 TERHADAP
KELAKUAN FATIK**

oleh

Ir. AMRU SIREGAR, MT

NIP : 131 996 163

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2000**

LAPORAN PENELITIAN

SELF DEVELOPMENT PROJECT FUNDING
HESD-PROJECT JICA

**PENGARUH STRUKTUR MIKRO LAPISAN
CHROMIZED PADA BAJA 42CrMo4 TERHADAP
KELAKUAN FATIK**

oleh
Ir. AMRU SIREGAR, MT
NIP : 131 996 163

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2000**



LAPORAN PENELITIAN

**SELF DEVELOPMENT PROJECT FUNDING
HESD-PROJECT JICA**

**PENGARUH STRUKTUR MIKRO LAPISAN
CHROMIZED PADA BAJA 42CrMo4 TERHADAP
KELAKUAN FATIK**

**oleh
Ir. AMRU SIREGAR, MT
NIP : 131 996 163**

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2000**

LAPORAN PENELITIAN

**SELF DEVELOPMENT PROJECT FUNDING
HESD-PROJECT JICA**

**PENGARUH STRUKTUR MIKRO LAPISAN
CHROMIZED PADA BAJA 42CrMo4 TERHADAP
KELAKUAN FATIK**

**Diketahui oleh
Dekan fakultas Teknik UMA
u.b**



**(Ir. Kamil Mustafa, MT.)
Pembantu Dekan I**

Peneliti

A handwritten signature in black ink, which appears to be 'Amru', written over a horizontal line.

(Ir. Amru Siregar, MT.)

PRAKATA

Dengan rasa syukur kehadiran Allah SWT yang maha pengasih dan penyayang atas rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan penelitian ini dengan baik.

Penelitian ini berjudul “ *Pengaruh Struktur Mikro Lapisan Chromized Terhadap Kelakuan Fatik Pada Baja DIN 42CrMo4.* “ yang merupakan rangkaian *Self Development Project Funding* dari HEDS-Project JICA.

Atas selesainya Penelitian ini, perkenankan penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Pimpinan HEDS Project-JICA di Jakarta
2. Bapak Dekan Fakultas Teknik UMA
3. Kawan-kawan yang telah memberi bantuan dan memperlancar dalam pelaksanaan dan penulisan laporan penelitian ini.

Atas jerih payahnya tersebut di atas, mudah-mudahan Allah SWT. memberikan imbalan yang berlipat ganda, Amin.

Medan Desember 2000

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PRAKATA	iii
DAFTAR LAMPIRAN	iv
ABSTRACT	v
 I PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang Masalah	1
B. Tujuan Penelitian	3
 II DASAR TEORI	
A. Tinjauan Pustaka.....	4
B. Landasan Teori.....	9
1. Pelapisan difusi.....	9
2. Struktur mikro lapisan <i>chromizing</i>	11
3. Fasa-fasa karbida dalam baja paduan	13
4. Kelelahan	16
5. Mekanisme kegagalan fatik	17
6. Batas kelelahan	19
7. Faktor-faktor yang mempengaruhi kelelahan	20

III. CARA PENELITIAN

A. Bahan/Materi penelitian	
1. Benda uji	25
2. Elemen-elemen campuran <i>pack</i>	26
B. Alat-Alat yang Digunakan	
1. Perlengkapan proses <i>chromizing</i>	26
2. Dapur pemanas.....	27
3. Pengukuran kekasaran permukaan.....	27
4. Mesin <i>rotary bending test</i>	28
5. Mikroskop optik.....	29
C. Jalan Penelitian	30
1. Pembuatan benda uji untuk <i>rotary bending test</i>	31
2. Pekerjaan akhir dan pengukuran kekasaran	31
3. Tabung	32
4. Persiapan proses <i>chromizing</i>	33
5. Penyusunan <i>pack</i>	35
6. Proses pemanasan	36
7. Uji kelelahan.....	36
8. Pengukuran tebal dan mikro Struktur lapisan	38

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengukuran Kekasaran Permukaan	56
B. Tebal dan Struktur Mikro Lapisan <i>Chromized</i>	39

1. Tebal lapisan <i>chromized</i>	40
2. Struktur mikro lapisan <i>chromized</i>	42
C. Uji kelelahan.....	46
V. KESIMPULAN	51
DAFTAR PUSTAKA	52
LAMPIRAN	53

THE EFFECT OF MICROSTRUCTURE OF CHROMIZED COATING ON 42CrMo4 STEEL RESPECT TO BEHAVIOUR OF FATIGUE

PENGARUH STRUKTUR MIKRO LAPISAN CHROMIZED PADA BAJA 42CrMo4 TERHADAP KELAKUAN FATIK

ABSTRACT

The corrosion resistance of alloys may be improved by a technique chromizing. The chromizing process can be applied by pack cementation method at elevated temperatures. As a consequence, microstructural changes occur. These microstructural changes could influence the fatigue properties of the coated alloy steel.

This paper presents results concerning the fatigue behaviour of 42CrMo4 steel coated with chromium by pack cementation method. Cementation was performed at a temperature of 1050^o C for 6, 8, and 10 hours. Completed reversed fatigue test was performed for both the coated and uncoated specimens at stress variation. The fatigue test was carried out on a rotary bending testing machine running at 2850 rev. per min. The chromized coating microstructure was obtained by optical microscopy and scanning electron microscope (SEM).

The results of the fatigue test are plotted as an S-N curve, while the results of the chromized coating microstructure study are shown as a photomicrograph. The results of the examination compared the coated and the uncoated.

It was found that the fatigue strength of coated specimens presents a fatigue life 10 hours longer than 6, and 8 hours of cementation, as the results of microstructural changes in the chromized coating.

Keywords : *microstructure, coating, chromizing, pack cementation, fatigue*

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Permasalahan

Teknologi pelapisan permukaan logam telah berkembang dengan pesat, terutama untuk pengoperasian pada suhu tinggi, seperti komponen-komponen turbin uap, ketel uap, turbin gas, dan lain-lain. Pelapisan permukaan logam biasanya digunakan untuk meningkatkan ketahanan terhadap gesekan dan ketahanan terhadap korosi. Metode yang banyak digunakan seperti teknik *plasma spraying*, *physical vapour deposition (PVD)*, *chemical vapour deposition (CVD)*, *elektroplating*, *pack cementation*, dan sebagainya. Tetapi beberapa dari metode ini sering menjadi pertimbangan, seperti dibutuhkannya biaya yang relatif tinggi, ketebalan lapisan yang kurang memadai dan adhesi antara lapisan dengan logam dasar kurang baik, oleh karena itu pemakaiannya terbatas.

Lapisan Titanium yang dilapisi dengan teknik *pack cementation* menurunkan sifat-sifat mekanis (*Hashem & Ali, 1993*), tetapi lapisan titanium ini mempunyai ketahanan yang sangat baik terhadap korosi. Oleh karena itu lapisan titanium sangat banyak digunakan untuk pemakaian temperatur tinggi.

Komponen-komponen yang dilapisi dengan chromium (*chromized*), menunjukkan daya tahan yang tinggi terhadap mekanisme korosi yang bervariasi, seperti oksidasi pada temperatur tinggi, serangan ion-ion sulfida dan ion-ion chlor. Sifat-sifat hasil *chromized* yang khas digambarkan dalam struktur lapisan *chromized*, yang terdiri dari matrik ferit yang kaya chromium, diselang-selingi

sejumlah chromium carbida yang bervariasi, (Liu dan Wu, 1990).

Pelapisan logam dengan chromium melalui difusi (*chromizing*), dapat dilakukan dengan teknik *pack cementation*. Teknik *pack cementation* ini mempunyai keuntungan-keuntungan yaitu : (1) sederhana (*simple*), (2) relatif lebih murah, (3) ikatan antara lapisan dengan logam dasar sangat kuat, dan (4) dapat diperlakukan pada komponen yang berbentuk kompleks.

Oleh karena difusivitas chromium rendah, maka proses *pack cementation* harus dilakukan pada temperatur relatif tinggi. Dengan demikian dapat mengakibatkan terjadinya perubahan struktur mikro pada material dasar. Perubahan ini dapat mempengaruhi sifat-sifat mekanis material tersebut.

Dengan adanya perubahan sifat-sifat mekanis ini perlu dilakukan penelitian, untuk mengetahui pengaruh Struktur mikro lapisan *chromized*, terhadap kelakuan fatiknya. Yaitu dengan cara membandingkan antara material yang dilapisi dengan material yang tidak dilapisi. Dalam penelitian ini sebagai logam dasar adalah baja DIN 42CrMo4.

Berdasarkan pengamatan penulis, sampai saat ini belum pernah dilakukan penelitian seperti yang disebutkan diatas. Beberapa penelitian sebelumnya yang berkenaan dengan pelapisan logam akan digunakan sebagai bahan rujukan dalam penelitian ini. Beberapa diantaranya akan disajikan di dalam tinjauan pustaka

Dengan dilakukannya penelitian ini akan bermanfaat bagi ilmu pengetahuan :

1. Memberikan kontribusi yang nyata pada bidang ilmu teknik, terutama pada ilmu bahan (*material science*).

2. Dapat menambah wawasan para ahli rekayasa, khususnya untuk komponen-komponen pemakaian temperatur tinggi.

B. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui :

1. Pengaruh struktur mikro lapisan chromized terhadap kelakuan fatik dari baja DIN 42CrMo4
2. Faktor-faktor yang mempengaruhi kelakuan fatik tersebut.

II. DASAR TEORI

A. Tinjauan Pustaka

Pelapisan permukaan umumnya menghasilkan permukaan yang lebih keras dan tegangan sisa tekan (*compressive residual stress*). Perubahan sifat-sifat mekanis dan distribusi tegangan, akan mengakibatkan perubahan kekuatan fatik dan diharapkan untuk beberapa kondisi kekuatan fatik akan meningkat.

Ferreire dkk. (1997), meneliti kelakukan fatik dari 42CrMo4 steel yang dilapisi (*coated*) dengan W, WN, WTi, dan WTiN dengan teknik *physical vapour deposition* (PVD), pengujian fatik dilakukan dengan *three point bending test* pada frekuensi 25 Hz, dengan perbandingan tegangan $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0$. Dari hasil pengujian diamati, untuk daerah tingkat tegangan rendah umur fatik meningkat hanya untuk beberapa jenis lapisan. Untuk daerah tingkat tegangan 950 MPa, umur fatik tidak meningkat untuk semua kondisi pengujian, dan benda uji yang dilapisi dengan W, menunjukkan umur fatik paling rendah bila dibandingkan dengan lapisan-lapisan lainnya dan yang tidak dilapisi. Untuk tingkat tegangan 850 MPa, umur fatik benda uji yang dilapisi dengan WTi, meningkat bila dibandingkan dengan benda uji yang tidak dilapisi, dan tidak ada perubahan umur fatik yang dapat diamati untuk lapisan WTiN dan WN bila dibandingkan dengan benda uji yang tidak dilapisi.

Perbedaan kekuatan fatik ini dipengaruhi oleh faktor tegangan sisa dan kekerasan lapisan permukaan. Harga kekerasan permukaan untuk semua jenis

lapisan meningkat bila dibandingkan dengan kekerasan permukaan logam dasar sebelum dilapisi, dimana kekerasan tertinggi pada lapisan WTi.

Hashem dan Aly (1994), meneliti kelakuan fatik dari baja carbon rendah yang dilapisi dengan Titanium alloy. Pelapisan dilakukan melalui diffusi titanium dengan teknik *pack cementation* pada permukaan baja carbon. Benda uji dimasukkan kedalam *pack* yang merupakan campuran serbuk ferrotitanium, serbuk Aluminium oksida (Al_2O_3) dan Ammonium chlorida (NH_4Cl). Selanjutnya hasil pelapisan ini dilakukan pengujian fatik dengan tingkat tegangan yang bervariasi pada putaran 1420 rpm. Dengan memperoleh siklus dari benda uji yang dilapisi (N') dan siklus benda uji yang tidak dilapisi (N), dapat ditentukan *factor life fatigue* (FLF). FLF ini menunjukkan perubahan umur fatik. Dengan *variabel* waktu penahanan proses pelapisan menghasilkan sifat-sifat lapisan berbeda. Semua jenis lapisan menurun umur fatiknya bila dibandingkan dengan benda uji yang tidak dilapisi.

Lapisan TiN pada baja carbon meningkatkan umur fatik dan meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan yang korosif, (Shiozawa dkk. 1990 dan 1991). Penelitian lanjutan dilakukan oleh Shiozawa dkk. (1992), meneliti pengaruh lapisan TiN dengan teknik *physical vapour deposition* (PVD), dan *chemical vapour deposition* (CVD) pada baja carbon terhadap kelakuan fatiknya, dengan variasi perbandingan tegangan. Pengujian dilakukan pada perbandingan tegangan $R = 0$ dan $R = -1$. Dari hasil uji tarik statik dan uji fatik dengan dua tingkat perbandingan tegangan diamati : (1) Bahwa sifat-sifat mekanis dari logam dasar yang dilapisi (*coated*) tidak berubah akibat proses pelapisan. (2) Kerusakan-

kerusakan pada lapisan yang dilapisi dengan *PVD* terjadi pada saat *tensile strain* 0,38% dan 0,87% untuk *CVD*. (3) Umur fatik yang dilapisi dengan *PVD* meningkat, untuk perbandingan tegangan $R=0$, kecuali pada *range* tingkat tegangan tinggi. (4) Umur fatik yang dilapisi dengan *CVD* untuk perbandingan tegangan $R=0$, lebih kecil bila dibandingkan dengan benda uji yang tidak dilapisi. (5) Peningkatan umur fatik terjadi pada benda uji yang dilapisi dengan *PVD* maupun *CVD*, untuk perbandingan tegangan $R = -1$. (6) Perbedaan umur fatik akibat pemakaian perbandingan tegangan ini disebabkan oleh kelakuan retak awal antara lapisan dengan logam dasar.

Dugdale dkk. (1996), menemukan bahwa lapisan logam dapat digunakan untuk meningkatkan ketahanan gesekan *cutting tools*. Kesimpulan ini diperoleh setelah meneliti kepingan daun gergaji (*bandsaw*) yang dilapisi dengan TiN dan dengan chromium.

Shiozawa dkk. (1996), meneliti kelakuan fatik korosi dari baja carbon yang dilapisi dengan chromium nitrid (*CrN*). Benda uji bentuk silindris dilapisi *CrN* dengan teknik *physical vapour deposition (PVD)*. Benda uji yang telah dilapisi, dilakukan pengujian fatik korosi dengan *cantilever rotary bending test* dalam lingkungan larutan garam 3%. Dari hasil pengujian diambil kesimpulan bahwa peningkatan kekuatan korosi tergantung pada tebal lapisan chromium nitrid (*CrN*).

Hotta dkk. (1994), meneliti kelakuan fatik baja AISI D₂, ASP30, 4140 dan baja perkakas sebagai logam dasar. Benda uji bentuk silindris dengan takikan bentuk V melingkar di setengah panjangnya, dilapisi vanadium carbida

(VC) dengan teknik *thermoreactive deposition and diffusi (TRD)* dan lapisan chromium dengan teknik *elektroplating*. Benda uji yang telah dilapisi, diuji fatik dengan *rotary bending test*. Dari hasil pengujian dapat diamati bahwa: (1) Perubahan ketebalan lapisan VC dari 3-18 μm tidak mempengaruhi batas kelelahan (*endurance limit*) dari baja ASP, tetapi batas kelelahan dari baja yang dilapisi lebih kecil dari baja yang dikeraskan (*hardened*), karena penurunan kekerasan dan penambahan tegangan sisa tarik dari logam dasar. (2) Kekasaran (*roughness*) permukaan tidak mempengaruhi batas kelelahan dari AISID₂ steel dalam batas kekasaran $R_{\text{max}} = (0,3-11) \mu\text{m}$. (3) Batas kelelahan dari baja AISID₂ berkurang disekitar tekukan. (4) Menunjukkan ada hubungan (*relasi*) antara batas kelelahan dengan tegangan sisa dan kekerasan dari logam dasar. (5) Lapisan chromium dengan teknik *elektroplating* menurunkan batas kelelahan dari baja AISID₂.

Penelitian lanjutan dilakukan oleh Hotta dkk. (1995), dari berbagai jenis baja carbon rendah yang dikeraskan sebagai logam dasar. Benda uji dilapisi dengan kombinasi teknik pelapisan yaitu *thermoreactive deposition (TRD)* untuk lapisan vanadium carbida (VC) dan chromium carbida (CrC), *Chemical vapour deposition (CVD)* untuk titanium carbida (TiC), *physical vapour deposition (PVD)* untuk titanium Nitrid (TiN) dan *chromium plating*. Benda uji yang telah dilapisi dilakukan uji fatik dengan *rotary bending test* pada putaran 3600 rpm untuk dua tingkat tegangan. Dari hasil pengujian diamati: (1) Kekuatan fatik ditentukan oleh kelakuan patah dari logam dasar dan sangat tergantung pada kekerasan maupun tegangan sisa dari lapisan permukaan logam dasar. (2)

Pelapisan dengan *chromium plating* menurunkan kekuatan fatik. Sebaliknya tidak dijumpai penurunan kekuatan fatik untuk benda uji yang dilapisi dengan carbida dan Nitrid. (3) Kehadiran lapisan carbida dan Nitrid akan memperlambat perambatan retak dari logam dasar dan dapat menaikkan kekuatan baja temper yang dilapisi.

Stamm dkk. (1996), meneliti pengaruh perlakuan permukaan dengan laser (*laser surface treatment*) pada baja nirkarat AISI 316L yaitu dengan menggunakan daya 3700 watt dan daya 5000 watt. Pengujian fatik dilakukan dengan mengontrol tegangan, menggunakan *servo hydraulic machine*, dengan perbandingan tegangan $R= 0,01$ dan frekwensi 30 Hz. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa: (1) Perlakuan permukaan dengan laser, meningkatkan kekuatan fatik dari baja nirkarat AISI 316L. (2) Struktur mikro dan lapisan permukaan mempunyai pengaruh besar terhadap kelakuan fatik. dan (3) Menjelaskan bahwa perlakuan permukaan dengan laser dapat digunakan pada material yang tidak dapat dikeraskan melalui transformasi fasa. Hal yang sama diteliti oleh Zhu dkk. (1996), baja-chrom dilapisi dengan teknik *laser cladding*. Dari hasil pengujian fatik menunjukkan umur fatik korosi baja chrom yang dilapisi, jauh lebih baik dibandingkan dengan baja chrom yang tidak dilapisi.

Takahashi dkk. (1996), meneliti lapisan chromium pada Ti-AL dengan teknik *ion plantation* melalui pemanasan untuk menghasilkan lapisan difusi dengan komposisi 44Ti-36AL-20Cr. Hasil pengujian fatik dengan mengontrol regangan dapat diamati, bahwa kekuatan fatik pada siklus rendah berkurang dan kerapuhan dari logam dasar semakin berkurang.

Sonobe dkk. (1996), meneliti lapisan chromium Nitrida (CrN) pada baja (0,37% C) dengan menggunakan teknik *physical vapour deposition (PVD)* bertingkat, dari hasil pengamatan menunjukkan daya tahan korosi lebih rendah dari benda uji yang dilapisi dengan teknik konvensional. Evaluasi kekuatan fatik korosi dilakukan dengan menggunakan mesin *cantilever rotary bending test* dalam larutan 3% NaCl, menunjukkan peningkatan kekuatan fatik pada pelapisan dengan teknik *PVD* dibandingkan dengan pelapisan teknik konvensional.

B. Landasan Teori

1. Pelapisan difusi

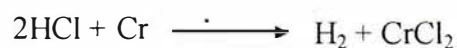
Komponen-komponen mesin untuk pemakaian pada suhu tinggi, seperti pada pembangkit tenaga uap, memerlukan material yang memiliki kombinasi yang baik antara sifat mekanis dan kestabilan permukaan. Komponen-komponen ini selain mengalami tegangan luar yang relatif tinggi, juga harus berinteraksi dengan lingkungan yang korosif dan oksidatif, kesemuanya ini sering terjadi pada suhu tinggi. Baja paduan dengan perlakuan permukaan dapat memenuhi kebutuhan ini.

Baja yang dilapisi dengan chromium (*chromized*) dapat memberikan ketahanan terhadap oksidasi temperatur tinggi. Hal ini dipenuhi oleh adanya lapisan pelindung seperti lapisan yang terdiri dari struktur fasa ferit-chromium dan diselang-selingi dengan chromium carbida. Struktur lapisan seperti ini dapat memberikan ketahanan korosi, sampai kira-kira 800°C (*Liu & Wu, 1990 ; Lakhtin, 1981*). Lapisan *chromized* pada baja paduan dapat dihasilkan melalui pelapisan

difusi (*diffusion coating*). Untuk mendapatkan lapisan difusi, maka teknik *pack cementation* dapat digunakan, selain karena lebih sederhana juga lebih murah dibanding dengan metode yang lain.

Pack cementation dilakukan dengan mempersiapkan *pack* yang merupakan campuran serbuk chromium murni atau Ferro chromium (5-15%) berat, Ammonium chlorida (NH_4Cl), (1-5%) berat dan sisanya Aluminium oksida (Al_2O_3). Logam dasar dikubur didalam tabung (*Retort*) yang terbuat dari *stainless steel*, yang telah diisi dengan campuran *pack*, dan selanjutnya ditutup dengan semen Al_2O_3 . Kemudian dilakukan pemanasan tabung di dalam dapur pada temperatur ($1100^\circ - 1200^\circ\text{C}$) dengan penahan selama (5-12) jam, tidak termasuk waktu pemanasan untuk mencapai temperatur ini. Selanjutnya didinginkan didalam dapur sampai temperatur kamar, (*Lakhtin, 1981*).

Urutan reaksi dalam campuran *chromizing* atau *pack* selama proses pelapisan berlangsung sebagai berikut:

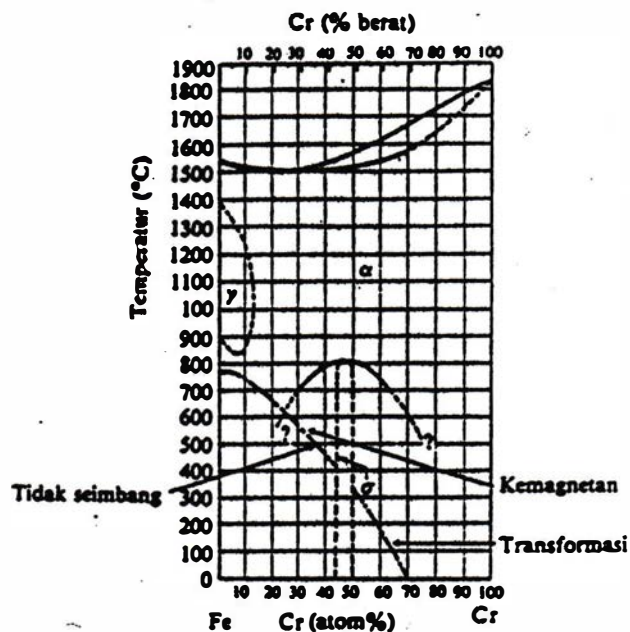


Reaksi pertukaran Fe dengan Cr dapat terjadi disebabkan adanya kontak langsung dalam campuran adalah :



Atom-atom chromium (*Cr*) yang bebas ini memiliki enersi aktifitas yang besar. Dengan demikian chromium ini akan berdifusi kepermukaan logam dasar dan *folatil ferro chlorida* ($FeCl_2$) yang dihasilkan akan dikeluarkan dari dalam *pack*. Sementara atom-atom carbon berdifusi dari arah bagian dalam logam dasar menuju bagian luar dan kemudian akan bersatu dengan chromium pada daerah permukaan baja membentuk senyawa carbida. Dengan demikian pada lapisan permukaan akan terbentuk lapisan-lapisan, yang terdiri dari fasa ferit-chromium dan chromium carbida. (Lakhtin, 1981)

2. Struktur mikro lapisan *chromomized*



GAMBAR 2.1 Diagram fasa Fe-Cr (Surdia)

Memperhatikan diagram fasa Fe-Cr pada gambar 2.1, chromium (Cr) dapat larut di dalam besi, yang dapat memperluas daerah besi α (*Ferit*). Dalam

besi yang kandungan chromiumnya lebih besar 12% mempunyai fasa α , dimulai dari temperatur pembekuan sampai temperatur kamar, dan tidak ada transformasi *martensite* yang mungkin terjadi. Dengan demikian lapisan *chromized* yang banyak mengandung chromium, terdiri dari fasa ferit-chromium.

Ketika besi di-*chromizing* maka lapisan *chromized*-nya terdiri dari larutan padat chromium dalam besi α (*ferit*) dan apabila baja carbon tinggi di-*chromizing*, maka lapisan *chromized*-nya terdiri dari fasa ferit-chromium dan chromium carbida $(FeCr)_7C_3$. Pembentukan chromium carbida disebabkan oleh difusi carbon dari lapisan dalam baja dan bersatu dengan chromium yang berdifusi dari permukaan logam, sehingga terbentuk lapisan chromium carbida. Carbida-carbida ini merintangangi chromium untuk berdifusi lebih jauh ke dalam logam dasar. Sebagai akibatnya permukaan lapisan difusi paling luar sebagian besar terdiri dari unsur-unsur chromium dan larutan ferit-chromium, dan semakin ke dalam diselang-selingi oleh chromium carbida. Lapisan terluar dapat dilihat dengan berwarna putih gambar 2.2, (*Lakhtin, 1981*).



GAMBAR 2.2 Struktur mikro lapisan *Chromized* pada baja C=0,4% (*Lakhtin, 1981*)

Unsur carbon (*C*) mempunyai kecepatan difusi yang lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan difusi chromium. Oleh karena itu tidak semua carbon bereaksi pada pembentukan lapisan carbida, tetapi sebahagian membentuk lapisan transisi dengan kandungan carbon tinggi. Lapisan carbida ($(\text{FeCr})_7\text{C}_3$) yang dibentuk pada permukaan lapisan difusi sangat tinggi kekerasannya, dengan demikian lapisan *chromized* pada besi mempunyai kekerasan antara 250-300 VHN, sedangkan lapisan *chromized* pada baja carbon tinggi mempunyai kekerasan antara 1200-1300 VHN, (*Lakhtin, 1981*).

Henry (*Ellis, 1992*), menemukan adanya *porosity* pada lapisan *chromized*, dan kemudian diklasifikasikan menjadi 4 kategori yaitu :

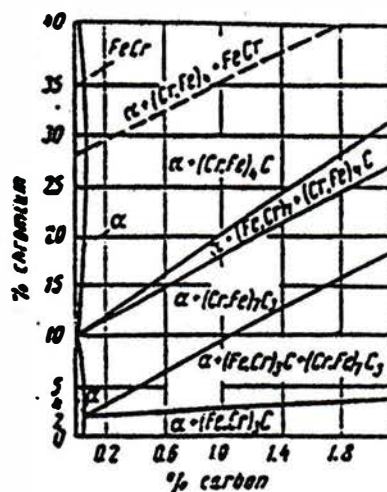
- a. *Porosity ringan*. Semua *porosity* berada dalam satu pita yang dekat dengan permukaan lapisan.
- b. *Porosity menengah*. Semua *porosity* berada dalam pita yang mendekati permukaan lapisan.
- c. *Porosity menengah – berat*. Sebagian besar *porosity* dalam pita-pita yang saling terpisah menuju lapisan *chromized*.
- d. *Porosity berat*. Sebagian besar *porosity* yang memanjang dan melebar menuju lapisan *chromized*.

3. Fasa-fasa karbida dalam baja paduan

Semua unsur-unsur paduan dalam hubungannya dengan carbon (*C*) diklasifikasikan menjadi 2 kelompok : (a) unsur-unsur yang tidak

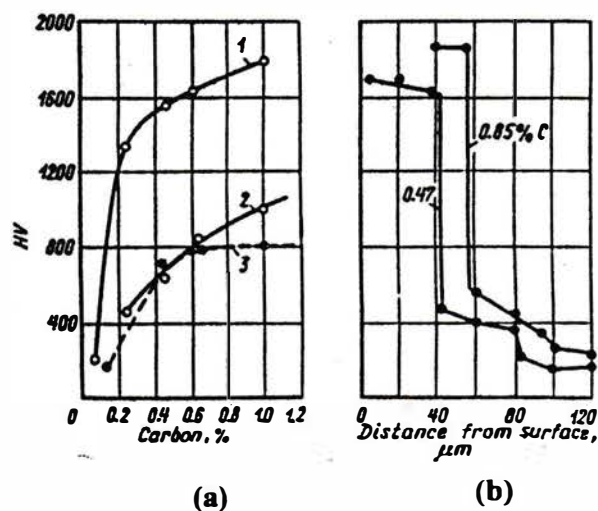
membentuk karbida dalam baja (Ni, Cu, Si dan Co), unsur-unsur ini berfungsi untuk memudahkan pertumbuhan grafit. (b) Unsur-unsur yang dapat membentuk karbida dalam baja (Mn, Cr, W, Mo, V, Ti dan Nb), unsur-unsur ini akan membentuk karbida yang stabil dalam baja.

Karbida-karbida tertentu kemungkinan terbentuk misalnya: sementit, dapat terbentuk jika perbandingan carbon dan unsur paduan yang larut didalam baja tepat sekali. Komposisi sementit dapat ditulis dengan rumus $(Fe, M)_3C$, dimana M adalah unsur pembentuk karbida. Misalnya unsur chromium akan membentuk $(Fe, Cr)_3C$. Penelitian menunjukkan chromium dapat menggantikan Fe sampai 25% jumlah atom (Lakhtin, 1981). Gambar 2.3 menunjukkan diagram kesetimbangan Fe-Cr-C pada temperatur ruang. Dari diagram ini menunjukkan bahwa paduan sementit terbentuk jika kandungan chromium tidak lebih kecil dari 2%.



GAMBAR 2.3 Diagram kesetimbangan Fe-Cr-C (Lakhtin,1981)

Pada kandungan chromium yang lebih tinggi, dapat terbentuk karbida $(Cr, Fe)_7C_3$, sedangkan pada kandungan chromium diatas (10-12%) terbentuk karbida $(Cr, Fe)_4C$ atau $(Cr, Fe)_{23}C_6$. Semua karbida-karbida dapat dibagi ke dalam 2 kelompok. Kelompok pertama meliputi, Fe_3C , Mn_3C , Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, FeW_2C , Fe_2Mo_2C dan lain-lain, dengan kisi-kisi kubik yang kompleks, satu satuan sel mengandung 92 atom chromium dan 24 atom carbon. Sementara Cr_7C_3 mempunyai kisi-kisi heksagonal yang kompleks, satu sel satuan mengandung 56 atom Cr dan 24 atom C. Karbida-karbida kelompok kedua adalah W_2C , WC , Mo_2C , VC , NbC , TiC , ZrC , TaC , Ta_2C dan lain-lain.



GAMBAR 2.4 Kekerasan lapisan Chromized, (a) 1-lapisan chromized, 2-zone transisi, 3-logam dasar, (b) sebagai fungsi jarak dari permukaan (Geller, 1978)

Semua karbida-karbida mampu larut dalam unsur-unsur logam, tetapi berbeda dalam beberapa tingkatannya. Misalnya karbida Cr_7C_3 dapat larut dalam Fe sampai 55% $(Cr, Fe)_7C_3$ pada temperatur kamar.

Sementara karbida $Cr_{23}C_6$ dapat larut dalam Fe sampai 35% (Lakhtin, 1981).

Semua karbida-karbida dikenal sebagai senyawa yang mempunyai kekerasan yang tinggi. Gambar 2.4 menunjukkan kekerasan permukaan lapisan *chromized* yang mempunyai kekerasan tinggi. Dengan demikian lapisan *chromized* tersebut banyak mengandung chromium carbida.

4. Kelelahan

Komponen-komponen mesin yang dikenai tegangan berulang akan rusak pada tegangan yang jauh lebih rendah dibanding yang dibutuhkan untuk menimbulkan perpatahan pada penerapan beban tunggal. Kegagalan yang terjadi pada keadaan beban dinamik disebut kegagalan fatik (*fatigue Failure*).

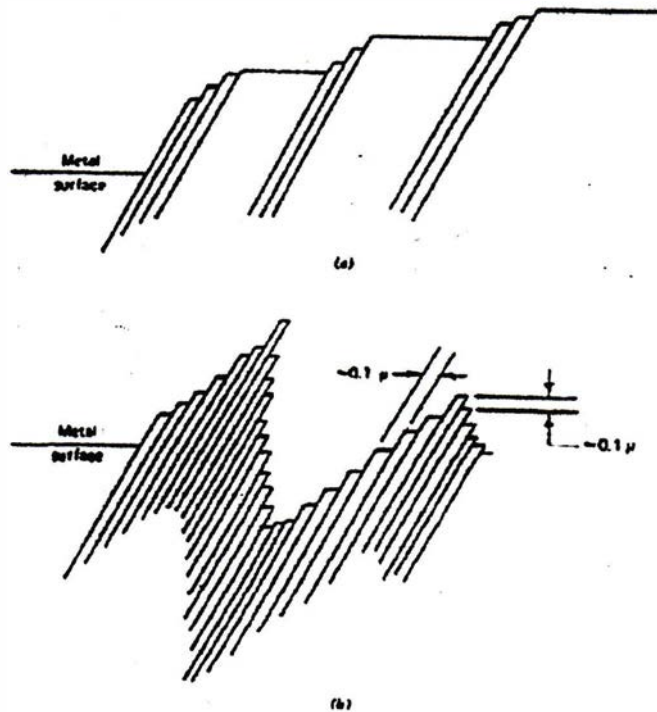
Kegagalan fatik adalah hal yang sangat membahayakan karena terjadi tanpa petunjuk awal. Walaupun mekanismenya telah berlangsung sejak pemakaian komponen tersebut. Proses fatik dimulai sekitar daerah yang mempunyai tegangan dan regangan maksimum yang diakibatkan oleh beban luar. Penyebab utama dari semua kegagalan fatik yaitu perambatan retak pada struktur mikro melampaui batas yang diizinkan. Kegagalan fatik memperlihatkan patah yang terlihat rapuh, tanpa deformasi pada patahan tersebut. Pada skala makroskopik, permukaan fatik biasanya dikenal dengan bentuk bidang patahannya, ada bagian yang halus akibat gesekan yang terjadi sewaktu retak merambat, dan daerah kasar patahan ulet terjadi pada waktu penampang tidak mampu menerima beban.

Beberapa faktor penyebab terjadi kegagalan fatik, selain tegangan yang terlalu tinggi dan berfluktuasi juga dipengaruhi kekasaran permukaan, goresan yang dapat menyebabkan konsentrasi tegangan. Retak mikro yang muncul sewaktu perlakuan panas dapat juga sebagai sumber kegagalan lelah, seperti munculnya lubang-lubang kecil, inklusi atau bentuk dislokasi lainnya dalam logam. Kondisi lingkungan korosif dapat menaikkan tegangan, karena dapat membentuk lubang-lubang pengikisan diantara batas-batas butir.

5. Mekanisme kegagalan fatik

Kebanyakan logam struktur adalah polikristalin yang terdiri dari susunan beberapa kristal atau butiran. Setiap butiran mempunyai sifat-sifat mekanis, arah susunan dan sifat-sifat arah tersendiri. Beberapa butiran berorientasi membentuk bidang-bidang yang mudah slip dalam arah tegangan geser maksimum. Pada logam ulet slip terjadi didalam suatu butiran, yaitu berpindahnya beberapa dislokasi sepanjang bidang kristalografi. Perpindahan ini dapat mengakibatkan terjadinya slip antara satu bidang atau beberapa bidang dengan bidang-bidang lainnya. Gambar 2.5 menunjukkan ujung slip yang kelihatan kasar dan dapat dilihat untuk siklus pembebanan lainnya. Pada pembebanan tingkat tegangan yang lebih rendah terjadi slip yang halus gambar 2.5.b. Garis-garis gelincir dalam gambar 2.5.a maupun gambar 2.5.b kelihatan sejajar di dalam sebuah butiran yang dilihat tegak lurus permukaan bebas. Pada pembebanan satu arah biasanya slip terjadi pada seluruh butiran, sedangkan pada kelelahan

slip terjadi hanya pada beberapa butiran saja dan pada butiran yang lain tidak tampak adanya garis tersebut. Pertambahan siklus selanjutnya menghasilkan slip.



GAMBAR 2.5 Slip pada logam ulet, (a) Statik, (b) Beban dinamik (Fuch)

Slip adalah hasil pembentukan yang sistematik dari pergerakan bidang gelincir yang kecil sekitar 10^{-7} cm/siklus. Gerakan maju mundur dari slip yang halus pada fatik dapat membentuk ekstrusi dan instrusi pita gelincir seperti gambar 2.5.b

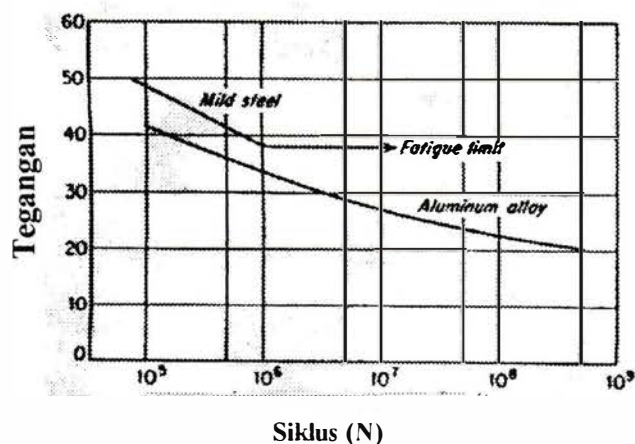
Pembentukan awal retak lelah tersebut sesuai dengan kenyataan bahwa retak lelah mulai terjadi pada instrusi dan ekstrusi pita gelincir. Retak tahap awal merambat sepanjang pita gelincir dalam satu arah.

Pada logam polikristalin retakan dapat berkembang sejauh beberapa diameter butiran sebelum perambatan retak tahap berikutnya. Pada perambatan tahap kedua ditandai dengan adanya riak patahan lelah. Adanya striasi ini menunjukkan kegagalan yang terjadi akibat kelelahan.

Kemungkinan dapat atau tidaknya merambat retak mikro dapat harus melalui beberapa tahapan. Pertama slip terjadi, diikuti retak-retak halus yang hanya dapat dilihat dengan pembesaran yang tinggi. Retak-retak ini terus berkembang dibawah siklus pembebanan dan akhirnya dapat dilihatan dengan mata biasa. Retak-retak ini cenderung berkombinasi yang akhirnya membentuk retak-retak kritis dan tiba-tiba patah terjadi.

6. Batas kelelahan

Pengujian kekuatan fatik banyak dilakukan untuk benda uji yang permukaannya telah dihaluskan dengan menggunakan *rotary bending test* atau siklus tarik-kompresi. Hasil-hasil pengujian disajikan da-



GAMBAR 2.6 Batas kelelahan dari baja dan aluminium tidak mempunyai batas kelelahan (Dieter)

lam bentuk diagram tegangan–jumlah siklus (*diagram S-N*). Wöhler menemukan bahwa pengujian baja menunjukkan adanya suatu batas kelelahan, yaitu suatu tingkat tegangan dimana material mampu menahan beban berulang dalam waktu tidak terbatas, tanpa menunjukkan tanda-tanda kerusakan. Tetapi beberapa material tidak menunjukkan adanya batas kelelahan dimana material tersebut akan mengalami kerusakan, pada kondisi tegangan rendah jika dikenai tegangan siklus secara terus-menerus. Gambar 2.6 menunjukkan baja paduan mempunyai batas kelelahan, sedangkan paduan aluminium tidak mempunyai batas kelelahan pada pengujian fatik dengan tegangan bolak-balik secara terus-menerus.

7. Faktor-faktor yang mempengaruhi kelelahan

Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi umur kelelahan dari suatu komponen dapat klasifikasikan menjadi 3 faktor yaitu: (a) faktor mekanis, (b) faktor metalurgi, dan (c) faktor lingkungan.

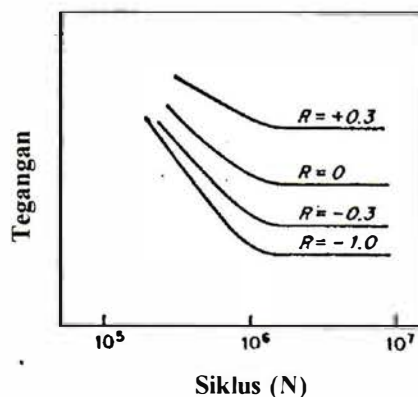
a. Faktor Mekanis. Yang termasuk faktor mekanis ini: (1) konsentrasi tegangan, (2) efek ukuran, (3) efek permukaan, dan (4) tegangan rata-rata.

(1) Komponen-komponen yang mempunyai, bentuk geometris tidak kontinyu dan mengalami perubahan bentuk merupakan sumber konsentrasi tegangan yang sangat potensial seperti, takikan, lubang ulir, suain tekan (*press-fit*), lubang dan sebagainya. Pada tempat-tempat tersebut tegangan akan lebih besar dari pada tempat-tempat lain, sehingga kegagalan bisa

dimulai dari tempat yang menimbulkan konsentrasi tegangan tersebut. Dalam perancangan komponen mesin bentuk-bentuk seperti disebutkan diatas perlu dihindari / dikurangi sedapat mungkin, dengan tujuan untuk meningkatkan umur kelelahan dari komponen tersebut. Selain bentuk geometris, konsentrasi tegangan dapat juga timbul akibat kekasaran permukaan atau berasal dari struktur metalurgi, seperti porositas, inklusi dan dekarburasi, (Dieter, 1981).

(2) Pengalaman secara praktis menunjukkan bahwa terdapat efek ukuran yaitu kekuatan lelah elemen mesin yang besar lebih rendah dibandingkan dengan kekuatan lelah benda uji yang lebih kecil. Hal ini dapat terjadi karena pertambahan diameter menyebabkan pertambahan volume atau luas penampang benda. Kegagalan biasanya selalu dimulai pada permukaan luar, semakin besar luas permukaan, maka semakin besar kemungkinan terjadi kegagalan ,(Collin 1981).

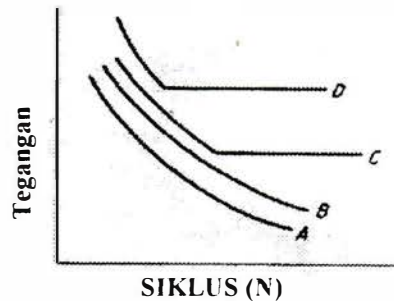
(3) Kelakuan fatik dari komponen-komponen mesin sangat dipengaruhi oleh kondisi permukaan. Kondisi permukaan yang dapat mempengaruhi kelelahan tersebut adalah



GAMBAR 2.7 Perubahan batas kelelahan akibat perubahan perbandingan tegangan

kekasaran permukaan, sifat-sifat permukaan dan tegangan sisa permukaan. Kekasaran permukaan tergantung pada penyelesaian akhir permukaan

dengan permesinan. Benda uji yang dipoles halus, akan menghasilkan harga uji lelah yang lebih tinggi, karena kekasaran permukaan dapat



menimbulkan konsentrasi tegangan. Dengan demikian penyelesaian akhir permukaan yang berbeda dapat mengakibatkan

GAMBAR 2.8 Batas kelelahan berubah akibat pengaruh unsur paduan, (A) logam murni, (B) pengaruh elemen-elemen larutan padat terhadap A, (C) batas lelah yang disebabkan oleh penyepuhan regang oleh interstisi, (D) batas lelah melalui penguatan penyepuhan regang (Dieter,1981)

perbedaan kekakuan fatik yang cukup besar. Perubahan sifat-sifat permukaan akan besar pengaruhnya, terhadap kekuatan lelah. Perbaikan sifat-sifat lelah yang nyata dapat diperoleh dari pembentukan permukaan yang lebih keras dan lebih kuat pada logam dasarnya. Akan tetapi belum dapat dipastikan umur lelah akan meningkat, dengan bertambahnya kekerasan permukaan. Karakteristik lelah permukaan material, yang mengalami peningkatan kekerasan ialah, bahwa kegagalan akan mulai terbentuk pada daerah antara permukaan yang keras dengan permukaan lunak, merambat ke daerah bagian dalam logam dan jarang sekali berawal dari permukaan luar. Sehingga menyebabkan penurunan kekuatan fatik dari 10% s/d 50 % dalam beberapa keadaan, (Collin, 1981). Pada umumnya pelapisan listrik pada permukaan baja akan memperkecil batas lelah baja tersebut. Pelapisan chrom, sukar untuk dapat dilakukan tanpa merusak sifat-sifat lelahnya. Sedangkan pelapisan kadmium yang lebih lunak mempunyai

efek yang lebih kecil terhadap lelah. Pengaruh yang penurunan ini disebabkan oleh perubahan-perubahan tegangan sisa, adhesi, porositas dan kekerasan. Tegangan sisa pada lapisan permukaan memainkan peranan yang penting terhadap sifat-sifat fatik komponen-komponen mesin. Jika tegangan sisa pada permukaan adalah tarik, kekuatan lelah dikurangi. Jika tegangan sisa pada permukaan adalah tekan, maka kekuatan lelah ditingkatkan. Tegangan-tegangan sisa tekan merupakan tegangan-tegangan terkunci yang terdapat pada bagian yang tidak terkena gaya luar. Tegangan sisa tekan dapat dianggap identik dengan tegangan –tegangan yang dihasilkan oleh beban luar dalam arah yang berlawanan, sehingga dapat meniadakan sebahagian tegangan tarik luar, dan pada gilirannya akan memperkecil kemungkinan kegagalan lelah pada titik tersebut.

(4) Tegangan rata-rata yang bekerja pada suatu komponen akan berpengaruh terhadap unsur kelelahannya. Hal ini dapat dijelaskan dengan gambar 2.7

- b. **Faktor metalurgi.** Faktor-faktor metalurgi yang dapat mempengaruhi umur kelelahan dari logam atau paduan yaitu : (1) Pengaruh ukuran butir, material yang mempunyai butiran halus menunjukkan kelelahan fatik yang lebih baik dibandingkan dengan material yang mempunyai butiran kasar pada komposisi yang sama, (Collin, 1981). Ketahanan lelah sebanding dengan $(\text{diameter butir})^{-1/2}$. Ketergantungan ketahanan fatik pada ukuran butir juga tergantung pada bentuk deformasi. Efek ukuran butir terhadap ketahanan fatik yang paling besar adalah pada tegangan rendah dengan siklus tinggi dimana yang paling menonjol adalah retakan tahap pertama.

(2) Arah butiran material hasil proses tempa maupun pengerjaan dingin terhadap arah pembebanan mempunyai pengaruh terhadap kekuatan fatik. Arah pembebanan kearah transversal, menghasilkan kekuatan fatik yang kecil dibanding arah pembebanan longitudinal. (3) Material yang mempunyai struktur mikro halus akan mempunyai umur fatik yang lebih tinggi, bila dibandingkan dengan material dengan struktur mikro yang kasar. Misalnya, struktur mikro hasil celup dan temper, menghasilkan sifat-sifat lelah yang optimum pada baja paduan rendah yang telah mengalami perlakuan panas. Akan tetapi pada tingkat kekerasan diatas Rc 40, struktur *bainite* yang diperoleh dengan proses *austempering*, menghasilkan sifat lelah yang lebih baik, dibanding dengan struktur mikro hasil pencelupan dan temper pada kekerasan yang sama. Sifat-sifat lelah pada tingkat kekerasan yang tinggi sangat peka terhadap kondisi permukaan benda uji, tegangan sisa dan inklusi. Adanya bercak-bercak dekarburasi pada permukaan benda uji, secara dratis akan memperburuk sifat-sifat lelah, (Dieter, 1981). (4) Adanya batas kelelahan pada bahan-bahan tertentu khususnya paduan besi dan titanium tergantung pada kehadiran elemen interstisi. Hal ini dijelaskan secara skematik pada gambar (2.8).

III. CARA PENELITIAN

A. Bahan/Materi Penelitian

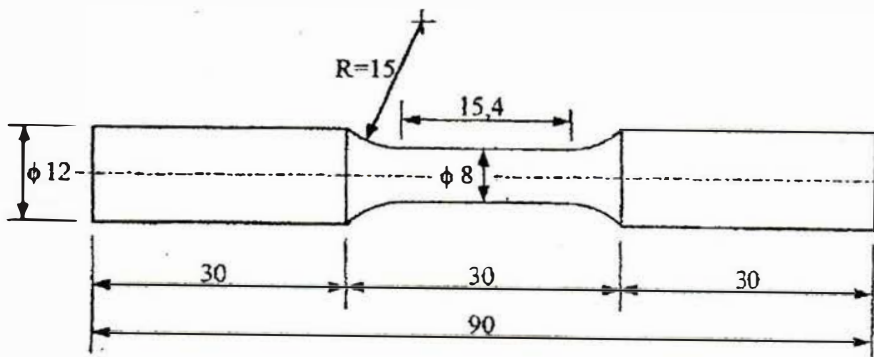
1. Benda uji

Benda uji pada penelitian ini adalah baja DIN 42CrMo4 komposisi kimia, 0,42%C; 1,05%Cr; 0,65%Mn; 0,25%Si; dan 0,20% Mo. Baja ini mendekati standard, AISI 4140, dan JIS SCM4.

Baja DIN 42CrMo4 mempunyai sifat-sifat mekanis sebagai berikut :

- Tegangan ultimate (σ_u) = 950 MPa
- Tegangan yield (σ_y) = 720 MPa
- Elongation min = 16%

Benda uji yang akan dilapisi maupun yang tidak dilapisi disesuaikan dengan mesin uji *rotary bending* yang tersedia yaitu sesuai dengan JIS Z-2247, seperti gambar dibawah ini :



GAMBAR 3.1 Benda uji rotary bending test JIS Z-2247

2. Elemen-elemen campuran pack

- a. **Chromium(Cr).** Elemen difusi yang digunakan pada proses pelapisan (*coating*) adalah unsur chromium murni dalam bentuk serbuk dari jenis PA (*Pro analisis*). Serbuk chromium ini diperoleh dalam bentuk *packing* dengan kemurnian $\approx 100\%$
- b. **Ammonium chlorida (NH₄Cl).** Berfungsi sebagai aktivator di dalam campuran *pack*. Ammonium chloride ini diperoleh dalam kondisi campuran “teknik”
- c. **Aluminium Oksida (Al₂O₃).** Berfungsi sebagai media dan untuk menjaga tidak terjadi penggumpalan campuran unsur-unsur chromium maupun NH₄Cl. Aluminium oksida diperoleh dalam kondisi campuran “teknis”.

B.Alat-alat Yang Digunakan

1. Perlengkapan proses Chromizing

- a. Tabung dari bahan stainless steel, dengan ukuran ϕ 34 mm x 140 (mm).
- b. Kertas amplas dan Autosol yang berfungsi untuk menghaluskan permukaan benda uji.
- c. *Methanol* dan *acetone* masing-masing 1 liter berfungsi sebagai alat pencuci benda uji yang akan dilapisi.
- d. Semen tahan api dan pasir yang berfungsi sebagai penutup *pack*.
- e. Bak sebagai tempat pencampuran dari elemen-elemen *pack*.

2. Dapur Pemanas

Berfungsi untuk memanaskan campuran *pack* sampai dengan temperatur 1050°C, dan ditahan pada temperatur tersebut dalam jangka waktu tertentu.

3. Pengukur Kekasaran Permukaan

Pengukuran kekasaran permukaan digunakan *surface roughness tester* merek surfcom 120 A (gambar 3.3) dengan spesifikasi sebagai berikut :

a. Pick up E-DT-SE01A

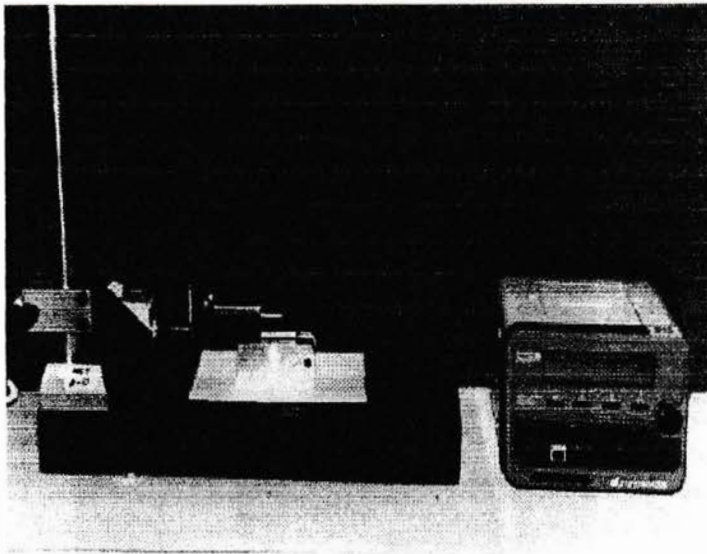
- Transducer = LVDT
- Stylus tip material = Diamond
- Stylus tip form = 5 μm R 90° cone

b. Amplification indicator E-MD-S-107 A

- Digital display = Liquid crystal display (LCD) 240 x 64 dots
- Print out put = Thermal chart paper width 60 mm
- Vertical magn. = 100 X : 100.000 X
- Horizontal magn. = 2X ÷ 500 X

c. Tracing driver E-RM-570 A

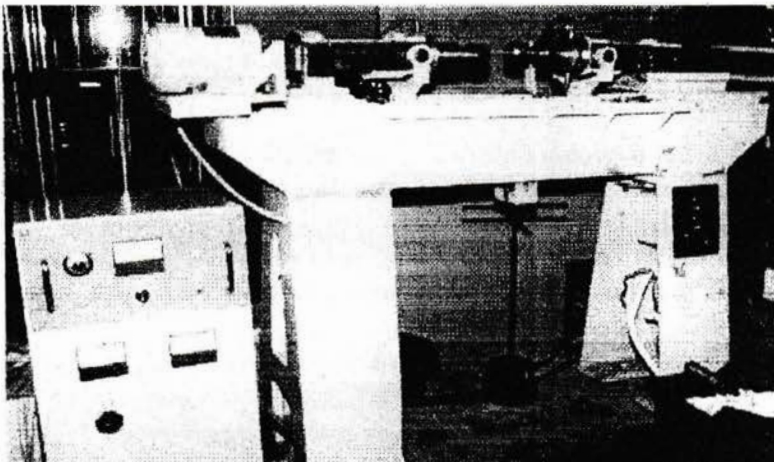
- Tracing speed = 0,6 m/S
- Transverse dist = max. 30 mm



GAMBAR 3.2 Surface rougness Tester

4. Mesin uji rotary bending

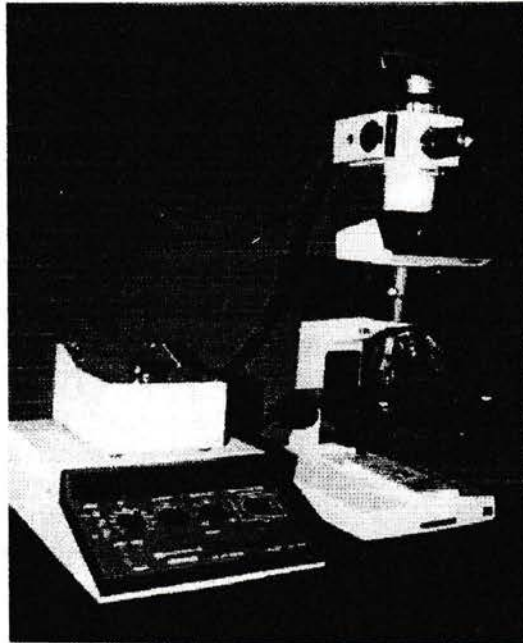
Mesin *rotary bending* merk SHIMADZY (gambar 3.4), digunakan untuk menentukan umur kelelahan dari benda uji.



GAMBAR 3.3 Mesin Uji rotary bending

5. Mikroskop optik

Mikroskop optik ini digunakan untuk mengamati tebal lapisan dan mikro struktur dari benda uji yang mengalami proses (gambar 3.4).



GAMBAR 3.4 Mikroskop Optik

6. Scanning Elektron Microscopy (SEM)

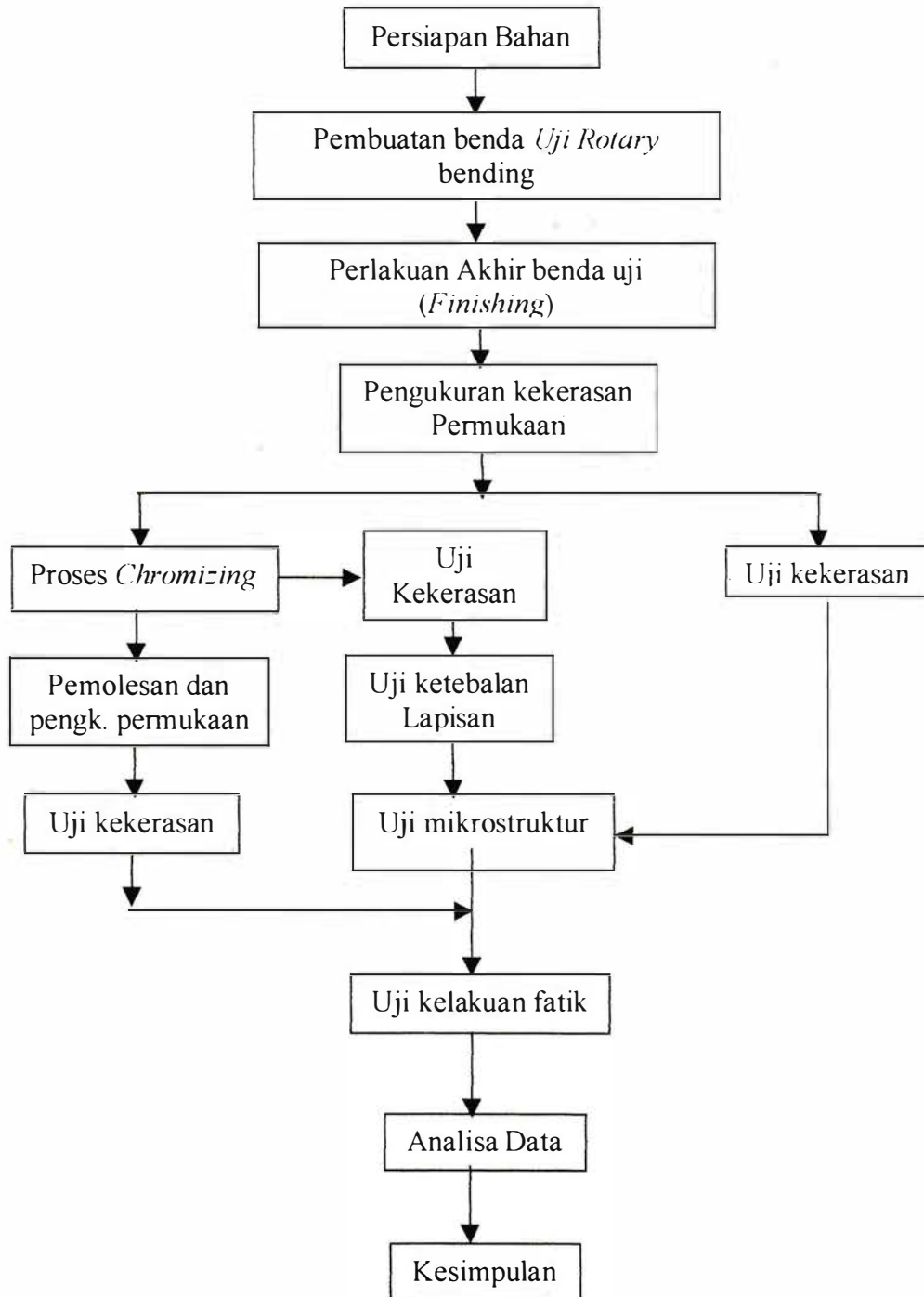
SEM digunakan untuk mengamati lapisan difusi secara lebih detail, karena foto hasil *SEM* mempunyai perbesaran lebih tinggi dari hasil foto Mikroskop optik. Spesifikasi SEM yang digunakan adalah sebagai berikut :

Type : Jeol - T120

Perbesaran : 35X ÷ 5000 X.

C. Jalannya Penelitian

Jalannya penelitian dilakukan mengikuti diagram alir dibawah ini.



GAMBAR 3.5 Prosedur Penelitian

1. Pembuatan benda uji rotary bending

Benda uji dibentuk dari baja DIN 42CrMo4. Baja ini diperoleh dalam bentuk baja batangan dengan diameter (\varnothing) = 12,8 mm. Pada tahapan pertama baja batangan ini dipotong-potong dengan ukuran kira-kira 200 mm. Selanjutnya untuk setiap potongan dapat dibentuk 2 buah benda uji untuk *rotary bending* seperti (gambar 3.1) dengan menggunakan mesin CNC. Jumlah benda uji yang diperlukan sebanyak 54 buah untuk uji *rotary bending*.

2. Pekerjaan akhir dan Pengukuran kekasaran

Kekasaran permukaan akan memberikan kontribusi yang besar terhadap penurunan kekuatan fatik dari suatu komponen mesin. Karena kekasaran permukaan ini menimbulkan konsentrasi tegangan lokal yang pada akhirnya mengakibatkan terjadinya retak awal. Untuk menghilangkan pengaruh ini diperlukan permukaan yang halus.

Kekasaran permukaan (*surface roughness*) benda uji hasil permesinan dengan CNC, belum memenuhi syarat kekasaran permukaan untuk uji *rotary bending*. Dengan demikian masih dibutuhkan pekerjaan akhir (*finishing*) pada permukaan benda uji tersebut, yaitu dilakukan pemolesan dengan menggunakan kertas amplas secara bertahap mulai dari grid 600, 1000, 1500 dan diakhiri dengan pemolesan dengan autosal. Pemolesan ini dilakukan dengan bantuan mesin bubut sebagai alat pemegang benda uji, diputar sambil ditekan permukaannya dengan kertas amplas. Dengan demikian diperoleh kekasaran permukaan yang relatif sama diseluruh permukaan benda uji.

Pekerjaan akhir permukaan ini diikuti dengan pengukuran kekasaran permukaan dengan alat pengukur kekasaran permukaan (*surface roughness tester*). Jika kekasaran permukaan belum pada batas yang ditentukan, pemolesan dilanjutkan kembali sampai diperoleh nilai kekasaran yang ditentukan. Dengan demikian diharapkan diperoleh kekasaran permukaan yang sama untuk semua benda uji.

Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan dengan menggunakan *surface roughness tester* merek surfcome 2A. Pengukuran dengan panjang lintasan (*tracing length*) 4 mm dengan perbesaran vertikal (*vertical magnification*) 2000X, serta perbesaran horizontal (*horizontal magnification*) 20X. Hasil pengukuran dibedakan menjadi 3 kategori nilai kekasaran yaitu R_a , R_{max} , dan R_z . Nilai yang paling penting adalah nilai kekasaran rata-rata (R_a) dan nilai kekasaran maksimum (R_{max}).

3. Tabung (Retort)

Pada proses pelapisan dengan teknik *pack cementation* diperlukan tabung (*retort*) sebagai tempat untuk memanaskan campuran unsur-unsur penyusun *pack*. Tabung ini dibentuk dari pipa *stainles steel* dengan diameter dalam (D_i) = 33 mm. Awalnya pipa batangan ini dipotong-potong dengan ukuran panjang 14 cm, selanjutnya ditutup salah satu ujungnya dengan plat melalui pengelasan dan ujung lainnya dibentuk alat penutup yang dapat dipasang dan dilepas sewaktu penyusunan *pack*.

4. Persiapan proses chromizing

a. Menentukan berat komponen-komponen pack. Sebelum dilakukan penyusunan *pack* yang akan dipanaskan dalam dapur pemanas, terlebih dahulu ditentukan berat masing-masing komponen campuran *pack*. Komponen campuran *pack* terdiri dari 15% berat serbuk chromium murni (Cr), 5% berat serbuk Ammonium Chlorida (NH_4Cl) dan sisanya serbuk Aluminium oksida (Al_2O_3). Volume campuran *pack* (V_p) = Volume tabung (V_t) - Volume benda uji (V_{bu}) atau

$$V_p = V_t - V_{bu} = \Pi/4(di)^2 \cdot L - W_{bu}/\rho_b$$

Besaran (di) adalah diameter dalam tabung = 33 mm dan L = panjang tabung yang diisi oleh campuran *pack* = 120 mm. Sedangkan untuk menentukan volume benda uji terlebih dahulu ditimbang beratnya atau (W_{bu}) = 66 gram dan ρ_b = berat jenis baja = 7,87 gram/cm³ atau

$$V_p = 0,785 (3,3 \text{ cm})^2 \cdot 12 \text{ cm} - \frac{66 \text{ gram}}{7,87 \text{ gram / cm}^3} = 94,2 \text{ cm}^3$$

dalam hal ini V_p = Volume Cr + volume NH_4Cl + volume Al_2O_3

$$= \frac{W_{Cr}}{\rho_{Cr}} + \frac{W_{NH_4Cl}}{\rho_{NH_4Cl}} + \frac{W_{Al_2O_3}}{\rho_{Al_2O_3}} = \frac{W_{Cr}}{3,7 \text{ gram / cm}^3} + \frac{W_{NH_4Cl}}{0,8 \text{ gram / cm}^3} + \frac{W_{Al_2O_3}}{1,061 \text{ gram / cm}^3}$$

sedangkan perbandingan berat : $W_{Cr} : W_{NH_4Cl} : W_{Al_2O_3} = 15 : 5 : 80$

(ditentukan berdasarkan referensi). Berat equivalent (NH_4Cl) dan (Al_2O_3)

terhadap (Cr) adalah : $W_{NH_4Cl} = \frac{5}{15} W_{Cr}$ dan $W_{Al_2O_3} = \frac{80}{15} W_{Cr}$, maka $V_p =$

$0,27 W_{Cr} + 5,026 W_{Cr} + 0,4166 W_{Cr}$, maka diperoleh $W_{Cr} = 16,5$ gram,
 $W_{NH_4Cl} = 5,5$ gram dan $W_{Al_2O_3} = 88$ gram.

b. Persiapan benda uji. Langkah berikutnya dibersihkan benda uji yang akan di-*chromizing* dari kotoran-kotoran yang menempel pada permukaannya. Pada awalnya dipoles dengan amplas sampai permukaannya mengkilap dan diakhiri pemolesan dengan autosol. Selanjutnya dicuci dengan *methanol* atau *acetone* dan disimpan didalam wadah tertutup untuk menghindari terjadinya korosi

c. Persiapkan Tabung (retort). Tabung (*retort*) dibersihkan dan dicuci sampai permukaannya bebas dari kotoran yang menempel ,yaitu dengan jalan menggosok dengan kertas amplas dan autosol.

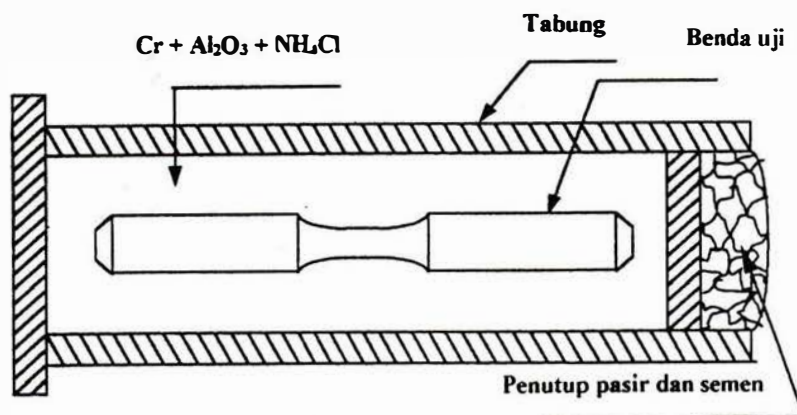
d. Bahan-bahan campuran pack. Bahan-bahan penyusun campuran *pack* yang telah disediakan sesuai dengan beratnya masing-masing dimasukkan kedalam bak pencampuran dan diaduk sampai dicapai homogen secara menyeluruh.

e. Bahan penutup. Pada proses pemanasan perlu dihindari masuknya udara kedalam campuran *pack* karena akan terjadi oksidasi pada material yang dilapisi. Untuk mengantifasi keadaan ini dilakukan dengan meletakkan benda uji jauh kedalam tabung (2,5cm dari ujung tabung) dan di bagian ujung tabung dipadatkan campuran *pack*nya. Selanjutnya ditutup dengan plate dari stainless steel dan diakhiri penutupan dengan campuran semen

tahan api dan pasir. Bahan semen tahan api dan pasir ini dicampur dengan perbandingan 2:1

5. Penyusunan pack

- a. Campuran *pack* yang telah diaduk dimasukkan kedalam tabung setinggi 1/2 cm dari dasar tabung.
- b. Langkah berikutnya 1 buah benda uji dimasukkan kedalam tabung tersebut dengan posisi tegak dan centris.
- c. Campuran *pack* dimasukkan kembali kedalam tabung hingga tabung penuh mencapai permukaan 2,5 cm diatas benda uji dan dipadatkan pada bagian ujungnya.
- d. Selanjutnya ditutup dengan plat dan diikuti campuran semen tahan api dengan pasir.
- e. Pack yang telah ditutup siap dimasukkan ke dapur pemanas
- f. Langkah a s/d e diulangi kembali sampai diperoleh 4 buah *pack*.



Gambar (3.6) Susunan pack dalam tabung

6. Proses Pemanasan

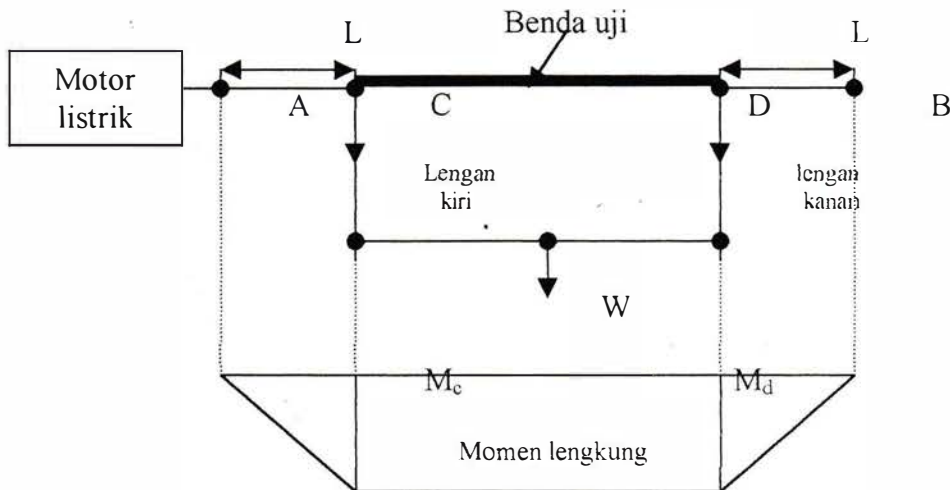
Empat buah *pack* yang telah dipersiapkan untuk satu kali proses pemanasan, dimasukkan ke dalam dapur pemanas. Selanjutnya dilakukan pemanasan awal sampai dengan temperatur 150°C dan ditahan selama satu jam dengan tujuan untuk menghilangkan kandungan air dari tutup *pack*. Kemudian dilakukan pemanasan lanjutan secara perlahan-lahan sampai temperatur 1050°C. Untuk mencapai temperatur 1050°C diperlukan waktu kurang lebih 2,5 jam. Setelah temperatur 1050°C dicapai, keadaan ini harus dipertahankan dalam jangka waktu tertentu, bergantung pada variasi waktu yang diinginkan. Pada penelitian ini variasi waktu penahanan yang dipilih adalah jangka waktu 6 jam, 8 jam dan 10 jam. Keadaan ini dipilih karena waktu tersebut adalah sebagai variabel dalam penelitian ini. Untuk setiap variabel waktu diperlukan 12 buah *pack*. Dengan demikian jumlah keseluruhan adalah 36 *pack*.

7. Uji Kelelahan

Benda uji yang telah dipersiapkan sesuai standart JIS – Z – 2274 (*lihat gambar 3.1*) dilapisi sebanyak 36 buah benda uji, masing-masing 12 buah benda uji untuk setiap satu variasi temperatur. Demikian pula untuk kelompok pembanding (*benda uji tanpa dilapisi*) diperlukan 12 buah benda uji.

Semua benda uji diuji fatik dengan menggunakan mesin uji *rotary bending* pada putaran 2850 rpm. Secara skematik posisi dan sistem pembebanan benda uji dapat dilihat gambar (3.7).

Jumlah beban dapat ditentukan dari data mesin tersebut. Beban W diletakkan disetengah panjang C- D, yang ditumpu bantalan A dan bantalan B. Dengan demikian gaya reaksi pada tumpuan A = $(\frac{1}{2}) W$ dan pada tumpuan B = $(\frac{1}{2}) W$. Panjang lengan $L = 200$ mm yaitu jarak beban $(\frac{1}{2}) W$ terhadap tumpuan



Gambar 3.7 Posisi benda uji pada mesin uji rotary bending dan diagram momen lengkung

utama A disebelah kiri, maupun tumpuan utama B disebelah kanan. Momen lengkung antara tumpuan C dan D dapat ditentukan dengan rumus :

$$M_c = M_d = (\frac{1}{2}) W \cdot L = \frac{1}{2} W \cdot 200 = 100 W \text{ kg mm} \quad (3.1)$$

dengan demikian tegangan yang dialami benda uji :

$$\sigma_b = \frac{\text{Momen lengkung yang terjadi}}{\text{Momen tahanan lengkung}} = \frac{M}{(\pi/32)d^3} = \frac{32M}{\pi d^3} = \frac{3200 W}{\pi \cdot d^3} \text{ kg/mm}^2 \quad (3.2)$$

Besaran W menunjukkan beban yang harus diberikan (kg) dan (d) diameter benda uji (mm)

Pada uji rotary bending tingkat tegangan (σ_b), dimulai dari yang paling tinggi (σ_1) = (0,7 : 0,8) dari tegangan ultimate (σ_u) dari benda uji. Pada tingkat tegangan (*stress level*) ini dilakukan uji rotary bending sampai diperoleh jumlah

siklus kegagalan(N_1). Selanjutnya tegangan σ_2 , σ_3 dan seterusnya, untuk benda uji ke dua, ketiga dan seterusnya, dilakukan dengan cara yang sama sehingga diperoleh jumlah siklus N_2, N_3 dan seterusnya. Besar tegangan untuk setiap tingkat tegangan (*stress level*) diturunkan kira-kira $(2 - 4) \text{ kg/mm}^2$.

Urutan pengujian seperti diuraikan diatas dilakukan untuk setiap kelompok benda uji (*variasi temperatur*). Dengan demikian data-data yang diperoleh dari setiap kelompok digunakan untuk menggambarkan diagram S – N.

8. Pengukuran tebal lapisan dan Mikrostruktur

Untuk mengetahui tebal lapisan dan mikrostruktur hasil proses *chromizing*, diperlukan benda uji yang sama seperti pada pengujian kekerasan permukaan. Permukaan yang halus dan bebas dari goresan-goresan, dietsa dengan menggunakan larutan 5% HNO_3 , hasil etsa ini diamati tebal lapisan maupun mikro strukturnya dengan menggunakan mikroskop optik, dan selanjutnya diambil gambarnya. Pada awalnya pengamatan dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik yaitu untuk menentukan tebal lapisan, dan strutur mikro *substrate*. Untuk menentukan tebal lapisan dihitung jumlah strip sepanjang tebal lapisan.

IV. HASIL dan PEMBAHASAN

A. Kekasaran Permukaan (*surface roughness*)

Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan dengan menggunakan alat pengukur kekasaran permukaan (*surface roughness tester*) surfcome 2A. Pengukuran dengan panjang lintasan 4,00 mm dengan pembesaran vertikal (*vertical magnification*), 20x. Hasil pengukuran dibedakan menjadi 3 kategori. Nilai kekasaran, yaitu R_a , R_{max} dan R_z . Nilai yang paling penting adalah nilai kekasaran rata-rata (R_a) dan nilai kekasaran maximum (R_{max}).

Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan terhadap semua benda uji yang akan diuji kekasarannya. Benda dibedakan 4 kelompok yaitu 3 kelompok dibedakan berdasarkan jangka waktu proses pelapisan dan satu kelompok benda uji pembanding (benda uji yang tidak dilapisi).

Hasil pengujian menunjukkan kekasaran (*roughness*) tidak persis sama untuk semua benda uji, tetapi berada pada batas kekasaran yang ditetapkan. Hal ini disebabkan sulitnya untuk mendapatkan kekasaran yang persis sama. Batas kekasaran yang ditentukan adalah $R_a \geq 0,25 \mu\text{m}$ atau $R_{max} < 3\mu\text{m}$. Batasan ini ditentukan merujuk pada hasil penelitian Hotta dkk (1994), menyatakan bahwa kekasaran permukaan tidak mempengaruhi batas kekelahan dari baja perkakas D_2 dalam batas $R_{max} = 0,3 - 11 \mu\text{m}$. Hasil pengujian kekasaran dapat dilihat pada lampiran B₁ – B₄.

B. Tebal dan struktur mikro Lapisan Chromized

Untuk mengetahui tebal lapisan dan mikro struktur hasil pelapisan dengan chromium (*chromized*), digunakan mikroskop optik dan *scanning elektron mikroskop (SEM)*. Pada awalnya sampel yang akan diuji dipoles sampai mengkilap dan bebas dari goresan goresan. Selanjutnya dietsa dengan konsentrasi urutan 5% HNO₃ dan selanjutnya diambil fotonya. Hasil foto mikro dengan mikroskop optik ditunjukkan pada gambar (4.1) s/d gambar (4.2), dan hasil foto mikro dengan *scanning elektron mikroskop (SEM)* ditunjukkan pada gambar (4.3) s/d gambar 4.5.

1. Tebal lapisan *chromized*.

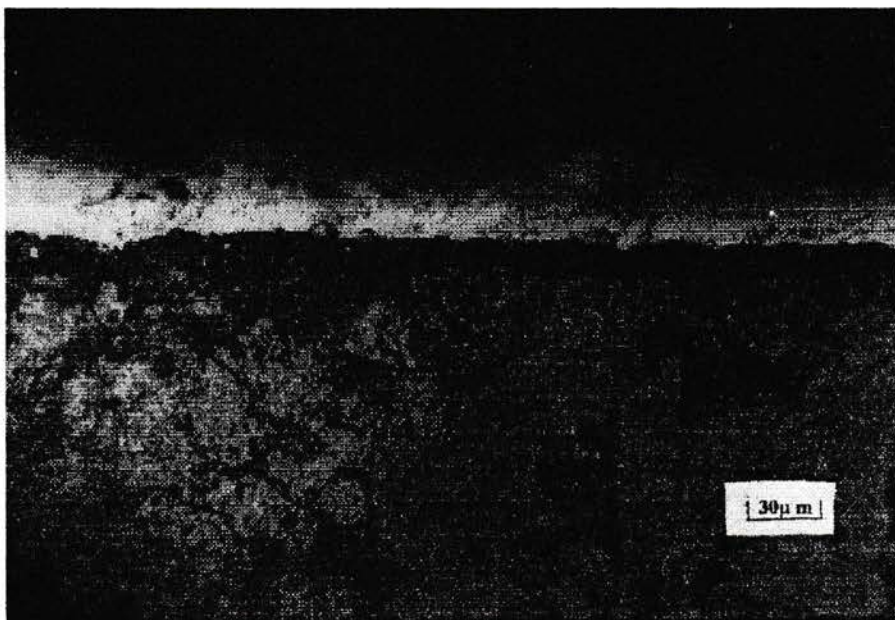
Untuk mengetahui tebal lapisan digunakan mikroskop optik pada pembesaran 500 x. Dihitung jumlah strip dari permukaan sampai dengan adanya garis pembatas warna, dalam hal ini warna putih pada gambar 4.1 s/d gambar 4.3. Hasil pembacaan jumlah strip dapat dilihat pada lampiran A. Dengan menggunakan rumus, dapat dihitung tebal lapisan, seperti tabel (4.1). Dari perhitungan ini tabel lapisan I, lapisan II dan lapisan III, sebanding dengan lamanya jangka waktu proses penahanan.

2. Mikro struktur lapisan *Chromized*

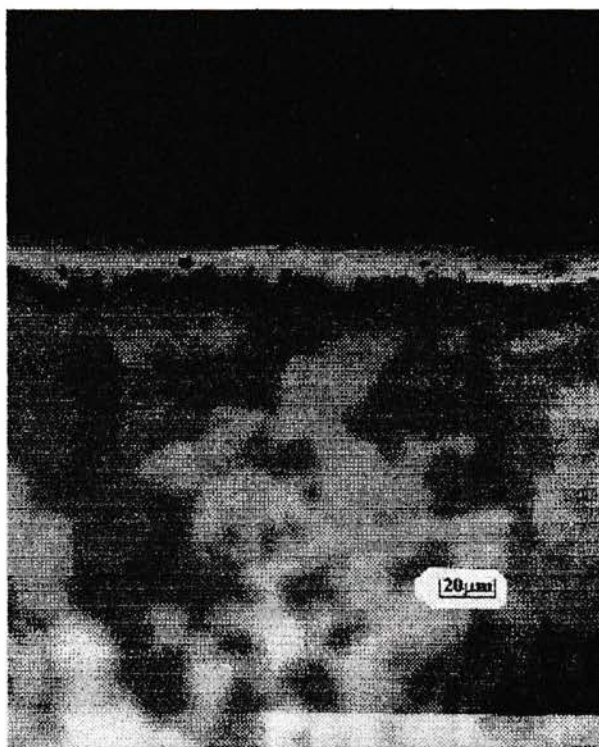
Dari diagram fasa Fe-Cr, paduan-paduan dengan kandungan chrom lebih besar dari 12%, akan terbentuk fasa ferit pada semua tingkat temperatur, dan tidak ada transformasi martensif yang mungkin terjadi. Oleh karena itu lapisan *chromized* terdiri dari matrik ferit yang kaya chromium dan diselang-selingi oleh sejumlah chromium carbida.

Tabel 4.1 Tebal Lapisan Chromized (μm)

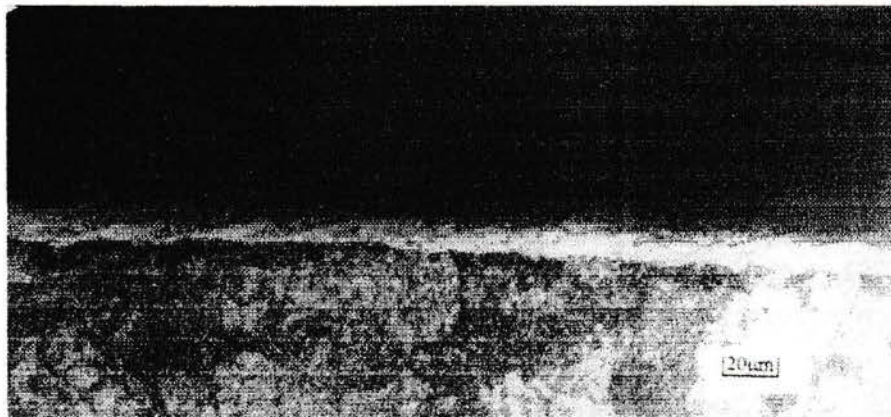
No Pengukuran	6 Jam	8 jam	10 jam
1	10,0	10,0	23,7
2	10,0	11,1	23,7
3	9,4	12,2	26,1
4	10,5	13,8	25,5
5	9,4	13,8	27,7
6	10,0	13,8	28,6
7	9,4	12,2	26,8
8	6,6	13,3	26,8
9	9,4	12,2	26,8
10	7,7	13,3	30,8
11	7,2	12,2	26,1
12	8,8	14,8	23,8
13	8,3	13,8	23,1
14	8,3	13,3	23,6
15	8,3	14,8	25,8
16	10,0	11,6	26,4
17	10,0	11,6	24,9
18	10,0	11,6	24,4
19	8,3	12,2	23,7
20	8,3	11,6	24,9
21	8,8	12,2	23,1
22	9,4	11,6	23,6
23	10,0	12,7	24,9
24	9,4	12,7	25,5
25	10,0	12,7	24,2
Rerata	9,1	12,6	25,2



GAMBAR 4.1 Fotomikro struktur untuk proses 10 jam



GAMBAR 4.2 Foto struktur mikro untuk proses 8 jam



GAMBAR 4.3 Foto struktur mikro untuk proses 6 jam

Gambar (4.1) adalah hasil foto mikro dengan mikroskop optik untuk jenis lapisan III (lama penahan 10 jam), menunjukkan tebal lapisan *chromized* (warna putih) sekitar 25 μm . Struktur mikro lapisan ini diperjelas gambar (4.4.) yaitu hasil foto mikro dengan *scanning elektron mikroskop (SEM)*. Untuk keperluan pembahasan lapisan III ini dibagi menjadi 3 sub lapisan. Pada sub lapisan I dengan ketebalan sekitar 10 μm atau ditunjukkan dengan warna putih pada gambar (4.4.), terdiri dari sebagian besar chromium dalam matrik ferit dan sedikit karbida. Penumpukan chromium ini terjadi akibat dirintangan oleh carbida-carbida yang terbentuk pada sub lapisan II. (Lakhtin 1981). Pada sub lapisan II, dengan ketebalan sekitar 15 μm yang ditunjukkan dengan warna gelap dan adanya bintik-bintik putih. Bintik-bintik putih ini merupakan difusi chromium pada sub lapisan II. Zona ini banyak mengandung chromium carbida. Carbida-carbida ini terbentuk akibat bertemunya chromium dari arah permukaan dengan carbon yang berdifusi dari arah bagian dalam *substrate* (Lakhtin 1981). Seperti yang

dijelaskan diatas, carbida-carbida merintang difusi chromium yang berakibat tertumpuknya chromium pada sub lapisan I.

Selanjutnya, pada sub lapisan II dijumpai pula adanya pori-pori. Berdasarkan klasifikasi Henry (*Ellis 1990*), pori-pori yang terbentuk pada lapisan II ini, termasuk kategori ringan (minimum). Pada sub lapisan III yaitu zona lebih besar 25 μm dari permukaan lapisan sampai jarak 50 μm dari permukaan lapisan. Pada zone ini dijumpai sedikit bintik-bintik putih. Bintik-bintik putih ini menunjukkan adanya difusi chromium sampai jarak 50 μm kedalam *substrate*.

Gambar (4.2) dan gambar (4.5) masing-masing menunjukkan hasil foto mikro dengan mikroskop optik dan dengan *scanning elektro mikroskop (SEM)*, untuk jenis lapisan II. Untuk keperluan pembahasan jenis lapisan II ini dibagi menjadi 3 sub lapisan. Pada sub lapisan I ketebalan sekitar 6-7 μm atau yang ditunjukkan dengan warna putih pada gambar (4.5). Pada sub lapisan ini terdiri dari sebagian besar chromium, dalam matrik ferit. Tebal penimbunan chromium ini lebih kecil dibanding dengan untuk jenis lapisan III. Hal ini disebabkan oleh waktu penimbun yang lebih singkat. Pada sub lapisan II, dengan ketebalan 10-12 μm , yang ditunjukkan warna gelap dan adanya bintik-bintik putih yang relatif banyak. Bintik-bintik putih ini merupakan difusi chromium pada sub lapisan II. Seperti penjelasan pada alinea sebelumnya, (jenis lapisan III), zone sub lapisan II banyak mengandung carbida yang dibentuk sewaktu difusi carbon dari arah bahagian dalam. Sub lapisan II ini mengandung pori-pori yang sedikit sekali.

Gambar (4.3) dan gambar (4.6) masing-masing menunjukkan hasil foto mikro dengan mikroskop optik dan dengan SEM, untuk jenis lapisan I

(penahanan 6 jam) untuk keperluan pembahasan jenis lapisan. I juga dibagi menjadi 3 sub lapisan. Pada sub lapisan I, ketebalan sekitar 5-7 μm , atau yang ditunjukkan dengan warna putih pada gambar (4.6). Pada sub lapisan I ini sama dengan penjelasan pada jenis lapisan III dan jenis lapisan II. Pada sub lapisan II juga dijumpai bintik-bintik putih yang relatif rapat yaitu pada zone (6-15) μm dari permukaan. Pada zone tidak dijumpai adanya pori-pori.

C. Uji kelelahan (Fatigue test)

Uji kelelahan untuk mendapatkan kurva S-N telah dilakukan dengan mesin uji *rotary bending* pada putaran 2850 rpm. Pengujian kelelahan dilakukan untuk kelompok benda uji yang dilapisi dengan kelompok untuk benda uji yang tidak dilapisi. Pengelompokan benda uji yang dilapisi berdasarkan jangka waktu penahan pada waktu proses pelapisan. Benda uji yang dilapisi 6 jam (jenis lapisan I), 8 jam (jenis lapisan II) dan 10 jam (jenis lapisan II). Data-data hasil pengujian dapat dilihat pada lampiran B.

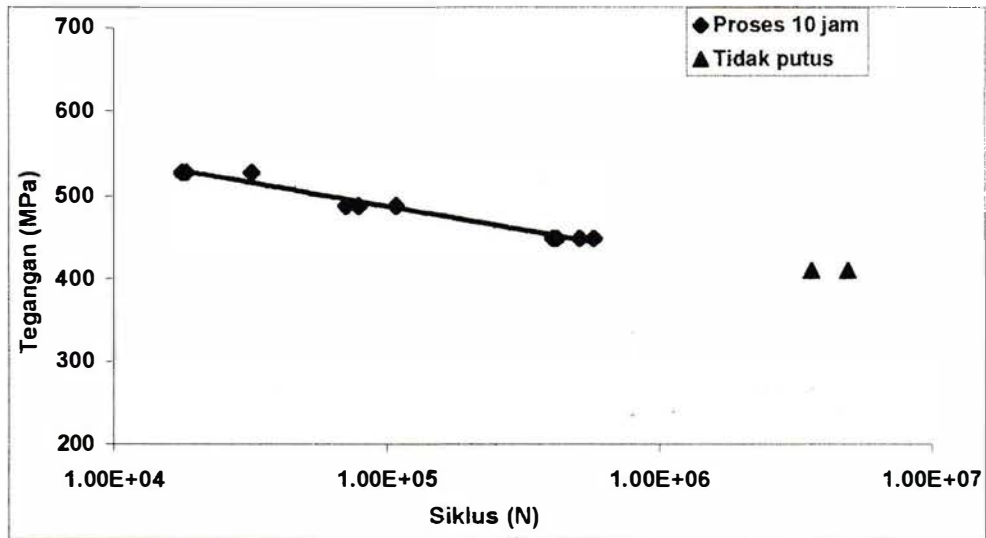
Hasil pengujian diplot antara tingkat tegangan (S) terhadap jumlah siklus kegagalan (N) atau kurva (S-N). Kurva S-N diperoleh dengan menggunakan teknik regresi linear dari data-data hasil pengujian. Teknik regresi linear ini merujuk pada ASTM E739. Gambar (4.12) untuk benda uji tanpa dilapisi, gambar (4.7) untuk benda uji jenis lapisan III, gambar (4.8) untuk benda uji jenis lapisan II dan gambar (4.9) untuk benda uji jenis lapisan I. Dari gambar tersebut dapat dilihat adanya sebaran data yang besar. Sebaran data yang besar dijumpai pada kurva benda uji yang tidak dilapisi dan untuk benda uji yang dilapisi

menunjukkan lebih kecil sebaran datanya. Keadaan ini menunjukkan benda uji yang tidak dilapisi mempunyai variasi sifat-sifat mekanis yang lebih besar, bila dibandingkan dengan variasi sifat-sifat mekanis benda uji yang dilapisi.

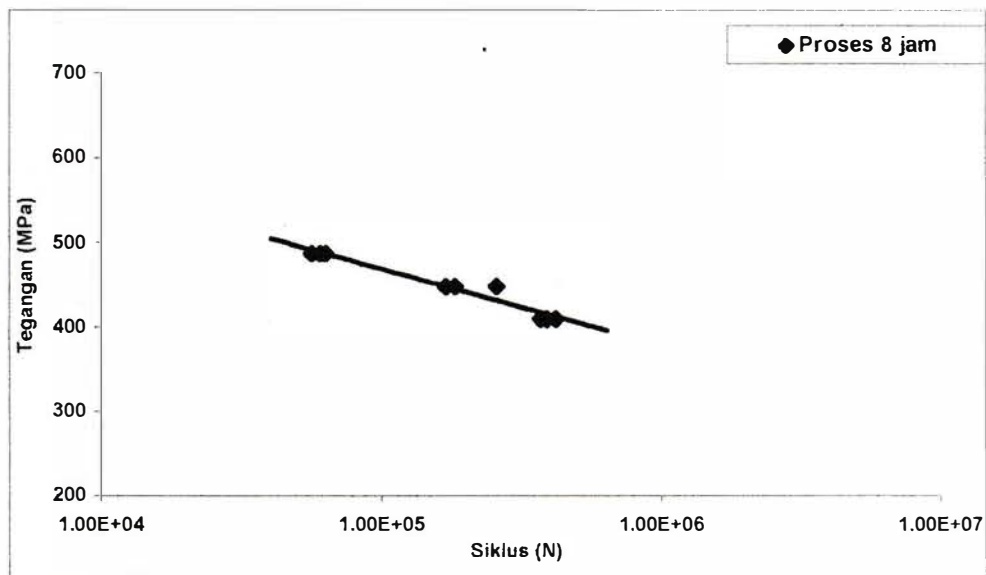
Gambar (4.10) menunjukkan kurva S-N gabungan antara benda uji yang dilapisi dan benda uji yang tidak dilapisi. Dari kurva S-N ini dapat dilihat adanya penurunan kekuatan fatik yang cukup signifikan antara benda uji yang tidak dilapisi dengan benda uji yang dilapisi. Perubahan ini diakibatkan oleh adanya perubahan sifat-sifat mekanis yang signifikan pada benda uji yang dilapisi.

Gambar (4.12) menunjukkan kurva S-N gabungan dari jenis I jenis lapisan II dan jenis lapisan III. Dari kurva S-N ini menunjukkan adanya perbedaan kekuatan fatik, akibat adanya perbedaan tebal lapisan *chromized*. Lapisan *chromized* yang lebih tebal, mempunyai kekuatan fatik yang lebih besar. Keadaan ini diakibatkan oleh karena pada lapisan yang lebih tebal terbentuk struktur karbida yang lebih tebal pula atau dilihat pada gambar (4.1) s/d gambar (4.5). Dengan demikian akan terbentuk lapisan karbida yang lebih keras, maka akan terjadi perambatan retak yang lambat.

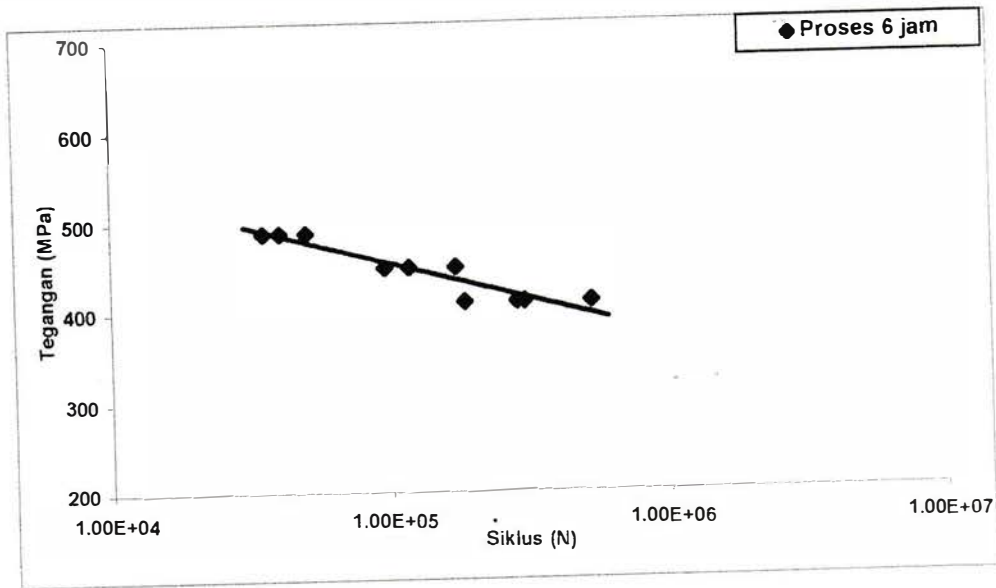
Untuk memperbaiki sifat-sifat mekanis hasil pelapisan dengan chromium (*chromized*) adalah dengan jalan memperbaiki sifat-sifat mekanis logam dasarnya (*substrate*). Sifat-sifat mekanis logam dasar dapat diperbaiki melalui perlakuan panas lanjutan.



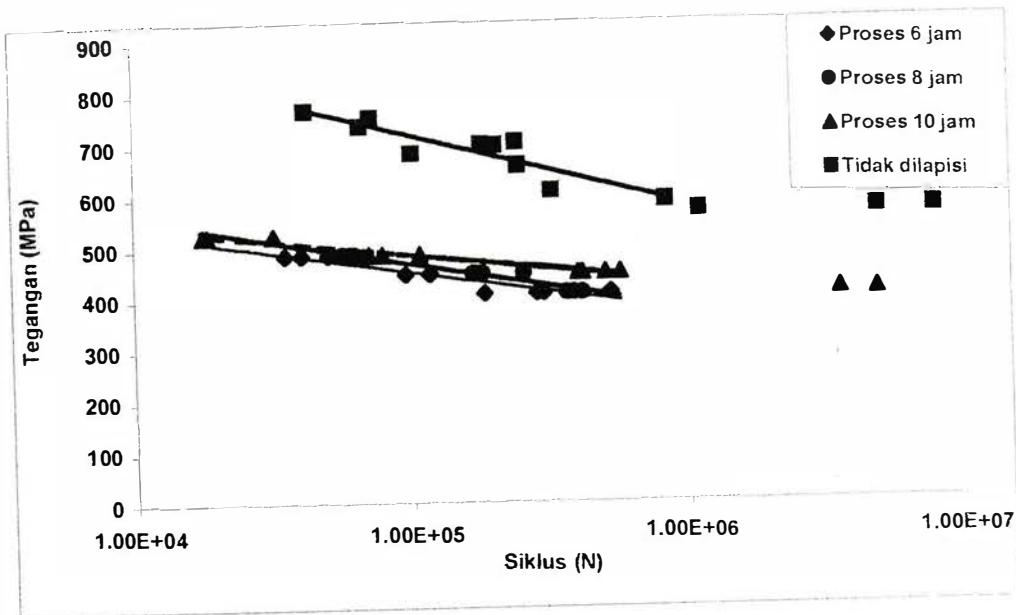
GAMBAR 4.7 Kurva S-N untuk proses 10 jam



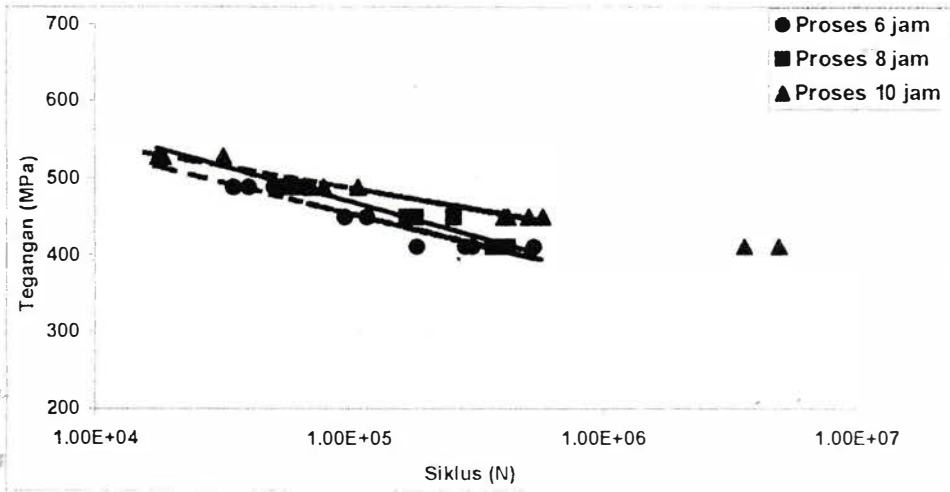
GAMBAR 4.8 Kurva S-N untuk proses 8 jam



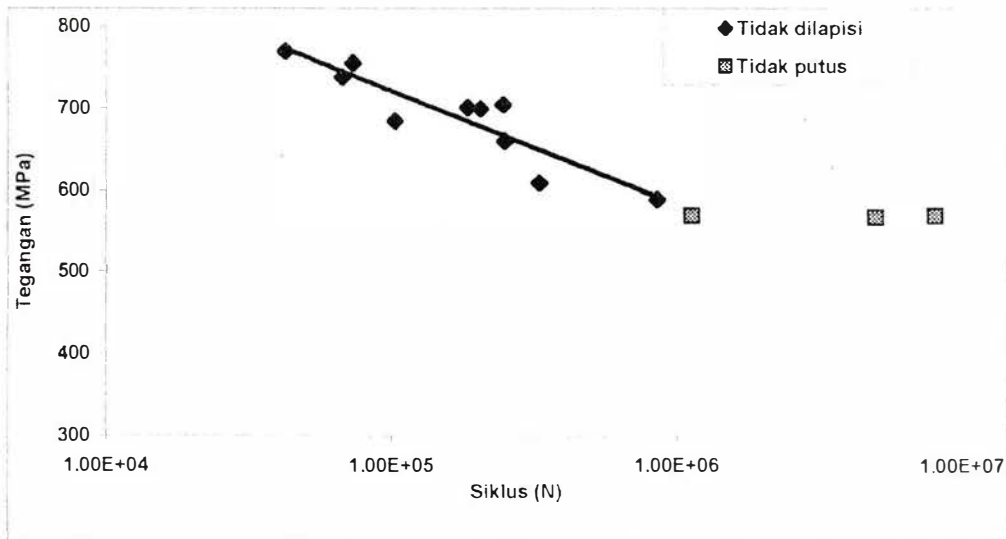
GAMBAR 4.9 Kurva S-N untuk proses 6 jam



GAMBAR 4.10 Kurva S-N gabungan



GAMBAR 4.11 Kurva S-N gabungan antara 3 jenis lapisan



GAMBAR 4.12 Kurva S-N untuk benda uji yang tidak dilapisi

KESIMPULAN

Beberapa hal yang dapat diambil kesimpulan dari penelitian pengaruh struktur mikro lapisan *chromized* baja DIN 42 CrMo4 terhadap tahanan fatik adalah sebagai berikut :

Lapisan *chromized* mempunyai ketebalan antara (10-25) μm yang bervariasi bergantung kepada jangka waktu proses pelapisan, makin lama proses pelapisan, makin tebal lapisan yang terbentuk.

Lapisan *chromized* terdiri dari fasa ferit yang banyak mengandung chromium dan diselang-selingi chromium carbida.

Kekuatan fatik *chromized* dari baja DIN 42CrMo4 yang dilapisi dengan teknik *pack cementation*, mengalami penurunan secara signifikan dan bervariasi berdasarkan tebal lapisan yang terbentuk, makin tebal lapisan yang terbentuk semakin kecil penurunan kekuatan fatiknya.

Penurunan kekuatan fatik ini diakibatkan oleh perubahan struktur mikro dari logam dasar.

Daftar Pustaka

- Dugdale, D.S., and Sarwar, M., 1996, "Fatigue Strength of Band Saws with hard Coating", J. of Mater. Proces. Techn. 56, 1-4, 729-732.
- Dieter, G.E., 1986, "Metal Fatigue", Mechanical Metallurgy, 3rd edition.
- Ellis, F.S., 1992, "Metal Evaluation of Chromized Coating for Boiler Tubing Appl.", Microstructural Sci. 19, 597.
- Ferreire, J.A.M., Costa, J.D.M., and Lava, V., 1997, "Fatigue Behavior of 42CrMo4 Steel with PDV Coating". Int.J. Fatigue, 19, 4, 293-299
- Fuchs, H.O., and Stephen, R.I., 1980, "Metal Fatigue Engineering", John Wiley & Son, Inc.
- Geller, Y., 1978, "Surface Layer, Defect and Improvement", Tool Steel, Publish, house Moscow.
- Hashem, A.M., and Aly, I.H., 1994, "High Cycle Fatigue Life of Coated Low Carbon Steel", Fatigue, 16, 321-329.
- Hotta, S., Saruki, K. and Arai, I., 1994, "Endurance Limit of thin Hard Coated Steel in Bending Fatigue", Surface and Coating, Techn. 70, 121-129.
- Liu, C.T., and Wu, J.D., 1990, "The Structure and High Temperature Corrosion Properties of Chromized Coatings", Surface and Coating Techn., 43/44, 493-499.
- Lakhtin, Y., "Chemical Heat Treatment of Steel", Engng. Physical Metal", Foreign, Lang. Publish. House Moscow.
- Shiozawa, K., Motobashy, K., Sonobe, M., 1996, "Corrosion Fatigue behaviour of chromium Nitride Coated Steel", J. Soc. Mat. Sci., Japan 45, 1, 26-311
- Stamm, H., Holzwarth, U., Boerman, D.J., 1996, "Effect of Laser Surface Treatment on High Cycle Fat. Of AISI 316L Stainless Steel", Fat. Fract. Engng. Mater. Struct., 9, 8, 985-995
- Surdia, T., and Saito, S., 1995, "Pengetahuan Bahan Teknik", edisi 2, Pradnya, Jakarta.
- ✓ Sonobe, M., Shiozawa, K., and Motobayashi, K., 1996, "Improvement in Corrosion resistance of CrN Coated Steel with multi Stage deposition Method and its Corrosion in Fatigue Strength", Proc. Of The 1996 4th Int. Conf. ON Comp-aided assessment and Control.

1 Data pengujian fatik dan kekarasan permukaan untuk benda uji 6 jam

No. Specimen	Roughness Ra (μm)	Tegangan (Mpa)	Siklus (N)
1	0,12	488,07	35.300
2	0,10	488,07	40.500
3	0,12	488,07	50.700
4	0,22	449,03	96.400
5	0,10	449,03	117.900
6	0,08	449,03	173.300
7	0,12	409,98	185.900
8	0,08	409,98	532.400
9	0,14	409,98	287.300
10	0,18	409,98	305.600

B.2 Data Pengujian fatik dan Kekasaran untuk benda uji proses 8 jam

No. Specimen	Roughness Ra (μm)	Tegangan (Mpa)	Siklus (N)
1	0,12	488,07	56.600
2	0,10	488,07	63.400
3	0,10	488,07	60.700
4	0,18	449,03	169.200
5	0,10	449,03	182.300
6	0,18	449,03	257.900
7	0,12	409,98	369.400
8	0,14	409,98	390.400
9	0,18	409,98	420.800

B.3 Data Pengujian fatik dan Kekasaran untuk benda uji proses 10 jam

No. Specimen	Roughness Ra (μm)	Tegangan (Mpa)	Siklus (N)
1	0,12	527,50	17.800
2	0,10	527,50	32.100
3	0,18	527,50	18.500
4	0,18	488,07	79.300
5	0,18	488,07	71.200
6	0,20	488,07	108.500
7	0,18	449,03	510.400
8	0,10	449,03	406.700
9	0,10	449,03	575.200
10	0,18	449,03	420.100
11	0,12	409,98	3.598.100
12	0,20	409,98	4.905.700

B.4 Data Pengujian fatik dan kekasaran untuk benda uji yang tidak dilapisi

No. Specimen	Roughness Ra (μm)	Tegangan (Mpa)	Siklus (N)
1	0,12	770,01	42.400
2	0,10	755,97	73.250
3	0,18	738,83	67.300
4	0,18	705,47	245.800
5	0,10	701,54	183.900
6	0,12	699,86	205.100
7	0,18	685,32	102.800
8	0,10	660,52	249.000
9	0,08	609,77	329.450
10	0,12	590	851.138
11	0,18	570	1.122.450 [↑]
12	0,20	570,43	7.991.300 [↑]
13	0,10	568,30	4.959.800 [↑]