

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

**SKRIPSI  
KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI**

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



Disusun Oleh :

**DIAN RIDLO PAMUJI  
NIM. 0410622006-62**

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
JURUSAN MESIN  
MALANG  
2007**

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

**SKRIPSI  
KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI**

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



Disusun Oleh :  
**DIAN RIDLO PAMUJI**  
NIM. 0410622006-62

**Telah diperiksa dan disetujui oleh :**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met.**  
NIP. 131 574 846

**Sugiarto, ST., MT.**  
NIP. 132 137 966

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

Disusun oleh :

**DIAN RIDLO PAMUJI**  
**NIM. 0410622006-62**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada  
Tanggal 14 Juni 2007

**DOSEN PENGUJI**

**Skripsi 1**

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

**Skripsi 2**

**Dr. Ir. Rudy Soenoko, M.Eng.Sc.**  
**NIP. 131 411 121**

**Komprehensif**

**Ir. Wardi Kasim, MT.**  
**NIP. 130 531 844**

Mengetahui  
Ketua Jurusan Teknik Mesin

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

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur kehadiran Allah SWT atas segala nikmat, berkat dan rahmat yang diberikan. Terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu penyelesaian skripsi ini diantaranya:

1. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST, MT, selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
2. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, M.Sc, selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
3. Bapak Djarot B. Darmadji, ST, MT, selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Teknik Produksi.
4. Bapak Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met, selaku dosen pembimbing dalam penyusunan skripsi ini yang telah memberikan bimbingan dan arahan.
5. Bapak Sugiarto, ST, MT, selaku dosen pembimbing dalam penyusunan skripsi ini yang telah memberikan bimbingan dan arahan
6. Kedua orang tua kami yang telah memberikan dorongan moral dan material
7. Rekan-rekan mahasiswa SAP 2004 dan semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini.

Penyusunan skripsi ini masih jauh dari sempurna, untuk itu saran dan kritik yang membangun sangat diperlukan demi kesempurnaan skripsi ini.

Malang, Juni 2007

Penyusun

## DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR LAMPIRAN	vi
RINGKASAN	vii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan Penelitian	2
1.5. Manfaat penelitian	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	<b>4</b>
2.1. Penelitian Sebelumnya	4
2.2. Pengerasan Kulit ( <i>Case Hardening</i> )	4
2.3. <i>Fluidized Bed</i>	9
2.4. Difusi	11
2.5. Aluminium	16
2.5.1. Pengaruh Unsur Paduan	17
2.5.2. Penggolongan Paduan Aluminium	18
2.5.3. Paduan Al-Cu	20
2.5.4. Diagram Fase Al-Cu	21
2.6. Mekanisme Penguatan	22
2.7. Keausan	24
2.7.1. Jenis Keausan	24
2.7.2. Metode Pengujian Keausan	28
2.8. Hipotesa	29
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	<b>30</b>
3.2. Metode Penelitian	30
3.2. Tempat Penelitian	30
3.3. Variabel Penelitian	30

3.4. Alat dan Bahan yang Digunakan	31
3.4.1. Alat Yang Digunakan	31
3.4.2. Bahan Yang Digunakan	32
3.5. Prosedur Penelitian	32
3.6. Metode Pengujian Keausan	33
3.7. Rancangan Penelitian	34
3.7.1. Rancangan Statistik	34
3.7.2. Analisa Regresi	37
3.8. Diagram Alir Penelitian	38
<b>BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN</b>	<b>39</b>
4.1. Data Hasil Pengujian	39
4.2. Pengolahan Data	40
4.2.1. Analisa Statistik	40
4.2.2. Analisa Varuan Satu Arah	41
4.2.3. Analisa Regresi	42
4.3. Pembahasan	44
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	<b>47</b>
5.1. Kesimpulan	47
5.2. Saran	47
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	
<b>LAMPIRAN</b>	



**DAFTAR TABEL**

No	Judul	Halaman
Tabel 2.1.	Konstanta dan Energi Aktivasi	13
Tabel 2.2.	Ukuran Atom Al dan N	16
Tabel 2.3.	Sifat-sifat Fisik Aluminium Murni	18
Tabel 2.4.	Sifat-sifat Mekanik Aluminium Murni	19
Tabel 2.5.	Klasifikasi Aluminium Paduan	20
Tabel 2.6.	Sifat Mekanik Al 2024	20
Tabel 3.1.	Rancangan Tabel Data Hasil Uji Keausan	34
Tabel 3.2.	Rancangan Analisa Varian Satu Arah	36
Tabel 4.1.	Data Hasil Uji Keausan	39
Tabel 4.2.	Interval Penduga Laju Keausan	40
Tabel 4.3.	Rancangan Analisa Varian Satu Arah	42
Tabel 4.4.	Analisa Regresi Laju Keausan Al-Cu	42
Tabel 4.5.	Nilai Laju Keausan	43

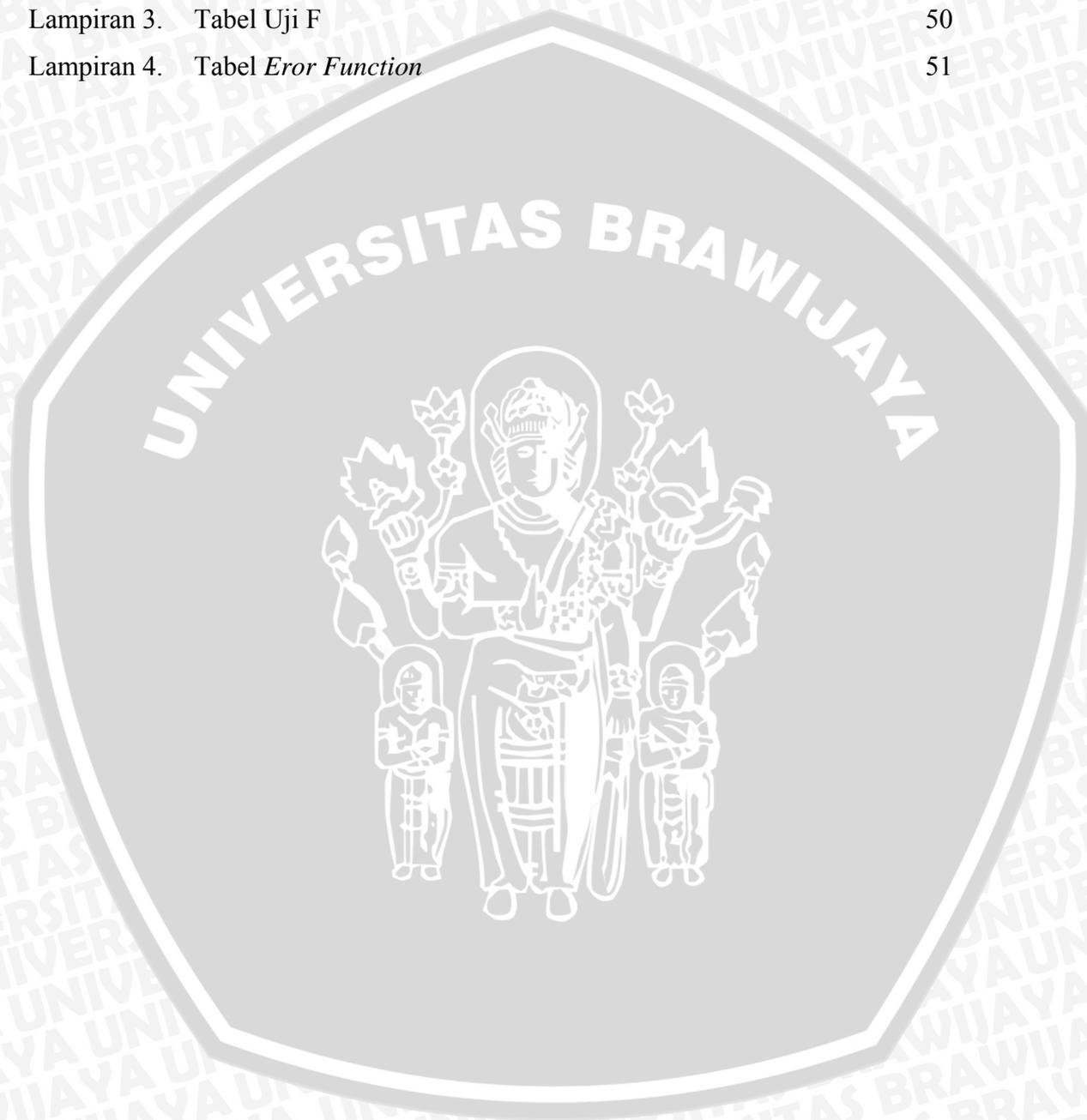


## DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 2.1.	Pengaruh Unsur Paduan Proses <i>Nitriding</i>	6
Gambar 2.2.	Perbandingan <i>Heat Transfer</i> pada <i>Fluidized Bed Furnace</i> dengan <i>Convensional Furnace</i>	10
Gambar 2.3.	Pembentukan Senyawa Dalam <i>Fluidized Bed</i> dan Dapur Konvensional	10
Gambar 2.4.	Konstruksi Dapur <i>Fluidized Bed</i>	11
Gambar 2.5.	Profil Konsentrasi Difusi <i>Non Steady State</i>	13
Gambar 2.6.	Mekanisme Difusi Substitusi	14
Gambar 2.7.	Mekanisme Difusi Intertisial	15
Gambar 2.8.	Difusi Atom Pada Batas Butir	15
Gambar 2.9.	Diagram Fase Al-Cu	21
Gambar 2.10.	Keausan <i>Adhesive</i>	24
Gambar 2.11.	Keausan <i>Abrasive</i>	25
Gambar 2.12.	Keausan <i>Fatigue</i>	26
Gambar 2.13.	Keausan <i>Fretting</i>	26
Gambar 2.14.	Keausan <i>Corrosive</i>	27
Gambar 2.15.	Keausan <i>Erosive</i>	27
Gambar 2.16.	Skema Uji Ketahanan Aus	28
Gambar 3.1.	<i>Fluidized Bed Furnace</i>	31
Gambar 3.2.	Mesin Uji Keausan	32
Gambar 3.3.	Bentuk dan Ukuran Spesimen	33
Gambar 4.1.	Grafik Hubungan Waktu Difusi dengan Laju Keausan	44
Gambar 4.2.	Foto Mikro Aluminium Paduan	46

## DAFTAR LAMPIRAN

No	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Hasil Pengujian Komposisi Kimia	48
Lampiran 2.	Komposisi Kimia Aluminium Paduan	49
Lampiran 3.	Tabel Uji F	50
Lampiran 4.	Tabel <i>Error Function</i>	51



## RINGKASAN

DIAN RIDLO PAMUJI, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, April 2007, *Pengaruh Waktu Difusi Proses Nitriding Dalam Fluidized Bed Furnace Terhadap Keausan Pada Aluminium Paduan*,

Dosen Pembimbing: Ir. Wahyono Suprpto, MT.,Met. dan Sugiarto, ST,MT.

Aluminium dipergunakan dalam bidang yang luas bukan saja untuk peralatan rumah tangga tetapi juga dipakai untuk pembuatan komponen pesawat terbang dan otomotif. Hal ini disebabkan aluminium mempunyai kelebihan-kelebihan dibandingkan dengan logam lainnya. Beberapa kelebihan tersebut antara lain: *strength to weight ratio* tinggi, *thermal conductivity to weight ratio* tinggi, mudah dibentuk, serta mempunyai ketahanan korosi yang baik. Dengan menambah unsur paduan dan perlakuan panas kimia dengan proses *nitriding* dalam dapur *fluidized bed* pada aluminium dapat meningkatkan sifat mekaniknya. Berdasarkan penelitian sebelumnya, *fluidized bed* mempunyai kelebihan dibandingkan dapur pemanas konvensional, yaitu waktu proses relatif singkat karena laju perpindahan panas tinggi.

Dalam penelitian ini metode yang digunakan adalah eksperimental ( *True Experimental Research* ) yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh waktu difusi pada proses *nitriding* terhadap keausan aluminium paduan di dalam dapur pemanas *fluidized bed*. Pada penelitian ini bahan yang digunakan adalah aluminium paduan seri 2024 dengan media difusi  $N_2$ , sedangkan variabel bebas pada penelitian ini adalah waktu difusi yaitu 30, 60, 90, 120, 150 menit dan variabel terikatnya adalah laju keausan.

Hasilnya adalah, dengan penambahan waktu difusi akan berpengaruh terhadap laju keausan permukaan pada aluminium paduan. Semakin lama waktu difusi menyebabkan laju keausan turun. Laju keausan tertinggi pada permukaan sebesar  $0,008883 \text{ mm}^3/\text{m}$  dengan waktu difusi 30 menit dan terendah sebesar  $0,00524 \text{ mm}^3/\text{m}$  dengan waktu difusi 150 menit.

**Kata Kunci** : Waktu difusi, *nitriding*, *fluidized bed*, keausan, aluminium paduan

## 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 kelebihan-kelebihan dibandingkan dengan logam lainnya. Beberapa kelebihan tersebut antara lain: *strength to weight ratio* tinggi, *thermal conductivity to weight ratio* tinggi, mudah dibentuk, serta mempunyai ketahanan korosi yang baik. Dengan menambah unsur paduan dan perlakuan panas pada aluminium dapat meningkatkan sifat mekaniknya. Aluminium dipergunakan dalam bidang yang luas bukan saja untuk peralatan rumah tangga tetapi juga dipakai untuk pembuatan komponen pesawat terbang dan otomotif. Kekerasan pada aluminium sangat mempengaruhi tingkat ketahanan aus yang terjadi.

Upaya yang sering dilakukan dalam mekanisme pengerasan logam adalah dengan melakukan perlakuan panas secara konvensional seperti perlakuan panas secara mekanik ataupun kimia. Namun pada metode tersebut masih ditemukan beberapa kekurangan misalnya biaya yang mahal karena waktu proses lama. Melihat permasalahan tersebut perlu dilakukan perbaikan metode perlakuan panas secara inovatif yaitu perlakuan panas dengan proses *nitriding* dalam *fluidized bed furnace*.

*Fluidized bed* adalah salah satu metode perlakuan panas dengan menggunakan media fluida dalam hal ini berupa pasir alumina yang bergerak dengan kecepatan tinggi karena adanya tekanan gas. Berdasarkan penelitian sebelumnya, *fluidized bed* mempunyai kelebihan dibandingkan dapur pemanas konvensional, yaitu waktu proses relatif singkat.

Proses *nitriding* adalah proses perlakuan panas logam secara *thermochemical* dengan menggunakan gas ammonia ( $\text{NH}_3$ ) atau nitrogen ( $\text{N}_2$ ) pada temperatur kerja antara  $(500 - 600)^\circ\text{C}$  yang bertujuan untuk memperbaiki sifat mekanik logam tersebut seperti kekerasan, ketahanan aus dan ketahanan korosi. Pada dasarnya semua baja dapat di *nitriding* tetapi hasil yang optimal dapat diperoleh bila baja membentuk unsur paduan yang membentuk nitrida (*Nitride Forming Element*) seperti aluminium, titanium, nikel, chrom dan molybdenum. Proses *nitriding* aluminium paduan seri 2011, 2024, 3003, 5083, 6060, 6061, 7075 diteliti oleh *J.M. Priest* pada tahun 2000 dengan menggunakan metode plasma pada temperatur  $400^\circ\text{C}$  selama 16 jam. Lapisan tertinggi yang terbentuk

0,05  $\mu\text{m}$  pada aluminium seri 6060 dan terendah 0,01  $\mu\text{m}$  pada aluminium paduan seri 2011.

Dalam perlakuan panas dengan menggunakan metode *nitriding* terdapat beberapa parameter yang berpengaruh terhadap kualitas permukaan logam, seperti temperatur proses, tekanan, waktu difusi dan sebagainya. Waktu difusi mempengaruhi besarnya difusivitas nitrida ke dalam logam. Semakin lama waktu difusi maka difusivitas juga semakin besar.

Berdasarkan uraian di atas maka perlu dilakukan penelitian untuk memperoleh informasi lebih lanjut seperti ketahanan aus yang diakibatkan adanya variasi waktu difusi pada proses *nitriding* dalam *fluidized bed*.

### 1.2. Rumusan Masalah

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

Bagaimanakah pengaruh waktu difusi proses *nitriding* dalam *fluidized bed* terhadap tingkat keausan aluminium paduan?

### 1.3. Batasan Masalah

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

- a. Bahan penelitian yang digunakan adalah aluminium paduan seri 2024.
- b. Media yang dialirkan ke dalam dapur *fluidized bed* adalah 100 %  $\text{N}_2$ .
- c. Temperatur proses adalah 500 °C.
- d. Tekanan proses 2,5 bar
- e. Beban pengujian keausan 8 Kg
- f. Waktu pengujian 10 menit

### 1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penulisan skripsi ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh waktu difusi proses *nitriding* dalam *fluidized bed* terhadap tingkat keausan aluminium paduan.
2. Meningkatkan sifat mekanik dari aluminium paduan khususnya ketahanan aus.

### 1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberi manfaat bagi pengembangan metode perlakuan panas inovatif khususnya proses *nitriding* dalam *fluidized bed* pada industri manufaktur logam.



## BAB II TINJAUAN PUSATAKA

### 2.1. Penelitian Sebelumnya

**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 400°C selama 16 jam. Lapisan tertinggi yang terbentuk 0,05 µm pada aluminium seri 6060 dan terendah 0,01 µm pada aluminium paduan seri 2011.

**Yudi Hermawan (2003)**, meneliti proses karburisasi pada baja karbon rendah pada temperatur 900°C dengan variasi waktu difusi 2, 4, 6, 8 dan 10 jam terhadap kekerasan dan ketahanan aus dengan menggunakan dapur pemanas *fluidized bed* dengan menggunakan LPG untuk menghasilkan atom karbon (C). Melalui penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu penahanan maka kekerasan akan semakin meningkat dan ketahanan aus akan semakin menurun. Untuk kekerasan tertinggi pada waktu difusi 10 jam yaitu sebesar 337 BHN dan terendah pada waktu difusi 2 jam yaitu sebesar 175 BHN. Laju keausan tertinggi pada waktu difusi 2 jam yaitu sebesar  $7,7 \times 10^{-3} \text{ Cm}^3/\text{m}$  dan laju keausan terendah pada waktu difusi 10 jam yaitu sebesar  $2,9 \times 10^{-3} \text{ Cm}^3/\text{m}$ .

**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 % m<sup>3</sup>/jam NH<sub>3</sub>, 20 % m<sup>3</sup>/jam N<sub>2</sub>, dan 16 % m<sup>3</sup>/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<sub>2-3</sub>N,C dengan *deep case depth* sudah tercapai.

### 2.2. Pengerasan Kulit (*Case Hardening*)

Pengerasan kulit atau *case hardening* merupakan proses laku panas yang bertujuan untuk memperoleh pengerasan hanya pada kedalaman tertentu atau kulitnya

saja. Dengan demikian lapisan kulit mempunyai kekerasan yang tinggi sedang bagian yang lebih dalam tetap seperti semula, dengan kekerasan rendah tetapi keuletannya tinggi.

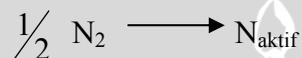
Dalam dunia industri seringkali diperlukan bahan yang keras dan tahan aus. Tetapi kekerasan yang diperoleh dengan proses pengerasan tembus (*through hardening*) akan mengakibatkan turunnya keuletan atau ketangguhannya, untuk itu agar didapatkan material dengan kekerasan yang tinggi tetapi masih tetap ulet atau tangguh perlu dilakukan *case hardening*.

Adapun macam-macam proses pengerasan kulit adalah sebagai berikut:

### 1. Nitriding

*Nitriding* merupakan proses laku panas pada logam secara *thermochemical* dimana atom nitrogen aktif akan berdifusi kedalam baja membentuk nitrida. Nitrida yang terbentuk ini sangat keras dan stabil. Nitrogen aktif ini bisa diperoleh dari gas ammonia dan bila dipanaskan pada temperatur *nitriding* antara (500-600) °C akan berdisosiasi menjadi nitrogen aktif dan gas hidrogen :

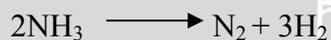
1. Gas nitriding Menggunakan gas nitrogen (Moraes, 2001)



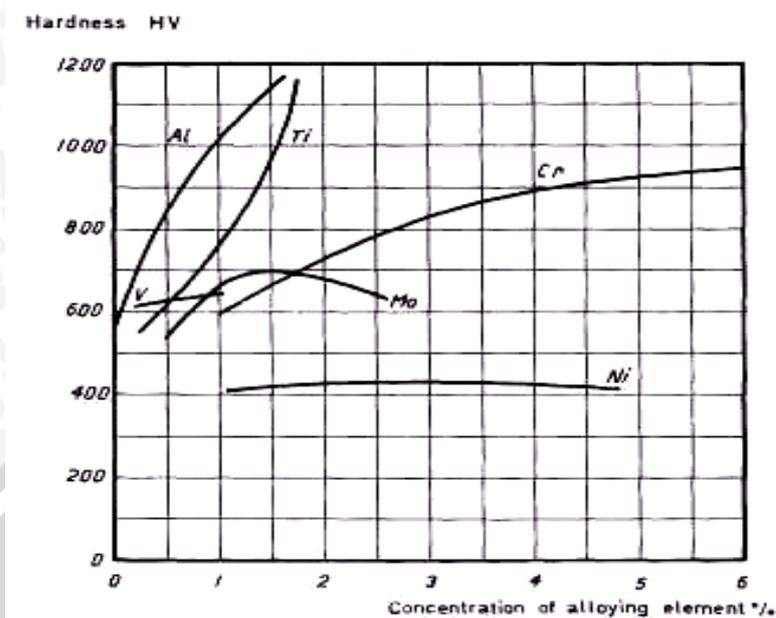
$\text{N}_{\text{aktif}}$  akan mengikat unsur paduan membentuk nitride:



2. Gas nitriding menggunakan gas ammonia (Zakharov, 1962) :



Pada dasarnya semua baja dapat di *nitriding* tetapi hasil yang optimal dapat diperoleh bila baja membentuk unsur paduan yang membentuk nitrida (*Nitride Forming Element*) seperti aluminium, titanium, nikel, chrom dan molybdenum. Pengaruh unsur paduan setelah *nitriding* dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Pengaruh Unsur Paduan Proses *Nitriding*  
 Sumber : Rainer Leppanen & Hakan Jonsson, 1999:5

Sedangkan macam-macam proses *nitriding*, yaitu:

a. *Gas Nitriding*

*Gas nitriding* dilakukan dengan pemanasan antara temperatur ( 500-600 )°C dalam dapur pemanas dengan atmosfer yang banyak mengandung atom nitrogen . Atom tersebut dapat diperoleh dari gas NH<sub>3</sub> ( ammonia ) yang mudah berdekomposisi pada temperatur *nitriding* sehingga atom nitrogen aktif akan berdifusi kedalam benda kerja.

b. *Pack nitriding*

*Pack nitriding* atau serbuk (solid) mempunyai kesamaan pada proses *pack carburising*. *Pack nitriding* dilakukan dengan memanaskan benda kerja didalam kotak tertutup rapat yang berisi *nitriding compound*. *Nitriding compound* ini biasanya sebagai sumber nitrogen aktif. Pemanasan proses *nitriding* dilakukan pada temperatur antara (520-570)°C dengan waktu pemanasan kurang dari 12 jam.

c. *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 ammonia atau campuran antara nitrogen dan hidrogen. Proses tersebut berlangsung pada tekanan gas (10-800) Pa dengan menggunakan tegangan listrik antara (300-800 ) V. Sehingga gas terionisasi dan

akan melakukan *bombardment* pada benda kerja. *Plasma nitriding* dilakukan pada temperatur 400-800°C (Rainer Leppanen & Hakan Jonsson, 1999:9).

## 2. *Carburising*

*Carburising* merupakan proses laku panas logam secara *thermochemical* dimana benda kerja dipanaskan pada temperatur yang cukup tinggi dalam lingkungan yang mengandung atom karbon aktif, sehingga atom karbon akan berdifusi kedalam baja dan mencapai kadar tertentu dan kedalaman tertentu. Tebal lapisan tergantung pada suhu dan waktu perlakuan panas. *Carburising* terdiri dari tiga macam yaitu:

### a. *Pack Carburising*

Proses laku panas logam dengan *pack carburising* dilakukan dengan memasukkan benda kerja ke dalam suatu kotak dan ditimbun dengan *carburising compound*, kotak ditutup rapat (kedap udara), kemudian dipanaskan pada suhu 900°-950°C selama beberapa jam. Selanjutnya benda kerja dikeluarkan dan didinginkan dengan media pendingin.

*Carburising compound* berupa serbuk terdiri dari arang kayu 70%-80%, barium atau natrium karbonat 25%-20% dan kalsium karbonat 2,5%-3,5%. Selama pemanasan udara yang terperangkap dalam kotak akan bereaksi dengan arang menjadi CO, dengan reaksi:



selanjutnya CO ini dapat berdisosiasi menjadi  $C_{at}$



$C_{at}$  merupakan atom karbon aktif yang dapat berdifusi kedalam benda kerja.

### b. *Gas Carburising*

Proses laku panas logam dengan *Gas Carburising* dilakukan dengan memanaskan baja dalam dapur dengan atmosfer yang banyak mengandung gas CO atau gas hidrokarbon yang mudah berdekomposisi pada temperatur *carburising*. Gas-gas tersebut pada temperatur *carburising* akan berdekomposisi menghasilkan atom karbon aktif ( $C_{at}$ ) yang nantinya berdifusi kedalam benda kerja.



Pada proses *gas carburising*, benda kerja lebih bersih dibandingkan pada proses *pack carburising*.

### c. *Liquid Carburising*

Pada *liquid carburising*, benda kerja dipanaskan dalam *salt bath* yang terdiri dari campuran sodium cyanide (NaCN) atau potassium cyanid (KCN), yang berfungsi sebagai *carburising agent* yang aktif dengan sodium carbonate (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) yang berfungsi sebagai *energizer*. Pada temperatur *carburising* cyanide akan bereaksi:



Dari reaksi diatas tampak bahwa di samping atom karbon, atom nitrogen juga ikut berdifusi masuk kedalam benda kerja. Nitrogen ini dalam benda kerja akan bereaksi membentuk nitrida yang juga keras. Banyaknya karbon dan nitrogen yang berdifusi tergantung pada temperatur pemanasan dan kandungan NaCN dalam *salth bath*.

### 3. Cyaniding dan Carbonitriding

*Cyaniding* merupakan modifikasi dari proses *liquid carburising*. Dilakukan dengan menggunakan *salth bath* seperti pada *liquid carburising*, tetapi dengan konsentrasi garam cyanide yang lebih rendah dan temperatur pemanasan yang lebih rendah. Reaksi yang terjadi pada *salth bath* sama dengan reaksi yang terjadi pada *liquid carburising*, hanya saja karena temperatur pemanasan yang dipakai lebih rendah, maka difusi nitrogen cukup banyak.

*Cyaniding* yang sering dilakukan adalah dengan menggunakan *salth bath* dengan kandungan cyanide sekitar 30% pada temperatur 800° – 850°C, waktu difusi bisa sampai 1,5 jam. Pada kulit akan diperoleh kandungan nitrogen sampai 0,5%, dengan kadar karbon 0,5 – 0,8%. Walaupun kadar karbonnya lebih rendah, tetapi kekerasan yang tinggi dapat tercapai setelah *diquencing*. Dengan *salth bath* mengandung 25 – 45% NaCN pada pemanasan 500-600°C dan waktu difusi selama 5 – 30 menit akan diperoleh kulit yang sangat tipis 0,02 – 0,04 mm. Kulit ini memiliki kekerasan tinggi dan tahan aus.

Pada *cyaniding* komposisi *salth bath* dan temperatur pemanasan sangat berpengaruh terhadap tebal dan komposisi kimia dari kulit. Dengan temperatur pemanasan makin tinggi dan kandungan NaCN dalam *salth bath* yang makin rendah akan menghasilkan tebal kulit yang makin besar dan kadar karbon pada kulit akan semakin tinggi (kadar nitrogen makin rendah). Untuk proses yang menghasilkan kadar karbon yang cukup tinggi (>0,4 %) perlu dilakukan *quenching* dan *tempering*.

*Carbonitriding* merupakan modifikasi dari *gas carburising*. *Carbonitriding* Menggunakan gas seperti pada *gas carburising* (terdiri dari karbon monoksida dan gas

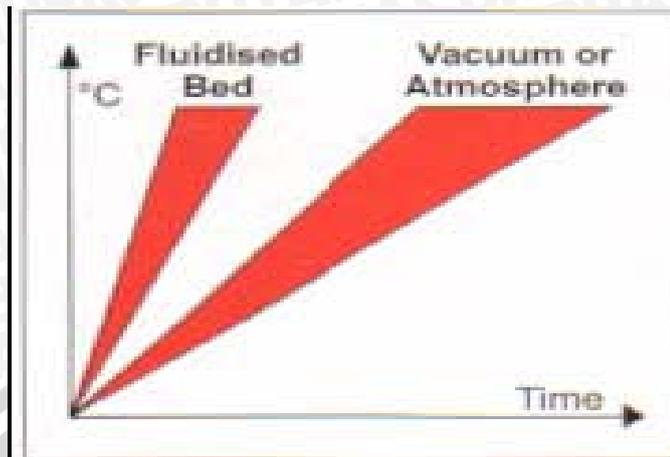
hidrokarbon) yang diperkaya dengan gas ammonia. Dengan demikian, yang berdifusi ke dalam benda kerja adalah karbon dan nitrogen. Proses berlangsung pada temperatur yang lebih rendah.

### 2.3. Fluidized Bed

*Fluidized bed* adalah salah satu metode perlakuan panas dengan menggunakan media fluida dalam hal ini berupa pasir alumina. Pasir alumina yang digunakan memiliki dua macam ukuran butiran. Untuk pasir alumina yang lebih besar ukuran butirannya diletakkan di bagian bawah, sedangkan yang berukuran lebih kecil di bagian atas. 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. Di dalam dapur terdapat ruang yang yang disebut bed, sebagai wadah bahan refraktori. Gas nitrogen akan melewati serbuk partikel yang sudah panas sehingga partikel-partikel tersebut akan kehilangan kontak satu sama lainnya.

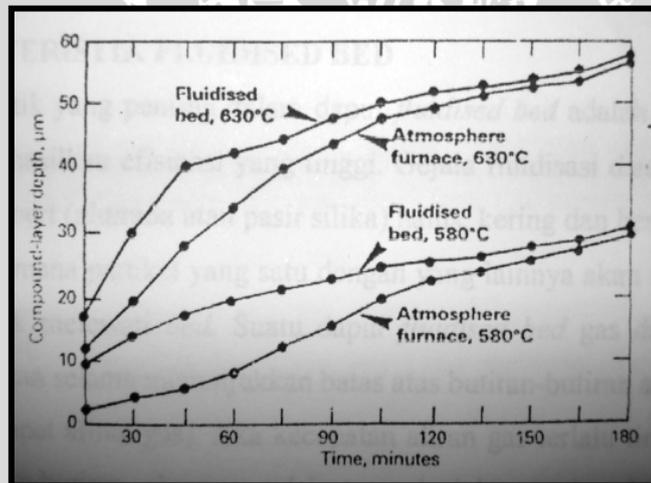
Dapur pemanas *fluidized bed* bekerja pada temperatur yang rendah, hal ini sangat cocok jika digunakan pada proses *surface treatment* seperti *carburising*, *nitriding* dan *cyaniding*. Selain itu efisiensi perpindahan panas sangat baik bila dibandingkan dengan dapur pemanas konvensional. Hal tersebut dipengaruhi oleh kecepatan alir gas, jika kecepatan alir gas semakin tinggi maka koefisien perpindahan panas akan mengalami peningkatan sehingga laju perpindahan panas semakin cepat. Perbandingan antara *heat transfer* yang menggunakan *convensional furnace* dengan *fluidized bed furnace* dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. Perbandingan *Heat Transfer* pada *Fluidized Bed Furnace* dengan *Conventional Furnace*

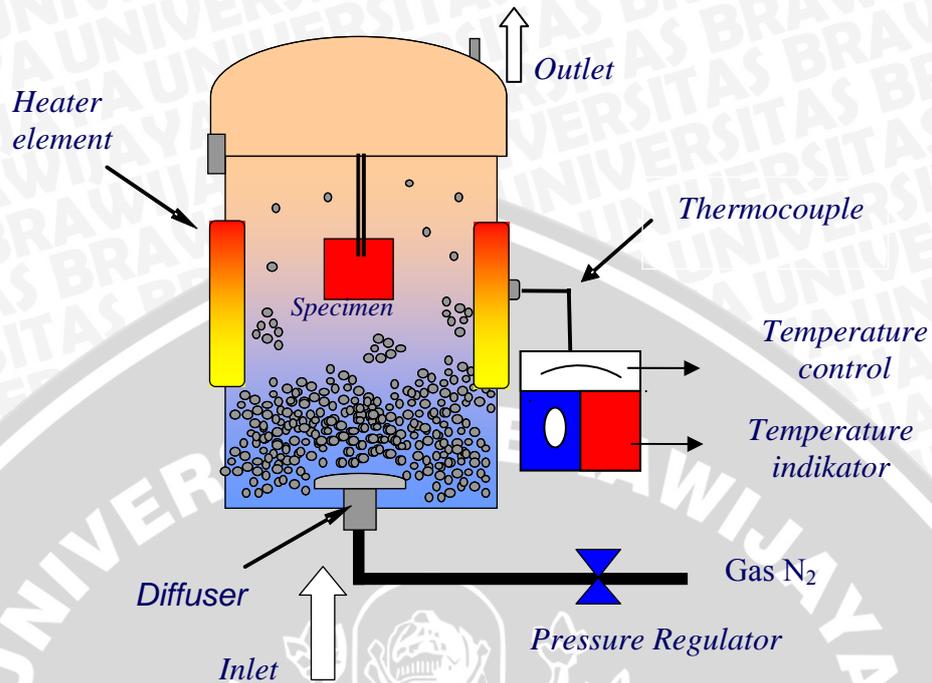
Sumber : [www.getottenassociates.com](http://www.getottenassociates.com)

Pada gambar 2.3 dapat dilihat bahwa waktu perlakuan dapat dikurangi pada pembentukan lapisan senyawa yang sama misalnya dengan penghematan waktu 33 % untuk pembentukan lapisan 40  $\mu\text{m}$  pada 630  $^{\circ}\text{C}$  dan dengan penghematan waktu 35 % untuk menghasilkan lapisan 20  $\mu\text{m}$  pada 580  $^{\circ}\text{C}$ .



Gambar 2.3. Pembentukan Senyawa dalam *Fluidized bed* dan Dapur Konvensional  
 Sumber : Reynoldson, 1989 : 40

*Fluidized Bed* terdiri atas dapur serta sistem kontrolnya. Dapur dipanaskan oleh elemen pemanas dan gas nitrogen dialirkan ke dapur untuk melindungi terjadinya oksidasi di dalam *fluidized bed*. Konstruksi dapur *fluidized bed* dapat ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. Konstruksi Dapur *Fluidized Bed*.  
Sumber : Laboratorium  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ .

Selama proses *nitriding* berlangsung, didalam dapur *fluidized bed* terjadi proses difusi atom nitrogen kedalam benda kerja. Atom nitrogen ini akan membentuk nitrida yang sifatnya keras dan stabil sehingga mempengaruhi ketahanan aus pada permukaan benda kerja.

#### 2.4. Difusi

Difusi merupakan proses berpindahnya suatu atom baik berupa gas, cair maupun padat dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi yang lebih rendah pada periode waktu tertentu. Konsep dasar dari difusi dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Adanya migrasi atom-atom dalam material pada kondisi gas, cair dan padat.
- Adanya gradient konsentrasi
- Terjadi secara substitusi atau interstisi

Sesuai dengan hukum difusi Fick's pada kondisi *steady-state* dimana tidak adanya perubahan konsentrasi selama periode waktu tertentu maka fluks atau aliran atom merupakan perkalian antara koefisien difusi dengan konsentrasi gradient, sesuai dengan persamaan :

$$J = D \frac{dC}{dx} \quad (2-1)$$

Dimana :

$J$  = Fluks atau aliran atom ( atom / m<sup>2</sup> . s )

$D$  = Difusitas atau koefisien difusi (m<sup>2</sup>/s )

$dC/dx$  = gradient konsentrasi ( atoms / m<sup>3</sup> . 1/m )

Jumlah atom yang berdifusi dalam satuan waktu melalui satu satuan luas penampang sepanjang satu satuan gradient konsentrasi disebut difusitas atau koefisien difusi. Sedangkan koefisien difusi bisa dihitung menggunakan persamaan *Arrhenius* :

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

Dimana :  $D$  = koefisien difusi (m<sup>2</sup>/s)

$D_0$  = Koefisien difusi pada keadaan standar (m<sup>2</sup>/s)

$Q$  = Energi aktivasi: energi yang digunakan untuk memindahkan atom keposisi yang baru dalam kisi kristal (J/mol)

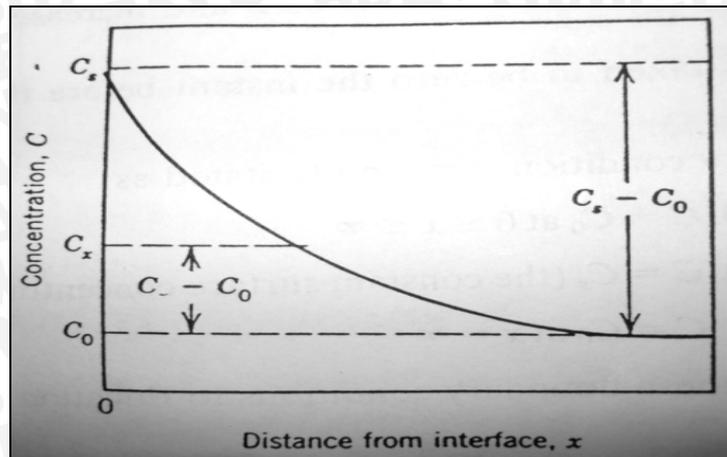
$R$  = Konstanta gas (8,314 J/(mol.°K) atau 1,987 kal/(mol°K))

$T$  = Temperatur absolut (°K)

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 tertentu, dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. 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 permukaan yang diperoleh 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  $z$

dapat dilihat pada lampiran

Jarak rata-rata difusi merupakan fungsi akar kuadratis terhadap waktu dengan persamaan

$$x = \sqrt{Dt} \quad (2-5)$$

Dimana:

$x$  : jarak difusi (mm)

$D$  : koefisien difusi ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$t$  : waktu proses difusi (s)

Koefisien difusi ( $D_0$ ) dan energi aktivasi ( $Q$ ) dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. Konstanta dan Energi aktivasi unsur nitrogen dan karbon

Elemen yang berdifusi	$D_0$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$Q$ (Kj/mol)
-----------------------	----------------------------------	--------------

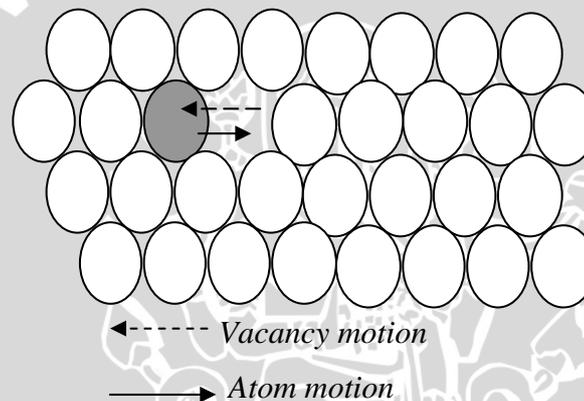
Carbon in FCC Fe	$2 \cdot 10^{-1}$	142
Nitrogen in Fe	$3 \times 10^{-3}$	76

Sumber : J.C. Anderson, 1990 : 131

Ada 2 macam mekanisme difusi atom ke dalam kisi-kisi kristal, yaitu :

### 1. Mekanisme larutan substitusi

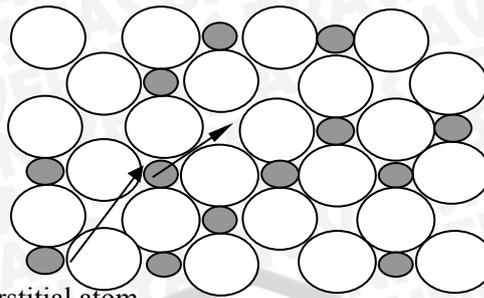
Berpindahnya atom pada kisi kristal dari posisi atom yang satu ke posisi atom yang lainnya dan kondisi tersebut dipengaruhi oleh peluang kosongnya kedudukan tersebut ( yang pada gilirannya sebanding dengan fraksi kekosongan dalam kristal ) dan besarnya energi aktivasi yang dibutuhkan untuk pindah posisi atom. Mekanisme difusi substitusi dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6. Difusi Substitusional  
Sumber : James P Schaffer, 1999 : 129

### 2. Difusi Interstitial

Pengangkutan atom melalui kisi berlangsung dengan berbagai cara, istilah “ difusi interstitial “ menggambarkan keadaan ketika atom tidak lagi bergerak disekitar kisi kristal namun menempati posisi intersisi . Pada mekanisme interstitial ukuran atom yang akan bersifusi harus lebih kecil daripada matrik atomnya, seperti difusi atom hidrogen, oksigen, karbon dan nitrogen ke dalam besi . Mekanisme difusi Interstitial dapat dilihat pada gambar 2.7.



Interstitial atom  
diffusing into  
Interstitial vacancy

Gambar 2.7. Difusi Intertisial  
Sumber : William F Smith, 1979 : 157

Faktor-faktor yang mempengaruhi difusivitas antara lain :

1. Tipe dari mekanisme difusi.

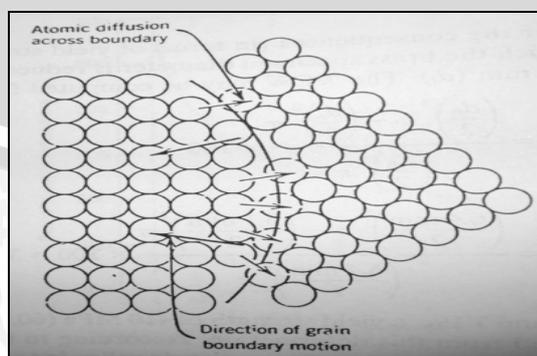
Proses difusi secara intersisi atau substitusi memberikan efek terhadap koefisien difusi. Untuk difusi interstisi atom yang kecil dapat bergabung ke dalam kisi kristal pada atom pelarut yang lebih besar, seperti nitrogen berdifusi intersisi pada struktur kristal BCC atau FCC. Sedangkan contoh proses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

Struktur kristal BCC mempunyai faktor tumpukan 0,68 yang lebih rendah dibandingkan FCC yaitu 0,74. Sehingga ruang antar atom pada BCC lebih lebar daripada FCC sehingga atom karbon mudah berdifusi pada struktur BCC daripada FCC.

3. Adanya cacat kristal

Difusi berjalan lebih cepat melalui batas butir karena merupakan merupakan daerah dengan cacat kristal, dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. Difusi atom pada batas butir  
Sumber : Callister, 1997 : 172.



#### 4. 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 2.2 memperlihatkan ukuran atom N dibandingkan dengan ukuran atom Al.

Tabel 2.2. Ukuran atom Al dan N

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. Pengaruh penambahan nitrogen pada permukaan adalah untuk menaikkan kekerasan dan ketahanan aus.

#### 2.5. Aluminium

Aluminium dan paduannya merupakan logam ringan yang mempunyai kekuatan tinggi, tahan terhadap karat dan merupakan konduktor listrik yang cukup baik. Aluminium dan paduannya dipergunakan dalam bidang yang luas bukan saja untuk peralatan rumah tangga tapi juga dipakai untuk keperluan material pesawat terbang, mobil dan sebagainya.

Dalam keadaan murni Aluminium sangat lemah dan lunak, terutama kekakuannya sangat rendah untuk dapat digunakan pada berbagai keperluan teknik. Penambahan unsur lain seperti Cu, Mg, Si, Mn, Zn dapat meningkatkan kekuatan mekaniknya.

### 2.5.1. Pengaruh Unsur Paduan

Pengaruh unsur paduan yang disebabkan oleh penambahan unsur paduan dapat dijelaskan sebagai berikut:

- ◆ Tembaga

Pengaruh tembaga dalam paduan aluminium adalah dapat meningkatkan kekuatan aluminium pada temperatur tinggi. Paduan aluminium yang mengandung tembaga merupakan paduan yang memiliki sifat mampu mesin yang baik.

- ◆ Silikon

Pengaruh yang nampak dalam penambahan silikon adalah dapat memperbaiki sifat mampu cornya. Selain itu paduan silikon akan meningkatkan ketahanan korosinya, baik adanya penambahan unsur lainnya atau tidak. Pengaruh buruk akibat penambahan silikon adalah dapat menurunkan kemampuan mesinnya.

- ◆ Magnesium

Magnesium digunakan untuk meningkatkan daya tahan karatnya. Bila dipadukan dengan silikon juga, maka daya tahan karatnya semakin besar. Magnesium tidak menyebabkan berkurangnya sifat ductile logam. Selain itu, magnesium mampu meningkatkan sifat mampu mesin dan mampu bentuknya.

- ◆ Mangan

Mangan mampu meningkatkan daya tahan karat aluminium, serta bila ditambahkan magnesium juga akan dapat memperbaiki kekuatan aluminium tersebut.

- ◆ Nikel

Pemaduan aluminium dengan nikel akan meningkatkan sistem pengerasan pengendapan Ni dengan Mn secara bersama-sama akan sangat efektif dalam memperbaiki keuletan aluminium.

- ◆ Zinc

Zn akan menambah kekuatan aluminium. Kekuatan paduan aluminium yang maksimum adalah 5-6 % dengan sejumlah Mg dan Cu yang lebih sedikit.

- ◆ Chromium

Sejumlah kecil Cr ditambahkan terhadap aluminium akan memperbaiki ketahanan korosi, sifat mampu las, tahan panas dan oksidasi. Namun demikian

jumlah Cr terhadap aluminium yang berlebihan akan menurunkan mampu bentuknya.

◆ Lead dan Bismuth

Lead dan Bismuth yang ditambahkan pada aluminium akan memperbaiki kemampuan mesinnya.

**2.5.2. Penggolongan Paduan Aluminium**

Sistem pengklasifikasian aluminium pada umumnya didasarkan pada standar Association of Aluminium (AA). Aluminium dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu : aluminium murni dan aluminium paduan, dimana aluminium murni memiliki kandungan lebih dari 99 % Al dan aluminium paduan memiliki kandungan aluminium maksimal sebesar 99 %.

a. Aluminium murni

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 2.3 dan 2.4.

Tabel 2.3. Sifat-sifat fisik aluminium murni.

Sifa-sifat	Kemurnian Al (%)	
	99,996	>99,0
Masa jenis ( 20°)	2,6989	2,71
Titik cair (°C)	660,2	653-657
Panas jenis ( cal/g°C)(10°C)	0,2226	0,2297
Hantaran listrik	64,94	59 (dianil)
Tahanan listrik koefisien temperatur ( /°C)	0,00429	0,0115
Koefisien pemurnian (20-100°C)	23,86x10 <sup>-6</sup>	23,5x10 <sup>-6</sup>
Jenis kristal, konstanta kisi	FCC, a=4,013 Å	FCC, a=4,04 Å

Keterangan : FCC: face center cubic = kubus berpusat muka

Sumber : Tata Surdia, 1994 : 134.

Tabel 2.4. Sifat-sifat mekanik aluminium murni.

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

Sumber : Tata Surdia, 1994 : 134.

#### b. 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.

Dari aluminium paduan yang tersedia, ada yang dapat diperlakukan panas dan tidak dapat diperlakukan panas. Aluminium tempa 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. Klasifikasi paduan aluminium dapat dilihat pada tabel 2.5.

Tabel 2.5. Klasifikasi Aluminium Paduan

Standar AA	keterangan	keterangan
1001	Al murni 99,5% atau di atasnya	
1100	Al murni 99,0% atau di atasnya	<i>Non-heat treatable</i>
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 <sub>2</sub> Si merupakan unsur paduan utama	<i>Heat treatable</i>
7070-7079	Zn merupakan unsur paduan utama	<i>Heat treatable</i>

Sumber : Tata Surdia, 1994 : 135.

### 2.5.3. Paduan Al-Cu (Seri 2xxx)

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). Aplikasi dari aluminium 2024 adalah untuk struktur pesawat terbang, sekrup, paku keling, rangka mobil. Paduan ini terkenal pada saat perang dunia I karena digunakan pada dunia kedirgantaraan. Sifat mekanik aluminium seri 2024 dapat dilihat pada tabel 2.6.

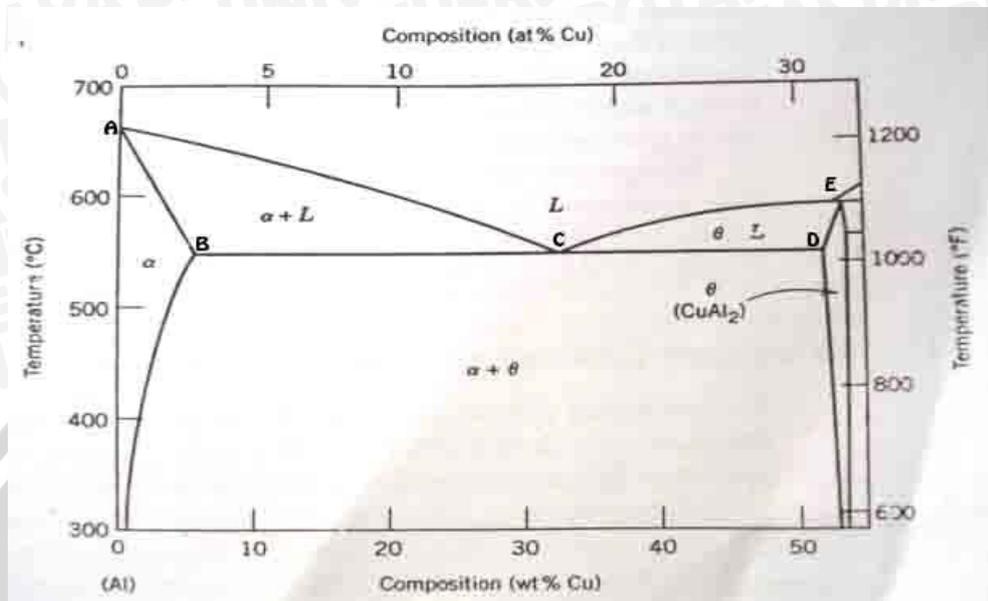
Tabel 2.6. Sifat Mekanik Al 2024

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

Sumber : Tata Surdia, 1999 : 137.

#### 2.5.4. Diagram Fasa Al-Cu

Diagram fasa dari dua komponen ditunjukkan oleh dua variabel yaitu prosentase unsur dan temperatur. Gambar 2.9 menunjukkan diagram fasa paduan Al-Cu.



Gambar 2.9. Diagram fasa Al-Cu

Sumber : Callister, 1997:337

Garis A-C-E adalah garis cair sehingga jika paduan tersebut dipanaskan melewati garis tersebut maka paduan akan mencair seluruhnya. 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- D-E adalah garis padat sehingga paduan akan berubah fasanya menjadi fasa padat pada penurunan temperatur yang memotong garis ini. Pada paduan Al-4,5%Cu akan mulai membeku membentuk larutan padat  $\alpha$ , Jika temperturnya diturunkan melewati garis AC. Dengan menurunnya temperatur maka akan semakin banyak unsur Cu yang larut dalam Al dan membentuk larutan padat  $\alpha$ , sehingga ketika melewati garis AB semua unsur Cu akan larut dalam Al membentuk larutan padat dengan fasa tunggal  $\alpha$ . Ketika temperatur semakin diturunkan melewati garis OB yang merupakan batas kejenuhan dari larutan padat  $\alpha$ , atom-atom Cu yang larut dalam matriks Al mulai berpresipitasi membentuk senyawa  $\alpha$ +CuAl<sub>2</sub>. Dengan diturunkan temperatur pada suhu ruang maka CuAl<sub>2</sub> yang terbentuk semakin besar dan larutan padat  $\alpha$  semakin berkurang.

## 2.6. 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 disini yaitu mekanisme yang berupa penghambat gerakan dislokasi. Hal ini berarti bahwa kekuatan berbanding terbalik dengan mobilitas dislokasi.

Adapun macam-macam penguatan bahan, yaitu:

### 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. Ukuran butir mempunyai hubungan dengan tegangan mulur (Tata Surdia, 1995: 45).

$$\sigma_y = \sigma_{0y} + \frac{K}{\sqrt{d}} \quad (2-6)$$

dimana:

$\sigma_y$  = tegangan mulur

$\sigma_{0y}$  = konstanta bahan yang tidak tergantung pada ukuran butir

K = konstanta bahan yang tidak tergantung pada ukuran butir

d = diameter butir

Dari rumus diatas menunjukkan bahwa sifat fisik dan mekanik material dapat diubah dengan variasi ukuran butir. Material dengan ukuran butir yang halus mempunyai kekutan tarik dan keuletan yang tinggi dibandingkan dengan material yang mempunyai ukuran butir yang besar atau kasar.

### 2. Penguatan 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 intersisi (*interstitial solid solution*).

### 3. Penguatan Serat

Pada mekanisme ini dilakukan dengan cara mencampurkan serat halus dalam matrik ulet untuk mendapatkan bahan yang mempunyai kekuatan tinggi dan teristimewa 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.

### 4. Penguatan Presipitasi dan Dispersi

Partikel yang keras dicampur dengan serbuk matrik, dipadatkan dan diproses secara metalurgi serbuk disebut penguatan dispersi. Secara teori ada kemungkinan menghasilkan sistem penguatan dispersi dalam jumlah yang tak terbatas dengan mencampurkan serbuk metal serta partikel fasa-kedua yang halus (oksida, karbida, nitrida dan sebagainya) dan menggabungkan lewat metalurgi serbuk. Sedangkan penguatan presipitasi atau penguatan sepuh dilakukan dengan cara perlakuan pelarutan dan pencelupan suatu paduan. Fasa kedua membentuk larutan padat pada suhu tinggi namun berpresipitasi pada pencelupan dan dibiarkan pada suhu rendah.

### 5. Struktur yang Diperkuat

Besi dan baja sering diberi perlakuan panas agar memiliki struktur mikro yang kuat. Baja kekuatan tinggi dapat diperoleh dengan mengubah fasa austenit yang mengandung karbon dalam bentuk larutan pada temperatur tinggi, menjadi fasa martensit dengan pencelupan dingin pada temperatur rendah. Martensit adalah larutan padat karbon yang dipaksakan, mempunyai bentuk kisi tetragonal. Kekuatan tinggi pada martensit diakibatkan karena dalam struktur ini terdapat banyak penghalang kuat terhadap pergerakan dislokasi.

### 6. Pengerasan Regangan

Salah satu karakteristik deformasi plastik adalah tegangan geser yang diperlukan untuk menghasilkan slip bertambah besar dengan meningkatnya regangan geser. Bertambah besarnya tegangan yang diperlukan untuk slip yang disebabkan oleh deformasi plastik dikenal dengan pengerasan regangan atau pengerasan kerja. Pengerasan regang disebabkan oleh adanya penghalang yang menghalangi gerakan dislokasi dalam kisi kristal.

## 2.7. Keausan

Keausan merupakan proses hilangnya bagian dari material satu atau dua permukaan material padat yang mengalami kontak akibat gesekan relatif yang berupa gesekan (*sliding*) ataupun gelinding (*rolling*). Hilangnya bagian material tersebut biasanya berlangsung sangat lambat tetapi bekerja secara terus menerus dan *steady* (Bhushan, 2.2).

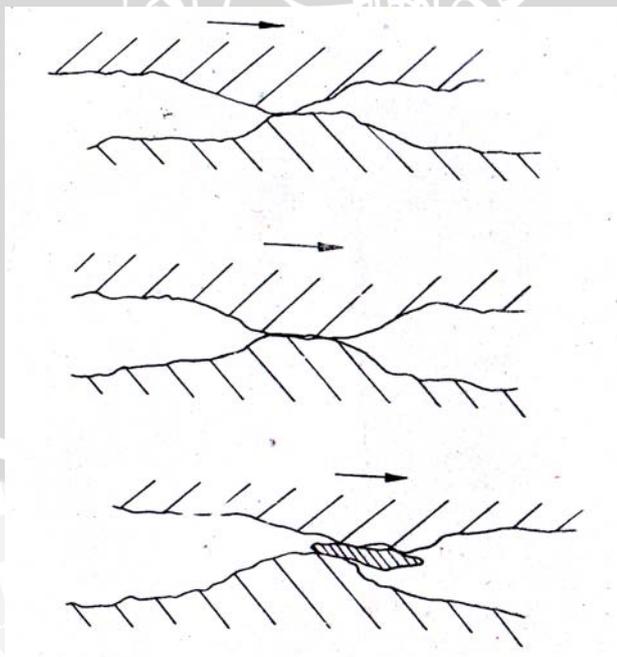
Oleh karena itu keausan merupakan faktor penting yang dapat memperburuk proses permesinan pada bagian yang bergerak. Jika hal tersebut dibiarkan maka akan berpengaruh terhadap umur (*life time*) dan kinerja suatu komponen.

### 2.7.1. Jenis keausan

Jenis-jenis keausan dibedakan menjadi:

#### 1. Keausan *Adhesive*

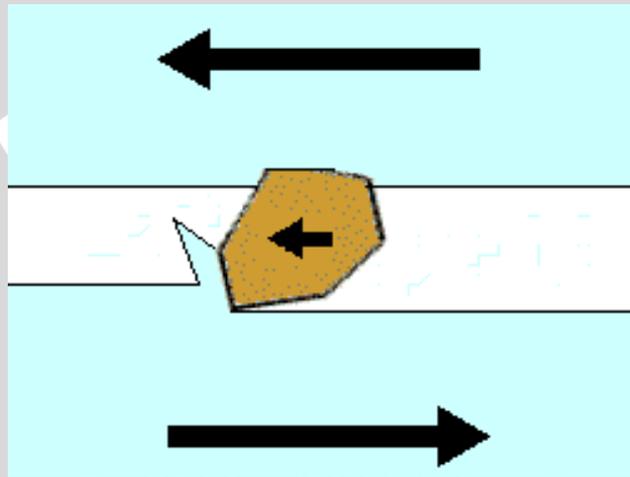
Keausan *adhesive* sering juga disebut sebagai *galling* atau *scuffing*, terjadi jika kontak antar kedua permukaan (*surface*) diberi gaya bersama dan bergerak relatif satu dengan yang lainnya. Laju keausan tersebut dipengaruhi oleh beban yang bekerja dan tingkat kekerasan material (Archad,1980). Semakin besar beban yang diberikan dan gesekan (*friction*) antar permukaan berlangsung terus menerus maka akan menurunkan ketahanan aus. Mekanisme Keausan *adhesive* dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10. Keausan *Adhesive*  
Sumber : Bhushan, 1991 : 2.17

## 2. Keausan *Abrasive*

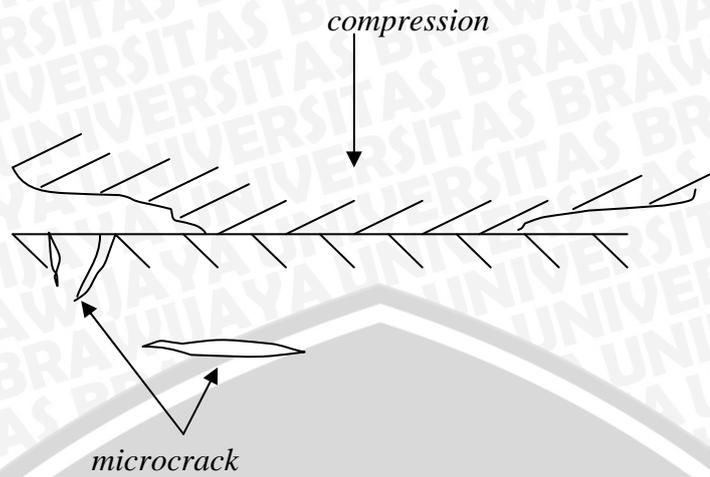
Keausan *abrasive* disebabkan oleh partikel yang terjebak antara dua permukaan yang bergerak. Adanya partikel tersebut bisa bersendiri-sendiri atau bersamaan dengan gas, cairan atau pelumas. Keausan yang disebabkan oleh *abrasive* adalah yang paling berbahaya diantara mekanisme keausan yang ada. Pada keausan *abrasive* partikel bisa dianggap sebagai alat potong dimana kekerasan, ukuran dan bentuk partikel akan mempengaruhi laju keausan. Mekanisme Keausan *abrasive* dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.11. Keausan *Abrasive*  
Sumber : [www. Gordonengland. Co.uk](http://www.Gordonengland.Co.uk).

## 3. Keausan *Fatigue*

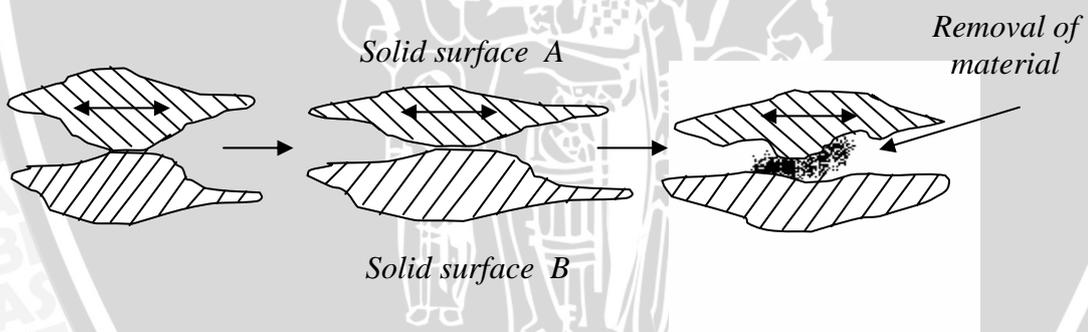
Keausan terjadi karena pembebanan yang berulang-ulang pada permukaan logam sehingga menimbulkan *microcrack* pada permukaan material yang lebih lunak. Untuk mengatasi hal tersebut biasanya dipilih material yang lebih keras dengan keuletan yang tinggi. Mekanisme Keausan *fatigue* dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12. Keausan *Fatigue*  
 Sumber : Bhushan, 1991 : 2.19

#### 4. Keausan *Fretting*

Keausan ini terjadi karena pasangan material yang disebabkan karena adanya getaran dan bukan karena gerakan relatif dari material. Keausan fretting biasanya terjadi pada dua sambungan material yang mengalami vibrasi, seperti pada sambungan keling. Mekanisme Keausan *fretting* dapat dilihat pada gambar 2.13.



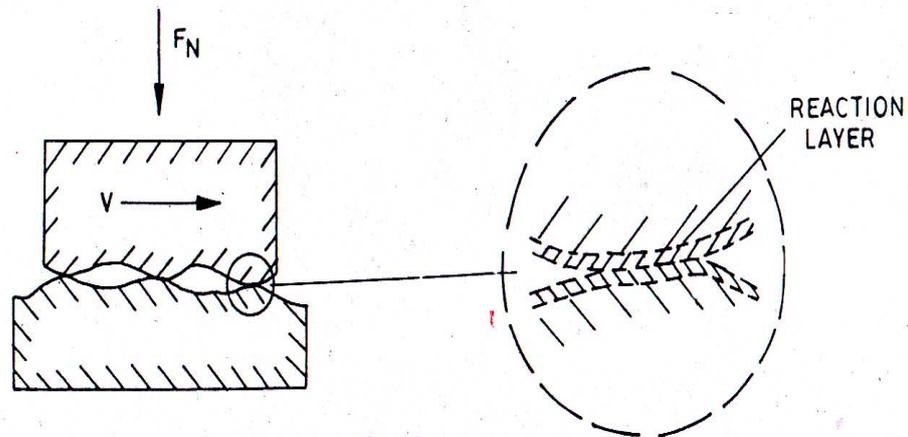
Gambar 2.13. Keausan *Fretting*  
 Sumber : Bhushan, 1991 : 2.21

#### 5. Keausan *Corrosive*

Keausan *corrosive* ini disebabkan karena adanya pengaruh lingkungan dengan pasangan permukaan material. Ada dua tahap terjadinya keausan jenis ini, yaitu:

- Tahap pertama, yaitu kontak permukaan material dengan lingkungannya akan menghasilkan pembentukan keausan pada permukaan.
- Tahap kedua, yaitu terjadinya keausan akibat dari reaksi akan menghasilkan retak (*crack*) pada permukaan material

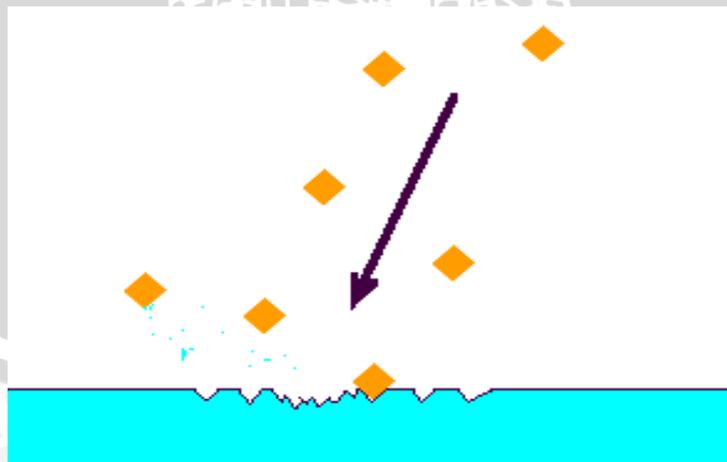
Mekanisme Keausan *corrosive* dapat dilihat pada gambar 2.14.



Gambar 2.14. Keausan *Corrosive*  
Sumber : Bhushan, 1991 : 2.20

## 6. Keausan *Erosive*

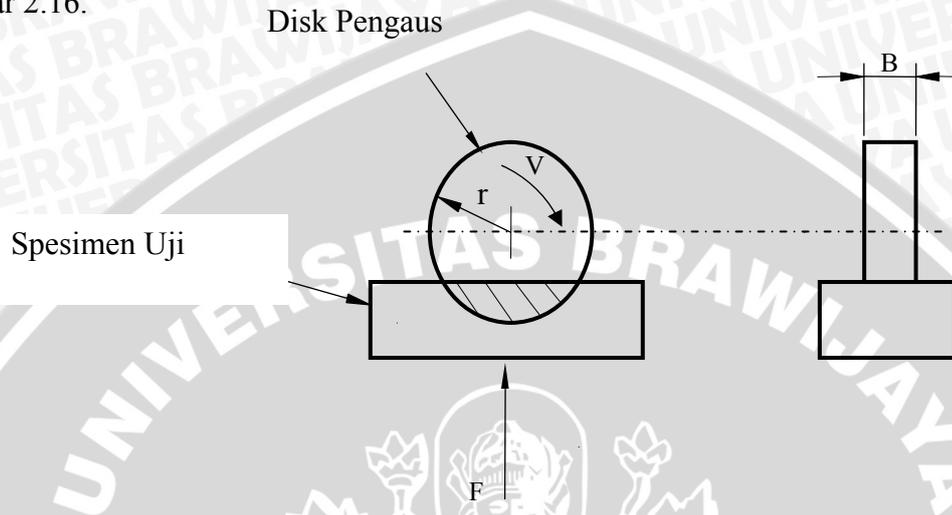
Pengikisan permukaan material atau komponen yang disebabkan oleh partikel padat yang terbawa oleh media cairan atau gas yang dilewatinya. Besarnya laju keausan *erosive* tergantung dari dimensi partikel, besarnya energi tumbukan dan sudut tumbukan. Mekanisme Keausan *erosive* dapat dilihat pada gambar 2.15.



Gambar 2.15. Keausan *Erosive*  
Sumber : [www.Gordonengland.Co.uk](http://www.Gordonengland.Co.uk).

### 2.7.2. Metode pengujian keausan

Pengujian keausan yang dilakukan menggunakan metode *OGOSHI* dengan prinsip piringan putar (*revolving disk*) sebagai media penggosok pada alat uji keausan akan menggosok permukaan sampel uji, gesekan tersebut akan menghasilkan jejak keausan pada bagian yang lebih lunak. Skema uji ketahanan aus ditunjukkan seperti gambar 2.16.



Gambar 2.16. Skema uji ketahanan aus

Laju keausan dapat dihitung sesuai dengan rumus berikut (Bhusan, 1991:2.16):

$$\text{Laju keausan} = \frac{\text{Volume}}{\text{jarak luncur}} \quad (2-6)$$

Perhitungan volume berdasarkan pengukuran kehilangan berat:

$$\text{Volume} = \frac{\Delta W}{\gamma} \quad (2-7)$$

Dimana:

$\Delta W$  = Selisih berat (gram)

$\gamma$  = berat jenis aluminium (gram/mm<sup>3</sup>)

Jarak luncur dapat dihitung sesuai dengan rumus berikut:

$$\text{Jarak luncur} = v.t \quad (2-8)$$

Dimana:

$v$  = kecepatan piringan pengaus (m/menit)

$t$  = waktu (menit)

Jadi laju keausan dapat dihitung sesuai dengan rumus berikut:

$$\text{Laju keausan} = \frac{\text{Volume}}{\text{jarak luncur}} = \frac{\Delta W}{\gamma.v.t} \quad (\text{mm}^3/\text{m}) \quad (2-9)$$

## 2.8. Hipotesa

Semakin lama waktu difusi pada proses *nitriding* dalam *fluidized bed furnace* semakin dalam gas nitrogen yang berdifusi kedalam material, sehingga ketebalan lapisan nitrida yang terbentuk bertambah yang menyebabkan ketahanan aus permukaan aluminium paduan meningkat.



## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. Metode Penelitian

Dalam penelitian ini metode yang digunakan adalah eksperimental ( *True Experimental Research* ) yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh waktu difusi pada proses *nitriding* terhadap keausan aluminium paduan di dalam dapur pemanas *fluidized bed*. Kajian literatur diperoleh dari beberapa sumber seperti buku dan jurnal yang relevan dengan masalah yang dikaji.

### 3.2. Tempat Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan di:

1. Laboratorium Material  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$  Landung Sari.
  - Pelaksanaan proses *nitriding* pada dapur pemanas *fluidized bed*.
  - Tempat pengujian dan pengambilan data hasil uji keausan.
2. Laboratorium Teknik Kimia Politeknik Negeri Malang
  - Tempat pengujian komposisi paduan aluminium.
3. Laboratorium Pengujian Material Teknik Mesin UGM
  - Tempat 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, 60, 90, 120, 150 menit).

2. Variabel Terikat.

Variabel terikat adalah variabel yang besarnya tergantung pada variabel bebas. Variabel terikatnya adalah laju keausan.

3. Variabel Terkendali.

Variabel terkendali adalah variabel yang besarnya dikontrol. Variabel terkendalinya yaitu:

- Temperatur Proses : 500°C.
- Gas yang digunakan : Nitrogen (N<sub>2</sub>).
- Media *Quenching* : Air.

- Alumina Oxide : 60 % dari volume reaktor.
- Tekanan gas nitrogen : 2,5 bar gauge

### 3.4. Alat dan Bahan yang Digunakan

#### 3.4.1. Alat yang digunakan dalam penelitian ini:

- Dapur pemanas *Fluidized Bed* (gambar 3.1).
- Mesin Uji keausan (gambar 3.2).
- *Stopwatch*.
- Gergaji besi.
- Kertas gosok.
- Mistar sorong.
- Foto Mikro.



Gambar 3.1. *Fluidized bed furnace*

Sumber :Laboratorium  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$

Keterangan:

1. Kotak tabung *fluidized bed*
2. Kontrol temperatur
3. Indikator temperatur
4. Indikator tekanan
5. Katup pengatur tekanan
6. Tabung gas
7. Saluran gas nitrogen.



Gambar 3.2. Mesin Uji Keausan  
Sumber :Laboratorium  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$

#### 3.4.2. Bahan yang digunakan.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- Aluminium paduan seri 2024
- Gas Nitrogen ( $N_2$ )
- Serbuk *Alumina Oxide*.
- *Autosol*

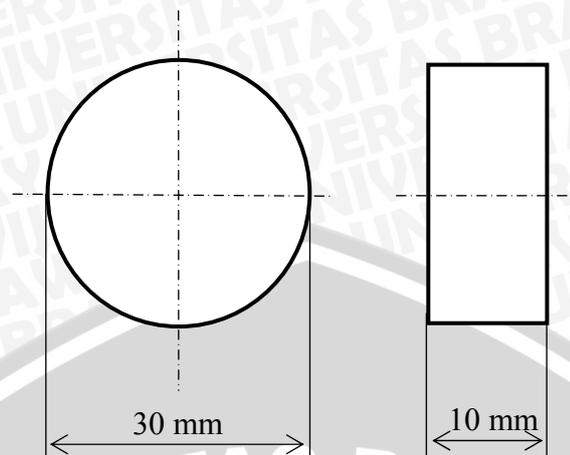
#### 3.5. Prosedur Penelitian.

Prosedur yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

##### 1. Pembuatan benda kerja.

Bentuk dan ukuran spesimen pada perlakuan di dalam *fluidized bed furnace* ditunjukkan seperti gambar 3.3. Pembuatan spesimen adalah sebagai berikut:

Material dipotong dengan ukuran 30 x 10 mm sebanyak 15 spesimen, kemudian diampas sambil mengalirkan air. dan setelah kering permukaan spesimen digosok menggunakan *autosol* sampai mengkilap.



Gambar 3.3. Bentuk dan ukuran spesimen

2. Persiapan dapur *fluidized bed*.

Spesimen dimasukkan kedalam dapur *fluidized bed* yang telah berisi serbuk *alumina oxide* dengan dua ukuran. Ukuran yang lebih besar berada di bawah untuk penyebar gas yang bertekanan. Sedangkan ukuran yang kecil sebagai pendistribusi temperatur pada saat proses *nitriding* berlangsung.

3. Dapur dipanaskan dengan energi listrik sampai temperatur 500°C.

4. Setelah mencapai suhu 500°C, kemudian dialirkan gas nitrogen (N<sub>2</sub>) dengan tekanan 2,5 bar .

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

6. Pengujian pada spesimen yang telah *dinitriding* yaitu pengujian keausan.

7. Pengolahan dan analisis data

### 3.6. Metode Pengujian Keausan

Pengujian keausan yang dilakukan menggunakan metode *OGOSHI* dengan data sebagai berikut:

1. Waktu pengausan (t) = 10 menit
2. Beban (F) = 8 Kg
3. Putaran piringan pengaus (n) = 900 rpm
4. Tebal piringan pengaus (B) = 3 mm
5. Jari-jari piringan pengaus (r) = 15 mm

6. Diameter piringan pengaus (D) = 30 mm

7. Kecepatan piringan pengaus (V)

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{3.14 \times 30 \times 900}{1000} = 84,78 \text{ m / menit}$$

dimana:

D = diameter piringan pengaus

n = putaran piringan pengaus

### 3.7. Rancangan Penelitian.

#### 3.7.1. Rancangan statistik.

Rancangan penelitian (*Experiment Design*) ini merupakan suatu cara yang digunakan untuk menentukan keberhasilan suatu penelitian atau eksperimen, selain itu juga untuk menentukan analisa yang tepat sehingga didapatkan kesimpulan signifikan. 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 keausan aluminium paduan setelah mengalami *nitriding*. Hasil pengukuran dan pengambilan data dari masing-masing seperti pada tabel 3.1 dibawah

Tabel 3.1. Rancangan Tabel Data Hasil Uji Keausan

Faktor Sampel	Variasi waktu difusi ( jam )				
	A 30 menit	B 60 menit	C 90 menit	D 120 menit	E 150 menit
1	$Y_{11}$	$Y_{21}$	$Y_{31}$	$Y_{41}$	$Y_{51}$
2	$Y_{12}$	$Y_{22}$	$Y_{32}$	$Y_{42}$	$Y_{52}$
3	$Y_{13}$	$Y_{23}$	$Y_{33}$	$Y_{43}$	$Y_{53}$
jumlah	$\sum Y_{1j}$	$\sum Y_{2j}$	$\sum Y_{3j}$	$\sum Y_{4j}$	$\sum Y_{5j}$
Nilai rata-rata	$\bar{Y}_1$	$\bar{Y}_2$	$\bar{Y}_3$	$\bar{Y}_4$	$\bar{Y}_5$

simen uji ditabelkan seperti tabel di bawah.

Keterangan :

Y = Data keausan aluminium paduan

$Y_{ij}$  = Data hasil uji keausan aluminium paduan setelah *nitriding* dengan waktu difusi ke i dan ulangan ke j.

Perhitungan statistik dari tabel di atas:

- Data rata-rata.

$$\bar{Y} = \frac{\sum Y}{n} \quad (3-1)$$

- Standar deviasi.

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

- Standar deviasi rata-rata.

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

- Interval penduga.

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

Data sampel rata-rata waktu difusi sebagai variabel bebas dianggap sebagai  $\bar{Y}_1$ ,  $\bar{Y}_2$ ,  $\bar{Y}_3$ ,  $\bar{Y}_4$ ,  $\bar{Y}_5$  maka dapat diambil hipotesis sebagai berikut:

1.  $H_0 : \bar{Y}_1 = \bar{Y}_2 = \bar{Y}_3 = \bar{Y}_4 = \bar{Y}_5$

( Tidak ada pengaruh nyata penambahan waktu difusi terhadap keausan aluminium paduan ).

2.  $H_0 : \bar{Y}_1 \neq \bar{Y}_2 \neq \bar{Y}_3 \neq \bar{Y}_4 \neq \bar{Y}_5$

( Ada pengaruh nyata penambahan waktu difusi terhadap keausan aluminium paduan ).

Berdasarkan data tabel 3.1 dapat dihitung antara lain (Hifni, H.M., 1993) :

1. Jumlah seluruh perlakuan :

$$\sum_{n=1}^n \sum_{j=1}^j Y_{ij} \quad (3-5)$$

2. Jumlah kuadrat seluruh perlakuan :

$$\sum_{n=1}^n \sum_{j=1}^j Y_{ij}^2 \quad (3-6)$$

3. Faktor Koreksi (FK) :

$$FK = \frac{\left[ \sum_{n=1}^n \sum_{j=1}^j Y_{ij} \right]^2}{n.k} \quad (3-7)$$

4. Jumlah Kuadrat Total (JKT):

$$JKT = \sum_{n=1}^n \sum_{j=1}^j Y_{ij}^2 - FK \quad (3-8)$$

5. Jumlah Kuadrat Perlakuan (JKP):

$$JKP = \frac{\sum_{n=1}^n \sum_{j=1}^j Y_{ij}^2}{n} - FK \quad (3-9)$$

6. Jumlah Kuadrat Galat (JKG).

$$JKG = JKT - JKP \quad (3-10)$$

7. Kuadrat Tengah Perlakuan (KTP).

$$KTP = \frac{JKP}{k-1} \quad (3-11)$$

8. Kuadrat Tengah Galat (KTG).

$$KTG = \frac{JKG}{n-k} \quad (3-12)$$

Dari rumus di atas dapat dicari  $F_{hitung}$  yang digunakan untuk menentukan ada atau tidaknya pengaruh variabel bebas terhadap variabel terkontrol dengan metode uji F

$$F_{hitung} = \frac{KTP}{KTG} \quad (3-13)$$

Untuk menyederhanakan perhitungan dan tampilan, maka dibuat tabel analisa varian satu arah seperti tabel 3.2 berikut

Tabel 3.2. Rancangan Analisa Varian Satu Arah

Sumber Keseragaman	db	JK	KT	$F_{hitung}$	$F_{tabel}$
Perlakuan	k-1	JKP	KTP	$\frac{KTP}{KTG}$	$F_{tabel}$
Galat	N-k	JKG	KTG		
Total	N-1	JKT			

Kesimpulan yang diperoleh dari uji F berdasarkan tabel 3.2 di atas adalah sebagai berikut :

1. Bila  $F_{hitung} > F_{tabel}$  maka  $H_0$  ditolak.  
Berarti faktor variasi waktu difusi pada proses nitriding berpengaruh terhadap keausan aluminium paduan.
2. Bila  $F_{hitung} < F_{tabel}$  maka  $H_0$  diterima.  
Berarti faktor variasi waktu difusi pada proses nitriding tidak berpengaruh terhadap keausan aluminium paduan.

Kemudian dicari kecenderungan dari faktor-faktor tersebut terhadap keausan yang terbentuk pada proses nitriding ke dalam suatu grafik dan selanjutnya mencari persamaan regresi dari grafik tersebut.

### 3.7.2. Analisa Regresi.

Analisa regresi adalah teknik statistik parametrik yang digunakan untuk melakukan peramalan atau prediksi besarnya variasi yang terjadi pada variabel Y berdasarkan variabel X, dan untuk menentukan besarnya koefisien korelasi antara variabel X dan variabel Y. Pada analisa regresi ini umumnya digunakan beberapa persamaan sebagai berikut:

$$Y = a + bx \quad (\text{untuk persamaan garis linier})$$

$$Y = i + jx + kx^2 \quad (\text{untuk persamaan polinomial})$$

Keterangan :

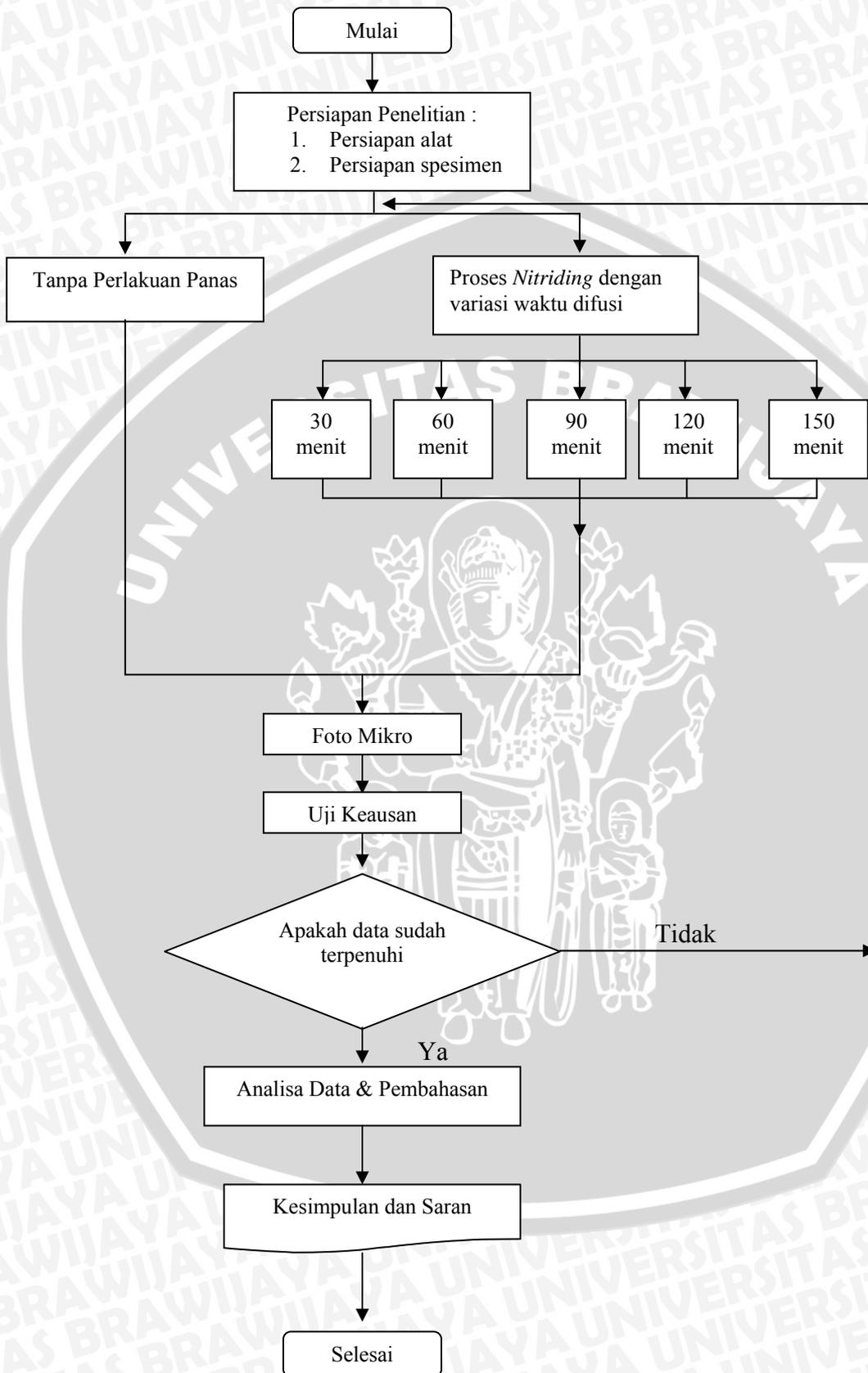
Y = variabel terikat

x = variabel bebas

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

$$r^2 = \frac{\sum (Y_{est} - \bar{Y})^2}{\sum (Y - \bar{Y})^2} \quad (3-14)$$

### 3.8. Diagram Alir Penelitian



## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Data Hasil Pengujian

Data hasil uji keausan dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1. Data Hasil Uji Keausan

Waktu difusi (menit)	sampel	Berat Awal (gram)	Berat Akhir (gram)	$\Delta W$ (gram)	Laju Keausan ( $\text{mm}^3/\text{m}$ )	Rata-rata
30	1	24,40	24,379	0,021	0,00917	0,00888
	2	22,51	22,490	0,020	0,00874	
	3	21,45	21,430	0,020	0,00874	
60	1	25,26	25,245	0,015	0,00655	0,00655
	2	24,69	24,675	0,015	0,00655	
	3	22,79	22,775	0,015	0,00655	
90	1	20,17	20,157	0,013	0,00568	0,00582
	2	21,41	21,396	0,014	0,00612	
	3	22,58	22,567	0,013	0,00568	
120	1	22,42	22,408	0,012	0,00524	0,00553
	2	20,19	20,178	0,012	0,00524	
	3	23,81	23,796	0,014	0,00612	
150	1	24,29	24,277	0,013	0,00568	0,00524
	2	22,49	22,479	0,011	0,00481	
	3	24,29	24,278	0,012	0,00524	
Sampel	Laju Keausan ( $\text{mm}^3/\text{m}$ )					Yij
	30 menit	60 menit	90 menit	120 menit	150 menit	
1	0,00917	0,00655	0,00568	0,00524	0,00568	
2	0,00874	0,00655	0,00612	0,00524	0,00481	
3	0,00874	0,00655	0,00568	0,00612	0,00524	
Jumlah	0,002665	0,001966	0,001747	0,00166	0,00157	0,09611
Rata-rata	0,00888	0,00655	0,00582	0,00553	0,00524	

Laju keausan sebelum perlakuan :  $0,01354 \text{ mm}^3/\text{m}$

Contoh perhitungan laju keausan untuk data pada waktu difusi 30 menit:

- laju keausan ( $\text{mm}^3/\text{m}$ )

$$\text{Laju keausan} = \frac{\Delta W}{\delta.v.t} = \frac{0,021\text{g}}{0,0027\text{g} / \text{mm}^3 \times 84,78\text{m} / \text{menit} \times 10\text{menit}} = 0,00888\text{mm}^3 / \text{m}$$

## 4.2. Pengolahan Data

### 4.2.1. Analisa Statistik

Analisa statistik untuk waktu difusi 30 menit

1. Laju keausan rata-rata.

$$\bar{Y} = \frac{\sum Y}{n} = \frac{0,002665}{3} = 0,0008883$$

2. Standar deviasi.

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum (Y - \bar{Y})^2}}{3-1} = 0,000178$$

3. Standar deviasi rata-rata.

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0,00018}{\sqrt{3}} = 0,0000103$$

4. Interval penduga.

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

$$(0,00888) - (4,3 \times (0,0000198)) < Y < (0,00888) + (4,3 \times (0,0000198))$$

$$0,00844 < Y < 0,00933$$

Dengan perhitungan yang sama interval penduga laju keausan rata-rata pada setiap variasi waktu difusi dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2. Interval Penduga Laju Keausan

Interval Penduga	Laju keausan rata-rata ( $\bar{Y}$ )	Standar Deviasi ( $\sigma$ )	Standar deviasi rata-rata ( $\bar{\sigma}$ )	Interval Penduga Rata-rata	
Waktu difusi	30	0,00888	0,000178	0,000103	0,00844 < Y < 0,00933
	60	0,00655	0	0	0,00655 < Y < 0,00655
	90	0,00582	0,000178	0,000103	0,00538 < Y < 0,00627
	120	0,00553	0,000357	0,000206	0,00465 < Y < 0,00642
	150	0,00524	0,000309	0,000178	0,00448 < Y < 0,00601

#### 4.2.2. Analisa Varian Satu Arah

Dari Tabel 4.1 data hasil pengujian laju keausan proses *nitriding* dalam *fluidized bed* yang diperoleh dapat dilakukan analisa varian satu arah untuk mengetahui ada tidaknya pengaruh waktu difusi terhadap laju keausan permukaan spesimen, yang mana hasil perhitungannya adalah sebagai berikut:

1. Faktor Koreksi (FK) :

$$FK = \frac{\left[ \sum_{n=1}^n \sum_{j=1}^j Y_{ij} \right]^2}{n.k} = \frac{(0,0961)^2}{3 \times 5} = 0,000616$$

2. Jumlah Kuadrat Total (JKT):

$$JKT = \sum_{n=1}^n \sum_{j=1}^j Y_{ij}^2 - FK = (0,000643) - (0,000616) = 0,000027$$

3. Jumlah Kuadrat Perlakuan (JKP):

$$JKP = \frac{\sum_{n=1}^n \sum_{j=1}^j Y_{ij}^2}{n} - FK = \frac{(0,000643)}{3} - (0,000616) = 0,0000258$$

4. Jumlah Kuadrat Galat (JKG).

$$JKG = JKT - JKP = (0,000027) - (0,0000258) = 0,00000115$$

5. Kuadrat Tengah Perlakuan (KTP).

$$KTP = \frac{JKP}{k-1} = \frac{0,0000258}{4} = 0,00000646$$

6. Kuadrat Tengah Galat (KTG).

$$KTG = \frac{JKG}{\sum ni - k} = \frac{0,00000115}{15 - 5} = 0,000000115$$

Dari rumus di atas dapat dicari  $F_{hitung}$  yang digunakan untuk menentukan ada atau tidaknya pengaruh variabel bebas terhadap variabel terkontrol dengan metode uji F

$$F_{hitung} = \frac{KTP}{KTG} = \frac{0,00000646}{0,000000115} = 56,4$$

7. Dari tabel uji F (lampiran 3) dengan  $\alpha = 5\%$ , derajat bebas 4 dan 10 didapatkan harga F tabel = 3,48

Dari hasil perhitungan analisa varian satu arah dapat ditabelkan seperti pada tabel 4.3.

Tabel 4.3. Rancangan Analisa Varian Satu Arah

Sumber Keseragaman	db	JK	KT	F <sub>hitung</sub>	F <sub>tabel</sub>
Perlakuan	4	0,0000258	0,00000646	56,4	3,48
Galat	10	0,00000112	0,000000115		
Total	14	0,000027			

### 4.2.3. Analisa Regresi

Dari data laju keausan yang diperoleh maka dapat dilakukan analisa regresi. Persamaan regresi dalam penelitian ini adalah model persamaan polinomial, agar di dapat peramalan yang mendekati 1. Dari Tabel 4.1 data hasil pengujian laju keausan proses *nitriding* dalam *fluidized bed* data hasil pengujian didapatkan suatu hasil yang dapat ditampilkan dalam bentuk suatu variabel seperti terlihat pada tabel 4.4 berikut ini:

Tabel 4.4. Analisa Regresi Laju Keausan Al-Cu

No.	X	Y	X <sup>2</sup>	X <sup>3</sup>	X <sup>4</sup>	XY	X <sup>2</sup> Y
1	30	0,00888	900	27000	810000	0,2664	7,992
2	60	0,00655	3600	216000	12960000	0,393	23,58
3	90	0,00582	8100	729000	65610000	0,5238	47,142
4	120	0,00553	14400	1728000	207360000	0,6636	79,632
5	150	0,00524	22500	3375000	506250000	0,786	117,9
	450	0,03202	49500	6075000	792990000	2,6328	276,246

Dimana:

X = Waktu difusi (menit)

Y = Laju keausan (mm<sup>3</sup>/m)

Berdasarkan Tabel 4.4 di atas maka diperoleh persamaan :

$$5i + 450j + 49500k = 0,03202$$

$$450i + 49500j + 6075000k = 2,633$$

$$49500i + 6075000j + 792990000k = 276,246$$

Hasil Eleminasi dari tiga persamaan di atas didapatkan :

$$i = 0,0112$$

$$j = -0,0000922$$

$$k = 0,000000359$$

Jadi persamaan regresi polinomial sebagai berikut:

$$Y = i + jX + kX^2$$
$$= 0,0112 - 0,0000922X + 0,000000359X^2$$

Untuk perhitungan koefisien regresi dapat ditabelkan pada tabel 4.5 sebagai berikut:

Tabel 4.5. Nilai Laju Keausan

No.	X	Y	Yest	$(Yest - \bar{Y})^2$	$(Y - \bar{Y})^2$
1	30	0,00888	0,00871	0,00000532	0,00000613
2	60	0,00655	0,006911	0,00000026	0,00000002
3	90	0,00582	0,005758	0,00000042	0,00000034
4	120	0,00553	0,005251	0,00000133	0,00000076
5	150	0,00524	0,00539	0,00000103	0,00000135
$\Sigma$	450	0,03202	0,03202	0,00000835	0,00000861

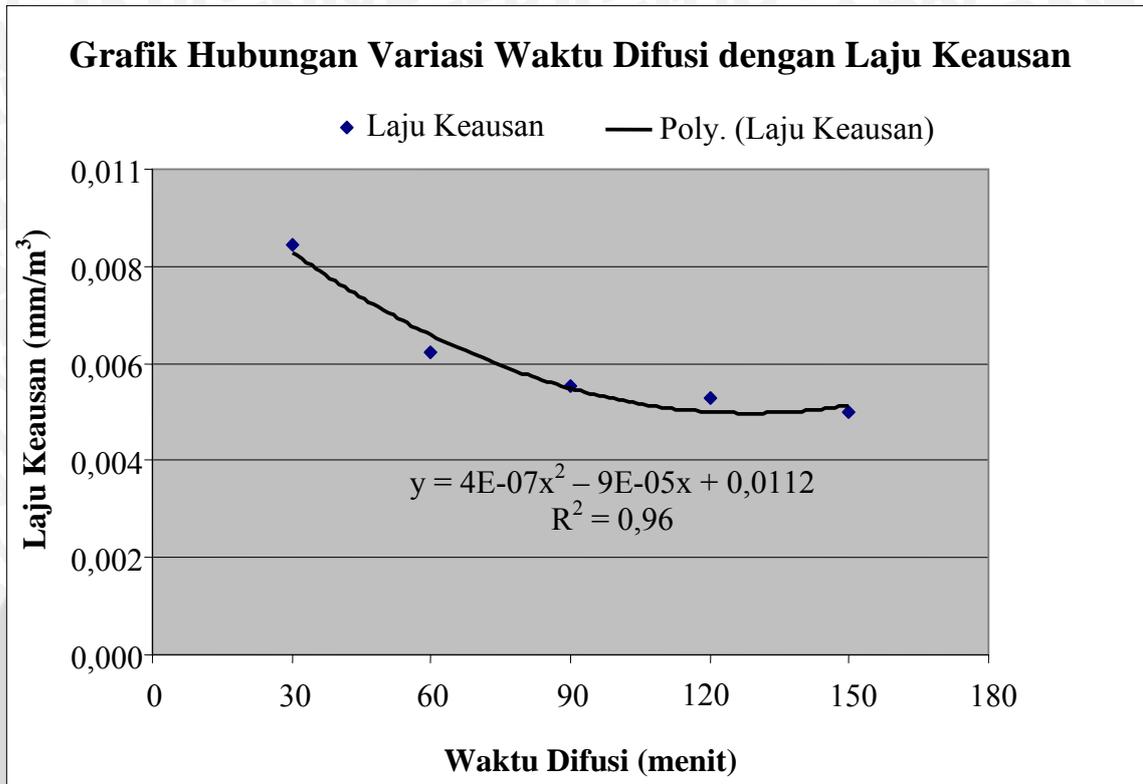
Berdasarkan tabel 4.5 diatas didapatkan koefisien regresi sebagai berikut:

$$r^2 = \frac{\sum (Yest - \bar{Y})^2}{\sum (Y - \bar{Y})^2} = \frac{0,00000835}{0,00000861} = 0,96$$



### 3. Pembahasan

#### 4.3.1. Grafik Hubungan antara Waktu difusi dengan Laju Keausan



Gambar 4.1 Grafik Hubungan Waktu difusi dan Laju Keausan

Berdasarkan pada tabel 4.2 menunjukkan bahwa data hasil pengujian keausan untuk semua pengulangan masuk diantara batasan minimum dan maximum. Analisa statistik tersebut menggunakan derajat kesalahan 5% yang berarti tingkat kebenaran adalah 95%.

Pengolahan selanjutnya adalah dengan analisa varian satu arah. Tabel 4.3 menunjukkan bahwa nilai  $F_{hitung}$  lebih besar dari nilai  $F_{tabel}$ . Hal ini menunjukkan bahwa variasi Waktu difusi memberikan pengaruh yang nyata terhadap laju keausan proses nitriding dalam *fluidized bed*.

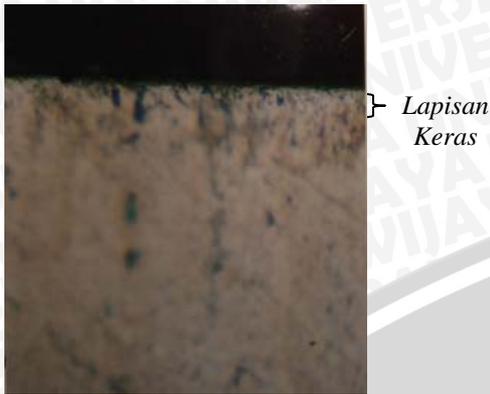
Laju keausan aluminium paduan sebelum dilakukan proses *nitriding* adalah 0,01354 mm<sup>3</sup>/m. Pada penelitian ini konsentrasi nitrogen didalam reaktor sebesar 100%. Nitrogen didalam reaktor tersebut akan berdifusi kedalam aluminium selama proses *nitriding*. Berdasarkan tabel 4.1 didapatkan Laju keausan menurun jika pada aluminium paduan dilakukan proses *nitriding*. Penurunan laju keausan sebesar 38,7%-65,6% dari tanpa perlakuan. Nilai laju keausan pada waktu difusi 30 menit sebesar 0,00888 mm<sup>3</sup>/m, pada waktu difusi 60 menit laju keausan sebesar 0,00655 mm<sup>3</sup>/m, pada waktu difusi 90

menit laju keausan sebesar  $0,00582 \text{ mm}^3/\text{m}$ , pada waktu difusi 120 menit laju keausan sebesar  $0,00553 \text{ mm}^3/\text{m}$ , dan pada waktu difusi 150 menit laju keausan sebesar  $0,005242 \text{ mm}^3/\text{m}$ . Hal ini menunjukkan bahwa dengan proses *nitriding* dapat memperbaiki sifat mekanik aluminium paduan khususnya ketahanan ausnya.

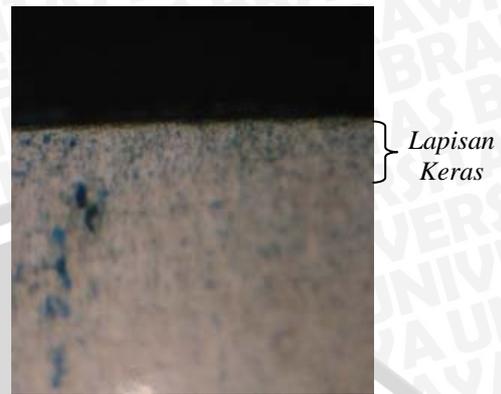
Pada grafik 4.1 menunjukkan hubungan polinomial antara waktu difusi dan laju keausan dimana dengan semakin meningkatnya waktu difusi maka laju keausan pada aluminium paduan akan menurun. Laju keausan tertinggi pada waktu difusi 30 menit dan laju keausan terendah pada waktu difusi 150 menit. Hal ini disebabkan dengan semakin meningkatnya waktu difusi, difusi atom nitrogen kedalam aluminium semakin dalam dan konsentrasi atom nitrogen pada permukaan aluminium semakin banyak. Sesuai dengan hukum *Fick's II* yang menyatakan hubungan jarak difusi dengan konsentrasi atom. Dengan semakin kecil jarak dari permukaan, konsentrasi atom nitrogen akan lebih banyak dan mengalami penurunan konsentrasi pada jarak yang semakin jauh dari permukaan. Nitrogen yang berdifusi kedalam aluminium akan membentuk nitrida yang keras dan stabil, sehingga dengan semakin dalam nitrida yang terbentuk maka kekerasan aluminium paduan meningkat dan laju keausannya semakin menurun. Selain kekerasan aluminium paduan meningkat akibat adanya unsur Cu dalam aluminium yang membentuk presipitat  $\text{CuAl}_2$  setelah mengalami penuaan secara alami (*natural aging*).

Difusi nitrogen pada struktur aluminium dapat dilihat pada gambar 4.2. Dari gambar dapat dilihat bahwa dengan semakin meningkatnya waktu difusi, difusi atom nitrogen pada struktur aluminium semakin dalam. Hal ini sesuai dengan persamaan(2-5) yaitu hubungan antara waktu difusi dengan ketebalan lapisan yang terbentuk. Dari persamaan tersebut menunjukkan bahwa ketebalan lapisan meningkat seiring meningkatnya waktu difusi. Pada waktu difusi 30 menit, difusi atom nitrogen menempati ruang interstisi pada struktur aluminium masih rendah sehingga kedalaman nitrida yang terbentuk masih rendah. Dengan bertambahnya waktu difusi, difusi atom nitrogen menempati ruang interstisi pada struktur aluminium meningkat, sehingga pada waktu difusi 150 menit ketebalan nitrida yang terbentuk semakin dalam.

1. Waktu Difusi 30 menit



2. Waktu Difusi 60 menit



3. Waktu Difusi 90 menit



4. Waktu Difusi 120 menit



5. Waktu Difusi 150 menit



6. Tanpa Perlakuan



Keterangan : Perbesaran pada mikroskop 520 x

Gambar 4.2 Foto Mikro Aluminium Paduan

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Dari analisa data dan pembahasan hasil penelitian pada proses *nitriding* pada aluminium paduan seri 2024 dengan komposisi kimia 4,2%Cu, 1,4%Mg, 0,4%Fe, 0,3%Si yang diperoleh dari hasil uji komposisi, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Dengan penambahan waktu difusi berpengaruh terhadap laju keausan permukaan pada aluminium paduan seri 2024. Semakin lama waktu difusi menyebabkan laju keausan turun. Penurunan laju keausan sebesar 65,6% pada waktu difusi 30 menit, 48,4% pada waktu difusi 60 menit, 43% pada waktu difusi 90 menit, 40,8% pada waktu difusi 120 menit dan 38,7% pada waktu difusi 150 menit dari tanpa perlakuan.
- Laju keausan tertinggi pada permukaan dengan waktu difusi 30 menit yaitu 0,008883 mm<sup>3</sup>/m dan terendah pada waktu difusi 150 menit yaitu 0,00524 mm<sup>3</sup>/m.

Hal ini disebabkan dengan semakin meningkatnya waktu difusi, difusi atom nitrogen kedalam aluminium paduan semakin dalam. Nitrogen yang berdifusi kedalam aluminium akan membentuk nitrida. Nitrida yang terbentuk ini bersifat stabil dan keras, sehingga dengan semakin dalam nitrida yang terbentuk maka kekerasan aluminium paduan meningkat dan laju keausannya semakin menurun.

#### 5.2. Saran

Untuk memperoleh hasil yang optimal perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan variasi variabel bebas yang lain, seperti tekanan dan temperatur proses nitriding.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, J.C. 1990. *Material Science*. Fourth Edition. London : Chapman and Hall.
- Bharat, Bhushan & Gupta, B.K. 1991. *Handbook of Tribology Materials, coatings, and Surface Treatments*. New York: Mc. Graw Hill.
- Callister. Jr, William.D. 1985. *Material Science and Engineering*. Fourt Edition. Singapore : John Wiley and Sons Inc.
- Hermawan, Yudi. 2003. *Studi Pengeruh Holding Time Proses Nitriding Pada Proses Karburasi Terhadap Karakteristik Permukaan Baja Karbon Rendah Pada Reactor Fluidized Bed*. Skripsi tidak diterbitkan : Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Hifni, M.1991. *Analisa Varian dan Penerapannya*. Malang: Fakultas Teknik Univerisitas Brawijaya Malang.
- Komang, I, Astana Widi. 2003. *Pengaruh Waktu Difusi dan Temperatur pada Proses Nitrokarburisasi terhadap kaakteristik Baja AISI 1013 dan AISI P20 pada Reaktor Fluidized Bed*. Jakarta : Universitas Indonesia
- Leppanen, Rainer & Jonsson, Hakan. 1999. *Properties of Nitrided Compenents*. Ovako Steel. Sweden.
- Moraes, Mello. 2001. *Predicting Microstructure Development During High Temperature Nitriding of Martensitic Stainless Steels Using Thermodynamics Modeling*. Brazil : University of Sao Paolo.
- Priest, J.M. 2000. *Studies in low pressure plasma nitriding*. Inggris : University of New England.
- Reynoldson. R.W.1989. *Heat Treatment in Fluidized Furnace*. Melbourne: Cammoran Publishing.
- Smith, William.F.19930. *Foundation Of Material Science and Engineering*. Fifth Edition. Singapore : Mc.GrawHill Inc.
- Spiegel, R. Murray. 1988. *Statistika*. Edisi kedua. Jakarta : Erlangga.
- Surdia, Tata. 1999. *Pengetahuan Bahan Teknik*. Cetakan Keempat. Jakarta : Pradnya Paramita.
- Van Vlack, Lawrence.1991. *Ilmu dan teknologi Bahan*.edisi kelima. Jakarta : Erlangga.
- [www.getottenassociates.com](http://www.getottenassociates.com).
- www. Gordonengland. Co.uk.
- Zakharov, B. 1962. *Heat Treatment of Metals*. Moscow : Peace Publisers.

# UNIVERSITAS BRAWIJAYA

## LAMPIRAN



Lampiran 1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia



**POLITEKNIK NEGERI MALANG**

JURUSAN TEKNIK KIMIA

UNIT PRODUKSI

Jl. Veteran PO. BOX 04 Telp. (0341) 551340 - 551341 Psw. 275 Malang

No : /UP-TK/EK/II/2007  
Jenis Sample : Aluminium Paduan AA 2024

Menerangkan bahwa :

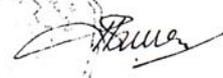
Nama Mahasiswa : Budiyan Mariyadi.  
NIM : 0410622004.  
Nama Mahasiswa : Dian Ridlo Pamuji.  
NIM : 0410622006.  
Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang.  
Telah melakukan:

” PENGUJIAN KOMPOSISI PADA ALUMINIUM PADUAN “

HASIL ANALISIS

No	Unsur Paduan	Kadar (%)
1.	Fe	0,4
2.	Cu	4,2
3.	Si	0,3
4.	Mg	1,4

Mengetahui,  
Ketua Jurusan Teknik Kimia,

  
Ir. Abdul Chalim  
NIP. 131 830 641

Malang, 13 Januari 2007

a.n Ketua Unit Produksi,

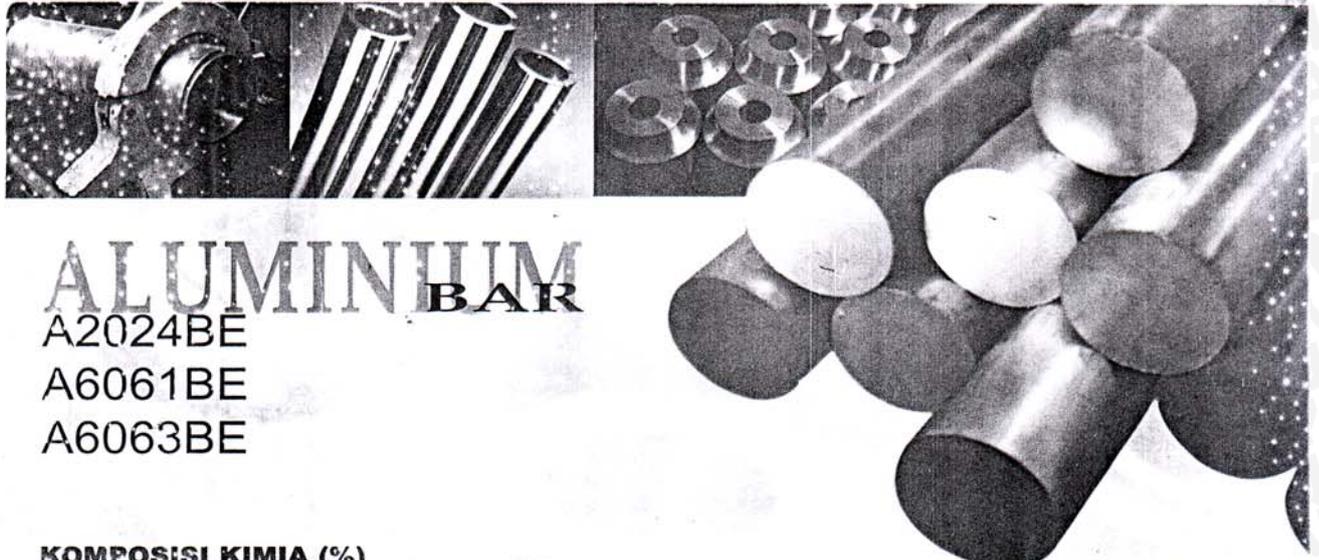
  
Ir. Dwina Moentamaria, MT  
NIP 131 830 642

**Jasa Analisa :**

- Analisa Kimia Lemah, Air dan Mawad
- Analisa Bahan Makanan
- Pelatihan
- Konsultasi dan Pemasangan



## Lampiran 2. Komposisi kimia Aluminium Paduan



# ALUMINIUM BAR

A2024BE

A6061BE

A6063BE

### KOMPOSISI KIMIA (%)

Kode Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Bi,Pb,Zr Zr+Ti,V	Ti	Lain-lain Masing²	Total	Al
A2024BE	Maks. 0,50	Maks. 0,50	3,8 - 4,9	0,30 - 0,9	1,2 - 1,8	Maks. 0,10	Maks. 0,25	Zr+Ti Maks. 0,20	Maks. 0,15	Maks. 0,05	Maks. 0,15	Sisa
A6061BE	0,40 - 0,8	Maks. 0,7	0,15 - 0,40	Maks. 0,15	0,8 - 1,2	0,04 - 0,35	Maks. 0,25	-	Maks. 0,15	Maks. 0,05	Maks. 0,15	Sisa
A6063BE	0,20 - 0,6	Maks. 0,35	Maks. 0,10	Maks. 0,10	0,45 - 0,9	Maks. 0,10	Maks. 0,10	-	Maks. 0,10	Maks. 0,05	Maks. 0,15	Sisa

### EKUIVALEN KODE MATERAL

	JIS	A2024BE	A6061BE	A6063BE
JEPANG	H4040-88	A2024BE	A6061BE	A6063BE
AMERIKA	AA AA-88	2024	6061	6063
	ASTM : B221M-92	2024	6061	6063
	FS : QQ -A-200	2024 (QQ-A-200/3F)	6061 (QQ-A-200/8F)	6063 (QQ-A-200/9D)
INGGRIS	BS : 1474-87	-	6061	6063
JERMAN	DIN : 1747-83	AlCuMg2	-	-
INTERNASIONAL	ISO : 6362-90, 209 89	AlCu4Mg1	AlMg1SiCu	AlMg0.7Si

### SIFAT-SIFAT MEKANIS

KODE MATERIAL	Temper	UJI TARIK				
		Diameter (mm)	Luas Penampang (cm²)	Kekuatan Tarik (N / mm²)	Ketahanan Tekanan (N / mm²)	Perpanjangan (%)
A2024BE	T3511	≤6	-	Min. 390	Min. 295	Min. 12
		6 < 19	-	Min. 410	Min. 305	Min. 12
		19 < 38	-	Min. 450	Min. 315	Min. 10
		38 <	≤160 160 < 200	Min. 480 Min. 470	Min. 365 Min. 335	Min. 10 Min. 8
A6061BE	T6	≤6	-	Min. 265	Min. 245	Min. 8
		6 <	-	Min. 265	Min. 245	Min. 10
		≤3	-	Min. 205	Min. 175	Min. 8
A6063BE	T6	3 < 25	-	Min. 206	Min. 175	Min. 10

### ALUMINIUM BAR A2024BE, A6061BE, A6063BE

BENTUK :  
Bulat

MESIN YANG BIASA DIGUNAKAN :  
Rubit, turret, CNC

#### KEUNGGULAN

A2024BE : Kekuatan tinggi, sangat baik dalam proses potong / bubut.  
A6061BE : Tahan korosi untuk jenis komponen alat pemanas  
A6063BE : Lebih lunak dari tipe 6061, tapi sangat tahan korosi dan keunggulan dalam proses permukaan

#### APLIKASI

A2024BE : Materi untuk pesawat terbang, kumparan, bahan untuk baut  
A6061BE : Bahan keling, komponen mobil  
A6063BE : Komponen mesin pemanas



**UD. SUTINDO SEJAHTERA**

Jl. Raden Saleh 63, Surabaya (60174) Telp. (031) 545 1378 Fax. (031) 545 1381  
E-mail : suturvas@indosat.net.id



Lampiran 3. Tabel Uji F

TABEL F UNTUK  $\alpha = 5\%$



V1 \ V2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	30	40	60	120	∞
1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	244	246	248	250	251	252	253	254
2	18.5	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.5	19.5	19.5	19.6	19.5
3	10.1	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.62	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	5.75	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	4.50	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	3.81	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	3.38	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	3.08	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	2.86	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	2.84	2.77	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	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.45	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

Lampiran 4. Tabel *Error Function*

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

Source: R. A. Flinn and P. K. Trojan, "Engineering Materials and Their Applications." 2d ed., Houghton Mifflin, 1981, p. 137.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

