

**PENGARUH WAKTU DIFUSI PROSES NITRIDING
DALAM FLUIDIZED BED FURNACE TERHADAP
DISTRIBUSI KEKERASAN PADA ALUMINIUM PADUAN**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI**

**Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Disusun oleh :

**BUDIYAN MARIYADI
NIM. 0410622004-62**

DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

JURUSAN MESIN

MALANG

2007

**PENGARUH WAKTU DIFUSI PROSES NITRIDING
DALAM FLUIDIZED BED FURNACE TERHADAP
DISTRIBUSI KEKERASAN PADA ALUMINIUM PADUAN**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI**

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**



Disusun oleh :

**BUDIYAN MARIYADI
NIM. 0410622004**

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

**Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met.
NIP. 130 574 846**

**Ir. Endi Sutikno, MT.
NIP. 131 576 002**

**PENGARUH WAKTU DIFUSI PROSES NITRIDING
DALAM FLUIDIZED BED FURNACE TERHADAP
DISTRIBUSI KEKERASAN PADA ALUMINIUM PADUAN**

Disusun oleh :

**BUDIYAN MARIYADI
NIM. 0410622004**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 3 Mei 2007

DOSEN PENGUJI

Skripsi 1

**Ir. Winarno Yahdi Atmodjo, MT.
NIP. 131 280 655**

Skripsi 2

**Ir. Bardji Hadi Pranoto.
NIP. 130 935 863**

Komprehensif

**Dr. Slamet Wahyudi, ST.MT.
NIP. 132 159 708**

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Mesin

**Dr. Slamet Wahyudi, ST.MT.
NIP. 132 159 708**

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, taufik dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulis sadar bahwa banyak pihak yang telah membantu didalam pengerjaan karya tulis ilmiah ini. Untuk itu ucapan terima kasih yang tulus penulis haturkan kepada :

- Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST,MT. selaku Ketua Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Bapak Ir. Wahyono Suprpto, M.Met selaku dosen pembimbing I yang banyak memberikan bimbingan dan masukan pada penulis dalam menyusun skripsi ini.
- Bapak Ir. Endi Sutikno, MT selaku dosen pembimbing II yang juga telah banyak memberikan sumbangan pemikiran, bimbingan dan masukan pada penulis.
- Bapak Ir. Djarot B. Darmadi MT, selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Produksi Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya atas masukan-masukannya.
- Bapak Ir. Samsudin, selaku pembimbing pengujian di UGM yang telah banyak memberikan sumbangan pemikiran, bimbingan dan masukan pada penulis
- Mas Komang Astana Widi yang telah banyak mengajarkan teori metalurgi
- Orang tua dan keluarga di Lombok atas doa dan dukungannya.
- Semua pihak yang secara langsung atau tidak langsung khususnya Arek Mesin Angkatan SAP 2004 dan rekan-rekan sumber sari cs, markas oyonid atas dukungan, hiburan dan kesediaan waktu berdiskusi.

Penyusun menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan, karena itu kritik dan saran sangat kami harapkan untuk kesempurnaan skripsi ini.

Malang, 20 Maret 2007

Penyusun

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR LAMPIRAN	vi
RINGKASAN	vii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	3
2.2 Perlakuan panas pada logam.....	4
2.2.1 <i>Thermal Treatment</i>	4
2.2.2 <i>Thermochemical Treatment</i>	5
2.3 Mekanisme penguatan	7
2.3.1 Penguatan dengan penghalusan butir.....	7
2.3.2 Pengerasan Larutan padat	7
2.3.3 Penguatan Serat.....	8
2.3.4 Penguatan presipitasi dan dispersi	8
2.3.5 Pengerasan regangan.....	8
2.3.6 Penguatan martensit.....	8
2.4 Aluminium.....	9
2.4.1 Aluminium Paduan	9
2.4.2 Paduan Al-Cu.....	10
2.4.3 Perlakuan panas paduan Al-Cu.....	11
2.4.4 Diagram fasa paduan Al-Cu	12
2.5 <i>Fluidized Bed</i>	14
2.6 <i>Nitriding</i>	16

2.6.1 Gas Nitriding	17
2.6.2 Pack nitriding	17
2.6.3 Plasma Nitriding	17
2.7 Logam Kubik Pemusatan Sisi.....	18
2.8 Difusi	19
2.8.1 Mekanisme difusi Substitusi.....	21
2.8.2 Mekanisme difusi interstisial.....	22
2.9 Hubungan kekerasan dengan sifat mekanik pada aluminium paduan .	24
2.10 Hipotesa	24

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian.....	25
3.2 Tempat Penelitian	25
3.3 Variabel Penelitian.....	25
3.4 Alat dan Bahan yang digunakan	26
3.5 Prosedur Penelitian.....	28
3.6 Pengujian Kekerasan	29
3.7 Rancangan Penelitian.....	30
3.8 Diagram Alir Penelitian.....	34

BAB IV ANALISA DATA

4.1 Data Hasil Pengujian.....	35
4.2 Pengolahan Data	35
4.2.1 Analisa Statistik.....	35
4.2.2 Analisa Varian Dua Arah.....	40
4.2.3 Analisa Regresi	41
4.2 Pembahasan	44

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....

5.1 Kesimpulan.....	47
5.2 Saran	47

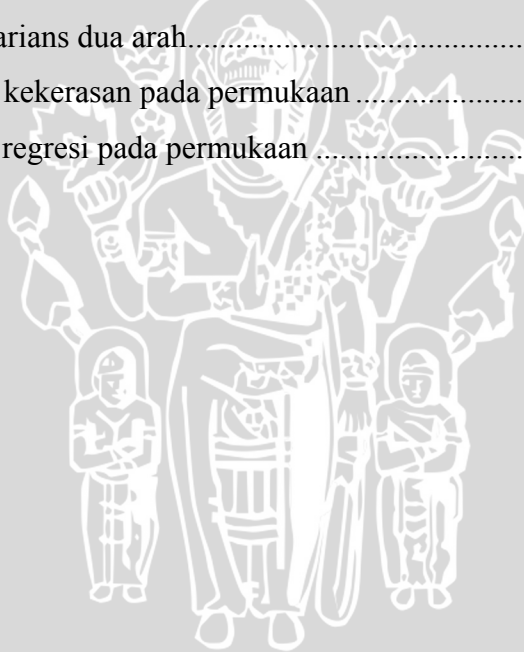
DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

No.	Judul	hal.
Tabel 2.1	Sifat – sifat fisik aluminium	9
Tabel 2.2	Sifat – sifat mekanik aluminium.....	9
Tabel 2.3	Klasifikasi aluminium paduan	10
Tabel 2.4	Sifat mekanik aluminium paduan 2024	11
Tabel 2.5	Nilai konstanta Do	21
Tabel 2.6	Ukuran atom berbagai unsur dibandingkan dengan atom Al	23
Tabel 3.1	Rancangan tabel data hasil uji distribusi kekerasan	30
Tabel 3.2	Rancangan analisa varians dua arah	32
Tabel 4.1	Data hasil uji distribusi kekerasan	35
Tabel 4.2	Nilai interval penduga distribusi kekerasan pada setiap waktu difusi.....	39
Tabel 4.3	Hasil analisa varians dua arah.....	41
Tabel 4.4	Nilai distribusi kekerasan pada permukaan	41
Tabel 4.5	Nilai koefisien regresi pada permukaan	43



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	hal.
Gambar 2.1	Klasifikasi perlakuan panas.....	4
Gambar 2.2	Diagram fasa Al - Cu.....	12
Gambar 2.3	Proses perubahan fasa Al - Cu.....	13
Gambar 2.4	Pengaruh waktu <i>aging</i> terhadap kekuatan dan kekerasan.....	13
Gambar 2.5	Mekanisme penguatan paduan Al - Cu.....	14
Gambar 2.6	Dapur <i>Fluidized Bed</i>	15
Gambar 2.7	Konstruksi dapur <i>fluidized bed</i>	15
Gambar 2.8	Waktu pembentukan lapisan dengan metode konvensional dan <i>fluidized bed</i>	16
Gambar 2.9	Grafik persentase unsur paduan terhadap nilai kekerasan.....	17
Gambar 2.10	Struktur kubik pemusatan sisi pada logam.....	18
Gambar 2.11	Sel satuan kubik pemusatan sisi.....	18
Gambar 2.12	Profil konsentrasi difusi <i>non steady state</i>	20
Gambar 2.13	Difusi <i>substitutional</i>	22
Gambar 2.14	Difusi <i>interstitial</i>	22
Gambar 2.15	Difusi atom pada batas butir.....	23
Gambar 2.16	Pengaruh unsur nitrogen terhadap kekerasan.....	24
Gambar 3.1	Instalasi <i>fluidized bed furnace</i>	26
Gambar 3.2	Alat uji <i>vickers hardness</i>	27
Gambar 3.3	Mikroskop elektron.....	27
Gambar 3.4	Skema distribusi kekerasan pada spesimen.....	28
Gambar 3.5	Indentor <i>vickers</i>	29
Gambar 3.6	Diagram alir penelitian.....	35
Gambar 4.1	Grafik nilai kekerasan terhadap waktu difusi.....	44
Gambar 4.2	Grafik distribusi kekerasan terhadap jarak distribusi.....	44
Gambar 4.3	Foto mikro aluminium paduan.....	46

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Data hasil pengujian kekerasan <i>vickers</i> pada Al-Cu
Lampiran 2	Tabel nilai kekerasan <i>vickers</i>
Lampiran 3	<i>F table</i>
Lampiran 4	<i>The T distribution table</i>
Lampiran 5	Tabel nilai <i>error function</i>
Lampiran 6	Hasil pengujian komposisi aluminium paduan
Lampiran 7	<i>Hardness conversion table and approximate tensile strength</i>
Lampiran 8	Tabel koefisien regresi
Lampiran 9	Tabel persamaan regresi
Lampiran 10	Gambar instalasi penelitian dan ukuran dapur
Lampiran 11	Gambar spesimen uji aluminium paduan
Lampiran 12	Gambar bekas penjejakan uji kekerasan aluminium paduan



RINGKASAN

BUDIYAN MARIYADI, 2007. Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Maret 2007, Pengaruh Waktu Difusi Proses Nitriding dalam Fluidized Bed Furnace terhadap Distribusi Kekerasan pada Aluminium Paduan. Dosen Pembimbing I : Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met., Dosen Pembimbing II : Ir. Endi Sutikno, MT.

Aplikasi aluminium paduan sebagai bahan komponen permesinan, komponen *otomotive* dengan pemanfaatan sifat fisik maupun sifat mekanik yang dimiliki, seperti *Strength to weight ratio*, *thermal to weight ratio* yang tinggi dibandingkan dengan baja yang bekerja pada kondisi gesekan maupun penetrasi dari benda keras secara statis maupun dinamis, sehingga memerlukan peningkatan sifat mekanik aluminium paduan melalui perlakuan panas pelarutan (*solution treatment*) dan perlakuan panas kimia (*thermochemical treatment*) dengan proses *nitriding* dalam dapur *fluidized bed*. Pada proses *nitriding* atom N menempati ruang interstisi membentuk senyawa *nitride* yang keras dengan kedalaman yang berbeda di dalam kristal aluminium paduan selama waktu difusi sehingga terjadi pengerasan pada aluminium paduan.

Penelitian dilakukan dengan memvariasikan waktu difusi sebagai variabel bebas dengan 5 variasi yaitu 30 menit, 60 menit, 90 menit, 120 menit, dan 150 menit pada temperatur proses 500°C, dengan tekanan gas nitrogen 2,5 bar di dalam dapur *fluidized bed* kemudian dilakukan *quenching*, sehingga memberikan pengaruh terhadap nilai kekerasan sebagai variabel terikat.

Dengan meningkatnya waktu difusi proses *nitriding* maka lapisan *nitride* yang terbentuk bertambah, menyebabkan kekerasan aluminium paduan meningkat. Nilai kekerasan pada permukaan 92 – 97 VHN dengan waktu difusi 150 menit, sedangkan pada waktu difusi 30 menit nilai kekerasan 65 – 70 VHN. Pada jarak distribusi 60 µm dengan waktu difusi 150 menit nilai kekerasan 56 – 61 VHN, sedangkan pada waktu difusi 30 menit nilai kekerasan 53 – 58 VHN.

Kata Kunci : Waktu difusi, *Nitriding*, kekerasan, aluminium paduan, *fluidized bed furnace*

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Penggunaan aluminium sebagai logam setiap tahunnya menempati peringkat kedua setelah besi dan baja. Hal ini disebabkan aluminium mempunyai *strength to weight ratio* dan *thermal conductivity to weight ratio* yang tinggi, mudah dibentuk serta mempunyai ketahanan korosi yang baik. Dengan menambah unsur paduan dan perlakuan panas pada aluminium dapat meningkatkan sifat mekaniknya, sehingga mulai pertengahan tahun 1920-an, aluminium digunakan sebagai kap mesin, radiator, piston, velg mobil, paku keling, *block cylinder*, *gear*, rangka pesawat (Callister, 1997 : 364). Beberapa komponen tersebut mempunyai permasalahan bukan hanya dalam soal kekuatan dan keuletan tetapi juga dalam hal keausan permukaan akibat bekerja pada kondisi gesekan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut perlu memberikan kekerasan yang tinggi pada permukaan. Kekerasan merupakan sifat mekanik material yang mengindikasikan ketahanan terhadap deformasi plastik akibat penetrasi benda yang keras dari luar. Pengujian kekerasan lebih simpel karena tidak membutuhkan bentuk spesimen khusus, serta tidak merusak (*non destructive*) spesimen jika diterapkan pada pengujian produk, sehingga banyak digunakan pada industri (William. F. Smith, 1996 : 278).

Upaya yang dilakukan untuk meningkatkan kekerasan permukaan pada aluminium dengan melakukan perlakuan panas secara mekanik ataupun kimia dalam dapur pemanas. Proses perlakuan panas merupakan rangkaian pemanasan dan pendinginan, sehingga dalam merancang proses perlakuan panas kondisi material setelah perlakuan harus diperhatikan seperti distorsi, keretakan dan *performance*. Pada penelitian ini dilakukan perlakuan panas kimia dengan proses *nitriding* menggunakan dapur *fluidized bed* yang merupakan pengembangan dari dapur pemanas biasa, sehingga waktu proses relatif singkat dan mengurangi biaya operasional. Pengerasan disebabkan oleh penetrasi atom yang terlarut menempati ruang interstisi di dalam kristal aluminium membentuk senyawa *nitride* dengan kedalaman tertentu selama proses difusi, sehingga timbul tegangan pada kisi – kisi atom. Perbedaan kedalaman lapisan *nitride* menyebabkan variasi kekerasan.

Penelitian terdahulu yang sudah dilakukan yaitu *Ghislain Perez* (2006), dalam penelitiannya *surface treating with low pressure nitriding*, melakukan proses *nitriding*

pada aluminium *extrusion dies*, pada temperatur 540°C selama 6 jam 30 menit, kedalaman lapisan yang terbentuk 0,3 – 15 mm, *white layer* 3 – 5 µm, dengan kekerasan lebih dari 500 HV. Selain itu, pada penelitian *J.M Priest (2000), Studies in low pressure plasma nitriding*, melakukan proses *nitriding* pada aluminium paduan seri 2011, 2024, 3003, 5083, 6060, 6061, 7075 dengan metode plasma pada temperatur 400°C selama 16 jam. Kedalaman lapisan yang terbentuk 0,05 µm pada aluminium seri 6060 dan 0,01 µm pada aluminium paduan seri 2011. Berdasarkan indikasi tersebut, dilakukan penelitian *thermochemical treatment* pada material aluminium paduan dengan proses *nitriding* dalam *fluidized bed furnace*.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah di atas, maka dapat ditarik suatu rumusan masalah yaitu :

Bagaimanakah pengaruh waktu difusi pada proses *nitriding* dalam *fluidized bed furnace* terhadap distribusi kekerasan Aluminium paduan?

1.3. Batasan Masalah

Agar permasalahan tidak terlalu luas, maka perlu adanya batasan masalah sebagai berikut :

- a. Penuaan dengan dengan *natural aging*.
- b. Pengujian kekerasan dengan arah melintang pada potongan spesimen.
- c. Dilakukan lima titik uji distribusi kekerasan dengan jarak antar titik 15 µm pada arah horizontal dan 40 µm pada arah vertikal.
- d. Beban penekanan pada pengujian kekerasan 10 gram.
- e. Waktu penekanan 10 detik.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penulisan skripsi ini adalah :

Mengetahui bagaimanakah pengaruh waktu difusi proses *nitriding* dalam *fluidized bed furnace* terhadap distribusi kekerasan pada aluminium paduan.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberi manfaat bagi penerapan metode *heat treatment* non konvensional khususnya *thermochemical treatment* menggunakan proses *nitriding* pada industri manufaktur logam.

BAB II

TINJAUAN PUSATAKA

2.1. Penelitian Sebelumnya.

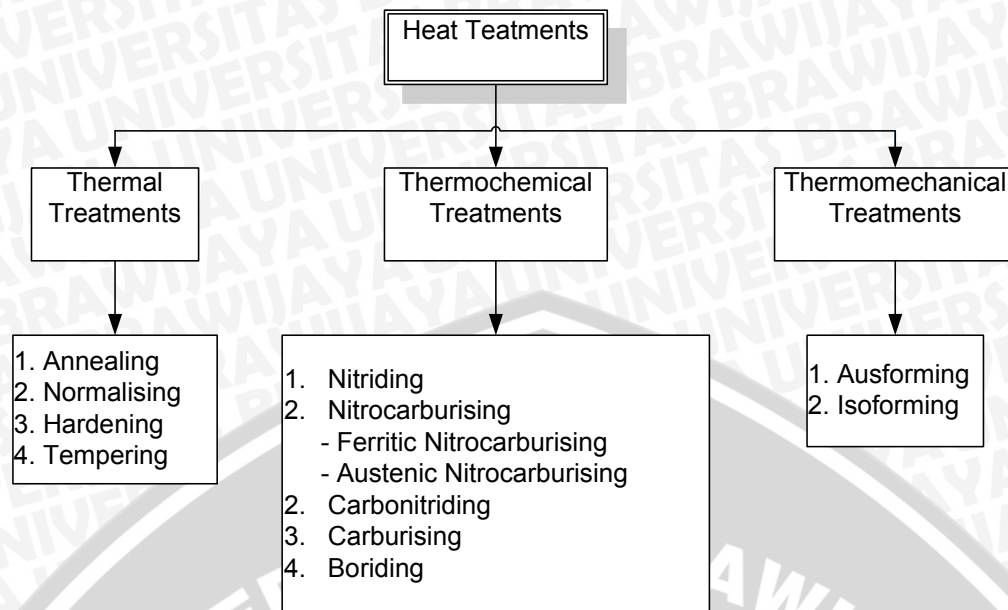
Ghislain Perez (2006), dalam penelitiannya *surface treating with low pressure nitriding*, melakukan proses *nitriding* pada aluminium *extrusion dies*, pada temperatur 540°C selama 6 jam 30 menit. Diperoleh kedalaman lapisan yang terbentuk 0,3 – 15 mm, *white layer* 3 – 5 µm, dengan kekerasan lebih dari 500 HV.

J.M Priest (2000), dalam penelitiannya *Studies in low pressure plasma nitriding*, melakukan proses *nitriding* pada aluminium paduan seri 2011, 2024, 3003, 5083, 6060, 6061, 7075 dengan metode plasma pada temperatur 600°C selama 16 jam. Lapisan tertingi yang terbentuk 0,05 µm pada aluminium seri 6060 dan terendah 0,01 µm pada aluminium paduan seri 2011.

I Komang Astana Widi (2003) meneliti proses nitrokarburisasi austenitik pada temperatur 600, 650 dan 700 °C dengan lamanya perlakuan 1, 3 dan 5 jam menggunakan dapur *fluidized bed* dengan komposisi gas 64 m³/jam NH₃, 20 m³/jam N₂, dan 16 m³/jam LPG, telah dilakukan pada penelitian ini terhadap dua jenis baja yaitu : baja karbon tipe AISI 1013 dan baja paduan tipe AISI P20. Melalui penelitian ini disimpulkan, perlakuan nitrokarburisasi austenitik pada temperatur proses 700 °C dengan waktu proses 1 jam merupakan parameter proses optimum yang menunjukkan belum terbentuknya porositas, tetapi lapisan senyawa ε Fe_{2,3}N,C dengan *case depth* sudah tercapai.

2.2. Perlakuan Panas Logam.

Proses perlakuan panas adalah suatu rangkaian pemanasan dan pendinginan dari suatu logam agar didapat sifat mekanis yang diinginkan. Perlakuan panas merupakan bagian dari rangkaian proses manufaktur logam yang dipengaruhi oleh proses sebelumnya, sehingga dalam merancang proses perlakuan panas harus diperhatikan kondisi material sebelumnya, selain sifat akhir yang harus dimiliki. Secara umum perlakuan panas logam dapat diklasifikasikan seperti ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Klasifikasi perlakuan panas
Sumber : James a jacob, 1997 : 5.

2.2.1 *Thermal treatments.*

Proses *thermal treatments* terdiri atas beberapa proses sebagai berikut:

- Hardening.

Proses pemanasan logam yang bertujuan untuk memperoleh kekerasan maksimum pada suhu 20 – 30 °C di atas AC_3 untuk baja hypoeutectoid dan di atas AC_m untuk baja eutectoid dan hyperutectoid disusul dengan pendinginan cepat. Pada setiap operasi perlakuan panas laju pemanasan merupakan faktor yang penting, panas merambat dari luar ke dalam dengan kecepatan tertentu. Bila pemanasan terlalu cepat bagian luar akan lebih panas dari bagian dalam sehingga tidak diperoleh struktur yang merata. Bila bentuk spesimen tidak teratur, benda harus dipanaskan perlahan – lahan agar tidak terjadi distorsi atau retak. Makin besar potongan spesimen makin lama waktu yang diperlukan untuk memperoleh hasil yang merata. Kekerasan dapat dicapai tergantung dari laju pendinginan, kadar karbon dan ukuran benda. Pada logam paduan, jenis dan jumlah paduan akan mempengaruhi kemampuan pengerasan. Benda dengan ukuran yang lebih besar pada umumnya akan menghasilkan permukaan yang kurang keras meski kondisi perlakuan tetap sama, hal ini disebabkan oleh terbatasnya jumlah panas yang merambat ke permukaan. Oleh karena itu kekerasan di bagian dalam benda akan lebih rendah daripada di bagian luar. Namun air garam atau air akan menurunkan suhu permukaan dengan cepat yang diikuti oleh penurunan suhu di dalam benda tersebut sehingga diperoleh lapisan keras dengan ketebalan tertentu. Hal ini tidak terjadi

pada pencelupan minyak, suhu permukaan lebih lambat dingin dan masih tinggi hingga pendinginan terhambat.

- *Tempering.*

Logam yang dikeraskan bersifat rapuh dan tidak cocok untuk digunakan, melalui temper kekerasan dan kerapuhan dapat diturunkan sampai memenuhi persyaratan penggunaan. Kekerasan turun, kekuatan tarik akan turun juga sedangkan keuletan dan ketangguhan logam akan meningkat. Pada proses ini terdiri dari pemanasan kembali baja yang telah dikeraskan pada suhu dibawah AC_1 , disusul dengan pendinginan lambat di udara. Temper pada suhu rendah antara $150 - 230\text{ }^\circ\text{C}$ tidak menghasilkan penurunan kekerasan yang berarti, karena pemanasan akan menghilangkan tegangan dalam terlebih dahulu. Unsur paduan mempunyai pengaruh menghambat laju pelunakan sehingga logam paduan akan memerlukan suhu temper yang lebih tinggi untuk mencapai kekerasan tertentu.

- *Annealing.*

Tujuan dari proses anil adalah pelunakan sehingga baja yang keras dapat dikerjakan melalui pemesinan dan pengerjaan dingin. Hal ini dilakukan dengan memanaskan di atas AC_1 , dibiarkan sampai suhu merata dan disusul dengan pendinginan secara perlahan – lahan. Agar kekerasan minimal dan keuletan maksimal maka laju pendinginan harus lambat, sehingga dapat dilakukan pendinginan dalam dapur.

- *Normalising.*

Proses normalisasi terdiri dari pemanasan baja pada suhu $40 - 50\text{ }^\circ\text{C}$ di atas AC_3 untuk baja hypoeutectoid dan di atas AC_m untuk baja hypereutectoid disusul dengan pendinginan di udara. Proses ini biasa diterapkan pada baja karbon rendah dan sedang atau baja paduan agar struktur butiran merata dan untuk menghilangkan tegangan dalam sehingga diperoleh sifat fisik yang diinginkan. Umumnya setelah dirol atau dicor baja mengalami proses normalisasi.

2.2.2 *Thermochemical treatments.*

Proses *Thermochemical treatments* merupakan proses perlakuan panas pada permukaan logam secara kimia, yang terdiri dari beberapa proses:

- Karburisasi.

Pengerasan permukaan dengan memanaskan logam di atas suhu austenisasi dalam lingkungan yang mengandung karbon baik dalam bentuk padat, cair, maupun

gas. Karbon diabsorpsi kedalam logam membentuk larutan padat dengan logam dan lapisan luar mempunyai kadar karbon tinggi. Bila dibiarkan lebih lama karbon akan mempunyai kesempatan untuk berdifusi ke bagian dalam. Tebal lapisan tergantung pada suhu dan waktu perlakuan panas. Karburisasi terdiri dari tiga macam yaitu:

- Karburisasi padat (Pack Carburizing), cara karburisasi dimana bahan dimasukkan kedalam kotak tertutup dan ruangan yang diisi dengan arang kayu atau kokas. Prosesnya memakan waktu yang lama dan banyak diterapkan untuk memperoleh lapisan yang tebal antara 0,75 mm sampai dengan 4 mm.

- Karburisasi gas (Gas Carburizing), proses ini digunakan untuk memperoleh lapisan yang tipis antara 0,1 mm sampai dengan 0,75 mm. gas yang digunakan yaitu propana atau hidrokarbon. Cara ini dapat diterapkan untuk karburisasi bagian – bagian yang kecil dan dapat dicelupkan langsung setelah pemanasan dalam dapur.

- Karburisasi cair (Liquid Carburizing), logam dipanaskan di atas suhu AC_1 dalam dapur garam cyanida sehingga karbon dan sedikit nitrogen dapat berdifusi kedalam lapisan luar. Proses ini mirip dengan proses cyanida, hanya disini kulit luar mempunyai kadar karbon yang lebih tinggi dan kadar nitrogen yang lebih rendah. Karburisasi cair dapat digunakan untuk membentuk lapisan setebal 6,35 mm, meskipun umumnya lapisan tidak melebihi 0,64 mm. Selama proses karburisasi kadar karbon lapisan luar dapat ditingkatkan sampai 0,9 – 1,2%C.

- Karbonitriding.

Karbonitriding, sianida kering atau nikarbing adalah suatu proses pengerasan permukaan dimana baja dipanaskan di atas suhu kritis di dalam lingkungan gas dan terjadi penyerapan karbon dan nitrogen. Dapat digunakan gas amonia atau gas yang kaya akan karbon. Lapisan yang tahan aus mempunyai ketebalan antara 0,08 mm – 0,75 mm. Keuntungan karbonitriding adalah bahwa kemampuan pengerasan lapisan luar meningkat bila ditambahkan nitrogen sehingga dapat dimanfaatkan baja yang relatif murah.

- Cyaniding.

Cyaniding atau karbonitriding cair merupakan proses dimana terjadi absorpsi karbon dan nitrogen untuk memperoleh permukaan yang keras pada baja karbon rendah yang sulit dikeraskan. Benda dimasukkan kedalam dapur yang mengandung garam cyanida natrium, dipanaskan di atas daerah AC_1 . Lama pemanasan tergantung pada permukaan yang dikeraskan, kemudian dicelupkan dalam air atau minyak untuk

mendapatkan permukaan yang keras. Tebal lapisan berkisar antara 0,01 mm sampai 0,04 mm. Cyaniding diterapkan untuk perlakuan panas benda yang kecil.

Perlakuan permukaan sangat bervariasi tergantung pada tujuan yang ingin dicapai. Perlakuan permukaan umumnya ditujukan antara lain untuk:

- Meningkatkan ketahanan aus dengan jalan memperkeras atau memberi lapisan yang keras pada bagian permukaan.
- Meningkatkan ketahanan korosi tanpa mengubah karakteristik sifat-sifat logam.

2.3. Mekanisme Penguatan.

Mekanisme penguatan umumnya berhubungan dengan beberapa mekanisme yang bisa dilakukan untuk tujuan peningkatan kekuatan suatu bahan. Hal yang sering dikaitkan dalam mekanisme penguatan berupa penghambat gerakan dislokasi. Hal ini berarti bahwa kekuatan berbanding terbalik dengan mobilitas dislokasi. Adapun macam-macam penguatan bahan, yaitu:

2.3.1 Penguatan dengan Penghalusan Butir.

Pada umumnya kekuatan bahan industri dapat ditingkatkan dengan memperkecil unit strukturnya. Bagi bahan logam dilakukan pertama dengan memperhalus butir struktur mikronya. Sifat fisik dan mekanik material dapat diubah dengan variasi ukuran butir. Material dengan ukuran butir yang halus mempunyai kekuatan tarik dan keuletan yang tinggi dibandingkan dengan material yang mempunyai ukuran butir yang besar atau kasar.

2.3.2 Pengerasan Larutan Padat.

Memasukkan atom-atom sebagai larutan padat dalam kisi atom pelarut selalu menghasilkan paduan yang lebih kuat dari pada logam murni. Mekanisme seperti ini merupakan bentuk penguatan larutan padat. Ada dua jenis larutan padat, jika atom larut dan atom pelarut kira-kira sama besarnya, atom larut akan menduduki tempat kisi dalam kisi kristal atom pelarut. Ini disebut larutan padat substitusi. Akan tetapi jika atom larut jauh lebih kecil dari pada atom pelarut maka atom larut akan menduduki posisi sisipan dalam kisi pelarut. Karbon, nitrogen, oksigen, hidrogen dan boron merupakan elemen yang biasanya membentuk larutan padat sisipan atau interstisi (*interstitial solid solution*).

2.3.3 Penguatan Serat.

Pada mekanisme ini dilakukan dengan cara mencampurkan serat halus dalam matrik ulet untuk mendapatkan bahan yang mempunyai kekuatan tinggi dengan perbandingan kuat-terhadap berat (*Strength to weight ratio*) yang tinggi pula. Serat harus mempunyai kekuatan dan modulus elastis yang tinggi, sedang matriknya harus ulet dan tak bereaksi (*no reactive*) terhadap serat. Umumnya serat yang digunakan adalah boron, grafit atau tungsten. Logam dan polimer telah dipakai sebagai matrik.

2.3.4 Penguatan Presipitasi dan Dispersi.

Perlakuan dimana atom terlarut ditambahkan melampaui kelarutannya untuk membuat larutan padat pada temperatur tinggi, setelah itu dipanaskan pada temperatur tertentu sehingga timbul fasa presipitat. Presipitat bentuknya bermacam-macam, ada yang seperti bola, seperti pelat dan jarum. Tegangan mulur meningkat jika presipitat terdispersi di dalam larutan padat. Partikel yang keras dicampur dengan serbuk matrik, dipadatkan dan diproses secara metalurgi serbuk disebut penguatan dispersi. Secara teori ada kemungkinan menghasilkan sistem pengerasan dispersi dalam jumlah yang tak terbatas dengan mencampurkan serbuk metal serta partikel fasa kedua yang halus (oksida, karbida, nitrida) dan menggabungkan lewat metalurgi serbuk.

2.3.5 Pengerasan regangan.

Salah satu karakteristik deformasi plastik adalah tegangan geser yang diperlukan untuk menghasilkan slip bertambah besar dengan meningkatnya regangan geser. Bertambahnya besarnya tegangan yang diperlukan untuk slip yang disebabkan oleh deformasi plastik dikenal dengan pengerasan regangan atau pengerasan kerja. Batas butir mempengaruhi pengerasan karena merupakan hambatan bagi slip dari butir ke butir, di sekitar batas butir terjadi slip yang rumit dan menyebar ke semua butir dengan meningkatnya deformasi.

2.3.6 Penguatan martensit.

Transformasi austenit ke martensit oleh transformasi geser tanpa difusi ketika mencelupkan logam dengan tiba-tiba, merupakan proses penguatan paling lazim yang dipergunakan pada bahan rekayasa. Kekuatan tinggi martensit berarti bahwa dalam struktur ini terdapat banyak penghalang kuat terhadap gerakan dislokasi. Kontribusi yang penting untuk kekuatan martensit datang dari atom karbon. Sewaktu mengalami transformasi cepat dari austenit ke ferit ketika dicelup, kemampuan larut karbon dalam

besi sangat berkurang. Atom karbon meregangkan kisi ferit dan regangan ini dapat ditiadakan dengan distribusi atom karbon secara difusi pada temperatur kamar. Terdapat suatu ikatan kuat antara dislokasi dan atom karbon yang membatasi gerakan dislokasi.

2.4. Aluminium.

Aluminium didapat dalam keadaan cair dengan elektrolisa, umumnya mencapai kemurnian 99,85% berat. Dengan mengelektrolisa kembali dapat dicapai kemurnian 99,99. sifat fisik dan mekanik aluminium dapat dilihat pada tabel 2.1 dan tabel 2.2.

Tabel 2.1. Sifat-sifat fisik Aluminium.

Sifa-sifat	Kemurnian Al (%)	
	99,996	>99,0
Masa jenis (20°)	2,6989	2,71
Titik cair	660,2	653-657
Panas jenis ($\text{cal/g}^{\circ}\text{C}$)(10°C)	0,2226	0,2297
Hantaran listrik	64,94	59 (dianil)
Tahanan listrik koefisien temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	0,00429	0,0115
Koefisien pemuai (20- 100°C)	$23,86 \times 10^{-6}$	$23,5 \times 10^{-6}$
Jenis kristal, konstanta kisi	<i>fcc</i> , $a=4,013 \text{ \AA}$	<i>fcc</i> , $a=4,04 \text{ \AA}$

Keterangan : *fcc*: *face center cubic*

Sumber : Tata Surdia, 1994 : 134.

Tabel 2.2. Sifat-sifat mekanik Aluminium.

Sifa-sifat	Kemurnian Al (%)			
	99,996		>99,0	
	Dianil	75 % dirol dingin	Dianil	H18
Kekuatan tarik (kg/mm^2)	4,9	11,6	9,3	16,9
Kekuatan mulur (kg/mm^2)	1,3	11,0	3,5	14,8
Perpanjangan (%)	48,8	5,5	35	5
Kekerasan Brinell (BHN)	17	27	23	44

Sumber : Tata Surdia, 1994 : 134.

2.4.1 Aluminium Paduan.

Adanya unsur paduan dalam aluminium seperti Cu, Mg, Zn, Si akan dapat meningkatkan kekerasan, kekuatan tarik, ketahanan aus dari aluminium. Paduan aluminium dapat digolongkan menjadi dua yaitu:

- *Wrought Alloys.*

Dibuat dengan jalan *rolling, forming, drawing, forging*, dan *press working* berupa barang setengah jadi misalnya batang, plat.

- *Casting Alloys.*

Dibuat berdasarkan pengecoran. Paduan ini merupakan paduan yang kompleks dari Al dengan Cu, Ni, Fe, Si, dan unsur lain. Pada aluminium paduan, ada yang dapat diperlakukan panas dan tidak dapat diperlakukan panas, dapat dilihat pada tabel 2.3. Aluminium paduan yang dapat ditingkatkan kekuatannya dengan perlakuan panas adalah aluminium paduan seri 2xxx, 6xxx, 7xxx karena pada seri tersebut timbul presipitat berupa CuAl_2 , Mg_2Si , dan Mg_2Zn yang menimbulkan tegangan pada kisi-kisi kristal dan meningkatkan kekuatan dan kekerasannya. Sedangkan pada seri 1xxx, 3xxx, 4xxx, dan 5xxx, tidak dapat diperlakukan panas karena tidak timbul presipitat yang dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan aluminium paduan.

Tabel 2.3. Klasifikasi Aluminium Paduan

Standar AA	keterangan	keterangan
1001	Al murni 99,5% atau di atasnya	<i>Non-heat treatable</i>
1100	Al murni 99,0% atau di atasnya	
2010-2029	Cu merupakan unsur paduan utama	<i>Heat treatable</i>
3003-3009	Mn merupakan unsur paduan utama	<i>Non-heat treatable</i>
4030-4039	Si merupakan unsur paduan utama	<i>Non-heat treatable</i>
5050-5086	Mg merupakan unsur paduan utama	<i>Non-heat treatable</i>
6061-6069	Mg_2Si merupakan unsur paduan utama	<i>Heat treatable</i>
7070-7079	Zn merupakan unsur paduan utama	<i>Heat treatable</i>

Sumber : Tata Surdia, 1994 : 135.

2.4.2 Paduan Al-Cu.

Paduan Al-Cu merupakan salah satu paduan yang dapat dilakukan perlakuan panas penuaan untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasannya. Perlakuan panas penuaan pada paduan ini dilakukan pada prosentase paduan Cu kurang dari 5,65 % Cu, karena merupakan persentase maksimal terbentuknya fase tunggal dimana tembaga larut dalam aluminium sehingga dapat meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasannya. Paduan Al-Cu dapat dilakukan penuaan baik secara alami maupun buatan. Paduan jenis ini yang terkenal adalah duralumin yaitu paduan aluminium dengan seri 2017.

keistimewaan dari paduan ini adalah kekerasan dan kekuatan yang meningkat jika diperlakukan panas, dan titik kelarutan dari paduan Al-Cu pada 36,2%Cu yaitu 548°C. Aluminium 2024 yang disebut super duralumin merupakan pengembangan dari duralumin yang memiliki komposisi standar Al-4,5%Cu-0,5%Mn-1,5%Mg (Tata Surdia, 1995:136) dan sifat mekanik pada tabel 2.4. Paduan ini termasuk jenis *natural aged*. Aplikasi dari aluminium 2024 adalah untuk struktur pesawat terbang, sekrup, paku keling, velg mobil. Paduan ini terkenal pada saat Perang dunia I karena digunakan pada dunia kedirgantaraan.

Tabel 2.4. Sifat Mekanik Al 2024

Sifat-sifat mekanik	Al 2024
Kekerasan (BHN)	42
Kekuatan tarik (kgf/mm ²)	18,9
Kekuatan mulur (kgf/mm ²)	7,7
Perpanjangan (%)	22
Kekuatan geser (kgf/mm ²)	12,7

Sumber : Tata Surdia, 1999 : 137.

2.4.3 Perlakuan Panas Paduan Al-Cu.

Perlakuan panas penuaan merupakan salah satu proses perlakuan panas pada aluminium yang bertujuan untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan dari aluminium. Pemanasan dilakukan pada temperatur terbentuknya fasa tunggal α , kemudian ditahan beberapa saat selanjutnya didinginkan dengan cepat sehingga fasa tunggal yang terbentuk tidak berubah. Aluminium yang telah didinginkan mempunyai sifat lunak dan ulet sama seperti fasa tunggal yang terbentuk sewaktu pemanasan. Seiring dengan berjalannya waktu maka akan timbul presipitat dari paduan aluminium yang dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatannya. Proses ini sering disebut perlakuan panas penuaan (*age hardening*). Proses perlakuan panas penuaan dibagi atas dua proses:

1. Proses perlakuan pelarutan (*Solution Treatment*), merupakan proses perlakuan dengan memanaskan spesimen sampai pada temperatur terbentuknya larutan padat fasa tunggal dan ditahan selama beberapa saat, dan dilakukan pendinginan cepat.

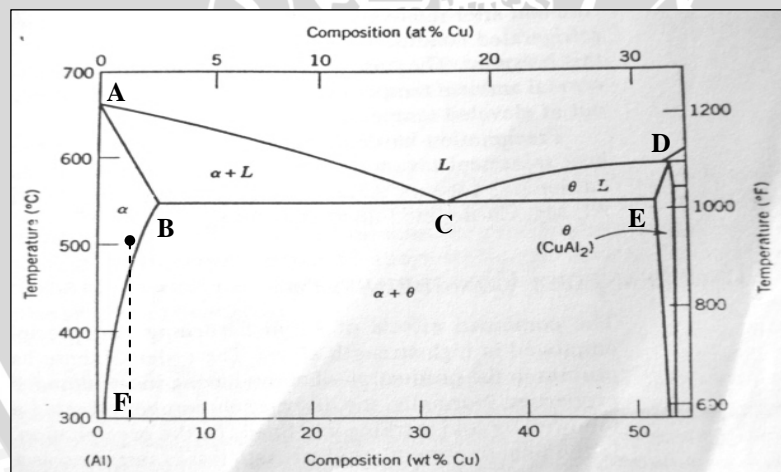
2. Proses perlakuan presipitasi (*precipitation treatment*), merupakan proses peningkatan kekuatan pada suhu tertentu selama beberapa waktu. Proses perlakuan presipitasi yang dilakukan pada temperatur kamar dinamakan perlakuan penuaan alami (*natural aging*), dan yang dilakukan di dalam dapur pemanas dengan suhu di atas suhu ruangan disebut dengan perlakuan penuaan buatan (*artificial aging*).

Proses perlakuan penuaan buatan memiliki beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan perlakuan penuaan alami, antara lain:

1. Kekuatan dan kekerasan yang diperoleh dari hasil perlakuan panas buatan lebih tinggi daripada penuaan alami.
2. Waktu yang diperlukan untuk mendapatkan kekuatan maksimum lebih singkat.

2.4.4 Diagram Fasa Paduan Al-Cu.

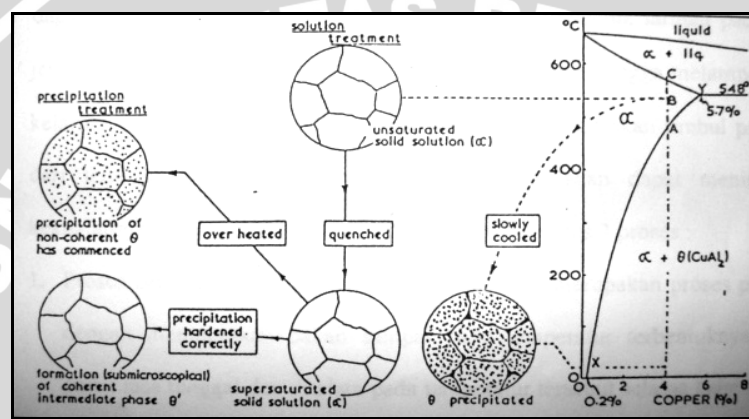
Diagram fasa dari dua komponen ditunjukkan oleh dua variabel yaitu prosentase unsur dan temperatur. Gambar 2.2 menunjukkan diagram fasa paduan Al-Cu. Garis A-C-D adalah garis cair sehingga jika paduan tersebut dipanaskan melewati garis tersebut maka paduan akan mencari seluruhnya.



Gambar 2.2. Diagram fasa Al-Cu
Sumber : Callister, 1997 : 337.

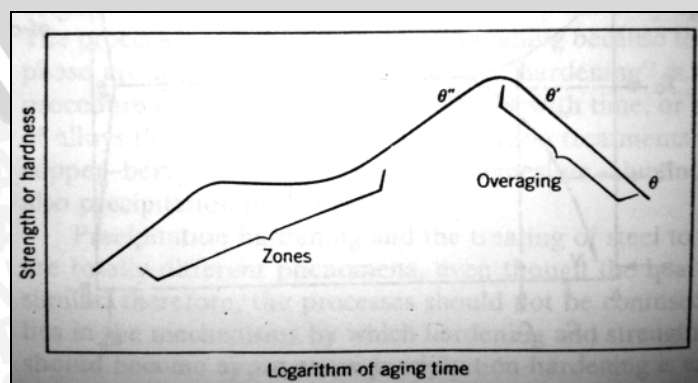
Titik C adalah titik eutektik yang merupakan titik pada suhu terendah terjadinya pencairan dari paduan tanpa melewati fasa gabungan antara padat dan cair dan terletak pada 33,2%Cu, temperatur 548°C. Garis A-B-C-E-D adalah garis padat sehingga paduan akan berubah fasanya menjadi fasa padat pada penurunan temperatur yang memotong garis ini. Pada paduan Al-4,5%Cu secara perlahan-lahan, cairan dari Al-

4,5%Cu akan mulai membeku membentuk larutan pada α , jika temperaturnya diturunkan. Dengan menurunnya temperatur maka akan semakin banyak unsur Cu yang larut dalam Al dan membentuk larutan padat α , sampai semua unsur Cu akan larut dalam Al membentuk larutan padat dengan fasa tunggal α . Ketika temperatur semakin diturunkan melewati garis B-F yang merupakan batas kejenuhan dari larutan padat α , atom-atom Cu yang larut dalam matriks Al mulai berpresipitasi membentuk senyawa $\alpha + \text{CuAl}_2$. Dengan diturunkan temperatur pada suhu ruang maka CuAl_2 yang terbentuk semakin besar dan larutan padat α semakin berkurang, dapat ditunjukkan oleh gambar 2.3.



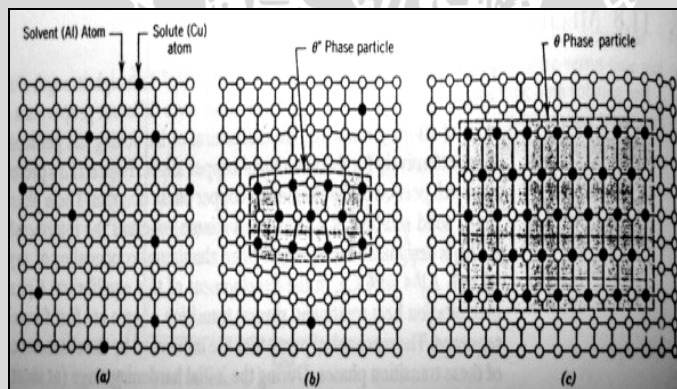
Gambar 2.3. Proses perubahan fasa Al-Cu
Sumber : Higgins, 1983 : 416.

Jika penuaan dilakukan pada temperatur yang tinggi dengan waktu yang lama dapat mengakibatkan presipitasi yang besar dari tembaga dan membentuk CuAl_2 yang mempunyai struktur tetragonal yang nampak secara mikroskopis dan tidak lagi mempunyai ikatan dengan larutan padat α yang mempunyai struktur kubus pemusatan sisi (kps) sehingga kekuatan dan kekerasannya menurun, hal ini yang disebut *overaging* dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. Pengaruh waktu aging terhadap kekuatan atau kekerasan
Sumber : Callister, 1997 : 336.

Sedangkan pada temperatur pemanasan yang lebih rendah dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasannya dengan waktu pemanasan yang lama jika dibandingkan dengan menggunakan temperatur yang lebih tinggi. Pada gambar 2.5.a. tampak bahwa pada awal proses penuaan atom-atom tembaga masih larut dan tersebar dalam matriks aluminium membentuk larutan padat lewat jenuh α dengan jenis larutan substitusional, setelah itu akibat adanya penambahan energi yang diterima selama pemanasan maka atom tembaga menggunakan energi tersebut untuk mulai berpresipitasi menjadi partikel yang sangat halus, dapat dilihat pada gambar 2.5.b dimana Atom-atom Cu mulai berkelompok membentuk fasa θ'' terutama pada daerah butir dan menarik atom-atom aluminium yang berada dalam larutan pada α sehingga menimbulkan tegangan pada kisi-kisi kristal, adanya daerah dengan penguatan tersebut akan menghambat dislokasi yang terjadi pada logam. Sedangkan pada gambar 2.5.c merupakan awal terjadinya *overaging* dimana CuAl_2 (fasa θ) yang terbentuk semakin besar dan membentuk struktur sendiri yang menimbulkan putusnya ikatan dengan larutan padat α , sehingga harus dihindari. Adapun cara untuk menghindari terbentuknya fasa θ pada perlakuan panas buatan adalah dengan mengatur variabel temperatur dan waktu penuaan.

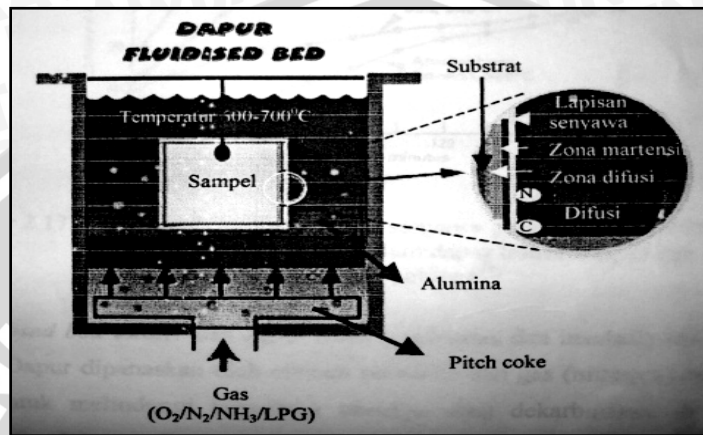


Gambar 2.5. Mekanisme penguatan paduan Al-Cu
Sumber : Callister, 1997 : 338.

2.5. *Fluidized Bed.*

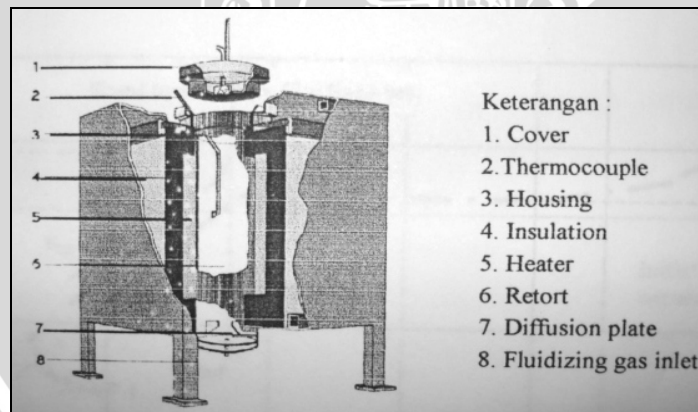
Fluidized bed adalah salah satu metode perlakuan panas di dalam dapur dengan menggunakan media fluida berupa pasir alumina dan *pitch coke*. Pasir alumina (Al_2O_3) mempunyai grade 120 mesh ($125\mu\text{m}$) untuk lapisan bagian atas dapur yang memiliki butiran halus dibandingkan dengan *pitch coke* yang terdapat pada bagian bawah dengan grade 60 mesh ($250\mu\text{m}$). Pasir alumina sebagai pendistribusi panas pada logam ketika dapur dipanaskan, sehingga panas akan secara merata mengenai seluruh permukaan

logam. Teknologinya pertama kali dikembangkan oleh *Institute of Precision mechanics* di Polandia. Udara atau gas akan melewati serbuk partikel yang sudah panas, dapat dilihat pada gambar 2.6.



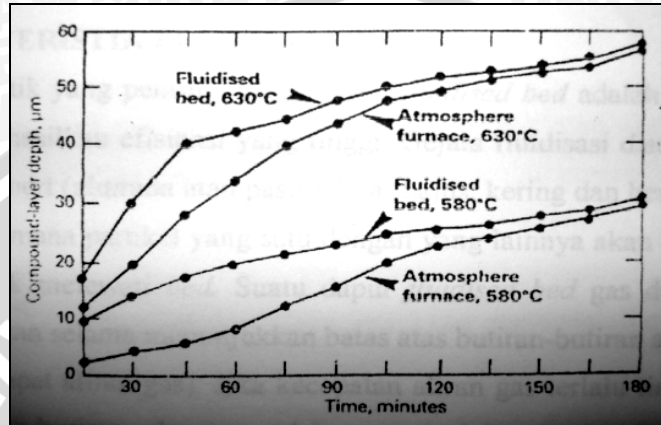
Gambar 2.6. Dapur *Fluidized Bed*.
Sumber : Reynoldson, 1989 : 30.

Fluidized Bed terdiri atas dapur (*retort*, pemanas dan insulasi) serta sistem kontrolnya. Konstruksi dapur *fluidized bed* dapat ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7. Konstruksi Dapur *Fluidized Bed*.
Sumber : Reynoldson, 1989 : 31.

Pada penelitian yang telah dilakukan dengan perlakuan nitrokarburisasi feritik (580 °C) dan nitrokarburisasi austenik (630 °C) mengindikasikan waktu pembentukan lapisan senyawa yang lebih cepat pada keadaan awal dengan menggunakan dapur *fluidized bed* dibandingkan dengan dapur konvensional seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. Waktu pembentukan lapisan dengan metode konvensional dan *fluidized bed*

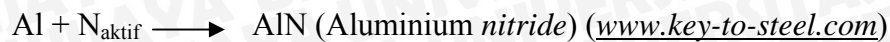
Sumber : Reynoldson, 1989 : 40.

2.6. Nitriding.

Proses *nitriding* adalah proses perlakuan panas secara kimia (*thermochemical*) pada permukaan logam dengan menggunakan gas ammonia (NH₃) atau gas nitrogen (N₂) pada temperatur kerja antara (500-550)°C yang bertujuan untuk memperbaiki sifat mekanik pada logam seperti kekerasan, ketahanan aus dan ketahanan korosi. Pada proses *nitriding*, atom nitrogen aktif akan berdifusi ke dalam logam membentuk nitrida. Nitrida yang terbentuk ini sangat keras dan stabil. Nitrogen aktif ini bisa diperoleh dari gas ammonia maupun nitrogen murni bila dipanaskan pada temperatur *nitriding* antara (500-550)°C. Amonia akan berdisosiasi menjadi nitrogen dan gas hidrogen :

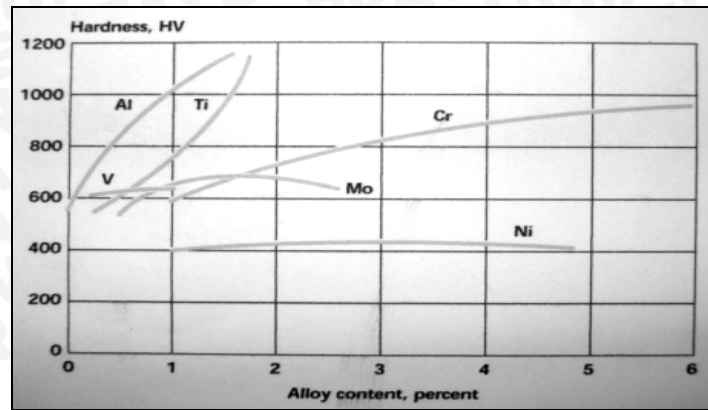


N_{aktif} akan mengikat unsur paduan membentuk lapisan *nitride*:



Pada dasarnya semua logam dapat *dinitriding* tetapi hasil kekerasan yang optimal dapat diperoleh bila logam mengandung unsur paduan yang membentuk *nitride* (*Nitride Forming Element*) seperti aluminium, titanium, nikel, krom dan molibdenum. Persentase unsur paduan dapat dilihat pada gambar 2.9.





Gambar 2.9. Grafik persentase unsur paduan terhadap nilai kekerasan
Sumber : Ovako Steel, 1999 ; 5.

2.6.1 Gas Nitriding.

Proses perlakuan panas permukaan logam dengan gas *nitriding* dilakukan dengan pemanasan antara temperatur (500 ~ 550 °C) dalam dapur pemanas dengan atmosfer yang banyak mengandung atom nitrogen. Atom tersebut dapat diperoleh dari gas NH₃ (amonia) atau nitrogen yang mudah berdekomposisi pada temperatur *nitriding* sehingga atom nitrogen aktif akan berdifusi ke dalam benda kerja.

2.6.2 Pack Nitriding.

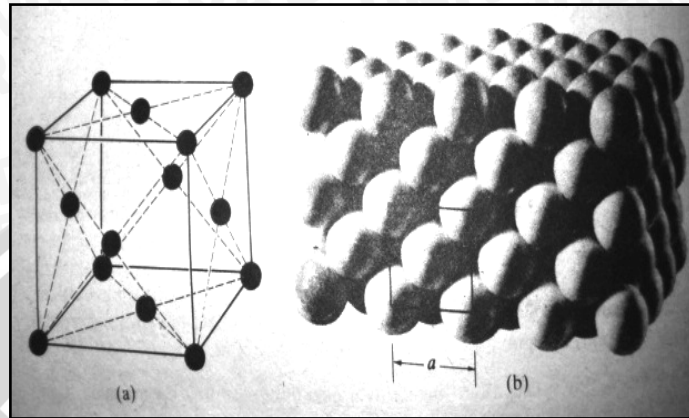
Pack nitriding atau serbuk (*solid nitriding*) mempunyai kesamaan pada proses *pack carburizing*. *Pack nitriding* dilakukan dengan memanaskan benda kerja di dalam kotak tertutup rapat yang berisi *nitriding compound*. *Nitriding compound* ini biasanya sebagai sumber nitrogen aktif. Proses pemanasan dilakukan dengan waktu pemanasan kurang dari 12 jam.

2.6.3 Plasma Nitriding.

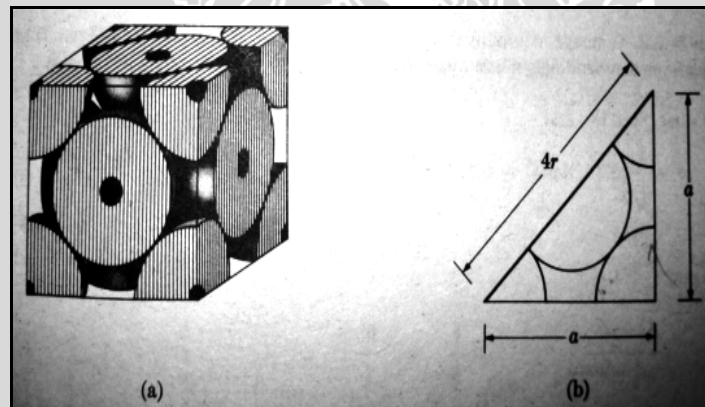
Plasma nitriding biasanya juga dikenal sebagai *ion nitriding* atau *glow discharge nitriding*. *Plasma nitriding* merupakan pengembangan dari konvensional gas *nitriding* dimana sumber gas bisa diperoleh dari amonia atau campuran antara nitrogen dan hidrogen. Proses tersebut berlangsung pada tekanan gas (1 ~ 1.3) kPa dengan menggunakan tegangan listrik antara (1 ~ 5) kV, sehingga gas terionisasi dan akan melakukan penembakan (*bombardment*) pada benda kerja. *Plasma nitriding* dilakukan pada temperatur yang rendah yaitu 380°C.

2.7. Logam Kubik Pemusatan Sisi (kps).

Struktur kubik pemusatan sisi (kps) lebih sering dijumpai pada logam antara lain, aluminium, tembaga, timah hitam, perak dan nikel yang mempunyai pengaturan seperti pada gambar 2.10.



Gambar 2.10. a) Struktur kubik pemusatan sisi pada logam.
b) Pandangan skematis letak titik pusat atom
Sumber : Van vlack, 1991 : 80.



Gambar 2.11. Sel satuan kubik pemusatan sisi.
Sumber : Van vlack, 1991 : 81.

Logam dengan struktur kps mempunyai empat kali lebih banyak atom. Kedelapan atom pada titik sudut menghasilkan satu atom, dan keenam bidang sisi menghasilkan tiga atom persel satuan, dapat dilihat pada gambar 2.11. Dalam logam, hubungan antara konstanta kisi a dengan jari – jari atau R dinyatakan oleh persamaan:

$$(a_{kps})_{metal} = 4R / \sqrt{2} \quad (2-1)$$

2.8. Difusi.

Perlakuan panas melibatkan adanya aktivasi termal pada temperatur yang meningkat, maka teori difusi dapat menjelaskan fenomena perubahan mikrostruktur suatu logam yang sedang diproses dengan perlakuan panas. Difusi merupakan proses perpindahan atom-atom dalam struktur material dari suatu posisi ke posisi lainnya. Pergerakan atom tersebut memerlukan energi dan energi tersebut berkaitan dengan temperatur padatan. Adanya variasi termal di dalam padatan akan menimbulkan energi. Energi ini tidak terdistribusi secara merata di antara atom-atom tunggal dalam kisi kristal tergantung dari energi termal yang dimilikinya. Adanya fluktuasi tingkat energi menyebabkan adanya atom-atom yang memiliki energi yang lebih rendah dan lebih tinggi. Atom yang memiliki tingkat energi yang lebih tinggi akan meninggalkan posisinya. Posisi yang ditinggalkan atom tersebut menimbulkan kekosongan (*vacancy*) pada kisi kristal, yang dapat diisi oleh atom yang lain. Mekanisme pengisian tersebut merupakan penjelasan terhadap proses difusi. Pada temperatur yang tinggi, jumlah interstisi dan kekosongan meningkat sehingga laju difusi meningkat. Difusi dapat terjadi bila elemen yang berdifusi membentuk sistem larutan padat dengan matrik logam. Konsep dasar dari difusi dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Adanya migrasi atom-atom dalam material pada kondisi gas, cair dan padat.
- Adanya gradien konsentrasi dalam bentuk *thermal* dan potensial kimia.
- Terjadi secara substitusi dan interstisi.

Mekanisme difusi sangat berperan di dalam proses perlakuan pengerasan permukaan. Proses pengerasan permukaan terdiri atas tiga tahapan:

- Proses yang terjadi di dalam media eksternal, yang membebaskan elemen difusi menjadi bentuk atomik (disosiasi).
- Kontak atom difusi dengan permukaan logam dan pembentukan ikatan kimia dengan matrik logam (absorpsi).
- Penetrasi atom difusi ke dalam bentuk matrik logam hingga mencapai titik jenuh (difusi).

Fick's merumuskan persamaan tentang difusi yang dikenal dengan hukum *Fick's I* dimana laju difusi berbanding lurus dengan gradien konsentrasinya:

$$J = -D \cdot \frac{dc}{dx} \quad (2-2)$$

Dimana : J = Sejumlah masa yang ditransformasikan selama waktu tertentu melalui satuan luas tertentu (kg / cm.detik).

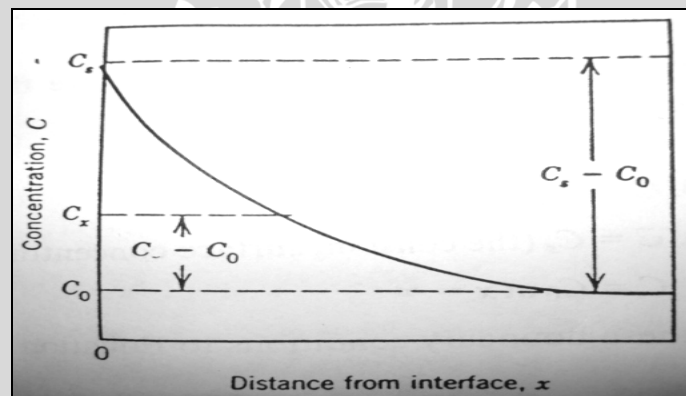
D = Koefisien difusi (cm^2/detik).

$\frac{dc}{dx}$ = Gradient konsentrasi pada jarak x dari permukaan.

Persamaan ini tidak dapat menjelaskan perubahan konsentrasi yang terjadi akibat pengaruh difusi, sehingga penggunaan hukum *Fick's I* hanya terbatas pada konsentrasi yang dianggap sama pada setiap posisi (*steady state*). Sehingga untuk menjelaskan perbedaan konsentrasi yang terjadi terhadap waktu (*non steady state*), *Fick's* mensubstitusikan hukum *Fick's I* yang dikenal dengan hukum *Fick's II* sebagai berikut:

$$\frac{\partial C_B}{\partial t} = D_B \frac{\partial^2 C_B}{\partial x^2} \quad (2-3)$$

Persamaan ini merupakan profil konsentrasi antara jumlah perubahan komposisi terhadap waktu, dimana $\frac{\partial^2 C_B}{\partial x^2}$ diinterpretasikan dalam bentuk grafik sederhana berupa kurva konsentrasi dengan jarak, dapat dilihat pada gambar 2.12



Gambar 2.12. Profil konsentrasi difusi *non steady state*
Sumber : Callister, 1997 : 338.

Aplikasi dari batas kondisi persamaan (2-3) dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (2-4)$$

Dimana : C_x = konsentrasi pada jarak x

C_s = konsentrasi yang diperoleh pada pada waktu tertentu

C_0 = konsentrasi pada $t = 0$ (kondisi awal)

$\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$ = *Gaussian error function* yang disimbolkan dengan z .

Jarak rata-rata difusi merupakan fungsi akar kuadratis terhadap waktu dengan persamaan $x = \sqrt{Dt}$, (2-5)

dimana: x : jarak distribusi (mm)

D : koefisien difusi (cm^2/s)

t : waktu difusi (detik)

Jumlah substansi (gram) yang berdifusi selama waktu tertentu (detik) melalui unit satuan luas (cm^2) pada gradien konsentrasi tertentu disebut koefisien difusi (D , cm^2/detik). Hubungan antara koefisien difusi dengan temperatur dirumuskan sebagai berikut:

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2-6)$$

Dimana : D = Koefisien difusi (cm^2/s)

D_0 = Koefisien difusi pada kondisi standart (cm^2/s), dapat dilihat pada tabel 2.6

Q = Energi aktivasi: energi yang digunakan untuk memindahkan atom keposisi yang baru dalam kisi kristal (kalori/gram-atom), (kalori/gram.mol).

R = Konstanta gas ($1,987 \text{ kal/mol}^\circ\text{K}$, $8,31 \text{ J/mol}^\circ\text{K}$)

T = Temperatur absolut ($^\circ\text{K}$)

Tabel 2.5. Nilai konstanta D_0

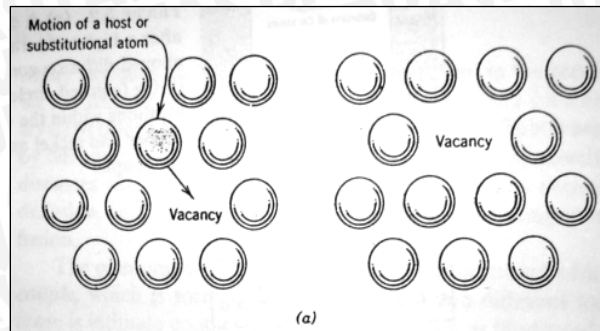
Elemen yang berdifusi	D_0 (cm^2/s)	Q (kJ/mol)
Carbon in FCC Fe	$2 \cdot 10^{-1}$	142
Nitrogen in Fe	3×10^{-3}	76

Sumber : J.C. Anderson, 1990 : 131.

Semakin besar nilai Q , maka harga D semakin kecil dan laju difusi menurun, akibatnya diperlukan temperatur dan waktu proses yang lebih besar supaya difusi dapat berlangsung dengan baik. Ada dua macam mekanisme difusi atom ke dalam kisi-kisi kristal, yaitu :

2.8.1 Mekanisme Difusi Substitusi.

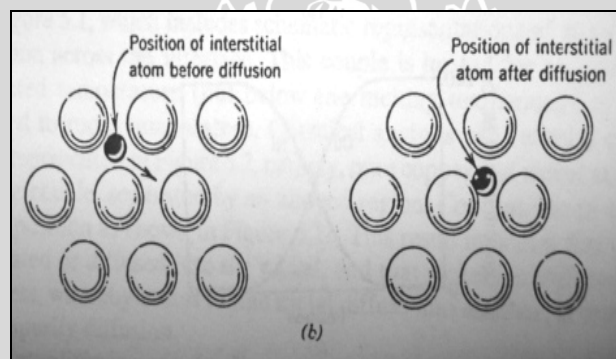
Berpindahnya atom pada kisi kristal dari posisi atom yang satu ke posisi atom yang lainnya terlihat pada gambar 2.13. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh peluang kosongnya kedudukan atom (yang pada gilirannya sebanding dengan fraksi kekosongan dalam kristal) dan besarnya energi aktivasi yang dibutuhkan untuk memindahkan posisi atom.



Gambar 2.13. Difusi *Substitutional*
Sumber : Callister, 1997 : 92.

2.8.2 Mekanisme Difusi Interstitial.

Pengangkutan atom melalui kisi berlangsung dengan berbagai cara, istilah “difusi *interstitial*” menggambarkan keadaan ketika atom tidak lagi bergerak di sekitar kisi kristal namun menempati posisi interstisi. Seperti terlihat pada gambar 2.14.



Gambar 2.14. Difusi *Interstitial*
Sumber : Callister, 1997 : 92.

Pada mekanisme *interstitial* ukuran atom yang akan berdifusi harus lebih kecil daripada matrik atomnya. seperti difusi atom hidrogen, oksigen, karbon dan nitrogen ke dalam besi. Atom-atom nitrogen akan lebih mudah mengendap pada kristal Al dalam larutan padat interstisi dari pada larutan padat substiusi. Pada larutan padat interstisi atom nitrogen bergerak lebih mudah, sedangkan pada larutan pada substitusi harus tersedia *vacancy* sebagai tempat atom berpindah. Hal ini menyebabkan proses difusi berjalan lebih lambat. Faktor-faktor yang mempengaruhi difusivitas antara lain :

1. Tipe dari mekanisme difusi.

Proses difusi secara interstisi atau substitusi memberikan efek terhadap koefisien difusi. Untuk difusi interstisi atom yang kecil dapat bergabung ke dalam kisi kristal pada atom pelarut yang lebih besar, seperti nitrogen berdifusi interstisi pada struktur kristal *bcc* atau *fcc*. Sedangkan contoh proses difusi substitusi adalah atom

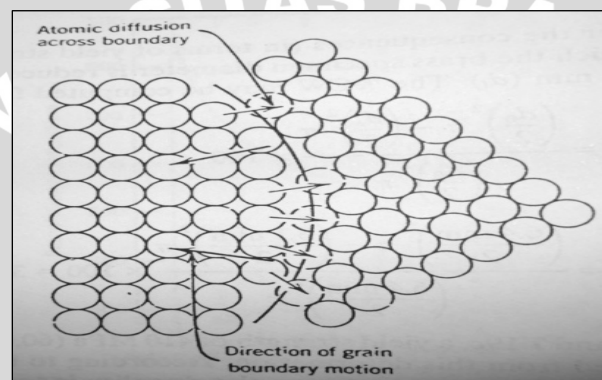
tembaga berdifusi ke dalam aluminium sebagai atom pelarut dimana dimensi dari kedua atom tersebut sama besar.

2. Tipe Struktur kristal dari kisi pelarut.

Atom mempunyai difusivitas yang lebih tinggi dalam struktur *bcc* dari pada struktur *fcc* karena *bcc* mempunyai faktor tumpukan yang lebih rendah 0,68 sedangkan *fcc* mempunyai faktor tumpukan 0,74.

3. Adanya cacat kristal

Difusi berjalan lebih cepat melalui batas butir karena merupakan merupakan daerah dengan cacat kristal, dapat dilihat pada gambar 2.15.



Gambar 2.15. Difusi atom pada batas butir
Sumber : Callister, 1997 : 172.

3. Temperatur difusi.

Suhu yang lebih tinggi menghasilkan difusivitas yang tinggi, atom – atom memiliki energi termal yang tinggi. Oleh karena itu besar kemungkinan untuk melampaui hambatan antara atom-atom. Ukuran atom N relatif lebih kecil dari pada ukuran atom Al, sehingga mudah masuk ke kisi kristal Al dan bertindak sebagai atom interstisi. Tabel 2.7 memperlihatkan ukuran atom N dibandingkan dengan ukuran atom Al.

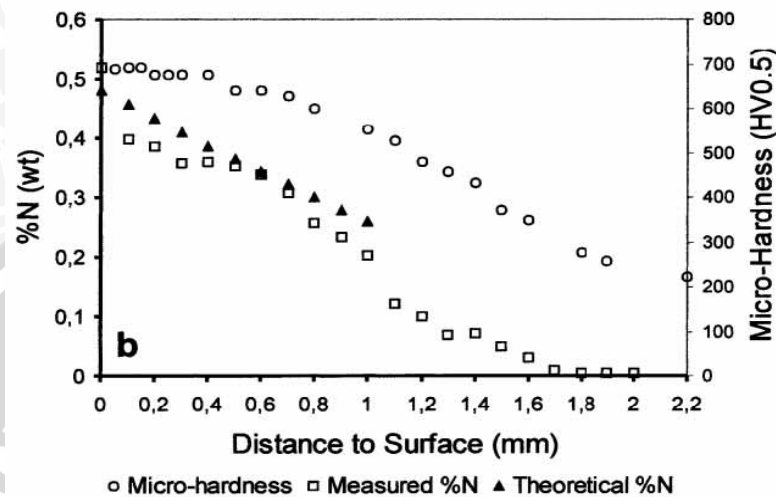
Tabel 2.6. Ukuran atom berbagai unsur dibandingkan dengan Atom Al

Elemen	Radius atom(nm)
Al	0,1431
N	0,072

Sumber : J.C. Anderson, 1990 : 500.

Selama proses difusi berlangsung terjadi dua proses yang berlangsung serentak yaitu peningkatan kadar nitrogen permukaan dan penetrasi nitrogen ke dalam material. Dengan mengatur pemasukan gas, temperatur dan waktu proses maka dapat diperoleh

kadar nitrogen permukaan dan kedalaman lapisan yang diinginkan. Dengan penambahan persentase nitrogen pada logam dapat mempengaruhi sifat mekanik material, dapat dilihat pada gambar 2.16. Dengan bertambahnya unsur nitrogen dalam baja AISI 410S maka kekerasan baja tsb meningkat.



Gambar 2.16. Pengaruh persentase unsur nitrogen terhadap kekerasan
Sumber : www.Elsevier.com

2.9. Hubungan kekerasan dengan sifat mekanik pada aluminium paduan.

Kekerasan merupakan sifat mekanik yang dimiliki oleh material. Kekerasan mempunyai korelasi dengan sifat kekuatan material (Tata surdia, 1999 : 137) , adapun hubungannya sebagai berikut:

$$UTS \text{ (kg/mm}^2\text{)} = 0,4 \div 0,45 \times \text{BHN}$$

$$UTS \text{ (Psi)} = 560 \div 630 \times \text{BHN}$$

BHN (kg/mm²), hubungan tersebut berlaku pada aluminium paduan .

2.10. Hipotesa.

Semakin lama waktu difusipada proses *nitriding* dalam *fluidized bed furnace* semakin banyak gas nitrogen yang berdifusi kedalam alumunium paduan, sehingga lapisan *aluminum nitride* yang terbentuk bertambah, menyebabkan kekerasan aluminium paduan meningkat.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Metode Penelitian.

Dalam penelitian ini metode yang digunakan adalah eksperimen nyata, yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh waktu difusi pada proses *nitriding* terhadap kekerasan aluminium paduan di dalam dapur *fluidized bed*. Kajian literatur diperoleh dari berbagai sumber baik dari buku, jurnal di perpustakaan maupun dari internet.

3.2. Tempat Penelitian.

Pelaksanaan penelitian dilakukan di:

1. Laboratorium Material *Alfa Beta Gama*, Landung Sari.
 - Pelaksanaan proses *nitriding* pada dapur pemanas *fluidized bed*.
2. Laboratorium Teknik kimia Politeknik Negeri Malang.
 - Tempat pengujian komposisi paduan aluminium.
3. Laboratorium Pengujian Material Teknik Mesin UGM.
 - Tempat pengujian distribusi kekerasan dan Foto Mikro

3.3. Variabel Penelitian.

1. Variabel Bebas.

Variabel bebas adalah variabel yang besarnya ditentukan sebelum penelitian. Dalam penelitian ini variabel bebas yang digunakan adalah waktu difusi 30 menit, 60 menit, 90 menit, 120 menit dan 150 menit.

2. Variabel Terikat.

Variabel terikat adalah variabel yang besarnya tergantung pada variabel bebas. Variabel terikatnya adalah nilai kekerasan.

3. Parameter Terkendali.

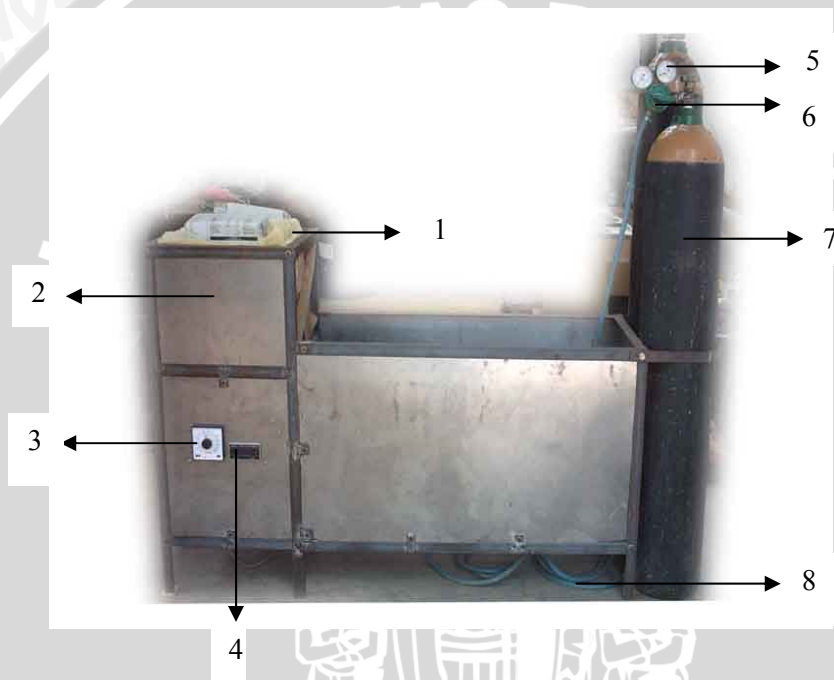
Parameter terkendali adalah parameter yang besarnya dikontrol. parameter terkendalinya yaitu:

- Temperatur Proses : 500°C.
- Gas yang digunakan : Nitrogen (N₂).
- Media pendinginan : air.
- *Alumina Oxide* : 60 % dari volume reaktor.
- Tekanan gas nitrogen : 2,5 bar.

3.4. Alat dan Bahan yang Digunakan.

3.4.1 Alat yang digunakan dalam penelitian ini:

- *Fluidized Bed furnace* gambar (3.1)
- Alat Uji *Vickers hardness* (gambar 3.2)
- *Stopwatch*.
- Gergaji besi.
- Mistar sorong.
- Mikroskop elektron (gambar 3.3)



Gambar 3.1. Instalasi *Fluidized bed furnace*
Sumber : Laboratorium material Alfa Beta Gama.

Keterangan :

1. *Glasswool*.
2. Dapur *fluidized bed*.
3. Kontrol temperatur.
4. Temperatur Indikator.
5. *Pressure gauge*.
6. Katup.
7. Tabung gas nitrogen.
8. Saluran gas nitrogen.



Gambar 3.2. Alat uji *Vickers hardness*
Sumber : Laboratorium Ilmu Logam UGM



Gambar 3.3. Mikroskop elektron
Sumber : Laboratorium Ilmu Logam UGM

3.4.2 Bahan yang digunakan.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

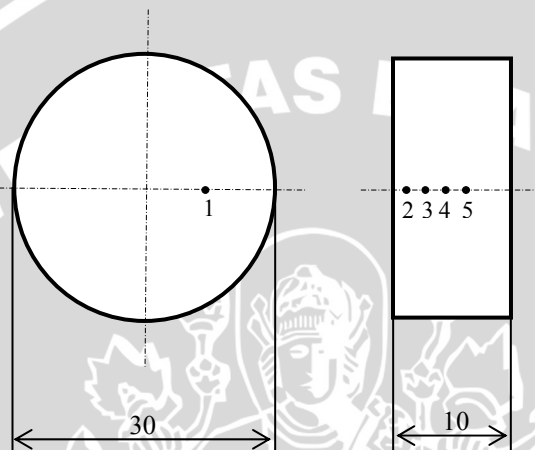
- Aluminium paduan seri AA 2024
- Gas Nitrogen (N_2).
- Serbuk *Alumina Oxide* (Al_2O_3)
- Kertas gosok nomor 0, 250, 500, 800, 1000.
- kain panel
- *Autosol*
- Resin dan katalis
- NaOH

3.5. Prosedur Penelitian.

Prosedur yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pembuatan benda kerja.

Bentuk dan ukuran spesimen serta skema distribusi kekerasan ditunjukkan seperti gambar 3.4. Pembuatan spesimen adalah sebagai berikut: Material dipotong dengan ukuran $\varnothing 30\text{mm} \times 10\text{mm}$ sebanyak 15 spesimen, kemudian dihaluskan pada mesin penggosok sambil mengalirkan air dan setelah kering permukaan spesimen digosok menggunakan *autosol* sampai mengkilap.



Gambar 3.4. Skema distribusi kekerasan pada spesimen

Keterangan :

- 1 : Distribusi pada permukaan spesimen.
- 2 : Distribusi pada jarak $15 \mu\text{m}$ dari permukaan.
- 3 : Distribusi pada jarak $30 \mu\text{m}$ dari permukaan.
- 4 : Distribusi pada jarak $45 \mu\text{m}$ dari permukaan.
- 5 : Distribusi pada jarak $60 \mu\text{m}$ dari permukaan.

2. Persiapan dapur *fluidized bed*.

Spesimen dimasukkan kedalam dapur *fluidized bed* yang telah berisi serbuk *alumina oxide* sebagai pendistribusi temperatur pada saat proses *nitriding* berlangsung.

3. Pemanasan awal dapur pemanas.

Dapur pemanas dipanaskan mencapai temperatur 500°C .

4. Pengaliran gas nitrogen.

Setelah mencapai suhu 500°C , kemudian dilairkan gas nitrogen (N_2) dengan tekanan 2,5 bar.

5. Variasi waktu difusi.

Variasi waktu difusi pada saat proses *nitriding* yaitu: 30 menit, 60 menit, 90 menit, 120 menit dan 150 menit. Setiap variasi waktu difusi 3 buah spesimen.

6. Pengujian spesimen.

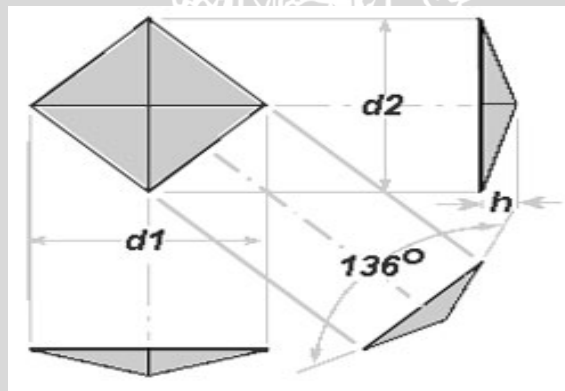
Pada spesimen yang telah *dinitriding* dilakukan foto mikro dan pengujian distribusi kekerasan.

7. Analisis data.

Setelah pengujian dilakukan pengolahan data.

3.6. Pengujian kekerasan.

Metode yang digunakan dalam pengujian ini adalah metode *Vickers*, yang digunakan terbuat dari intan dan berbentuk piramida dengan empat sisi. Sudut antara sisi yang berlawanan 136° , seperti pada gambar 3.5.



Gambar 3.5. Indentor *Vickers*

Sumber : [www. Gordonengland. co.uk](http://www.Gordonengland.co.uk)

Penetrasi yang berbentuk bujur sangkar, diagonal-diagonal dari bujur sangkar tersebut diukur. Adapun nilai kekerasan diperoleh dari beban total dibagi dengan luas area piramida dituliskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{VHN} &= \frac{\text{Load}}{\text{Area}} \\ &= \frac{1,8544.P}{d^2} \end{aligned}$$

Dimana:

VHN : Vickers Hardness Number (kg/mm²)

P : Beban (kg)

d : Diagonal rata-rata piramida (mm)

Pada pengujian *Vickers* beban otomatis digunakan dan dilepas pada waktu yang telah ditentukan dengan Variasi beban 10-1000 gram. spesimen uji dipindahkan dari bawah indenter, kemudian diagonal hasil penekanan diukur menggunakan mikroskop.

3.7. Rancangan Penelitian.

3.7.1 Rancangan statistik.

Dalam penelitian ini, rancangan penelitian yang digunakan adalah metode rancang acak lengkap dengan satu faktor, karena ada satu faktor yang diamati yaitu variasi waktu difusi terhadap distribusi kekerasan aluminium paduan setelah mengalami *nitriding*. Hasil pengukuran dan pengambilan data dari masing-masing spesimen uji ditabelkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Rancangan Tabel Data Hasil Uji Distribusi Kekerasan

Waktu Difusi	Nilai Kekerasan (VHN)						
	Jarak Distribusi					Σ_{baris}	Rata-rata
	1	2	3	4	5		
30 menit (A)	X_{A11}	X_{A21}	X_{A31}	X_{A41}	X_{A51}		
	X_{A12}	X_{A22}	X_{A32}	X_{A42}	X_{A52}		
	X_{A13}	X_{A23}	X_{A33}	X_{A43}	X_{A53}		
	X_{A1T}	X_{A2T}	X_{A3T}	X_{A4T}	X_{A5T}	T_A	X_{rA}
60 menit (B)	X_{B11}	X_{B21}	X_{B31}	X_{B41}	X_{B51}		
	X_{B12}	X_{B22}	X_{B32}	X_{B42}	X_{B52}		
	X_{B13}	X_{B23}	X_{B33}	X_{B43}	X_{B53}		
	X_{B1T}	X_{B2T}	X_{B3T}	X_{B4T}	X_{B5T}	T_B	X_{rB}
90 menit (C)	X_{C11}	X_{C21}	X_{C31}	X_{C41}	X_{C51}		
	X_{C12}	X_{C22}	X_{C32}	X_{C42}	X_{C52}		
	X_{C13}	X_{C23}	X_{C33}	X_{C43}	X_{C53}		
	X_{C1T}	X_{C2T}	X_{C3T}	X_{C4T}	X_{C5T}	T_C	X_{rC}
120 menit (D)	X_{D11}	X_{D21}	X_{D31}	X_{D41}	X_{D51}		
	X_{D12}	X_{D22}	X_{D32}	X_{D42}	X_{D52}		
	X_{D13}	X_{D23}	X_{D33}	X_{D43}	X_{D53}		
	X_{D1T}	X_{D2T}	X_{D3T}	X_{D4T}	X_{D5T}	T_D	X_{rD}
150 menit (E)	X_{E11}	X_{E21}	X_{E31}	X_{E41}	X_{E51}		
	X_{AE12}	X_{E22}	X_{E32}	X_{E42}	X_{E52}		
	X_{E13}	X_{E23}	X_{E33}	X_{E43}	X_{E53}		
	X_{E1T}	X_{E2T}	X_{E3T}	X_{E4T}	X_{E5T}	T_E	X_{rE}
Σ_{kolom}	T_A	T_B	T_C	T_D	T_E	T_T	
Rata-rata	X_{rA}	X_{rB}	X_{rC}	X_{rD}	X_{rE}		X_{rT}

Keterangan :

X_{A11} = Data hasil uji kekerasan aluminium paduan pada waktu difusi 30 menit pada permukaan spesimen pada ulangan pertama

T_A = Jumlah Baris atau kolom pada waktu difusi 30 menit

X_{rA} = Jumlah Rata – rata baris atau kolom pada waktu difusi 30 menit

Perhitungan statistik dari tabel 3.1.

- Kekerasan rata-rata.

$$X_r = \frac{\sum T}{n} \quad (3-1)$$

- Standar deviasi.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (T - X_r)^2}{n-1}} \quad (3-2)$$

- Standar deviasi rata-rata.

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3-3)$$

- Interval penduga rata rata kekerasan

$$X_r - t\left\{\frac{\alpha}{2}; db\right\} \bar{\sigma} < \mu < X_r + t\left\{\frac{\alpha}{2}; db\right\} \bar{\sigma} \quad (3-4)$$

3.7.2 Analisa Varian Dua Arah

Bila pengaruh interaksi antara faktor waktu difusi pada level A dan faktor jarak distribusi pada level 1 dinyatakan dengan $(\alpha\beta)_{A1}$ dan μ merupakan nilai rata – rata dari seluruh pengamatan maka persamaan menjadi :

$$\mu_{A1} = \mu + \alpha_A + \beta_1 + (\alpha\beta)_{A1} \quad (3-5)$$

Yang akan diuji dari kejadian ini adalah :

1. α = merupakan pengaruh faktor waktu difusi.
2. β = merupakan pengaruh faktor jarak distribusi.
3. $\alpha\beta$ = merupakan pengaruh interaksi antara faktor waktu difusi dan jarak distribusi.

Ketiga hipotesisnya ditulis sebagai berikut:

1. H_0 : $\alpha_{A1} = \alpha_{A2} = \alpha_{A3} = \alpha_{A4} = \alpha_{A5}$
 H_1 : Sekurang- kurangnya ada satu $\alpha_{A1} \neq 0$
2. H_0 : $\beta_{B1} = \beta_{B2} = \beta_{B3} = \beta_{B4} = \beta_{B5}$
 H_1 : Sekurang- kurangnya ada satu $\beta_{B1} \neq 0$
3. H_0 : $(\alpha\beta)_{A1B1} = (\alpha\beta)_{AB2} = \dots = \alpha\beta_{AiBj}$
 H_1 : Sekurang- kurangnya ada satu $\alpha\beta_{AiBj} \neq 0$

Langkah – langkah analisis varian dua arah dilakukan sebagai berikut:

1. Menentukan taraf nyata α
2. Menentukan Wilayah kritis:
 - a. Untuk pengujian hipotesis tentang pengaruh waktu difusi : $F_1 > F_{\alpha}(db1,db4)$
 - b. Untuk pengujian hipotesis tentang pengaruh Jarak distribusi : $F_2 > F_{\alpha}(db2,db4)$
 - c. Untuk pengujian hipotesis tentang pengaruh Interaksi : $F_3 > F_{\alpha}(db3,db4)$
3. Perhitungan:

$$\text{Faktor Koreksi} = \frac{T_T^2}{r.c.t} \quad (3-6)$$

$$\text{JKT} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^t X_{ijk}^2 - \frac{T_T^2}{r.c.t} \quad (3-7)$$

$$\text{JK Waktu difusi} = \frac{\sum_{i=1}^r T_A}{c.t} - \frac{T_T^2}{r.c.t} \quad (3-8)$$

$$\text{JK Jarak Distribusi} = \frac{\sum_{i=1}^r T_A}{r.t} - \frac{T_T^2}{r.c.t} \quad (3-9)$$

$$\text{JK Perlakuan} = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c T_{ij}}{t} - \frac{T_T^2}{r.c.t} \quad (3-10)$$

JK Interaksi = JK perlakuan – JK Waktu difusi – JK Jarak Distribusi

JK Galat = JKT – JK Perlakuan

Tabel 3.2 Rancangan Hasil Analisa Varian Dua arah

Sumber Varian	JK	Db	KT	F _{hitung}	F _{Tabel}
Waktu difusi (A)	JK Waktu difusi	Db ₁ = r-1	KTA	F ₁	
Jarak Distribusi (B)	JK Jarak distribusi	Db ₂ = c-1	KTB	F ₂	
Interaksi	JK Interaksi	Db ₃ = Db ₁ . Db ₂	KTAB	F ₃	
Galat	JKG	Db ₄ = rc(t-1)	KTG		
Total	JKT	rct - 1			

Pengambilan keputusan : Dari tabel analisis varian jika F_{hitung} > F_{tabel} yang terletak pada daerah kritis, sehingga H₀ ditolak dan H₀ diterima bila F_{hitung} terletak diluar wilayah kritis.

3.7.3 Analisa Regresi.

Analisa regresi adalah teknik statistik parametrik yang digunakan untuk melakukan peramalan atau prediksi besarnya kecenderungan yang terjadi pada variabel Y berdasarkan variabel X, dan untuk menentukan besarnya koefisien regresi antara variabel X dan variabel Y. persamaan regresi dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x^j \quad (3-11)$$

Dengan $j : 1, 2, 3, \dots, k$

j : fungsi dengan derajat k

Model penduga dari regresi fungsi kuadratik dinyatakan dengan:

$$Y = b_0 + b_1 x + b_2 x^2 \quad (3-12)$$

Jumlah kuadrat deviasi (S) adalah:

$$S^2 = \sum [y - \{b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + \dots + b_k x^k\}]^2 \quad (3-13)$$

Dengan menurunkan S^2 secara parsial masing – masing terhadap $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ dan masing – masing turunan disamakan dengan nol akan diperoleh sejumlah n persamaan normal dengan n variabel yang tidak diketahui, sehingga n variabel dari persamaan tersebut yaitu $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$ dapat dihitung:

Diferensial dari fungsi S berturut – turut:

$$\frac{\partial S^2}{\partial a_0} = 0; \quad \frac{\partial S^2}{\partial a_1} = 0; \quad \frac{\partial S^2}{\partial a_2} = 0; \quad \dots \quad \frac{\partial S^2}{\partial a_n} = 0; \quad (3-14)$$

Diperoleh n persamaan normal sebagai berikut:

$$1. \sum Y_i = b_0 \cdot n + b_1 \sum X_i + b_2 \sum X_i^2 + \dots + b_n \sum X_i^n; \quad (3-15)$$

$$2. \sum X_i Y_i = b_0 \sum X_i + b_1 \sum X_i^2 + b_2 \sum X_i^3 + \dots + b_n \sum X_i^{n+1}; \quad (3-16)$$

$$3. \sum X_i^2 Y_i = b_0 \sum X_i^2 + b_1 \sum X_i^3 + b_2 \sum X_i^4 + \dots + b_n \sum X_i^{n+2}; \quad (3-17)$$

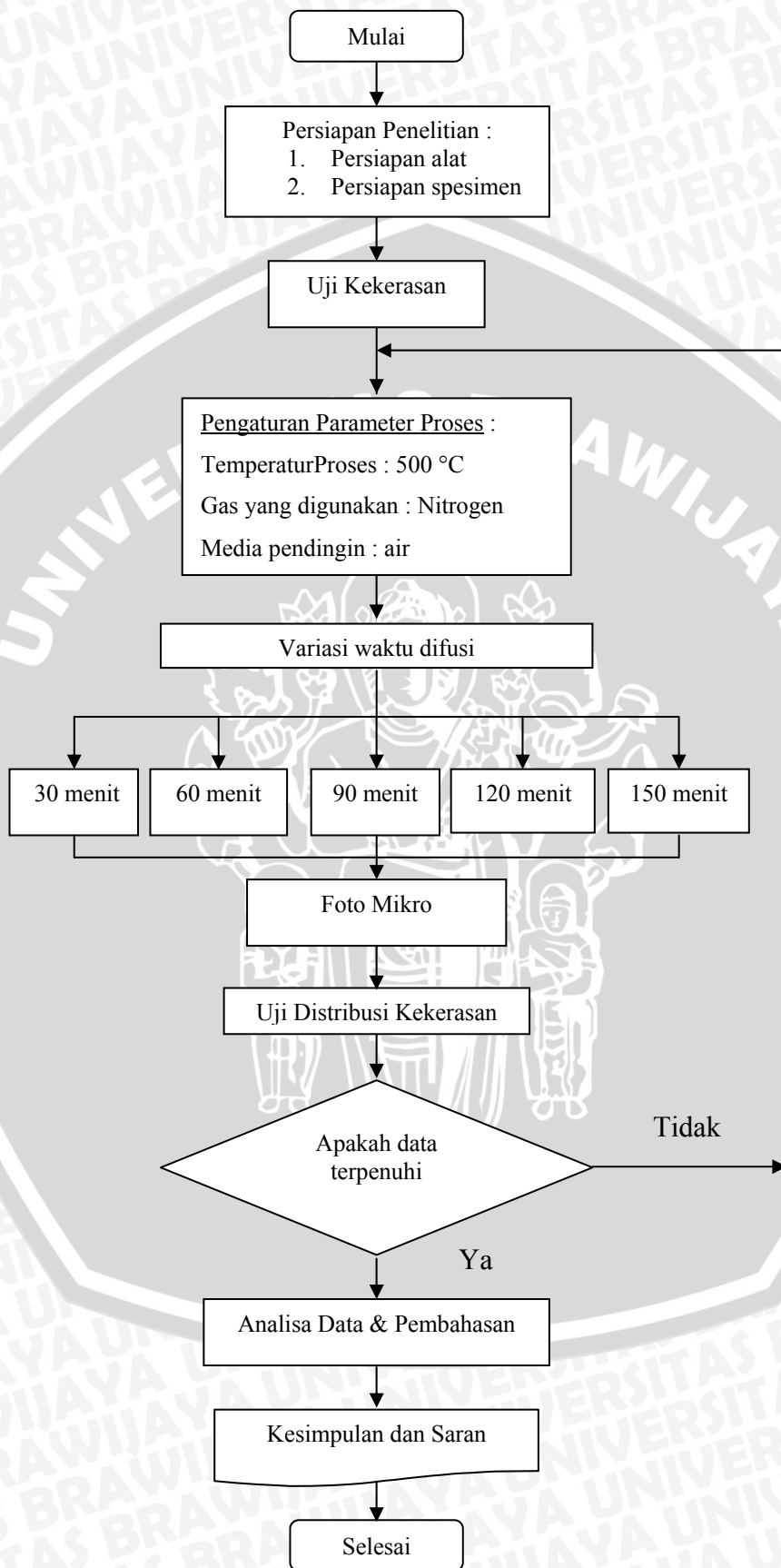
Keterangan : Y = variabel terikat

X = variabel bebas

sedangkan nilai koefisien korelasi (r) dapat ditentukan dengan persamaan :

$$r^2 = \frac{\left[\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y}) \right]^2}{\sum (X - \bar{X})^2 \cdot \sum (Y - \bar{Y})^2} \quad (3-18)$$

3.8. Diagram Alir Penelitian.



Gambar 3.6. Diagram Alir Penelitian

BAB IV ANALISA DATA

4.1 Data Hasil Pengujian

Data distribusi kekerasan hasil proses nitriding dengan metode *Vickers* pada tabel sebagai berikut:

Tabel 4.1. Data Hasil Pengujian Distribusi Kekerasan

Waktu Difusi	Nilai Kekerasan (VHN)					
	Jarak Distribusi					
	1	2	3	4	5	Jumlah
30 menit	67	63	60	57	56	
	68	64	62	58	57	
	66	62	58	56	55	
	201	189	180	171	168	909
60 menit	73	67	62	58	57	
	72	66	61	57	56	
	74	68	63	59	58	
	219	201	186	174	171	951
90 menit	78	71	65	59	57	
	79	72	66	60	58	
	77	70	64	58	56	
	234	213	195	177	171	990
120 menit	85	75	67	60	58	
	84	74	66	59	57	
	86	76	68	61	59	
	255	225	201	180	174	1035
150 menit	94	80	69	61	58	
	95	81	70	62	59	
	93	79	68	60	57	
	282	240	207	183	174	1086
Jumlah	1191	1068	969	885	858	4971

4.2 Pengolahan Data

4.2.1 Analisa Statistik

Analisa statistik nilai distribusi kekerasan untuk proses *nitriding* dengan *holding time* 30 menit, data yang digunakan dapat dilihat pada table 4.1

- Pada permukaan spesimen
 - Kekerasan rata-rata :

$$X_r = \frac{\sum T}{n} = \frac{201}{3} = 67$$

- Standar deviasi :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (T - X_r)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{2}{2}} = 1$$

- Standar deviasi rata-rata :

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,58$$

- Interval penduga rata-rata kekerasan permukaan :

$$X_r - t\left\{\frac{\alpha}{2}; db\right\} \bar{\sigma} < \mu < X_r + t\left\{\frac{\alpha}{2}; db\right\} \bar{\sigma}.$$

$$67 - (4,303 \cdot 0,58) < \mu < 67 + (4,303 \cdot 0,58)$$

$$64,5 < \mu < 69,5$$

- Pada jarak 15 μm dari permukaan

- Kekerasan rata-rata :

$$X_r = \frac{\sum T}{n} = \frac{189}{3} = 63$$

- Standar deviasi :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (T - X_r)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{2}{2}} = 1$$

- Standar deviasi rata-rata :

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,58$$

- Interval penduga rata-rata kekerasan permukaan :

$$X_r - t\left\{\frac{\alpha}{2}; db\right\} \bar{\sigma} < \mu < X_r + t\left\{\frac{\alpha}{2}; db\right\} \bar{\sigma}.$$

$$63 - (4,303 \cdot 0,58) < \mu < 63 + (4,303 \cdot 0,58)$$

$$60,5 < \mu < 65,5$$

- Pada jarak 30 μm dari permukaan

- Kekerasan rata-rata :

$$X_r = \frac{\sum T}{n} = \frac{180}{3} = 60$$

- Standar deviasi :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (T - X_r)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{8}{2}} = 2$$

- Standar deviasi rata-rata :

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,154$$

- Interval penduga rata-rata kekerasan permukaan :

$$X_r - t\left\{\frac{\alpha}{2}; db\right\} \bar{\sigma} < \mu < X_r + t\left\{\frac{\alpha}{2}; db\right\} \bar{\sigma}.$$

$$60 - (4,303.1,15) < \mu < 60 + (4,303.1,15)$$

$$55,1 < \mu < 64,95$$

- Pada jarak 45 μm dari permukaan

- Kekerasan rata-rata :

$$X_r = \frac{\sum T}{n} = \frac{171}{3} = 57$$

- Standar deviasi :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (T - X_r)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{2}{2}} = 1$$

- Standar deviasi rata-rata :

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,58$$

- Interval penduga rata-rata kekerasan permukaan :

$$X_r - t\left\{\frac{\alpha}{2}; db\right\} \bar{\sigma} < \mu < X_r + t\left\{\frac{\alpha}{2}; db\right\} \bar{\sigma}.$$

$$57 - (4,303.0,58) < \mu < 57 + (4,303.0,58)$$

$$54,5 < \mu < 59,49$$

- Pada jarak 60 μm dari permukaan

- Kekerasan rata-rata :

$$X_r = \frac{\sum T}{n} = \frac{168}{3} = 56$$

- Standar deviasi :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (T - X_r)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{2}{2}} = 1$$

- Standar deviasi rata-rata :

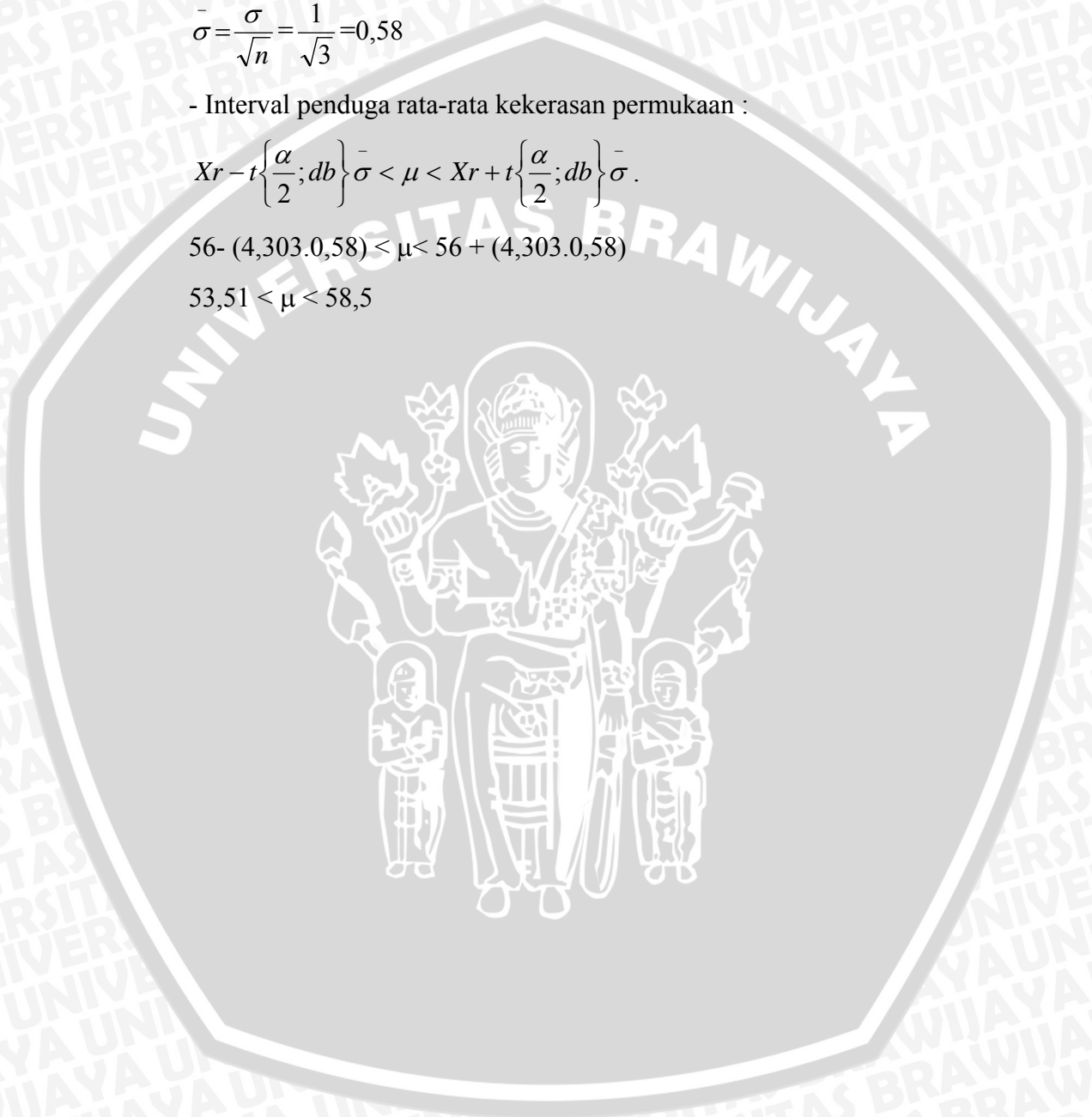
$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,58$$

- Interval penduga rata-rata kekerasan permukaan :

$$X_r - t\left\{\frac{\alpha}{2}; db\right\} \bar{\sigma} < \mu < X_r + t\left\{\frac{\alpha}{2}; db\right\} \bar{\sigma}$$

$$56 - (4,303 \cdot 0,58) < \mu < 56 + (4,303 \cdot 0,58)$$

$$53,51 < \mu < 58,5$$



Interval penduga nilai kekerasan rata-rata pada setiap jarak distribusi dapat dilihat pada tabel 4.2

Tabel 4.2. Nilai interval penduga distribusi kekerasan pada setiap waktu difusi

Jarak Difusi		Kekerasan Rata – rata (\bar{Y})	Standar Deviasi (σ)	Standar Deviasi Rata – rata ($\bar{\sigma}$)	Interval penduga Rata – rata	
						Variasi
Waktu difusi (Menit)	30	1	67	1	0,58	$64,5 < \mu < 69,5$
		2	63	1	0,58	$60,5 < \mu < 65,5$
		3	60	2	1,15	$57,5 < \mu < 62,49$
		4	57	1	0,58	$54,5 < \mu < 59,49$
		5	56	1	0,58	$53,51 < \mu < 58,5$
	60	1	73	1	0,577	$70,51 < \mu < 75,5$
		2	67	1	0,577	$64,5 < \mu < 69,5$
		3	62	1	0,577	$59,51 < \mu < 64,5$
		4	58	1	0,577	$55,5 < \mu < 60,45$
		5	57	1	0,577	$54,5 < \mu < 59,49$
	90	1	78	1	0,577	$75,51 < \mu < 80,5$
		2	71	1	0,577	$68,5 < \mu < 73,5$
		3	65	1	0,577	$62,4 < \mu < 67,49$
		4	59	1	0,577	$56,51 < \mu < 61,5$
		5	57	1	0,577	$54,45 < \mu < 59,5$
	120	1	85	1	0,577	$82,5 < \mu < 87,49$
		2	75	1	0,577	$72,504 < \mu < 77,5$
		3	67	1	0,577	$64,5 < \mu < 69,49$
		4	60	1	0,577	$57,51 < \mu < 62,5$
		5	58	1	0,577	$55,5 < \mu < 60,49$
150	1	94	1	0,577	$91,51 < \mu < 96,5$	
	2	80	1	0,577	$77,45 < \mu < 82,49$	
	3	69	1	0,577	$66,51 < \mu < 71,5$	
	4	61	1	0,577	$58,51 < \mu < 63,45$	
	5	58	1	0,577	$55,5 < \mu < 60,49$	

Keterangan :

- 1 : Distribusi pada permukaan spesimen
- 2 : Distribusi pada jarak 15 μm dari permukaan
- 3 : Distribusi pada jarak 30 μm dari permukaan
- 4 : Distribusi pada jarak 45 μm dari permukaan
- 5 : Distribusi pada jarak 60 μm dari permukaan

4.2.2 Analisa Varian Dua Arah

Dilakukan analisa varian untuk mengetahui ada tidaknya pengaruh waktu difusi terhadap distribusi kekerasan pada aluminium paduan hasil proses nitriding, dengan perhitungan sebagai berikut:

4. Hipotesis

$$H_0^1 : \alpha_{A1} = \alpha_{A2} = \alpha_{A3} = \alpha_{A4} = \alpha_{A5}$$

$$H_1^1 : \text{Sekurang- kurangnya ada satu } \alpha_{A1} \neq 0$$

$$H_0^2 : \beta_{B1} = \beta_{B2} = \beta_{B3} = \beta_{B4} = \beta_{B5}$$

$$H_1^2 : \text{Sekurang- kurangnya ada satu } \beta_{B1} \neq 0$$

$$H_0^3 : (\alpha\beta)_{A1B1} = (\alpha\beta)_{AB2} = \dots = \alpha\beta_{AiBj}$$

$$H_1^3 : \text{Sekurang- kurangnya ada satu } \alpha\beta_{AiBj} \neq 0$$

5. Taraf nyata $\alpha = 5\%$

6. Wilayah kritik:

d. Untuk pengujian hipotesis tentang pengaruh waktu difusi : $F_1 > F_{0,05}(4,50) = 2,57$.

e. Untuk pengujian hipotesis tentang pengaruh Jarak distribusi : $F_2 > F_{0,05}(4,50) = 2,57$

f. Untuk pengujian hipotesis tentang pengaruh Interaksi : $F_3 > F_{0,05}(16,50) = 2,41$

7. Perhitungan:

$$\text{Faktor Koreksi} = \frac{4971^2}{75} = 329477,88$$

$$\text{Jumlah kuadrat total} = (67^2 + 63^2 + \dots + 57^2) - 329477,88 = 7593,12$$

$$\text{JK Waktu difusi} = \frac{909^2 + 951^2 + 990^2 + 1035^2 + 1086^2}{15} = 1282,32$$

$$\text{JK Jarak Distribusi} = \frac{1191^2 + 1068^2 + 969^2 + 885^2 + 858^2}{15} = 5019,12$$

$$\text{JK Perlakuan} = \frac{201^2 + 189^2 + \dots + \dots + 174^2}{3} = 7071,12$$

$$\text{JK Interaksi} = 7071,12 - 5019,12 - 1282,32 = 769,68$$

$$\begin{aligned} \text{JK Galat} &= \text{JKT} - \text{JK Perlakuan} \\ &= 7593,12 - 7071,12 = 522 \end{aligned}$$

Tabel 4.3 Hasil Analisa Varian Dua arah

Sumber Varian	JK	Db	KT	F _{hitung}	F _{Tabel}
Waktu difusi	1282,32	4	320,58	30,7069	2,57
Jarak Distribusi	5019,12	4	1254,78	120,19	2,57
Interaksi	769,68	16	48,105	4,60776	2,41
Galat	522	50	10,44		
Total	7593,12	74			

Pengambilan keputusan : Dari tabel analisis varian terlihat bahwa masing – masing $F_{hitung} > F_{tabel}$ yang terletak pada daerah kritik, sehingga H_0 ditolak yang berarti peningkatan waktu difusi, jarak distribusi dan interaksinya memberikan pengaruh terhadap kekerasan aluminium paduan dengan keyakinan 95 %.

4.2.3 Analisa Regresi

Untuk mencari hubungan dan besarnya pengaruh waktu waktu difusi terhadap distribusi kekerasan, perhitungan berikut mengambil sampel pada permukaan spesimen

Tabel 4.4. Nilai distribusi kekerasan pada permukaan

X	Y	X ²	X ³	X ⁴	XY	X ² Y
30	67	900	27000	810000	2010	60300
30	68	900	27000	810000	2040	61200
30	66	900	27000	810000	1980	59400
60	73	3600	216000	12960000	4380	262800
60	72	3600	216000	12960000	4320	259200
60	74	3600	216000	12960000	4440	266400
90	78	8100	729000	65610000	7020	631800
90	79	8100	729000	65610000	7110	639900
90	77	8100	729000	65610000	6930	623700
120	85	14400	1728000	207360000	10200	1224000
120	84	14400	1728000	207360000	10080	1209600
120	86	14400	1728000	207360000	10320	1238400
150	94	22500	3375000	506250000	14100	2115000
150	85	22500	3375000	506250000	12750	1912500
150	93	22500	3375000	506250000	13950	2092500
1350	1181	148500	18225000	2378970000	111630	12656700

X = Variasi Waktu Difusi Y = Nilai kekerasan pada permukaan

a. Perhitungan b_0 , b_1 , b_2 pada permukaan spesimen

Persamaan regresi polinomial derajat k yang digunakan dapat dilihat pada persamaan (3-12) dan data yang digunakan dapat dilihat pada tabel 4.4 sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$15b_0 + 1350b_1 + 148500b_2 = 1181$$

$$1350b_0 + 148500b_1 + 18225000b_2 = 111630$$

$$148500b_0 + 18225000b_1 + 2378970000b_2 = 12656700$$

$$= \begin{vmatrix} 15 & 1350 & 148500 \\ 1350 & 148500 & 18225000 \\ 148500 & 18225000 & 2,38E+09 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1181 \\ 111630 \\ 12656700 \end{vmatrix}$$

$$D = \begin{vmatrix} 15 & 1350 & 148500 \\ 1350 & 148500 & 18225000 \\ 148500 & 18225000 & 2,38E+09 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 15 & 1350 \\ 1350 & 148500 \\ 148500 & 18225000 \end{vmatrix}$$

$$D = 1,378E+13$$

$$D_{b_0} = \begin{vmatrix} 1181 & 1350 & 148500 \\ 111630 & 148500 & 18225000 \\ 12656700 & 18225000 & 2,38E+09 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 1181 & 1350 \\ 111630 & 148500 \\ 12656700 & 18225000 \end{vmatrix}$$

$$D_{b_0} = 8,487E+14$$

$$D_{b_1} = \begin{vmatrix} 15 & 1181 & 148500 \\ 1350 & 111630 & 18225000 \\ 148500 & 12656700 & 2,38E+09 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 15 & 1181 \\ 1350 & 111630 \\ 148500 & 12656700 \end{vmatrix}$$

$$D_{b_1} = 2,463E+12$$

$$D_{b_2} = \begin{vmatrix} 15 & 1350 & 1181 \\ 1350 & 148500 & 111630 \\ 148500 & 18225000 & 12656700 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 15 & 1350 \\ 1350 & 148500 \\ 148500 & 18225000 \end{vmatrix}$$

$$D_{b_2} = 1,458E+09$$

$$b_2 = 0,0001$$

$$b_1 = 0,1787$$

$$b_0 = 61,6000$$

Nilai b_0 , b_1 , b_2 disubstitusikan ke persamaan $Y = b_0 + b_1x + b_2x^2$, sehingga diperoleh persamaan regresi pada permukaan spesimen:

$$Y = 61,6 + 0,1787x + 0,0001x^2,$$

Tabel 4.5. Nilai koefisien regresi pada permukaan

X	X-X _{rata}	Y	Y ₁ -Y _{rata}	Y ₁	(X-X _{rata}) ²	(Y ₁ -Y _{rata}) ²	(X-X _{rata})(Y ₁ -Y _{rata})	(X-X _{rata}) ² ·(Y ₁ -Y _{rata}) ²
30	-60	67	-12,682	66,051	3600	160,841	760,938	
30	-60	68	-12,682	66,051	3600	160,841	760,938	
30	-60	66	-12,682	66,051	3600	160,841	760,938	
60	-30	73	-7,051	71,682	900	49,721	211,539	
60	-30	72	-7,051	71,682	900	49,721	211,539	
60	-30	74	-7,051	71,682	900	49,721	211,539	
90	0	78	-1,240	77,493	0	1,538	0	
90	0	79	-1,240	77,493	0	1,538	0	
90	0	77	-1,240	77,493	0	1,538	0	
120	30	85	4,751	83,484	900	22,569	142,521	
120	30	84	4,751	83,484	900	22,569	142,521	
120	30	86	4,751	83,484	900	22,569	142,521	
150	60	94	10,922	89,655	3600	119,284	655,302	
150	60	85	10,922	89,655	3600	119,284	655,302	
150	60	93	10,922	89,655	3600	119,284	655,302	
Σ		78,73333			27000	1061,858	5310,900	28670159,826

Dari table 4.5 dapat dihitung nilai koefisien regresi, sebagai berikut:

$$r^2 = \frac{[\Sigma(X - X_{rata})(Y_0 - Y_{rata})]^2}{(\Sigma(X - X_{rata})^2)(\Sigma(Y_0 - Y_{rata})^2)}$$

$$r^2 = \frac{5310,9^2}{28670159,826} = 0,9837$$

Dengan perhitungan yang sama diperoleh persamaan regresi kuadratik dan koefisien regresi pada setiap jarak distribusi sebagai berikut:

b. Pada jarak distribusi 15 μm:

$$Y = 59,6 + 0,1114x + 0,0002x^2$$

$$r^2 = \frac{3979,8^2}{15942308,22} = 0,993508$$

c. Pada jarak distribusi 30 μm:

$$Y = 57,2 + 0,0910x - 0,0001x^2$$

$$r^2 = \frac{1971^2}{3910226,4} = 0,993508$$

d. Pada jarak distribusi 45 μm:

$$Y = 53,33 + 0,1286x - 0,0005x^2$$

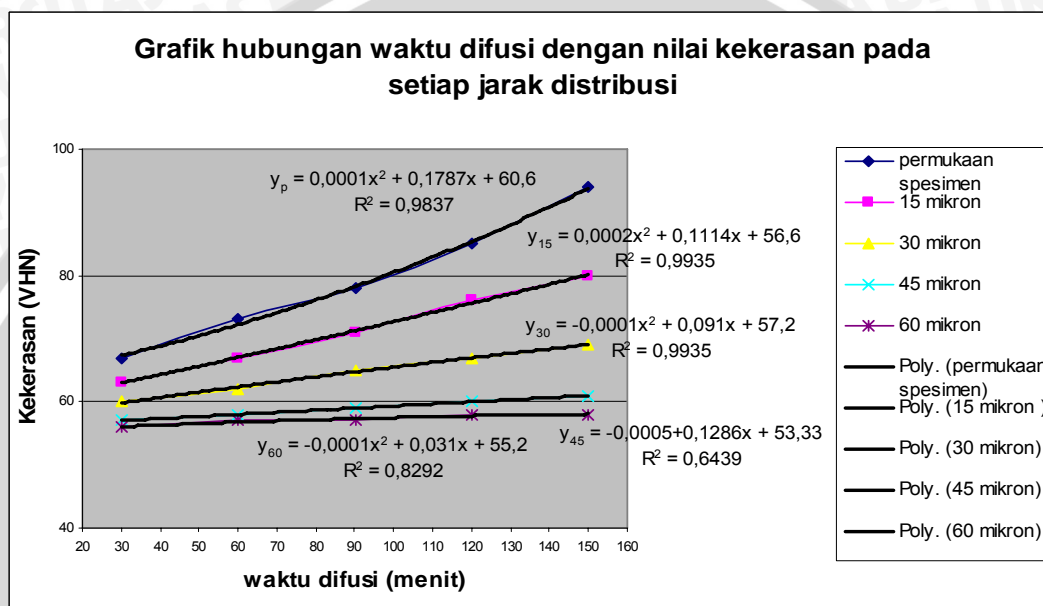
$$r^2 = \frac{1042,2^2}{1686734,685} = 0,6439$$

e. Pada jarak distribusi 60 μm :

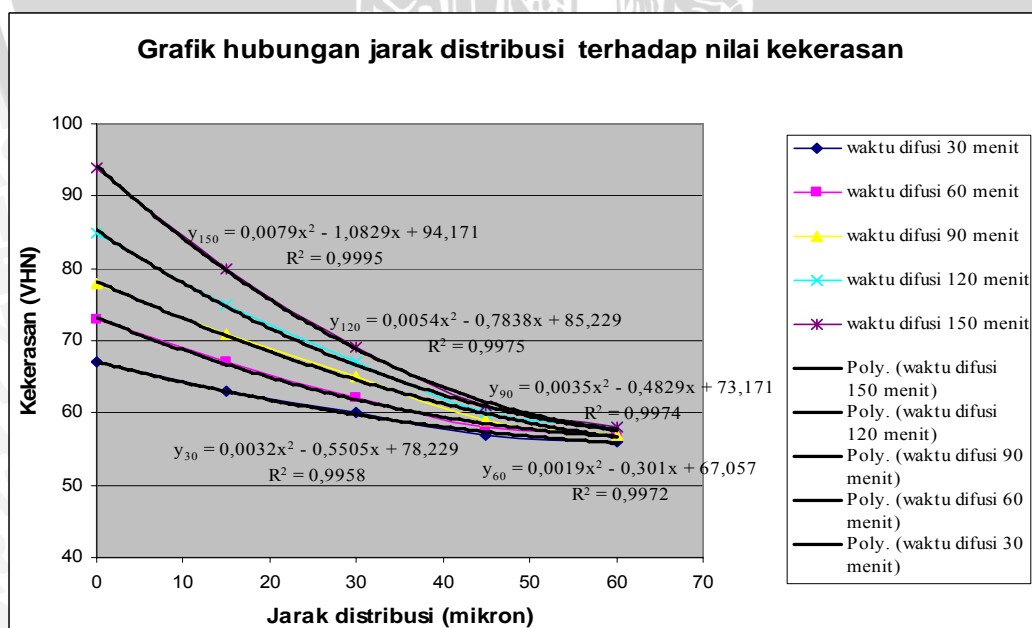
$$Y = 55,2 + 0,0310x - 0,0001x^2$$

$$r^2 = \frac{3979,8^2}{15942308,22} = 0,8292$$

4.3 Pembahasan



Gambar 4.1. Grafik nilai kekerasan terhadap waktu difusi

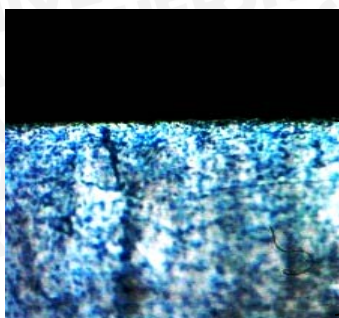


Gambar 4.2. Grafik distribusi kekerasan terhadap jarak distribusi

Dari gambar 4.1 dapat diamati bahwa dengan meningkatnya waktu difusi, kekerasan lapisan *nitride* yang terbentuk pada setiap jarak distribusi mengalami peningkatan. Pada waktu difusi 150 menit, nilai kekerasan pada permukaan 91,51-96,5 VHN, dan waktu difusi 30 menit nilai kekerasan 64,5-69,5 VHN, pada jarak distribusi 60 μm dari permukaan, waktu difusi 150 menit nilai kekerasan 55,5 – 60,49 VHN dan waktu difusi 30 menit nilai kekerasan 53,5–58,5 VHN. Lapisan *nitride* yang terbentuk bertambah dengan meningkatnya waktu difusi, seperti terlihat pada gambar 4.3. Hal ini disebabkan karena selama proses difusi berlangsung terjadi peningkatan kadar atom nitrogen dan penetrasi atom nitrogen kedalam aluminium paduan. Pada waktu difusi 30 menit, difusi atom nitrogen menempati ruang interstisi masih rendah menyebabkan lapisan *nitride* yang terbentuk berkurang, dengan bertambahnya waktu difusi maka difusi atom nitrogen menempati posisi interstisi meningkat, sampai pada waktu difusi 150 menit, difusi atom nitrogen diperkirakan mengalami kondisi jenuh dalam hal ini terjadi peningkatan kadar nitrogen di permukaan. Selain itu akibat adanya unsur paduan Cu dalam aluminium yang membentuk presipitat CuAl_2 setelah mengalami penuaan secara alami (*natural aging*). Hal ini menyebabkan terjadinya dislokasi pada kisi-kisi kristal yang menghalangi terjadinya slip, sehingga terjadi pengerasan selain pada permukaan juga pada *substrate* material aluminium.

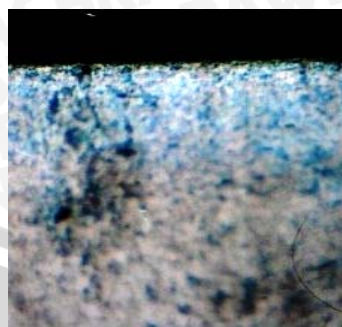
Pada gambar 4.2 Nilai kekerasan cenderung menurun terhadap jarak distribusi pada daerah difusi dengan waktu difusi yang tetap, hal ini disebabkan oleh perbedaan konsentrasi atom nitrogen yang berdifusi pada jarak tertentu dari permukaan dan telah dijelaskan dalam hukum *Fick's II* yang menyatakan hubungan perbedaan jumlah konsentrasi atom yang berdifusi pada jarak distribusi, dimana konsentrasi atom nitrogen pada permukaan lebih banyak dan mengalami penurunan konsentrasi pada jarak yang semakin jauh dari permukaan.

1. perlakuan 150 menit



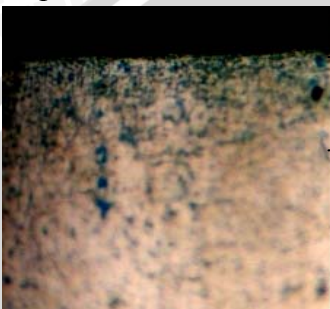
Lapisan keras

2. perlakuan 120 menit



Lapisan keras

3. perlakuan 90 menit



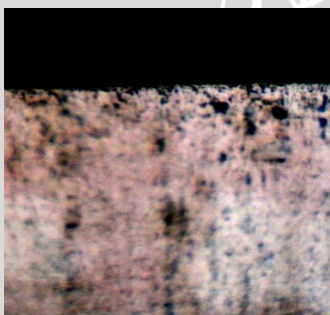
Lapisan keras

4. perlakuan 60 menit



Lapisan keras

5. perlakuan 30 menit



Lapisan keras

6. Tanpa perlakuan



Gambar 4.3 Foto Mikro Aluminium paduan

Keterangan : Pembesaran pada mikroskop elektron : 520X

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan.

Pada penelitian ini menggunakan aluminium paduan seri AA 2024 dengan kandungan 4,2 %Cu, 1,4%Mg, 0,4%Fe, 0,3%Si yang diperoleh dari hasil pengujian komposisi. Dari hasil analisa dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa penambahan waktu difusi proses *nitriding* berpengaruh terhadap peningkatan kekerasan pada aluminium paduan, karena selama proses *nitriding* berlangsung terjadi peningkatan kadar nitrogen pada permukaan dan difusi atom nitrogen ke dalam material aluminium sehingga terbentuk suatu lapisan *nitride*.

- Pada permukaan dengan waktu difusi 150 menit nilai kekerasan 92-97 VHN dan pada waktu difusi 30 menit nilai kekerasan 65-70 VHN.
- Pada jarak distribusi 15 μm dengan waktu difusi 150 menit nilai kekerasan 78-83 VHN dan pada waktu difusi 30 menit nilai kekerasan 61-66 VHN.
- Pada jarak distribusi 30 μm dengan waktu difusi 150 menit nilai kekerasan 67-72 VHN dan pada waktu difusi 30 menit nilai kekerasan 57-62 VHN.
- Pada jarak distribusi 45 μm dengan waktu difusi 150 menit nilai kekerasan 58-63 VHN dan pada waktu difusi 30 menit nilai kekerasan 54-59VHN.
- Pada jarak distribusi 60 μm dengan waktu difusi 150 menit nilai kekerasan 56-61 VHN dan pada waktu difusi 30 menit nilai kekerasan 53-58 VHN.

Semakin lama waktu difusi proses *nitriding*, nilai kekerasan aluminium paduan meningkat pada setiap jarak distribusi serta kedalaman lapisan *nitride* yang terbentuk bertambah sehingga bisa diasumsikan perubahan kekerasan terhadap waktu difusi berbanding lurus.

5.2. Saran.

- Pada proses foto mikro perlu ditempelkan panjang garis ukuran yang diketahui sebagai pembanding.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, J.C., 1990, *Material Science, Fourth Edition*, London : Chapman and Hall.
- Callister. Jr. William.D., 1985, *Material Science and Engineering, Fourt Edition*, Singapore : John Wiley and Sons Inc.
- Hifni, M., 1991, *Analisa Varian dan Penerapannya*, Fakultas Teknik, Jurusan Mesin, Univerisitas Brawijaya Malang.
- Jacob, James., 1997, *Engineering Material Technology, Third Edition*, New Jersey : Prientce – Hall.
- Leppanen, Rainer., 1999. *Properties of nitrided components –A Result of the nitriding Process*, Sweden : Ovako Steel.
- Parker, Earl.K., 1967, *Material Data Book*, Newyork : Mc.Graw Hill.
- Perez, Ghislain., 2006. *Surface Treating with low pressure nitriding*, BMI.
- Pranoto, B.H., 1992. *Teori Dasar Pengujian Logam*, Fakultas Teknik, Jurusan Mesin, Universitas Brawijaya.
- Priest, J.M., 2000. *Studies in Low Pressure Plasma Nitriding, Physics & Electrical Engineering*, University of New England
- Reynoldson. R.W.,1989, *Heat Treatment in Fluidized Furnace*, Melbourne: Cammoran Publishing.
- Schaffer, James., 1999, *The Science and Design of Engineering Materials, Second Edition*, New York : Mc Grawhill.
- Smallman, R.E., 1991, *Metalurgi Fisik Modern*, Edisi Keempat, Jakarta: P.T Gramedia.
- Smith, William.F., 1993, *Foundation Of Material Science and Engineering, Fifth Edition*, Singapore : Mc.GrawHill Inc.
- Surdia, Tata., 1999, *Pengetahuan Bahan Teknik*, Cetakan Keempat, Jakarta : Pradnya Paramita.
- Van Vlack, Lawrence.,1991, *Ilmu dan teknologi Bahan*, edisi kelima, Jakarta : Erlangga.
- Wahyudi, Slamet., 2006, *Statistik Teknik*, Malang : Universitas Brawijaya.
- [www. Elsevier.com](http://www.Elsevier.com)
- [www. Gordonengland.co.uk](http://www.Gordonengland.co.uk).
- [www. Key-to-steel.com](http://www.Key-to-steel.com).



LAMPIRAN



TABEL NILAI KEKERASAN VICKERS

Load 10 gf (0.01 kgf)										
Diagonal (μm)	Vickers Hardness Number									
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
3	2060	1929	1811	1702	1604	1513	1431	1354	1284	1219
4	1159	1103	1051	1003	958	916	876	839	805	772
5	742	713	686	660	636	613	591	571	551	533
6	515	498	482	467	453	439	426	413	401	389
7	378	368	358	348	339	330	321	313	305	297
8	290	283	276	269	263	257	251	245	239	234
9	229	224	219	214	210	205	201	197	193	189
10	185	182	178	175	171	168	165	162	159	156
11	153	150	148	145	143	140	138	135	133	131
12	129	127	125	123	121	119	117	115	113	111
13	110	108	106	105	103	102	100	98.8	97.4	96.0
14	94.6	93.3	91.9	90.7	89.4	88.2	87.0	85.8	84.6	83.5
15	82.4	81.3	80.2	79.2	78.2	77.2	76.2	75.2	74.3	73.3
16	72.4	71.5	70.6	69.8	68.9	68.1	7.3	66.5	65.7	64.9
17	64.2	63.4	62.7	61.9	61.2	60.5	59.9	59.2	58.5	57.9
18	57.2	56.6	56.0	55.4	54.8	54.2	53.6	53.0	52.5	51.9
19	51.4	50.8	50.3	49.8	49.3	48.8	48.3	47.8	47.3	46.8
20	46.4	45.9	45.4	45.0	44.6	44.1	43.7	43.3	42.9	42.4
21	42.0	41.6	41.3	40.9	40.5	40.1	39.7	39.4	39.0	38.7
22	38.3	38.0	37.6	37.3	36.9	36.6	36.3	36.0	35.7	35.4
23	35.0	34.7	34.4	34.2	33.9	33.6	33.3	33.0	32.7	32.5
24	32.2	31.9	31.7	31.4	31.1	30.9	30.6	30.4	30.1	29.9
25	29.7	29.4	29.2	29.0	28.7	28.5	28.3	28.1	27.9	27.6
26	27.4	27.2	27.0	26.8	26.6	26.4	26.2	26.0	25.8	25.6
27	25.4	25.2	25.1	24.9	24.7	24.5	24.3	24.2	24.0	23.8
28	23.6	23.5	23.3	23.1	23.0	22.8	22.7	22.5	22.4	22.2
29	22.0	21.9	21.7	21.6	21.4	21.3	21.2	21.0	20.9	20.7
30	20.6	20.5	20.3	20.2	20.1	19.9	19.8	19.7	19.5	19.4
31	19.3	19.2	19.0	18.9	18.8	18.7	18.6	18.4	18.3	18.2
32	18.1	18.0	17.9	17.8	17.7	17.6	17.4	17.3	17.2	17.1
33	17.0	16.9	16.8	16.7	16.6	16.5	16.4	16.3	16.2	16.1
34	16.0	15.9	15.9	15.8	15.7	15.6	15.5	15.4	15.3	15.2
35	15.1	15.0	15.0	14.9	14.8	14.7	14.6	14.5	14.5	14.4
36	14.3	14.2	14.1	14.1	14.0	13.9	13.8	13.8	13.7	13.6
37	13.5	13.5	13.4	13.3	13.3	13.2	13.1	13.0	13.0	12.9
38	12.8	12.8	12.7	12.6	12.6	12.5	12.4	12.4	12.3	12.3
39	12.2	12.1	12.1	12.0	11.9	11.9	11.8	11.8	11.7	11.6
40	11.6	11.5	11.5	11.4	11.4	11.3	11.2	11.2	11.1	11.1
41	11.0	11.0	10.9	10.9	10.8	10.8	10.7	10.7	10.6	10.6

Sumber : Laboratorium Ilmu Logam UGM.

Lampiran 3

F Table
Critical values for alpha equals .05.

df _w	df _B																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40

Sumber : *Psychological Statistic.*

The t-Distribution Table

Significance level = α

Degrees of Freedom	.005 (1-tail)	.01 (1-tail)	.025 (1-tail)	.05 (1-tail)	.10 (1-tail)	.25 (1-tail)
	.01 (2-tails)	.02 (2-tails)	.05 (2-tails)	.10 (2-tails)	.20 (2-tails)	.50 (2-tails)
1	63.657	31.821	12.706	6.314	3.078	1.000
2	9.925	6.965	4.303	2.920	1.886	.816
3	5.841	4.541	3.182	2.353	1.638	.765
4	4.604	3.747	2.776	2.132	1.533	.741
5	4.032	3.365	2.571	2.015	1.476	.727
6	3.707	3.143	2.447	1.943	1.440	.718
7	3.500	2.998	2.365	1.895	1.415	.711
8	3.355	2.896	2.306	1.860	1.397	.706
9	3.250	2.821	2.262	1.833	1.383	.703
10	3.169	2.764	2.228	1.812	1.372	.700
11	3.106	2.718	2.201	1.796	1.363	.697
12	3.054	2.681	2.179	1.782	1.356	.696
13	3.012	2.650	2.160	1.771	1.350	.694
14	2.977	2.625	2.145	1.761	1.345	.692
15	2.947	2.602	2.132	1.753	1.341	.691
16	2.921	2.584	2.120	1.746	1.337	.690
17	2.898	2.567	2.110	1.740	1.333	.689
18	2.878	2.552	2.101	1.734	1.330	.688
19	2.861	2.540	2.093	1.729	1.328	.688
20	2.845	2.528	2.086	1.725	1.325	.687
21	2.831	2.518	2.080	1.721	1.323	.686
22	2.819	2.508	2.074	1.717	1.321	.686
23	2.807	2.500	2.069	1.714	1.320	.685
24	2.797	2.492	2.064	1.711	1.318	.685
25	2.878	2.485	2.060	1.708	1.316	.684
26	2.779	2.479	2.056	1.706	1.315	.684
27	2.771	2.473	2.052	1.703	1.314	.684
28	2.763	2.467	2.048	1.701	1.313	.683
29	2.756	2.462	2.045	1.699	1.311	.683
Large	2.575	2.327	1.960	1.645	1.282	.675

Sumber : *Psychological Statistic*.

TABEL NILAI *ERROR FUNCTION*

Table 5.1 Tabulation of Error Function Values

z	$erf(z)$	z	$erf(z)$	z	$erf(z)$
0	0	0.55	0.5633	1.3	0.9340
0.025	0.0282	0.60	0.6039	1.4	0.9523
0.05	0.0564	0.65	0.6420	1.5	0.9661
0.10	0.1125	0.70	0.6778	1.6	0.9763
0.15	0.1680	0.75	0.7112	1.7	0.9838
0.20	0.2227	0.80	0.7421	1.8	0.9891
0.25	0.2763	0.85	0.7707	1.9	0.9928
0.30	0.3286	0.90	0.7970	2.0	0.9953
0.35	0.3794	0.95	0.8209	2.2	0.9981
0.40	0.4284	1.0	0.8427	2.4	0.9993
0.45	0.4755	1.1	0.8802	2.6	0.9998
0.50	0.5205	1.2	0.9103	2.8	0.9999

Sumber : Callister, hal. 96 : 1997.



Lampiran 7

HARDNESS CONVERSION TABLE and APROXIMATE TENSILE STRENGTH

No	Vickers hardness number	Brinell number		Rockwell number		Scleroscope	Tensile strength
		Steel ball	Carbide ball	C-scale	B-scale	Scope hardness	
		BHN		R_C	R_B	Shore	
1	940			68		97	
2	920			67,5		96	
3	900			67		95	
4	880			66,4		93	
5	860			65,9		92	
6	840		745	65,3		91	
7	820		733	64,7		90	
8	800		722	64		88	
9	780		710	63,3		87	
10	760		698	62,5		86	
11	740		684	61,8		84	
12	720		670	61		83	
13	700		656	61,1		81	
14	680		638	59,2		80	250
15	660		620	58,3		79	243
16	640		601	57,3		77	234
17	620		582	56,3		75	225
18	600		564	55,2		74	216
19	580		545	54,1		72	208
20	560		525	53		71	200
21	540	496	507	51,7		69	190
22	520	480	488	50,5		67	185
23	500	465	471	49,1		66	175
24	480	448	452	47,7		64	168
25	460	433	433	46,1		62	156
26	440	415	415	44,5		59	150
27	420	397	397	42,7		57	141
28	400	379	379	40,8		55	133
29	379	360		38,8		52	127
30	360	341		36,6		50	116
31	340	322		34,4		47	110
32	320	303		32,2		45	104
33	300	284		29,8		42	97
34	290	275		28,5		41	94
35	280	265		27,1		40	90
36	270	256		25,6		38	86
37	260	247		24		37	84
38	250	238		22,2		36	81
39	240	228		20,3		34	78
40	230	219			99,1	33	76

No	Vickers hardness number	Brinell number		Rockwell number		Scleroscope	Tensile strength
		Steel ball	Carbide ball	C-scale	B-scale	Scope hardness	
		BHN		R_C	R_B	Shore	Kg/mm ²
	HV						
41	220	209			97,5	32	73
42	210	200			95,7	30	70
43	200	190			93,8	29	67
44	190	181			91,6	28	66
45	180	171			89,2	26	62
46	170	162			86,5	25	58
47	160	152			83,4	23	54
48	150	143			80	22	51
49	140	133			76,1	21	48
50	130	124			71,5	20	46
51	120	114			66,3	18	43
52	110	105			60		
53	100	95			52,5		
54	90	85,5			43,3		
55	80	76			31,9		
56	70	66,5					
57	60	57					
58	50	47,5					
59	40	38					
60	30	28,5					

Sumber : B.K Agrawal, hal. 355 : 1988

TABEL KOEFISIEN REGRESI PADA PERMUKAAN SPESIMEN

No	X	$X - X_{rata}$	Y	$Y_1 - Y_{rata}$	Y_1	$(X - X_{rata})^2$	$(Y_1 - Y_{rata})^2$	$(X - X_{rata})(Y - Y_{rata})$	$(X - X_{rata})^2 \cdot (Y_1 - Y_{rata})^2$
1	30	-60	67	-12,682	66,051	3600	160,841	760,938	
2	30	-60	68	-12,682	66,051	3600	160,841	760,938	
3	30	-60	66	-12,682	66,051	3600	160,841	760,938	
4	60	-30	73	-7,051	71,682	900	49,721	211,539	
5	60	-30	72	-7,051	71,682	900	49,721	211,539	
6	60	-30	74	-7,051	71,682	900	49,721	211,539	
7	90	0	78	-1,240	77,493	0	1,538	0	
8	90	0	79	-1,240	77,493	0	1,538	0	
9	90	0	77	-1,240	77,493	0	1,538	0	
10	120	30	85	4,751	83,484	900	22,569	142,521	
11	120	30	84	4,751	83,484	900	22,569	142,521	
12	120	30	86	4,751	83,484	900	22,569	142,521	
13	150	60	94	10,922	89,655	3600	119,284	655,302	
14	150	60	85	10,922	89,655	3600	119,284	655,302	
15	150	60	93	10,922	89,655	3600	119,284	655,302	
Σ	90		78,73333			27000	1061,858	5310,900	28670159,826

TABEL KOEFISIEN REGRESI PADA JARAK DISTRIBUSI 15 μm

No	X	$X - X_{rata}$	Y	$Y_1 - Y_{rata}$	Y_1	$(Y_1 - Y_{rata})^2$	$(X - X_{rata})^2$	$(Y_1 - Y_{rata})^2$	$(X - X_{rata})(Y - Y_{rata})$	$(X - X_{rata})^2 \cdot (Y_1 - Y_{rata})^2$
1	30	-60	63	-8,078	63,122	15,039	3600	65,254	484,68	
2	30	-60	64	-8,078	63,122	3984,387	3600	65,254	484,68	
3	30	-60	62	-8,078	63,122	3984,387	3600	65,254	484,68	
4	60	-30	67	-4,196	67,004	35,952	900	17,606	125,88	
5	60	-30	66	-4,196	67,004	4489,536	900	17,606	125,88	
6	60	-30	68	-4,196	67,004	4489,536	900	17,606	125,88	
7	90	0	71	0,046	71,246	45,617	0	0,002	0	
8	90	0	72	0,046	71,246	5075,993	0	0,002	0	
9	90	0	70	0,046	71,246	5075,993	0	0,002	0	
10	120	30	75	4,648	75,848	83,759	900	21,604	139,44	
11	120	30	74	4,648	75,848	5752,919	900	21,604	139,44	
12	120	30	76	4,648	75,848	5752,919	900	21,604	139,44	
13	150	60	80	9,610	80,810	173,976	3600	92,352	576,6	
14	150	60	81	9,610	80,810	6530,256	3600	92,352	576,6	
15	150	60	79	9,610	80,810	6530,256	3600	92,352	576,6	
Σ	90		71,2			52020,524	27000	590,456	3979,800	15942308,220

TABEL KOEFISIEN REGRESI PADA JARAK DISTRIBUSI 30 μm

No	X	$X-X_{rata}$	Y	Y_1-Y_{rata}	Y_1	$(Y_1-Y_{rata})^2$	$(X-X_{rata})^2$	$(Y_1-Y_{rata})^2$	$(X-X_{rata})(Y_1-Y_{rata})$	$(X-X_{rata})^2 \cdot (Y_1-Y_{rata})^2$
1	30	-60	60	-4,760	59,840	51,266	3600	22,658	285,6	
2	30	-60	62	-4,760	59,840	3580,826	3600	22,658	285,6	
3	30	-60	58	-4,760	59,840	3580,826	3600	22,658	285,6	
4	60	-30	62	-2,300	62,300	114,490	900	5,290	69	
5	60	-30	61	-2,300	62,300	3881,290	900	5,290	69	
6	60	-30	63	-2,300	62,300	3881,290	900	5,290	69	
7	90	0	65	-0,020	64,580	180,096	0	0,000	0	
8	90	0	66	-0,020	64,580	4170,576	0	0,000	0	
9	90	0	64	-0,020	64,580	4170,576	0	0,000	0	
10	120	30	67	2,080	66,680	335,622	900	4,326	62,4	
11	120	30	66	2,080	66,680	4446,222	900	4,326	62,4	
12	120	30	68	2,080	66,680	4446,222	900	4,326	62,4	
13	150	60	69	4,000	68,600	645,160	3600	16,000	240	
14	150	60	70	4,000	68,600	4705,960	3600	16,000	240	
15	150	60	68	4,000	68,600	4705,960	3600	16,000	240	
Σ	90		64,6			42896,383	27000	144,823	1971,000	3910226,400

TABEL KOEFISIEN REGRESI PADA JARAK DISTRIBUSI 45 μm

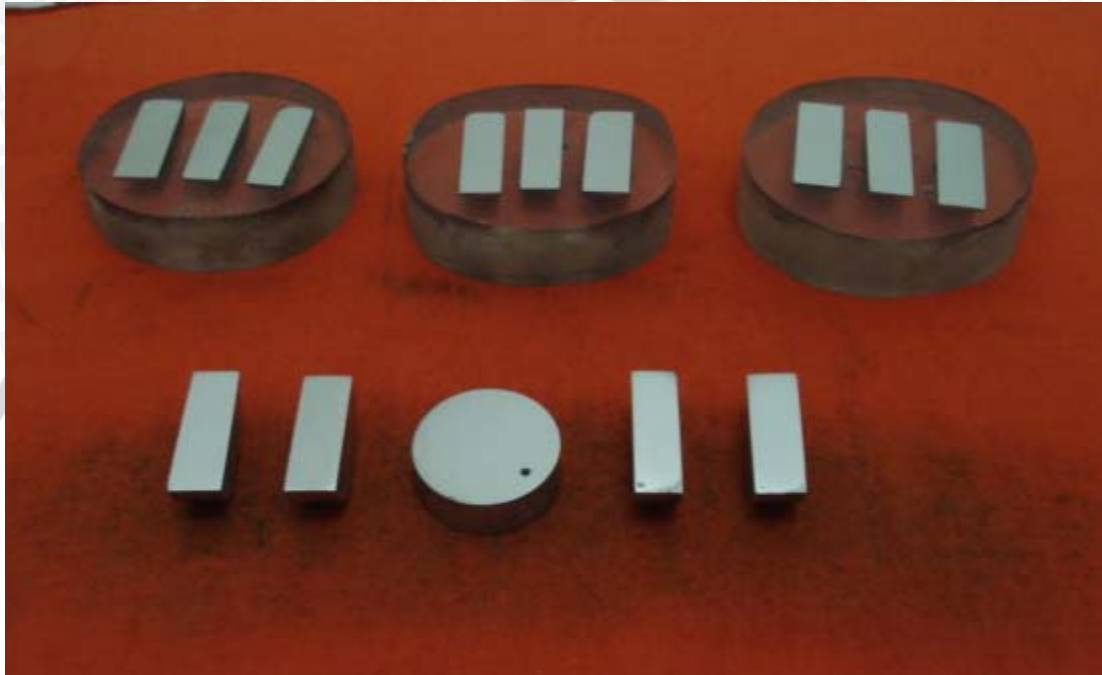
No	X	$X - X_{rata}$	Y	$Y_1 - Y_{rata}$	Y_1	$(Y_1 - Y_{rata})^2$	$(X - X_{rata})^2$	$(Y_1 - Y_{rata})^2$	$(X - X_{rata})(Y - Y_{rata})$	$(X - X_{rata})^2 \cdot (Y_1 - Y_{rata})^2$
1	30	-60	57	-2,259	56,741	105,247	3600	5,103	135,54	
2	30	-60	58	-2,259	56,741	3219,541	3600	5,103	135,54	
3	30	-60	56	-2,259	56,741	3219,541	3600	5,103	135,54	
4	60	-30	58	0,249	59,249	189,090	900	0,062	-7,47	
5	60	-30	57	0,249	59,249	3510,444	900	0,062	-7,47	
6	60	-30	59	0,249	59,249	3510,444	900	0,062	-7,47	
7	90	0	59	1,857	60,857	293,882	0	3,448	0	
8	90	0	60	1,857	60,857	3703,574	0	3,448	0	
9	90	0	58	1,857	60,857	3703,574	0	3,448	0	
10	120	30	60	2,565	61,565	549,199	900	6,579	76,95	
11	120	30	59	2,565	61,565	3790,249	900	6,579	76,95	
12	120	30	61	2,565	61,565	3790,249	900	6,579	76,95	
13	150	60	61	2,373	61,373	1064,521	3600	5,631	142,38	
14	150	60	62	2,373	61,373	3766,645	3600	5,631	142,38	
15	150	60	60	2,373	61,373	3766,645	3600	5,631	142,38	
Σ	90		59			38182,848	27000	62,472	1042,200	1686734,685

TABEL KOEFISIEN REGRESI PADA JARAK DISTRIBUSI 60 μm

No	X	$X - X_{rata}$	Y	$Y_1 - Y_{rata}$	Y_1	$(Y_1 - Y_{rata})^2$	$(X - X_{rata})^2$	$(Y_1 - Y_{rata})^2$	$(X - X_{rata})(Y - Y_{rata})$	$(X - X_{rata})^2 \cdot (Y_1 - Y_{rata})^2$
1	30	-60	56	-1,160	56,040	120,122	3600	1,346	69,6	
2	30	-60	57	-1,160	56,040	3140,482	3600	1,346	69,6	
3	30	-60	55	-1,160	56,040	3140,482	3600	1,346	69,6	
4	60	-30	57	-0,500	56,700	265,690	900	0,250	15	
5	60	-30	56	-0,500	56,700	3214,890	900	0,250	15	
6	60	-30	58	-0,500	56,700	3214,890	900	0,250	15	
7	90	0	57	-0,020	57,180	433,472	0	0,000	0	
8	90	0	58	-0,020	57,180	3269,552	0	0,000	0	
9	90	0	56	-0,020	57,180	3269,552	0	0,000	0	
10	120	30	58	0,280	57,480	757,350	900	0,078	8,4	
11	120	30	57	0,280	57,480	3303,950	900	0,078	8,4	
12	120	30	59	0,280	57,480	3303,950	900	0,078	8,4	
13	150	60	58	0,400	57,600	1324,960	3600	0,160	24	
14	150	60	59	0,400	57,600	3317,760	3600	0,160	24	
15	150	60	57	0,400	57,600	3317,760	3600	0,160	24	
Σ	90		57,2			35394,863	27000	5,503	351,000	148586,400

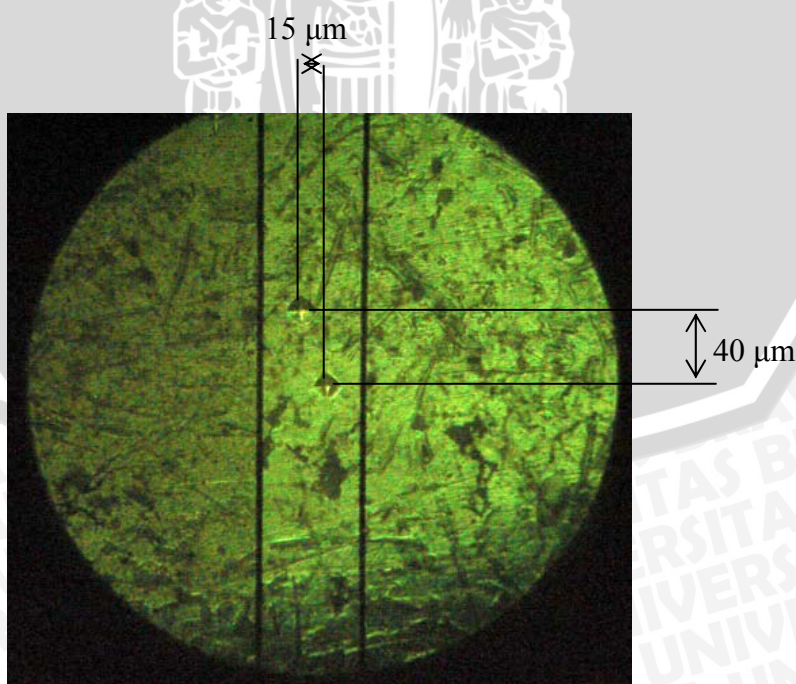
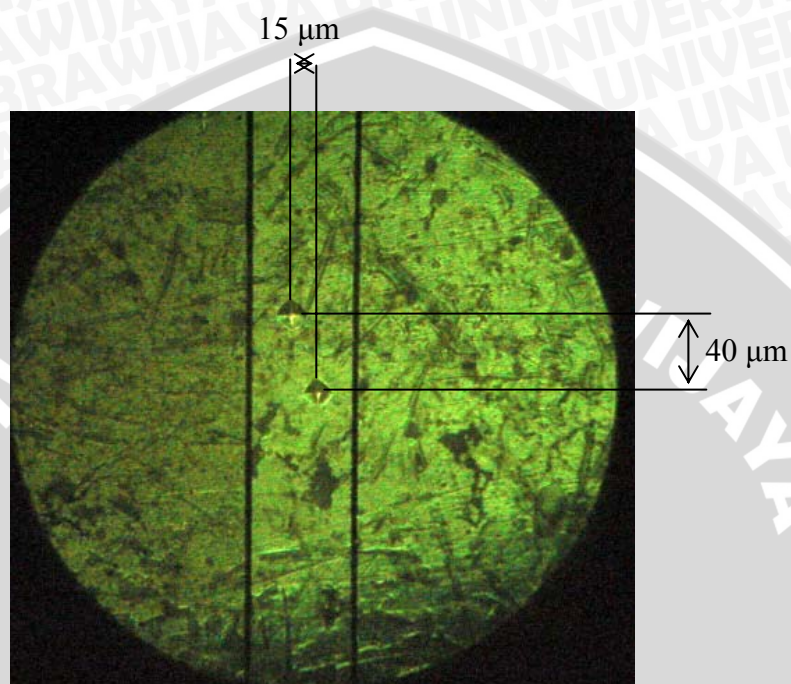
Lampiran 11

GAMBAR SPESIMEN UJI ALUMINIUM PADUAN



Lampiran 12

GAMBAR BEKAS PENJEJAKAN UJI KEKERASAN ALUMINIUM PADUAN



Keterangan : Pembesaran 400X pada alat uji kekerasan *Vickers*