

**PENGARUH TEMPERATUR PEMANASAN TERHADAP KOEFISIEN
PERPINDAHAN MASSA DIFUSI (*DIFFUSIVITY*) KARBON PADA
PROSES *PACK CARBURIZING* BAJA AISI 3115**

SKRIPSI

KONSENTRASI KONVERSI ENERGI

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



Disusun oleh:

IKA ISTIANA

NIM. 0710620067-62

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2012

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH TEMPERATUR PEMANASAN TERHADAP KOEFISIEN
PERPINDAHAN MASSA DIFUSI (*DIFFUSIVITY*) KARBON PADA
PROSES *PACK CARBURIZING* BAJA AISI 3115**

SKRIPSI

KONSENTRASI KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

IKA ISTIANA

NIM. 0710620067-62

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT
NIP. 19720903 199702 1 001

Putu Hadi Setyarini, ST., MT
NIP. 19770806 200312 2 001



LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH TEMPERATUR PEMANASAN TERHADAP KOEFISIEN
PERPINDAHAN MASSA DIFUSI (*DIFFUSIVITY*) KARBON PADA
PROSES *PACK CARBURIZING* BAJA AISI 3115**

**SKRIPSI
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

**IKA ISTIANA
NIM. 0710620067-62**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 2 Februari 2012

Skripsi 1

Ir. Tjuk Oerbandono, MSc., CSE
NIP. 19670923 199303 1 002

Skripsi 2

Dr. Eng. Lilis Yulianti, ST., MT
NIP. 19750702 200003 2 001

Komprehensif

Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT., MET
NIP. 19551117 198601 1 001

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT
NIP. 19720903 199702 1 001

KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Temperatur Pemanasan Terhadap Koefisien Perpindahan Massa Difusi (*Diffusivity*) Karbon Pada Proses *Pack Carburizing* Baja AISI 3115”** untuk memenuhi sebagian persyaratan akademik memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dari beberapa pihak, penyusunan skripsi ini tidak akan berjalan dengan baik. Oleh karena itu pada kesempatan kali ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya dan Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan dan saran yang sangat membantu dalam penulisan skripsi ini.
2. Bapak Dr. Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
3. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, MSc. selaku Dosen Wali yang telah memberikan bimbingan dan saran-saran yang bermanfaat untuk kelancaran perkuliahan.
4. Ibu Putu Hadi Setyarini, ST., MT., selaku Ketua Laboratorium Pengujian Bahan dan Pembimbing II yang telah membimbing penyusunan skripsi ini, serta memberi nasehat, motivasi dan segala dukungan yang dibutuhkan penulis.
5. Seluruh dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah memberikan nasehat dan ilmu yang bermanfaat bagi penulis.
6. Keluarga besar Laboratorium Pengujian Bahan, Bapak Hastomo selaku Laboran yang dengan sabar memberikan nasehat dan bimbingannya. Tidak lupa rekan-rekan asisten dan asisten magang 2011 yang telah banyak membantu dan memberikan motivasi kepada penulis selama pengerjaan skripsi ini.
7. Kedua orang tua tercinta Bapak Sukir dan Ibu Sulastri yang selalu memberikan doa, dukungan dan segala yang terbaik untuk penulis.

8. Keluarga besar LPM SOLID FT UB yang telah menjadi keluarga kedua bagi penulis, yang telah memberi banyak wawasan dan memperkaya pengalaman penulis.
9. Rekan-rekan seperjuangan dalam mengerjakan skripsi Ivan, Bayu, Gatya, Arda, dan Very yang tetap menularkan canda dan saling mendukung selama menyelesaikan skripsi.
10. Sahabat-sahabat terdekatku, Umi, Irma dan Elok atas perhatian, dukungan dan kebersamaannya selama ini.
11. Keluarga Besar Mahasiswa Mesin Universitas Brawijaya khususnya angkatan 2007 atas dukungan dan kebersamaannya selama ini.
12. Keluarga besar Beastudi Etos atas kepercayaan dan kesempatan yang diberikan kepada penulis sehingga penulis dapat menempuh studinya dengan baik.
13. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Akhir kata, penulis mengharapkan skripsi ini dapat memberikan manfaat dan wawasan baru bagi pembaca. Kritik dan saran yang membangun juga sangat penulis harapkan.

Malang, Januari 2012

Penulis

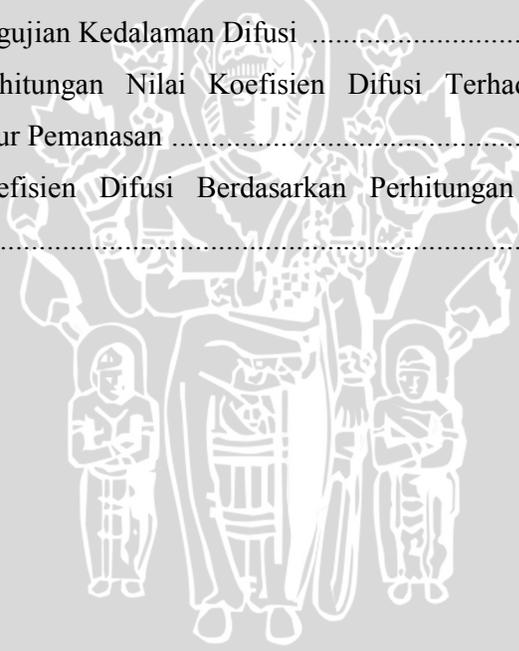
DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	viii
DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL	ix
RINGKASAN	x
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	4
2.2 Definisi Perpindahan Massa (Difusi).....	5
2.3 Mekanisme Difusi.....	5
2.3.1 Difusi <i>Vacancy</i>	6
2.3.2 Difusi Intersisi.....	6
2.4 Difusi Pada Kondisi <i>Steady-state</i>	7
2.5 Koefisien Difusi (<i>Diffusivity</i>).....	9
2.6 Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Koefisien Difusi.....	10
2.6.1 Jenis Bahan Yang Berdifusi.....	10
2.6.2 Temperatur.....	10
2.7 Pengertian <i>Carburizing</i>	12
2.7.1 <i>Pack Carburizing</i>	13
2.7.2 <i>Liquid Carburizing</i>	13
2.7.3 <i>Gas Carburizing</i>	14
2.8 Proses <i>Pack Carburizing</i>	15
2.8.1 <i>Heating</i> (Pemanasan).....	15
2.8.2 <i> Holding</i>	17

2.8.3	<i>Quenching</i> (Pendinginan Cepat).....	18
2.9	Baja.....	19
2.9.1	Klasifikasi Baja.....	20
2.9.2	Penamaan Baja Dalam Standar AISI.....	21
2.9.3	Baja Paduan Rendah.....	21
2.10	Hipotesis.....	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		
3.1	Metode Penelitian.....	23
3.2	Variabel Penelitian.....	23
3.3	Waktu dan Tempat Penelitian.....	24
3.4	Alat dan Bahan Penelitian.....	24
3.4.1	Alat Penelitian.....	24
3.4.2	Bahan Penelitian.....	29
3.5	Prosedur Penelitian.....	30
3.5.1	Pembuatan Spesimen.....	30
3.5.2	Pelaksanaan <i>Pack Carburizing</i>	31
3.5.3	Penentuan Koefisien Perpindahan Massa Difusi.....	32
3.6	Diagram Alir Penelitian.....	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Data Hasil Penelitian.....	35
4.1.1	Data Hasil Pengujian Massa.....	35
4.1.2	Data Hasil Perhitungan Konsentrasi Karbon.....	37
4.1.3	Data Hasil Pengujian Foto Mikro.....	39
4.1.4	Data Hasil Perhitungan Koefisien Difusi.....	39
4.2	Analisa Grafik dan Pembahasan.....	41
BAB V PENUTUP		
5.1	Kesimpulan.....	47
5.2	Saran.....	47
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Tabulasi Data Difusi	11
Tabel 2.2	Penamaan Baja Berdasarkan Standar AISI	21
Tabel 3.1	Kandungan Unsur Baja AISI 3115	29
Tabel 3.2	Macam-macam Komposisi <i>Carburizer</i> (Berdasarkan Persentase Berat)	30
Tabel 4.1	Hasil Pengujian Massa Spesimen Sebelum dan Setelah Perlakuan <i>Pack Carburizing</i> dengan Variasi Temperatur Pemanasan	36
Tabel 4.2	Tabulasi Data Perubahan Massa Karbon	37
Tabel 4.3	Data Massa Karbon, Volume Spesimen dan Konsentrasi Karbon	38
Tabel 4.4	Hasil Pengujian Kedalaman Difusi	39
Tabel 4.5	Data Perhitungan Nilai Koefisien Difusi Terhadap Variasi Temperatur Pemanasan	41
Tabel 4.6	Data Koefisien Difusi Berdasarkan Perhitungan Persamaan Arrhenus	43



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Perpindahan Massa (Difusi) Pada Campuran Gas Biner	5
Gambar 2.2	Difusi <i>Vacancy</i>	6
Gambar 2.3	Difusi Intersisi	7
Gambar 2.4	<i>Steady-state Diffusion</i> Melalui Plat Tipis	8
Gambar 2.5	Gradien Konsentrasi Pada <i>Steady-state Diffusion</i>	9
Gambar 2.6	Hubungan Antara Koefisien Difusi Dengan Resiprok Temperatur Mutlak Pada Beberapa Logam	12
Gambar 2.7	Mekanisme Difusi Intersisi Pada <i>Pack Carburizing</i>	13
Gambar 2.8	Proses <i>Liquid Carburizing</i>	14
Gambar 2.9	Proses <i>Gas Carburizing</i>	15
Gambar 2.10	Proses <i>Pack Carburizing</i>	16
Gambar 2.11	Pengaruh Temperatur Pemanasan Terhadap Laju Difusi Karbon...	16
Gambar 2.12	Pengaruh Temperatur <i>Carburizing</i> Terhadap Kedalaman Difusi Karbon	18
Gambar 2.13	Mekanisme Pendinginan	19
Gambar 3.1	Kotak <i>Carburizing</i>	24
Gambar 3.2	Peletakan Spesimen Dalam Kotak <i>Carburizing</i>	24
Gambar 3.3	Dapur Listrik	25
Gambar 3.4	Mesin Pengguncang Rotap	26
Gambar 3.5	Timbangan Analitik	27
Gambar 3.6	<i>Centrifugal Sand Paper Machine</i>	27
Gambar 3.7	<i>Emission Spectrometer</i>	28
Gambar 3.8	Mikroskop Logam	29
Gambar 3.9	Dimensi Spesimen Uji	30
Gambar 3.10	Spesimen Uji	31
Gambar 3.11	Diagram Alir Penelitian	34
Gambar 4.1	Pengaruh Temperatur Pemanasan Terhadap Perbedaan Massa Spesimen Hasil <i>Pack Carburizing</i>	36
Gambar 4.2	Contoh Hasil Pengujian Foto Mikro	39

Gambar 4.3 Pengaruh Temperatur Pemanasan Terhadap Koefisien Difusi
(*Diffusivity*) Karbon Pada *Carburizer* 500-560 μ m 41

Gambar 4.4 Pengaruh Temperatur Pemanasan Terhadap Koefisien Difusi
(*Diffusivity*) Karbon Pada *Carburizer* 60-100 μ m 42

Gambar 4.5 Pengaruh Temperatur Pemanasan Terhadap Koefisien Difusi
(*Diffusivity*) Berdasarkan Plot Persamaan Arrhenus 44

Gambar 4.6 Pengaruh Temperatur Pemanasan Terhadap Koefisien Difusi
(*Diffusivity*) 45



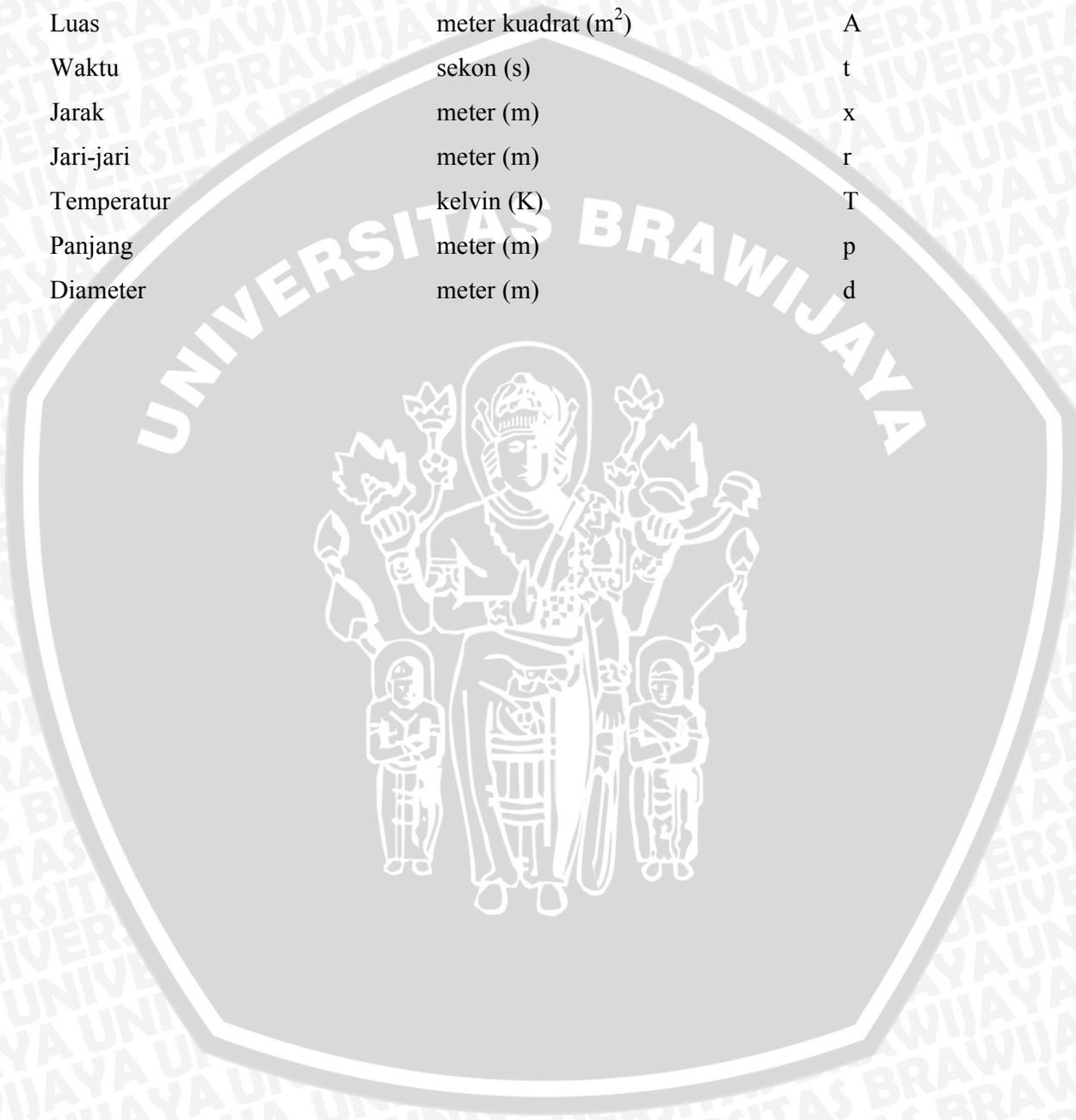
DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Foto Mikro Hasil <i>Pack Carburizing</i>
Lampiran 2	Hasil Uji Komposisi Kimia Baja AISI 3115
Lampiran 3	<i>Material Properties</i> Baja AISI 3115 (HQ 7210)
Lampiran 4	Surat Keterangan Penelitian Di Laboratorium Pengecoran Logam



DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL

Besaran Dasar	Satuan	Simbol
Massa	kilogram (kg)	m
Luas	meter kuadrat (m ²)	A
Waktu	sekon (s)	t
Jarak	meter (m)	x
Jari-jari	meter (m)	r
Temperatur	kelvin (K)	T
Panjang	meter (m)	p
Diameter	meter (m)	d



RINGKASAN

Ika Istiana, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2012, *Pengaruh Temperatur Pemanasan Terhadap Koefisien Perpindahan Massa Difusi (Diffusivity) Karbon Pada Proses Pack Carburizing Baja AISI 3115*, Dosen Pembimbing: Slamet Wahyudi dan Putu Hadi Setyarini.

Perpindahan massa pada benda padat dinyatakan dalam bentuk koefisien difusi (*diffusivity*). Koefisien difusi (*diffusivity*) menggambarkan banyaknya substansi yang berdifusi pada suatu permukaan dalam waktu tertentu. Penentuan besarnya koefisien difusi pada *pack carburizing* sangat penting dalam usaha optimalisasi proses *pack carburizing*.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur pemanasan terhadap koefisien difusi (*diffusivity*) karbon pada proses *pack carburizing* baja AISI 3115 sehingga dapat diketahui temperatur optimal pada proses *pack carburizing*. Hasil penelitian ini selanjutnya diharapkan dapat menjadi dasar untuk meningkatkan efisiensi produksi pada industri material.

Pada penelitian ini dilakukan perhitungan nilai koefisien difusi pada proses *pack carburizing* baja AISI 3115. Koefisien difusi didapatkan dengan menerapkan metode perhitungan *direct flux* pada hukum I Fick. Benda kerja yang dipakai adalah baja AISI 3115 dengan diameter 22 mm dan tebal ± 20 mm. Temperatur divariasikan dari 800-950°C. *Holding time* dikontrol sebesar 5 jam dan ukuran butir *carburizer* dibedakan antara 60-100 μm dan 500-560 μm . Data yang diamati pada penelitian ini adalah perubahan massa (Δm), perubahan konsentrasi (ΔC) dan kedalaman difusi (r) karbon sebelum dan sesudah perlakuan *pack carburizing*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur pemanasan, maka koefisien difusi (*diffusivity*) karbon akan semakin meningkat. Nilai koefisien difusi rata-rata tertinggi terdapat pada *carburizer* berukuran 60-100 μm yaitu 1.71E-11, sedangkan pada *carburizer* berukuran 500-560 μm nilai koefisien difusi rata-ratanya adalah 1.46E-11. Hal ini menunjukkan *carburizer* berukuran kecil mempunyai koefisien difusi yang lebih besar daripada *carburizer* berukuran lebih besar. Selain itu juga dilakukan perhitungan koefisien difusi berdasarkan persamaan Arrhenus. Pada perhitungan tersebut didapatkan kecenderungan yang sama dengan hasil eksperimen, yaitu koefisien difusi meningkat seiring peningkatan temperatur pemanasan. Koefisien difusi tertinggi berdasarkan persamaan Arrhenus adalah 1.09E-11.

Kata Kunci: Koefisien difusi, *pack carburizing*, hukum Fick, baja AISI 3115

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perpindahan massa (*mass transfer*) merupakan suatu fenomena yang sering dijumpai di bidang ilmu fisika, kimia maupun teknik. Perpindahan massa didefinisikan sebagai suatu proses perpindahan partikel atau kuantitas fisik yang disebabkan oleh adanya perbedaan konsentrasi dalam suatu campuran (Incropera, 1992). Sama halnya dengan perpindahan panas yang terjadi akibat adanya perbedaan suhu sebagai gaya pendorong, maka pada peristiwa perpindahan massa gaya pendorongnya berupa perbedaan konsentrasi.

Proses perpindahan massa banyak dijumpai dalam kehidupan sehari-hari. Larutnya deterjen ke dalam air, larutnya serbuk kopi ke dalam air dan menyebarnya bau parfum ke udara merupakan bagian dari perpindahan massa. Pada bidang industri, pemisahan komponen-komponen dari campurannya seperti distilasi minyak bumi, absorpsi logam berbahaya dari limbah cair dan ekstraksi uranium dengan pelarut organik juga memanfaatkan prinsip perpindahan massa. Begitu pun dengan industri material yang memanfaatkan prinsip perpindahan massa pada perlakuan *carburizing* untuk mengeraskan permukaan material.

Carburizing merupakan proses penambahan unsur karbon pada baja karbon rendah secara difusi sehingga karbon dari media *carburizing* akan masuk ke permukaan baja dan meningkatkan kadar karbon pada permukaan baja karbon rendah tersebut. Pada baja dengan kadar karbon tinggi ($> 1\% \text{ C}$), difusi akan sulit terjadi karena jumlah kandungan karbon pada permukaan substrat sudah cukup tinggi (Budinski, 1983). Beberapa metode *carburizing*, antara lain gas, *liquid*, *paste* dan *pack carburizing*.

Pada *pack carburizing* material yang banyak dipakai adalah baja karbon rendah. Material tersebut dimasukkan ke dalam serbuk arang yang pada saat pemanasan mengeluarkan gas CO_2 dan CO . Pada permukaan material, gas CO akan terurai membentuk atom karbon yang kemudian terdifusi masuk ke dalam baja. Dengan demikian kadar karbon pada permukaan baja akan meningkat sehingga meningkatkan kekerasan permukaan.

Difusi karbon pada *pack carburizing* sendiri dipengaruhi oleh banyak faktor seperti temperatur pemanasan, waktu penahanan (*holding*), ukuran serbuk *carburizer*,

katalis dan media pendingin. Temperatur pemanasan akan mempengaruhi energi aktivasi atom karbon sehingga memungkinkan atom karbon berpindah dari satu tempat ke tempat lain. Karena kadar karbon di lingkungan lebih tinggi daripada kadar karbon di permukaan baja, maka atom karbon akan berdifusi masuk ke dalam baja. Sedangkan gerak acak perpindahan atom karbon ke dalam baja akan mempengaruhi fluks massa karbon. Berdasarkan hukum Fick (*Fick's law*) tentang keseimbangan fluks massa dan gradient konsentrasi. Hal ini akan berpengaruh juga pada koefisien difusi (*diffusivity*) atom karbon.

Koefisien difusi (*diffusivity*) menggambarkan banyaknya substansi yang berdifusi pada suatu permukaan dalam waktu tertentu. Semakin besar koefisien difusi, maka proses difusi akan semakin cepat. Penentuan besarnya koefisien difusi pada *pack carburizing* dapat membantu optimalisasi proses *pack carburizing*, memprediksi waktu dan suhu optimal untuk mendapatkan pengerasan permukaan yang diinginkan serta memprediksi biaya yang diperlukan.

Berdasarkan uraian di atas akan diamati dan dikaji tentang pengaruh temperatur pemanasan terhadap koefisien perpindahan massa difusi (*diffusivity*) karbon pada proses *pack carburizing* baja AISI 3115.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh temperatur pemanasan terhadap koefisien perpindahan massa difusi (*diffusivity*) karbon pada proses *pack carburizing* baja AISI 3115?

1.3 Batasan Masalah

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

1. Proses *pack carburizing* menggunakan media arang tempurung kelapa pada komposisi 90% dengan 10% BaCO₃ sebagai *energizer*.
2. *Holding time* yang digunakan adalah 5 jam.
3. Variasi temperatur pemanasan adalah 800°C, 850°C, 900°C dan 950°C.
4. Dapur pemanas yang digunakan adalah jenis dapur listrik.
5. Media *quenching* adalah oli SAE 30.
6. Material yang digunakan adalah baja AISI 3115.

7. *Mesh* ukuran serbuk *carburerizer* yang digunakan adalah 60-100 μm dan 500-560 μm .
8. Kondisi pada saat proses *pack carburizing* diasumsikan sebagai *steady state condition*.
9. Penelitian difokuskan pada satu arah aksial spesimen.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah mengetahui pengaruh temperatur pemanasan terhadap koefisien perpindahan massa difusi (*diffusivity*) karbon pada proses *pack carburizing* baja AISI 3115.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari adanya penelitian ini antara lain:

1. Mengetahui fenomena perpindahan massa karbon pada proses *pack carburizing*.
2. Mengetahui pengaruh temperatur terhadap koefisien perpindahan massa difusi (*diffusifity*) karbon pada *pack carburizing*.
3. Hasil penelitian ini selanjutnya akan direkomendasikan kepada industri rekayasa material agar produksinya lebih efisien.
4. Sebagai dasar atau literatur penelitian selanjutnya.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Penelitian tentang difusi pada benda padat pertama kali dilakukan oleh Dr. Smith pada tahun 1951. Dr. Smith melakukan eksperimen untuk mengetahui bahwa proses difusi berlaku juga pada benda padat. Pada eksperimen tersebut, sebuah pipa besi ditempatkan dalam suatu lingkungan isothermal dengan suhu 1000 °C dimana gas *carburizing* ditiupkan ke dalam pipa ketika gas *decarburizing* mengalir ke luar dari pipa. Berdasarkan teknik analisa mikro, beliau mendapatkan konstanta difusi. Hasil tersebut bersesuaian dengan analisa yang dilakukan sebelumnya oleh Adolph Fick (Guodong, 1994).

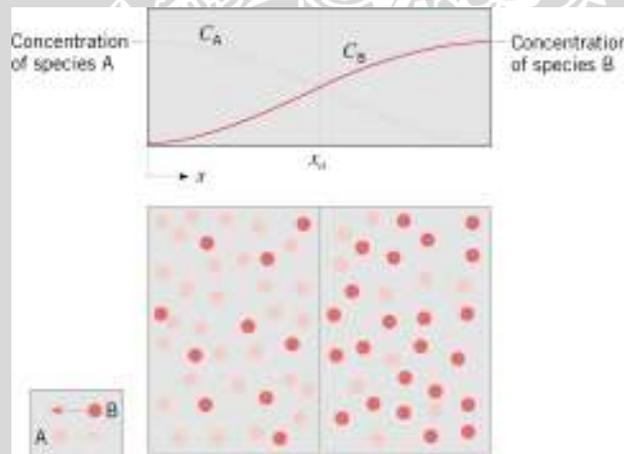
Sibanda *et al* (2005) melakukan penelitian terhadap karakteristik difusi karbon pada paduan Co-5 % Fe-C dalam lingkungan bertekanan tinggi. Pada penelitian tersebut spesimen padat dimasukkan ke dalam *belt-type apparatus* dengan variasi suhu 1290 °C – 1330 °C dan variasi tekanan 42 kbar-45 kbar untuk proses *couple diffusion*. Setelah itu spesimen diuji secara metalografi dan dilakukan penghitungan terhadap parameter-parameter yang diperoleh. Dari hasil pengujian dan penghitungan tersebut didapatkan kesimpulan bahwa koefisien difusi karbon meningkat seiring dengan meningkatnya tekanan. Begitu pun dengan konsentrasi karbon yang meningkat sebanding dengan peningkatan tekanan dan suhu dalam *belt-type apparatus*.

Sedangkan penelitian tentang koefisien difusi karbon pada proses *carburizing* dilakukan oleh Karabeltchikova (2007) dengan menggunakan pendekatan analisis numerik pada persamaan fluks difusi dengan metode *finite difference* yang dihitung dan disimulasikan ke dalam program Matlab. Metode ini mendapatkan hasil yang cukup akurat dan dapat diterapkan dalam penghitungan koefisien difusi karbon berdasarkan gradien konsentrasi karbon.

2.2 Definisi Perpindahan Massa (Difusi)

Perpindahan massa/difusi adalah gerakan molekul-molekul atau fluida yang disebabkan adanya perbedaan atau gradien konsentrasi, molekul tersebut berpindah dari daerah berkonsentrasi tinggi menuju konsentrasi rendah (Treybal, 1980).

Perpindahan massa (difusi) dapat digambarkan dengan suatu kondisi di mana dua buah zat A dan B berada pada suhu (T) dan tekanan (P) yang sama, namun dipisahkan oleh sekat. Pada saat sekat tersebut diambil, kedua zat A dan B akan berpindah secara difusi. Sebagaimana terlihat pada gambar 2.1, A memiliki konsentrasi yang lebih tinggi dari B sehingga jumlah molekul yang dimiliki per satuan volum lebih banyak. Konsentrasi A semakin menurun seiring meningkatnya x , sementara konsentrasi B semakin naik dengan meningkatnya x . Karena perpindahan massa/difusi terjadi searah dengan x , maka terjadilah *net transport* molekul A ke arah kanan dan B ke kiri. Setelah beberapa waktu tertentu, pergerakan molekul berhenti setelah tercapainya konsentrasi yang homogen antara A dan B.



Gambar 2.1 : Perpindahan massa (difusi) pada campuran gas biner
Sumber : Incropera, 1992: 785

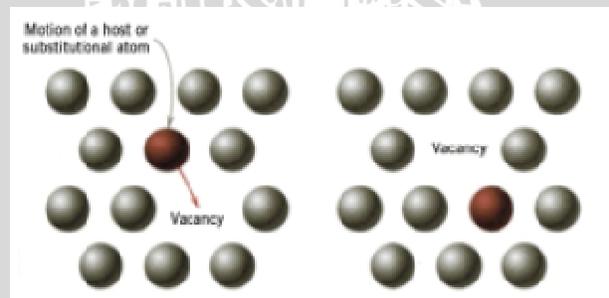
2.3 Mekanisme Difusi

Ditinjau berdasarkan perspektif atom, difusi merupakan perpindahan atom dari satu kisi ke kisi yang lain. Kenyataannya, atom dalam material padat bergerak secara konstan, berganti posisi secara cepat. Gerakan tersebut dapat terjadi apabila terpenuhi dua kondisi berikut:

- 1) Adanya kisi kosong yang berdekatan.
- 2) Atom tersebut harus mempunyai energi yang cukup untuk memutuskan ikatan dengan atom tetangganya yang kemudian menyebabkan terjadinya distorsi antara beberapa kisi selama proses perpindahan tersebut. Energi ini akan bergetar secara alami. Pada temperatur tertentu, sebagian atom-atom tersebut dapat melakukan gerak difusi karena adanya energi getar (aktivasi) ini. Jumlah atom yang bergerak akan bertambah seiring dengan bertambahnya suhu. Adapun gerakan yang paling sering terjadi pada difusi logam adalah difusi *vacancy* dan difusi intersisi.

2.3.1 Difusi *Vacancy*

Mekanisme perpindahan atom dari kisi normal menuju kisi kosong di dekatnya atau *vacancy*, disebut difusi *vacancy*. Seperti terlihat pada gambar 2.2, mekanisme difusi ini memerlukan suatu kisi kosong yang dapat terjadi karena adanya cacat atom pada material. Banyaknya difusi *vacancy* yang terjadi sebanding dengan peningkatan temperatur pemanasan. Atom-atom yang berpindah ke kisi kosong, akan menimbulkan kisi kosong dari tempatnya semula dan kemudian akan ditempati oleh atom yang lain di dekatnya. Mekanisme inilah yang terjadi pada peristiwa *self-diffusion* dan interdifusi. Sedangkan pada peristiwa *impurity* atom, kisi kosong akan disubstitusi oleh atom lain yang berukuran sama.



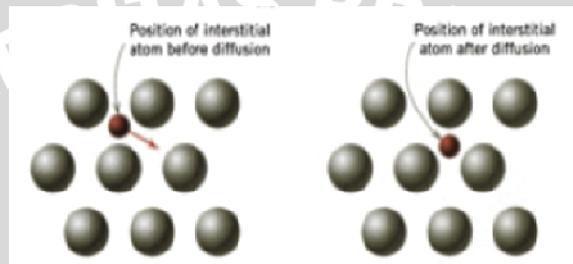
Gambar 2.2 : Difusi *Vacancy*
Sumber : Johnson, 2006:129

2.3.2. Difusi Intersisi

Merupakan perpindahan atom dari satu posisi antar atom (intersisi) *host* menuju posisi intersisi di dekatnya yang masih kosong sebagaimana terlihat pada

gambar 2.3. Mekanisme ini terjadi pada interdifusi atom pengotor seperti hidrogen, karbon, nitrogen dan oksigen yang mempunyai ukuran atom kecil sehingga memungkinkan untuk mengisi kisi intersisi.

Pada sebagian besar logam paduan, difusi intersisi terjadi lebih cepat daripada difusi *vacancy*, karena ukuran atom intersisi yang lebih kecil sehingga perpindahannya lebih cepat. Selain itu, kekosongan pada posisi intersisi jauh lebih banyak daripada *vacancy* sehingga kemungkinan perpindahan atom intersisi lebih besar daripada *vacancy*.



Gambar 2.3 : Difusi Intersisi
Sumber : Johnson, 2006:129

2.4 Difusi Pada Kondisi *Steady-state*

Difusi merupakan suatu proses yang tergantung waktu. Besarnya massa yang dipindahkan ke tempat lain dipengaruhi oleh fungsi waktu. Hal ini mempengaruhi seberapa cepat suatu difusi terjadi, atau biasa disebut laju perpindahan massa (fluks difusi). Besarnya fluks difusi (J) didefinisikan sebagai banyaknya massa (atau sebanding dengan banyaknya atom) yang berdifusi dan tegak lurus terhadap suatu luasan benda padat per satuan waktu. Rumus matematisnya:

$$J = \frac{m}{At} \quad (\text{Johnson, 2006:130}) \quad (2-1a)$$

Atau dalam bentuk diferensialnya:

$$J = \frac{1}{A} \frac{dm}{dt} \quad (\text{Johnson, 2006:130}) \quad (2-1b)$$

Keterangan:

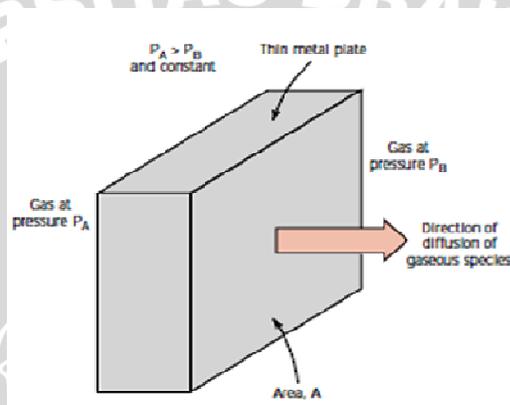
J = Fluks (laju) difusi ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)

m = Massa (kg)

A = Luasan yang dilalui (m^2)

t = Waktu difusi (s)

Apabila fluks difusi tidak berubah sesuai dengan pertambahan waktu, maka tercapailah suatu kondisi *steady-state*. Difusi dalam kondisi ini dapat dimisalkan dengan perpindahan atom gas melalui plat logam dimana konsentrasi (atau tekanan) di kedua permukaan plat konstan sebagaimana gambar 2.4.



Gambar 2.4 : *Steady-state diffusion* melalui plat tipis

Sumber : Johnson, 2006:130

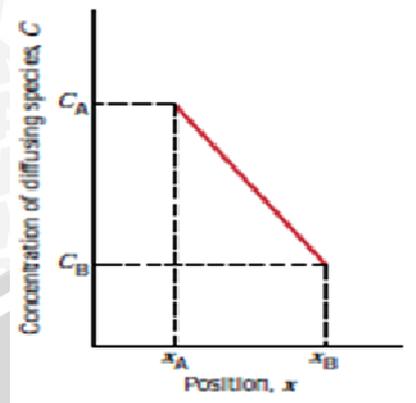
Jika konsentrasi pada percobaan di atas dibandingkan dengan posisi (jarak) dalam suatu grafik maka akan dihasilkan suatu kurva yang disebut gradien konsentrasi (gambar 2.5).

$$\text{Gradien konsentrasi} = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{C_A - C_B}{x_A - x_B} = \frac{dC}{dx} \quad (\text{Johnson, 2006:131}) \quad (2-3)$$

Keterangan:

ΔC = Beda konsentrasi (kg/m^3)

Δx = Jarak (kedalaman difusi) (m)



Gambar 2.5 : Gradien konsentrasi pada *steady-state diffusion*
Sumber : Johnson, 2006: 130

Rumus matematika untuk *steady-state diffusion* dalam satu arah aksial (x) didapatkan pada kondisi dimana fluks difusi sebanding dengan gradien konsentrasi, dan gradien konsentrasi tidak berubah mengikuti perubahan waktu. Keadaan ini disebut juga dengan Hukum 1 Fick (*Fick's first law*).

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (\text{Johnson, 2006:131}) \quad (2-4)$$

Keterangan:

J = Fluks difusi ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)

D = Koefisien difusi (*diffusivity*) (m^2/s)

C = Konsentrasi (kg/m^3)

x = Jarak difusi (m)

$J \sim dC/dx$ (fluks difusi tidak bergantung waktu)

Tanda (-) menandakan bahwa fluks difusi bergerak berlawanan dengan arah gradien konsentrasi.

2.5 Koefisien Difusi (*Diffusivity*)

Koefisien difusi (*diffusivity*) merupakan suatu konstanta yang sebanding dengan fluks berdasarkan difusi molekuler dan gradien konsentrasi pada suatu zat. *Diffusivity* dapat ditentukan berdasarkan hukum Fick atau beberapa persamaan kimia fisik lainnya (Johnson, 2006).

Koefisien difusi menggambarkan banyaknya substansi yang berdifusi pada suatu permukaan dalam waktu tertentu. Semakin besar koefisien difusi, maka proses difusi akan semakin cepat. Penentuan besarnya koefisien ini dapat membantu proses optimasi suatu industri dan memprediksi biaya yang diperlukan. Satuan SI untuk koefisien difusi adalah m^2/s .

2.6 Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Koefisien Difusi

Besarnya koefisien difusi dipengaruhi oleh beberapa faktor sesuai dengan kondisi yang diterapkan. Faktor-faktor tersebut akan berpengaruh pada rumus matematis dan metode pendekatan yang akan digunakan untuk menentukan koefisien difusi. Pada pembahasan ini faktor-faktor yang mempengaruhi koefisien difusi difokuskan pada jenis bahan dan temperatur.

2.6.1 Jenis Bahan Yang Berdifusi

Besarnya koefisien difusi (D) dalam perspektif *atomic*, mengindikasikan laju perpindahan atom secara difusi. Beberapa contoh koefisien pada *self diffusion* dan *interstitial diffusion* beberapa logam sebagaimana tercantum pada tabel 2.1. Jenis bahan yang berdifusi, juga jenis *host material* mempengaruhi besarnya koefisien difusi. Misalnya saja adanya perbedaan yang besar antara *self* difusi dan *interstitial* difusi karbon dalam besi α pada suhu 500°C . Nilai D pada *interstitial* difusi karbon ($2,4 \times 10^{-12}$) jauh lebih besar dari nilai D pada *self* difusinya ($3,0 \times 10^{-21}$). Hal ini karena *self* difusi terjadi dengan mekanisme *vacancy* sedangkan difusi karbon terjadi dengan mekanisme intersisi. Perbedaan mekanisme inilah yang memungkinkan perbedaan jumlah karbon yang berdifusi.

2.6.2 Temperatur

Temperatur mempunyai pengaruh yang sangat besar terhadap koefisien maupun laju difusi. Misalnya, pada *self* difusi Fe ke dalam $\alpha\text{-Fe}$, koefisien difusi meningkat sekitar 6 digit (dari $3,0 \times 10^{-21}$ menjadi $1,8 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$) pada peningkatan temperatur mulai 500°C menjadi 900°C (tabel 2.1).

Pengaruh temperatur terhadap koefisien difusi dijelaskan melalui rumus matematis berikut:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_d}{RT}\right) \quad (\text{Johnson, 2006: 136}) \quad (2-5)$$

Keterangan:

- D_o = Koefisien difusi pre-eksponensial (m^2/s)
- Q_d = Energi aktivasi pada difusi (J/mol , kal/mol , atau $eV/atom$)
- R = Konstanta gas.
= $8,31 J/mol.K$ atau $1987 kal/mol.K$ atau $8,62 \times 10^{-5} eV/atom.K$
- T = Temperatur mutlak (K)

Energi aktivasi adalah energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan gerak difusi pada suatu mol atom. Nilai energi aktivasi pada beberapa sistem difusi juga tercantum dalam tabel 2.1.

Tabel 2.1 Tabulasi Data Difusi

Diffusing Species	Host Metal	$D_o(m^2/s)$	Activation Energy Q_d		Calculated Values	
			kJ/mol	$eV/atom$	$T(^{\circ}C)$	$D(m^2/s)$
Fe	α -Fe (BCC)	2.8×10^{-4}	251	2.60	500	3.0×10^{-23}
					900	1.8×10^{-15}
Fe	γ -Fe (FCC)	5.0×10^{-5}	284	2.94	900	1.1×10^{-17}
					1100	7.8×10^{-16}
C	α -Fe	6.2×10^{-7}	80	0.83	500	2.4×10^{-12}
					900	1.7×10^{-10}
C	γ -Fe	2.3×10^{-5}	148	1.53	900	5.9×10^{-12}
					1100	5.3×10^{-11}
Cu	Cu	7.8×10^{-5}	211	2.19	500	4.2×10^{-19}
Zn	Cu	2.4×10^{-5}	189	1.96	500	4.0×10^{-18}
Al	Al	2.3×10^{-4}	144	1.49	500	4.2×10^{-14}
Cu	Al	6.5×10^{-5}	136	1.41	500	4.1×10^{-14}
Mg	Al	1.2×10^{-4}	131	1.35	500	1.9×10^{-13}
Cu	Ni	2.7×10^{-5}	256	2.65	500	1.3×10^{-22}

Sumber: Brandes, 1992.

Berdasarkan logaritma persamaan 2-5 dihasilkan:

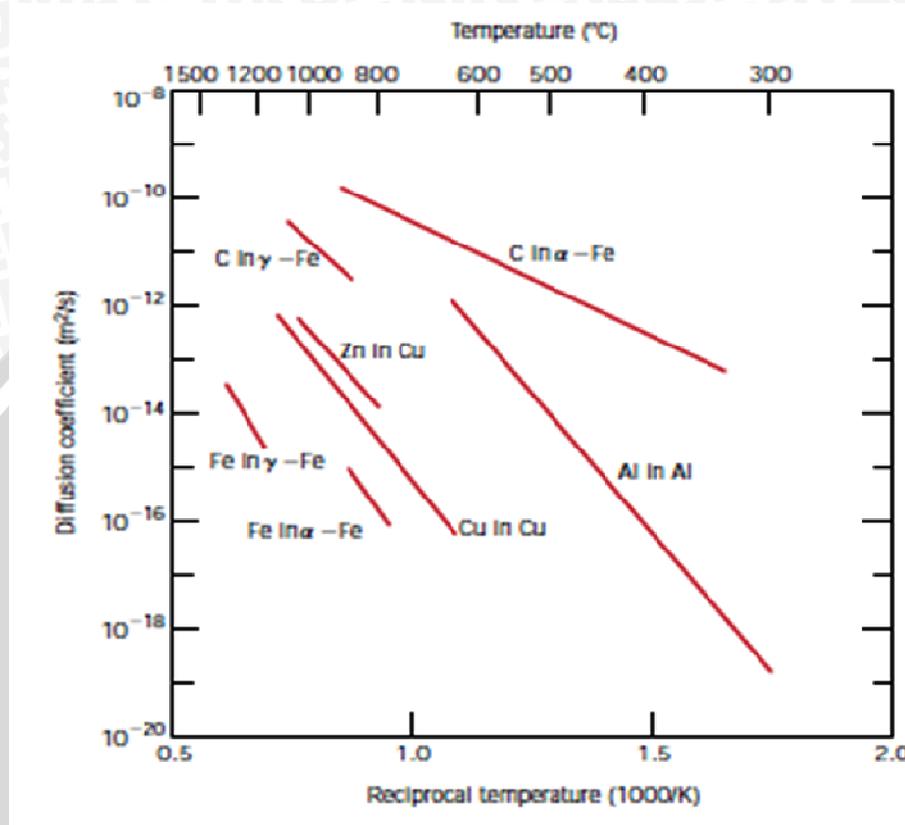
$$\ln D = \ln D_o - \frac{Q_d}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (\text{Johnson, 2006: 137}) \quad (2-6a)$$

Atau apabila diubah menjadi bentuk log 10

$$\log D = \log D_o - \frac{Q_d}{2.3R} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (\text{Johnson, 2006- 137}) \quad (2-6b)$$

Karena nilai D_o , Q_d dan R adalah konstan, maka persamaan 2-6b dapat diubah ke dalam bentuk persamaan linear. Persamaan tersebut diinterpretasikan ke dalam garis

linear yang menghubungkan antara pengaruh temperatur terhadap koefisien difusi seperti pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 : Hubungan antara koefisien difusi dengan resiprok temperatur mutlak pada beberapa logam

Sumber : Brandes, 1992

2.7 Pengertian *Carburizing*

Carburizing merupakan proses penambahan unsur karbon pada baja karbon rendah secara difusi sehingga karbon dari media *carburizing* akan masuk ke permukaan baja dan meningkatkan kadar karbon pada permukaan baja karbon rendah tersebut. Pada baja dengan kadar karbon tinggi ($> 1\% \text{ C}$), jumlah kandungan karbon pada permukaan baja sudah cukup tinggi sehingga karbon akan sulit terdifusi ke permukaan substrat. Difusi karbon umumnya dilakukan pada suhu $842\text{-}953^{\circ}\text{C}$ (Budinski, 1983: 304).

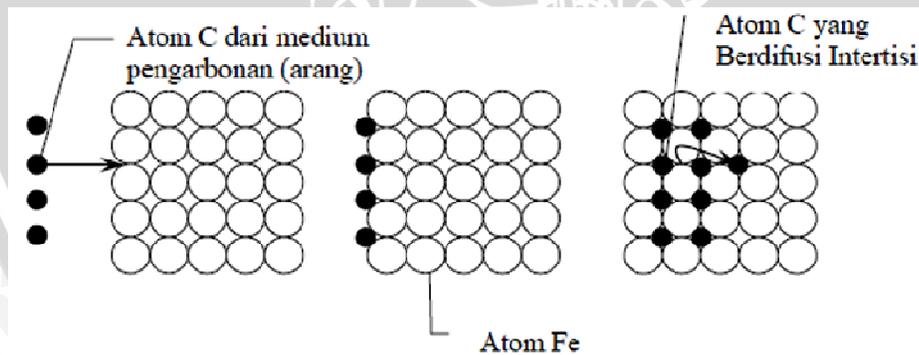
Carburizing dapat dilakukan dalam tiga cara, yaitu *pack carburizing* (karburising padat), *liquid carburizing* (karburising cair) dan *gas carburizing* (karburising gas).

2.7.1 Pack Carburizing

Pack Carburizing merupakan salah satu perlakuan dari *surface hardening* yang dilakukan dengan cara menambahkan karbon dalam bentuk padat ke dalam baja yang berkadar karbon rendah dengan mekanisme difusi. Proses difusi karbon ini terjadi karena adanya gradien konsentrasi antara lingkungan yang kaya karbon dengan karbon yang terkandung pada baja. Konsentrasi karbon pada lingkungan lebih besar daripada konsentrasi karbon pada baja sehingga terjadi proses pemindahan atom karbon aktif dari lingkungan ke dalam baja.

Pada proses ini benda kerja dimasukkan ke dalam kotak yang terbuat dari baja dan berisi *carburizer*. Kotak diisi bahan *carburizer* bubuk atau butiran-butiran arang yang diaktifkan dengan bahan-bahan kimia seperti: kalsium karbonat, barium karbonat atau sodium karbonat untuk membantu pembentukan karbon monoksida (CO).

Pada mekanisme *carburizing* terjadi difusi interstisi dimana atom karbon menempati kisi antara atom-atom besi. Mekanisme ini terjadi karena adanya suhu pembakaran yang mengakibatkan timbulnya energi aktivasi karbon. Energi tersebut memungkinkan atom karbon untuk berpindah dari satu kisi ke kisi interstisi yang lain. Sementara tempat yang ditinggalkan diisi oleh atom karbon yang lain. Mekanisme tersebut ditunjukkan pada gambar 2.7.

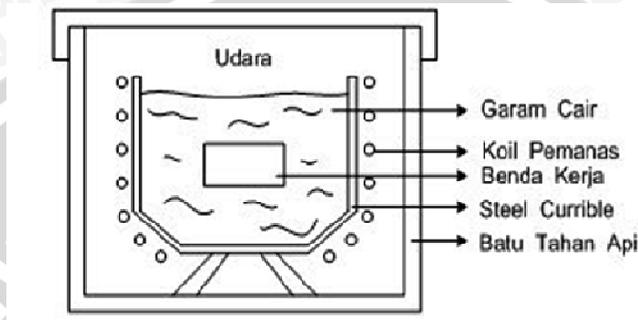


Gambar 2.7: Mekanisme difusi interstisi pada *pack carburizing*
Sumber : Aniq, 2007 : 38

2.7.2 Liquid Carburizing

Carburizing jenis ini menggunakan lelehan sianida (CN) pada logam berkarbon rendah yang dipanaskan dengan menggunakan belerang pemanas. Permukaan lelehan ditutup dengan grafit atau batubara untuk mengurangi hilangnya radiasi dan

dekomposisi sianida yang berlebihan. Selain sodium dan potasium sianida, lelehan juga dapat menggunakan barium klorida sebagai aktifator. Pada umumnya proses ini mampu menghasilkan ketebalan difusi karbon kurang dari 0,64 mm. Kelebihan dari proses *liquid carburizing* ini adalah pengerasan permukaan yang dihasilkan lebih merata. Proses *liquid carburizing* ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 : Proses *liquid carburizing*

Sumber : *Anonymous a./www.google.com/gambar/liquid_carburizing*

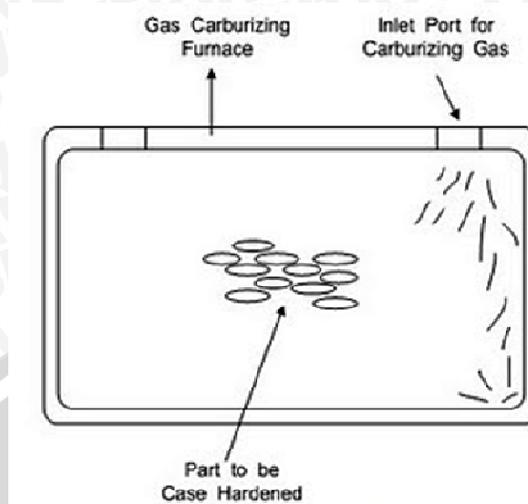
2.7.3 Gas Carburizing

Gas carburizing adalah proses *carburizing* dengan memanfaatkan gas alam, hidrokarbon atau gas karbit. Prosesnya yaitu benda yang akan diberi perlakuan *carburizing* dimasukkan ke dalam *furnace* pada temperatur 870-950°C. Atmosfer gas diproduksi dari cairan (metanol, isopropanol) atau gas hidrokarbon (metana, propana).

Komposisi gas dalam *gas carburizing* adalah:

- Nitrogen 40%
- Hidrogen 40%
- Karbon monoksida 10%
- Karbon dioksida 0,3%
- Metana 0,5%
- Uap air 0,8%
- Oksigen sisanya hingga 100%

Proses ini dilakukan dengan cara mengalirkan gas karbon ke dalam *furnace* sehingga atom-atom karbon akan menembus ke dalam logam dan menyebabkan permukaan logam lebih kaya karbon (gambar 2.9).



Gambar 2.9 : Proses *gas carburizing*

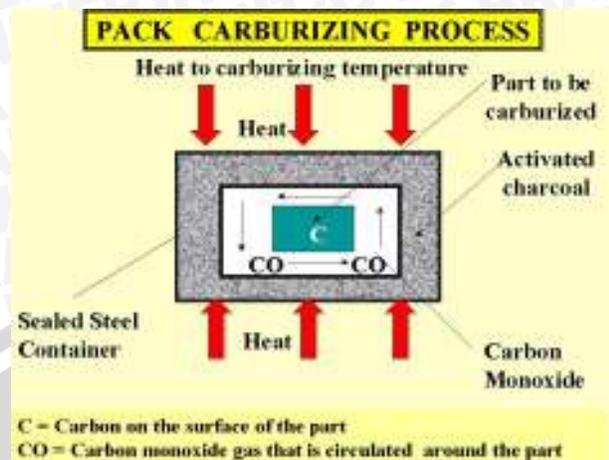
Sumber : *Anonymous b./www.google.com/gambar/gas_carburizing*

2.8 Proses *Pack Carburizing*

Proses *pack carburizing* memiliki tiga tahapan sama seperti perlakuan panas fisik lainnya. Proses tersebut meliputi *heating* (pemanasan), *holding* (penahanan) dan *quenching* (pendinginan cepat).

2.8.1 *Heating* (Pemanasan)

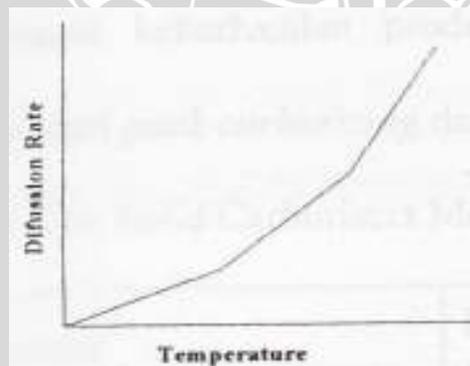
Setiap proses pengarbonan mencakup tiga proses dasar (Lakhtin, 1980), yang meliputi : proses yang terjadi pada medium eksternal berupa pembebasan elemen difusi menjadi atom (*ion*), kontak elemen difusi dengan permukaan matrik membentuk ikatan kimia, dan penetrasi elemen difusi menuju inti setelah menjadi keadaan jenuh dipermukaan matrik. Proses yang terjadi pada saat *heating* pada *pack carburizing* terlihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 : Proses *pack carburizing*

Sumber : *Anonymous c./www.oggix.com/proses_pack_carburizing*

Pada proses pemanasan, temperatur yang digunakan adalah temperatur austenit dimana paduan besi-karbon mempunyai bentuk kisi kristal kubik pemusatan sisi (fcc). Bentuk kisi ini mempunyai jarak atom yang lebih besar, sehingga kemungkinan terjadinya difusi intersisi oleh karbon lebih banyak (gambar 2.11). Kandungan karbon pada lingkungan akan terserap oleh material baja karbon rendah ini. Pada permukaan material, kandungan karbon tinggi dan akan berkurang dalam arah menuju inti.



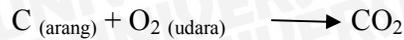
Gambar 2.11 : Pengaruh temperatur pemanasan terhadap laju difusi karbon

Sumber : Zakharov,1992:43

Selama pemanasan di dalam kotak *carburizing* terjadi dua macam gas yaitu:

- Gas karbon dioksida (CO_2)
- Gas karbon monoksida (CO)

Pada pemanasan awal terjadi pembakaran pada arang sehingga terbentuk ikatan antara zat arang dengan zat asam menurut persamaan:



Dari gas CO_2 yang dihasilkan akan menguap dan membakar lapisan *birch* arang yang ada dalam kotak. Selama pemanasan, *carburizer* dalam kotak mengalami reaksi yang menghasilkan gas karbon monoksida (CO) dan karbon dioksida (CO_2). Gas-gas ini terutama diperoleh sebagai hasil oksidasi karbon dari *carburizer* padat. Proses ini ditunjukkan dengan persamaan sebagai berikut:



Sebagai sumber CO_2 diperoleh dari katalis yang berupa BaCO_3 atau Na_2CO_3 sehingga akan terjadi proses:



Akibat semakin tingginya temperatur pemanasan maka CO akan lebih banyak terbentuk daripada CO_2 sehingga akan terjadi reaksi kimia sebagai berikut (Palallo, 1995):



Pada suhu pengarbonan reaksi ini selalu berlangsung ke kanan. Karbon monoksida bebas bereaksi dengan besi, kondisi ini seperti pada reaksi berikut:



Semakin banyak kandungan karbon di permukaan, atom karbon akan berpindah menuju inti melalui mekanisme difusi. Masuknya karbon ke dalam baja bergantung pada temperatur, waktu penahanan (*holding time*) dan bahan pengarbonan (Clark, 1961).

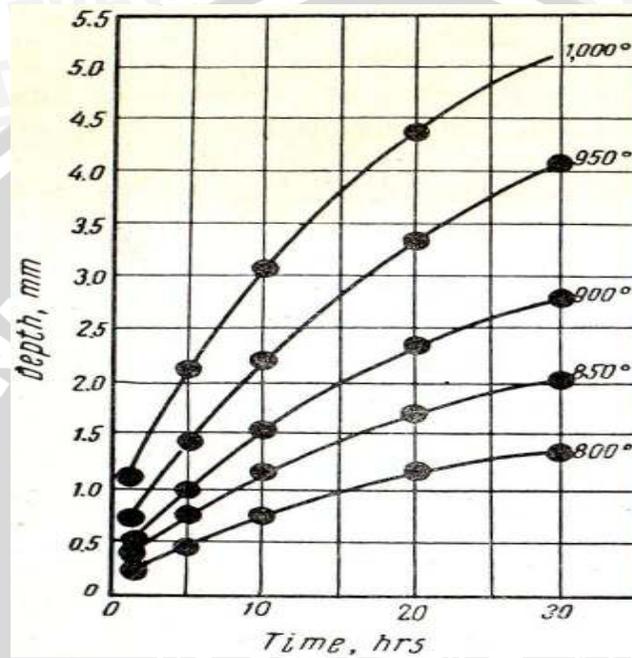
Pada pengarbonan padat dipakai arang yang dicampur dengan 10%-40% Na_2CO_3 atau BaCO_3 , baja dimasukkan ke dalam campuran inti kemudian ditempatkan dalam suatu kotak dan ditutup rapat. Setelah itu diatur temperatur pemanasannya antara 850-950°C (Surdia, 2000).

2.8.2 Holding

Holding time dilakukan untuk mendapatkan konsentrasi difusi yang lebih besar. Semakin lama waktu penahanan pada suhu tertentu, maka akan semakin banyak jumlah

karbon yang mengisi kisi intersisi baja. Selain itu, penahanan pada temperatur austenit akan menyebabkan struktur atom homogen dan kelarutan karbida akan semakin banyak sehingga baja akan terkeraskan secara maksimal.

Pada *pack carburizing*, *holding time* akan mempengaruhi kedalaman difusi karbon, seperti ditunjukkan pada gambar 2.12.



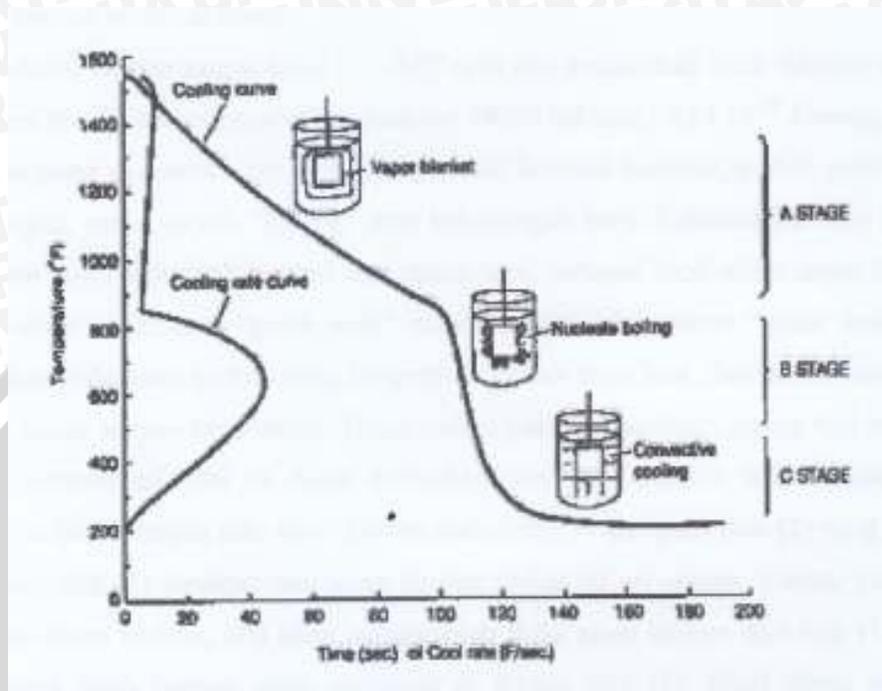
Gambar 2.12 : Pengaruh temperatur *carburizing* terhadap kedalaman difusi karbon
Sumber : Lakhtin, 1980:264

2.8.3 Quenching (Pendinginan Cepat)

Proses *carburizing* selalu diikuti oleh proses *quenching* atau pendinginan cepat, karena tujuan *carburizing* adalah untuk mendapatkan pengerasan permukaan. Untuk menghasilkan permukaan yang memiliki kekerasan tinggi harus terbentuk martensit atau sementit, maka diperlukan adanya *quenching*.

Pada perlakuan *quenching* terjadi percepatan pendinginan dari temperatur akhir perlakuan dan mengalami perubahan dari austenit menjadi ferit dan martensit untuk menghasilkan kekuatan dan kekerasan yang tinggi. Kekerasan maksimum yang dapat dicapai baja dengan perlakuan *quenching* hampir sepenuhnya ditentukan oleh konsentrasi karbon dan kecepatan pendinginan yang sama atau lebih tinggi dari kecepatan kritis untuk paduan tersebut. Banyak material dan cara yang dapat digunakan

dalam proses *quenching* pada baja. Adapun media *quenching* meliputi: air, air asin, oli, air-polimer dan beberapa kasus digunakan *inert gas*.



Gambar 2.13 : Mekanisme Pendinginan
Sumber : Totten, 1993: 70

Pada gambar 2.13 diperlihatkan laju pendinginan panas dari logam sebagai fungsi dari temperatur permukaan logam. Awal pencelupan tahap A, logam akan diselubungi selubung uap yang akan pecah saat logam mendingin. Perpindahan panas saat terbentuknya selubung uap tergolong buruk, sehingga logam akan mendingin dengan lambat pada tahap ini. Stabilitas dan lamanya proses pendinginan tahap A sangat dipengaruhi oleh agitasi, umumnya waktu pendinginan tahap ini berkurang dengan peningkatan agitasi. Kemudian tahap B, logam masih sangat panas dan air akan mendidih. Kecepatan pembentukan uap air menunjukkan sangat tingginya laju perpindahan panas. Tahap C merupakan tahap pendinginan konveksi dan konduksi, dimana permukaan logam telah bertemperatur di bawah titik didih air. Secara umum perpindahan panasnya lebih cepat daripada konveksi alamiah laju pendinginan.

2.9 Baja

Baja adalah logam paduan, logam besi sebagai unsur dasar dengan karbon sebagai unsur paduan utamanya. Kandungan unsur karbon dalam baja berkisar antara

0.2% hingga 2.1% berat sesuai *grade*-nya. Fungsi karbon dalam baja adalah sebagai unsur penguat dengan mencegah dislokasi bergeser pada kisi kristal (*crystal lattice*) atom besi. Unsur paduan lain yang biasa ditambahkan selain karbon adalah titanium, krom (*chromium*), nikel, vanadium, *cobalt* dan tungsten (wolfram). Dengan memvariasikan kandungan karbon dan unsur paduan lainnya, berbagai jenis kualitas baja bisa didapatkan. Penambahan kandungan karbon pada baja dapat meningkatkan kekerasan (*hardness*) dan kekuatan tariknya (*tensile strength*), namun di sisi lain membuatnya menjadi getas (*brittle*) serta menurunkan keuletannya (*ductility*) (www.wikipedia.org/baja.htm).

Peran baja dalam dunia industri sangat besar. Baja sebagai bahan baku pelat, pipa, lembaran dan sebagainya. Pembentukan baja dapat melalui proses pengecoran dan penempaan.

2.9.1 Klasifikasi Baja

Berdasarkan komposisi kimianya, baja dapat dibagi menjadi 2 kelompok besar yaitu baja karbon (baja tanpa paduan) dan baja paduan. Suatu baja disebut baja paduan bila mengandung sejumlah unsur paduan dalam jumlah tertentu sehingga mempengaruhi sifatnya. Unsur paduan yang sering digunakan pada baja paduan selain silikon dan mangan antara lain: krom, nikel, tungsten, molybdenum, vanadium, titanium, aluminium dan lain-lain.

Penambahan unsur paduan pada baja biasanya bertujuan untuk memperbaiki sifat mekanik, sifat tahan aus, sifat tahan korosi, *machinability* maupun memperbaiki sifat *hardenability*.

Dengan menggabungkan 2 klasifikasi (berdasarkan komposisi kimia dan tujuannya) akan diperoleh klasifikasi 5 kelompok baja (Zakharov, 1992) yaitu:

- *Carbon structural steels*
- *Carbon tool steels*
- *Alloyed structural steels*
- *High alloyed structural steels*
- Baja dengan properti fisik spesial dan *ico-chemical*

2.9.2 Penamaan Baja Dalam Standar AISI (*American Iron and Steel Institute*)

1. Angka pertama menunjukkan jenis baja.

Tabel 2.2 Penamaan Baja Berdasarkan Standar AISI

SAE designation	Type
1xxx	Carbon steels
2xxx	Nickel steels
3xxx	Nickel-chromium steels
4xxx	Molybdenum steels
5xxx	Chromium steels
6xxx	Chromium-vanadium steels
7xxx	Tungsten steels
8xxx	Nickel-chromium-vanadium steels
9xxx	Silicon-manganese steels

Sumber : *Anonymous e./www.wikipedia.com/SAE_steels_grades.htm*

2. Angka kedua menunjukkan:

a. Kadar unsur paduan untuk baja paduan sederhana.

Misal: AISI 31xx = Ni 1,25%, Cr 0,65% atau 0,80%.

b. Modifikasi jenis baja paduan untuk baja paduan yang kompleks.

Misal: AISI 40xx = baja molibdenum; AISI 41xx = baja krom-molibdenum.

3. Dua angka atau tiga angka terakhir menunjukkan kadar karbon perseratus persen.

Misal: AISI 3115 = baja nikel-krom dengan 0,15% C.

4. Bila terdapat huruf di depan angka maka huruf tersebut menunjukkan proses pembuatan bajanya.

Misal: B = *Acid bessemer carbon steel*

C = *Basic open-hearth carbon steel*

E = *Basic electric furnace process*

2.9.3 Baja Paduan Rendah

Baja paduan rendah biasanya digunakan untuk mencapai *hardenability* lebih baik, yang pada gilirannya akan meningkatkan sifat mekanis lainnya. Baja ini juga mempunyai ketahanan korosi dalam kondisi lingkungan tertentu. Apabila kandungan

karbon pada baja paduan rendah ini ditingkatkan pada kisaran 0,10% menjadi 0,30%, bersamaan dengan pengurangan beberapa elemen paduan maka akan meningkatkan *weldability* dan sifat mampu bentuk baja dengan tetap menjaga kekuatannya (Surdia, 2000). Baja paduan ini sebagian besar digunakan sebagai bahan pembuat komponen-komponen otomotif dan konstruksi.

2.10 Hipotesis

Perbedaan temperatur pemanasan pada proses *pack carburizing* akan berpengaruh terhadap perpindahan atom karbon pada difusi intersisi. Perpindahan atom ini akan mempengaruhi gradien konsentrasi karbon, dimana besarnya gradien konsentrasi karbon akan berpengaruh terhadap nilai koefisien difusi (*diffusivity*) atom karbon.



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental (*experimental research*), yaitu melakukan pengamatan untuk mencari data sebab-akibat dalam suatu proses melalui eksperimen sehingga dapat mengetahui pengaruh variasi temperatur pemanasan pada *pack carburizing* baja karbon rendah (AISI 3115) terhadap koefisien difusi (*diffusivity*) karbon.

3.2 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Variabel Bebas (*Independent variable*)

Adalah variabel yang tidak dipengaruhi oleh variabel yang lain. Besarnya variabel ini ditentukan sebelum penelitian. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah temperatur pemanasan sebesar 800°C, 850°C, 900°C dan 950°C.

2. Variabel Terikat (*Dependent Variable*)

Adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas yang telah ditentukan. Nilai dari variabel terikat diketahui setelah melakukan penelitian. Adapun variabel terikat yang diamati dalam penelitian ini adalah koefisien perpindahan massa difusi (*diffusivity*).

3. Variabel Terkontrol (*Controlled Variable*)

Adalah variabel yang nilainya dijaga konstan selama penelitian. Variabel terkontrol dalam penelitian ini antara lain:

- Komposisi *carburizer* yang digunakan dalam penelitian adalah 90% arang tempurung kelapa dan 10% barium karbonat (BaCO_3)
- *Holding time* selama 5 jam
- Media *quenching* yang digunakan adalah oli SAE 30
- Ukuran serbuk *carburizer* : *mesh* 60-100 μm dan *mesh* 500-560 μm

3.3 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada tanggal 22 Nopember–16 Desember 2011.

Tempat pelaksanaan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Laboratorium Pengujian Bahan Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, untuk proses *pack carburizing* dan penentuan jarak difusi karbon.
2. Laboratorium Pengecoran Logam Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, untuk menentukan ukuran serbuk *carburizer*.
3. Laboratorium Sentral Ilmu Hayati Universitas Brawijaya untuk menentukan massa spesimen sebelum dan sesudah perlakuan *pack carburizing*.
4. PT Barata Indonesia untuk pengujian kadar karbon pada spesimen.

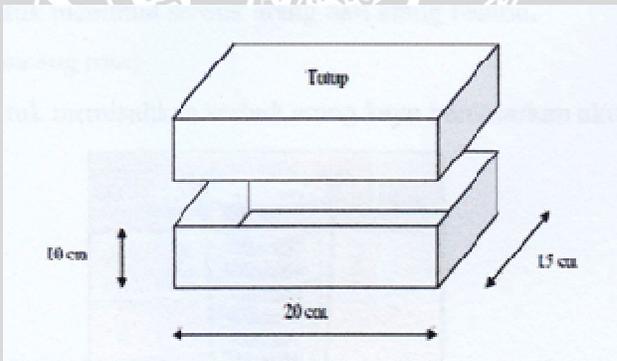
3.4 Alat dan Bahan Penelitian

3.4.1 Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

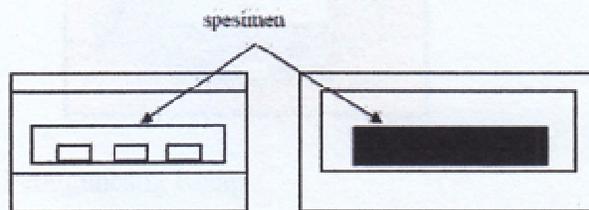
1. Kotak *carburizing*

Kotak *carburizing* yang digunakan dalam penelitian ini dibuat dari pelat dengan tebal 3 mm. Bentuk dari kotak dan dimensi diperlihatkan pada gambar 3.1 di bawah ini:



Gambar 3.1: Kotak *carburizing*

Sedangkan peletakan spesimen pada kotak *carburizing* dapat dilihat pada gambar 3.2 berikut:



Gambar 3.2 : Peletakan spesimen dalam kotak *carburizing*

2. Dapur listrik

Digunakan dalam proses pemanasan dan *holding* pada spesimen *pack carburizing*. Dapur listrik yang digunakan seperti pada gambar 3.3.



Gambar 3.3 : Dapur listrik

Spesifikasi :

- Merk : OPENBAU HOFMAN
- Tipe : E/90
- Suhu maks. : 1.100 °C
- Buatan : Austria
- Voltage/Daya : 220 Volt/3.3 kW

3. Penumbuk dan pengaduk

Digunakan untuk membuat serbuk arang dari arang tempurung kelapa.

4. Mesin pengguncang rotap

Digunakan untuk memisahkan serbuk arang tempurung kelapa berdasarkan ukuran *mesh*-nya. Mesin pengguncang rotap yang digunakan merupakan rotap tipe VS-1 seperti terlihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 : Mesin pengguncang rotap

Spesifikasi:

- Jenis : Rotap
- Tipe : VS 1
- Merk : Retsch
- Voltase : 220 V
- Daya : 430 Watt
- Buatan : Jerman Barat
- Artikel : 30 40 0010
- No. Seri : 01849038
- Frekuensi : 50 Hz

5. Timbangan digital

Digunakan untuk menentukan prosentase bahan-bahan *carburizer*.

6. Timbangan analitik

Digunakan untuk mengukur massa spesimen sebelum diberi perlakuan dan spesimen yang telah mengalami *carburizing*. Timbangan analitik yang digunakan seperti pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 : Timbangan analitik

Spesifikasi:

- Model : AUX 220
- Merk : Shimadzu
- Max : 220 gr
- Min : 10 mg
- Error : 1 mg

7. *Timer*

Digunakan untuk mengukur waktu pemanasan dan waktu *holding*.

8. Mesin pemotong (*Hack shaw*)

Digunakan untuk memotong spesimen.

9. *Centrifugal sand paper machine*

Digunakan untuk menghaluskan permukaan spesimen. Alat tersebut seperti terlihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 : *Centrifugal sand paper machine*

Spesifikasi :

- Merk : Saphir
- Buatan : Jerman
- Diameter : 15 cm
- Putaran : 1200 rpm

10. *Emission spectrometer*

Digunakan untuk mengetahui kadar konsentrasi karbon dan komposisi kimia lainnya dalam spesimen *pack carburizing*. *Emission spectrometer* yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 : *Emission Spectrometer*

Spesifikasi:

- Model : GVM-514S
- Merk : Shimadzu
- Tahun pembelian : 1994
- Kapasitas penangkapan unsur: 27 unsur

11. Mikroskop logam

Digunakan untuk melihat struktur mikro dari baja *pack carburizing* dan mengamati kedalaman difusi (x) karbon. Hasil dari pengujian ini ditampilkan dalam sebuah foto. Mikroskop logam yang digunakan seperti terlihat pada gambar 3.8 berikut:



Gambar 3.8 : Mikroskop logam

Spesifikasi:

- Merk : Olympus
- Buatan : Jerman
- Perbesaran : 10x, 50x, 100x, 200x

3.4.2 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Baja AISI 3115

Baja AISI 3115 merupakan jenis baja paduan rendah. Baja paduan ini sebagian besar digunakan sebagai bahan pembuat komponen-komponen otomotif dan konstruksi. Berdasarkan pengujian komposisi kimia menggunakan *Emission Spectrometer*, baja AISI 3115 mengandung unsur-unsur paduan sebagai berikut:

Tabel 3.1 Kandungan unsur baja AISI 3115

No.	Nama Unsur	Simbol	Kandungan Unsur (%)
1.	Besi	Fe	95.895
2.	Karbon	C	0.153
3.	Silikon	Si	0.195
4.	Mangan	Mn	0.474
5.	Fosfor	P	0.010
6.	Sulfur	S	0.001
7.	Tembaga	Cu	0.274
8.	Nikel	Ni	1.408
9.	Kromium	Cr	1.567
10.	Molibdenum	Mo	0.021
11.	Vanadium	V	0.002

2. Carburizer

Carburizer yang digunakan berupa arang tempurung kelapa pada komposisi 90% dengan ukuran *mesh* 60-100 μm dan *mesh* 500-560 μm dan barium karbonat dengan komposisi 10%.

Komposisi dari *carburizer* dapat bervariasi sesuai standar yang berlaku. Macam-macam komposisi *carburizing* pada *pack carburizing* dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Macam-macam komposisi *carburizer* (berdasarkan persentase berat)

No.	Charcoal	Barium Carbonat	Soda ash	Calcium carbonate	Coke	Turf coke	Fuel Oil
1	74-78	12-15	1.0-1.5	3.5	-	-	4.5-5.0
2	65	10	1	1	20	-	3
3	87	-	10	3	-	-	-
4	85-90	-	10-15	-	-	-	-
5	90	10	-	-	-	-	-
6	-	-	10-15	-	-	85-90	-
7	60	40	-	-	-	-	-
8	45	12	-	-	43	-	-
9	98	2	-	-	-	-	-

Sumber: Kamenichny, 1969: 105

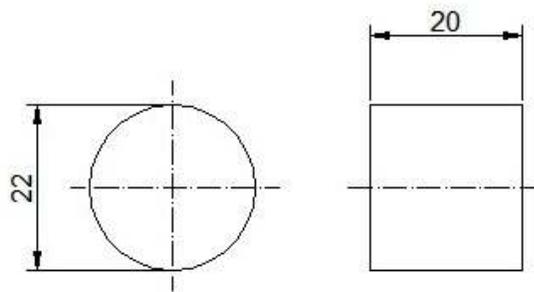
3. Batu hijau dan autosol

Digunakan untuk mengkilapkan permukaan spesimen *pack carburizing*.

3.5 Prosedur Penelitian

3.5.1 Pembuatan Spesimen

Pada penelitian ini digunakan spesimen berbentuk silinder dengan diameter 22 mm dan tebal 20 mm. Adapun dimensi spesimen seperti pada gambar 3.9.



Satuan: mm

Gambar 3.9 : Dimensi spesimen uji

Spesimen yang digunakan sejumlah 27 buah dengan ketentuan:

- 3 buah spesimen *raw material* untuk perbandingan uji konsentrasi.
- 12 buah spesimen dengan perlakuan *pack carburizing* pada temperatur 800°C, 850°C, 900°C dan 950°C dengan ukuran serbuk *carburizer* pada *mesh* 60-100 µm.
- 12 buah spesimen dengan perlakuan *pack carburizing* pada temperatur 800°C, 850°C, 900°C dan 950°C dengan ukuran serbuk *carburizer* pada *mesh* 500-560 µm.



(a)

(b)

Gambar 3.10 : Spesimen uji

(a) Spesimen tanpa perlakuan

(b) Spesimen setelah perlakuan *pack carburizing*

3.5.2 Pelaksanaan *Pack Carburizing*

Prosedur pelaksanaan *pack carburizing* adalah sebagai berikut:

1. Kotak baja disiapkan dan dibersihkan dari terak-terak yang masih menempel.
2. Menyiapkan arang tempurung kelapa dengan ukuran *mesh* 60-100µm.
3. Menyiapkan barium karbonat.
4. Membersihkan spesimen dari terak atau kotoran yang masih menempel.
5. Serbuk arang dan barium karbonat ditimbang sesuai dengan komposisi yang ditentukan.
6. Serbuk arang dan barium karbonat yang telah ditimbang dicampur secara merata dan dimasukkan ke dalam kotak baja.
7. Setelah semua bahan dimasukkan ke dalam kotak baja, masukkan kotak baja ke dalam *furnace*.
8. Tentukan temperatur pemanasan sebesar 800°C dan *holding* selama 5 jam.

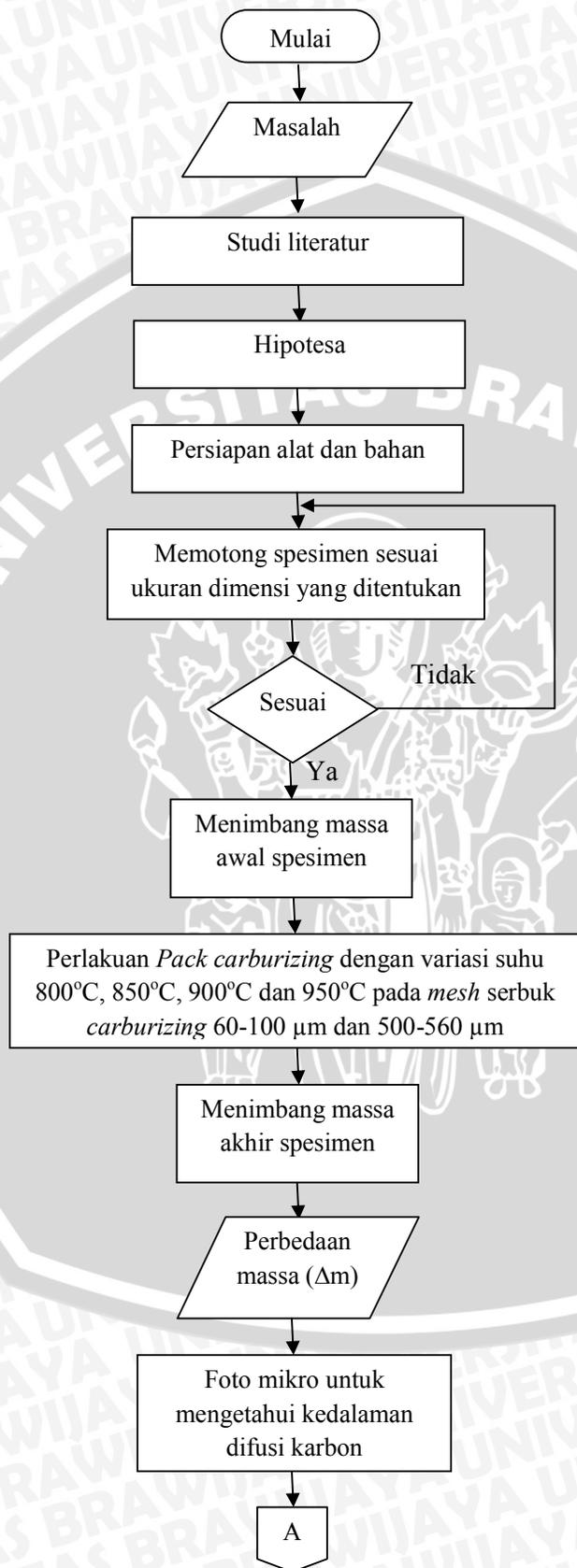
9. Setelah selesai proses *holding*, kotak baja dikeluarkan dari *furnace*.
10. Spesimen diambil dari dalam kotak baja dan dilakukan *quenching* pada media oli.
11. Ulangi langkah 1 sampai 10 dengan variasi suhu pemanasan 850°C, 900°C dan 950°C.
12. Ulangi langkah 1 sampai 11 pada *mesh carburizer* berukuran 500-560 µm.

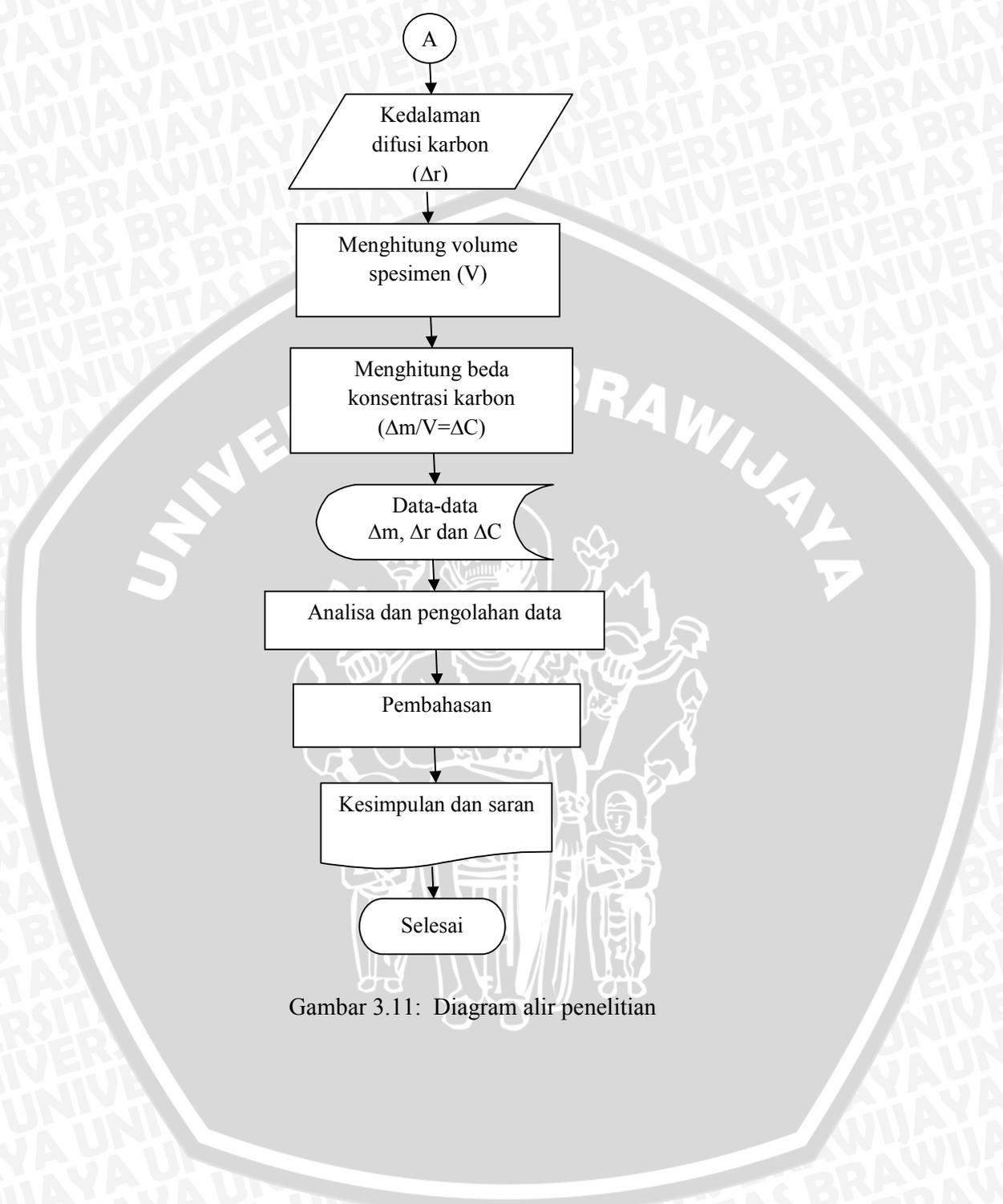
3.5.3 Penentuan Koefisien Perpindahan Massa Difusi

Untuk memperoleh data koefisien perpindahan massa difusi (*diffusivity*) diperlukan beberapa langkah pengujian. Langkah-langkah yang harus dilakukan antara lain:

1. Membersihkan kotoran dan terak yang menempel pada spesimen yang telah dipotong.
2. Mengukur massa awal tiap-tiap spesimen dengan timbangan analitik.
3. Melakukan perlakuan *pack carburizing* pada spesimen dengan variasi suhu 800°C, 850°C, 900°C dan 950°C pada *mesh* serbuk *carburizer* 60-100 µm dan 500-560 µm.
4. Mengukur massa spesimen hasil *pack carburizing* dengan timbangan analitik.
5. Menghitung selisih massa awal dan massa akhir spesimen hasil *pack carburizing* sehingga diperoleh data perubahan massa (Δm).
6. Melakukan pengujian foto mikro pada tiap-tiap spesimen untuk mendapatkan data kedalaman difusi karbon (Δr).
7. Melakukan perhitungan selisih massa karbon berdasarkan data perubahan massa spesimen sebelum dan setelah proses *pack carburizing*.
8. Menghitung volume tiap-tiap spesimen.
9. Melakukan perhitungan perbedaan konsentrasi karbon (ΔC) dengan membandingkan selisih massa karbon dan volume spesimen.
10. Mengolah data-data yang didapatkan dan mengkonversikannya ke dalam perhitungan berdasarkan hukum 1 Fick sehingga didapatkan nilai koefisien perpindahan massa difusi (*diffusivity*).

3.6 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.11: Diagram alir penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

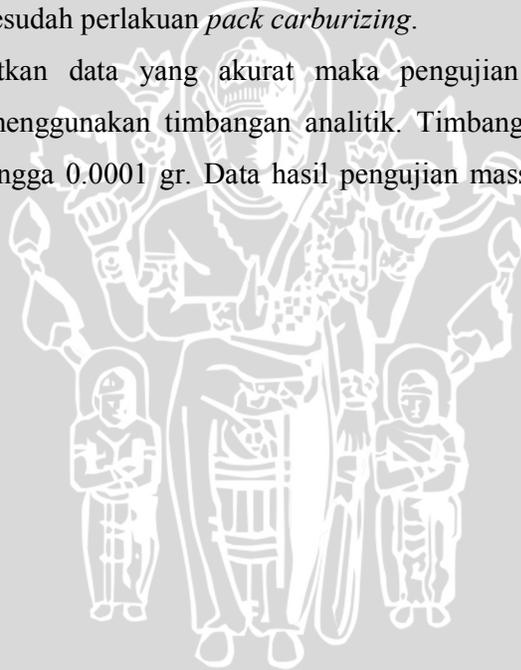
4.1 Data Hasil Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan beberapa pengujian untuk mendapatkan koefisien difusi karbon pada proses *pack carburizing*. Pengujian yang telah dilakukan antara lain: pengujian massa, pengujian komposisi kimia dan pengujian foto mikro pada spesimen.

4.1.1 Data Hasil Pengujian Massa

Untuk menghitung kecepatan difusi (fluks) karbon pada spesimen hasil *pack carburizing* diperlukan data perbedaan massa (Δm) per luasan penampang spesimen (A). Untuk itu dilakukan pengujian massa dengan cara menimbang massa spesimen pada saat sebelum dan sesudah perlakuan *pack carburizing*.

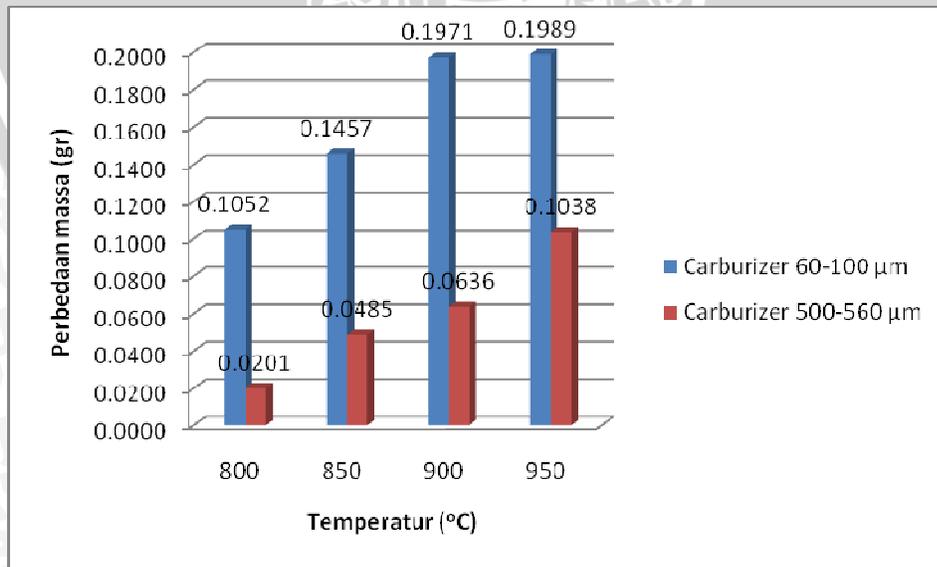
Untuk mendapatkan data yang akurat maka pengujian dilakukan dengan menimbang spesimen menggunakan timbangan analitik. Timbangan tersebut mampu mengkalkulasi massa hingga 0.0001 gr. Data hasil pengujian massa ditunjukkan pada tabel 4.1:



Tabel 4.1 Hasil pengujian massa spesimen sebelum dan setelah perlakuan *pack carburizing* dengan variasi temperatur pemanasan.

Suhu	Massa spesimen (gr)							
	Carburizer 60-100 μm				Carburizer 500-560 μm			
	No. spesimen	m awal	m akhir	Δm	No. spesimen	m awal	m akhir	Δm
800°C	1	64.2586	64.3655	0.1069	13	57.9043	57.9218	0.0175
	2	63.6438	63.7397	0.0959	14	58.0452	58.0681	0.0229
	3	65.0173	65.1302	0.1129	15	56.9043	56.9242	0.0199
Rata-rata		64.3066	64.4118	0.1052		57.6179	57.6380	0.0201
850°C	4	62.8284	62.9747	0.1463	16	59.2291	59.2759	0.0468
	5	63.0506	63.2013	0.1507	17	57.1498	57.2022	0.0524
	6	61.0143	61.1544	0.1401	18	59.4165	59.4627	0.0462
Rata-rata		62.2977	62.4435	0.1457		58.4260	58.4754	0.0485
900°C	7	61.0066	61.2067	0.2001	19	58.7118	58.7613	0.0495
	8	59.1335	59.3245	0.1910	20	55.3778	55.4392	0.0614
	9	60.7340	60.9341	0.2001	21	59.0575	59.1375	0.0800
Rata-rata		60.6312	60.8285	0.1971		57.8881	57.9509	0.0636
950°C	10	59.9427	60.1463	0.2036	22	62.3227	62.4420	0.1193
	11	56.7203	56.9125	0.1922	23	64.6904	64.7769	0.0865
	12	61.7535	61.9543	0.2008	24	61.2115	61.3172	0.1057
Rata-rata		59.1323	59.3309	0.1989		62.7415	62.8454	0.1038

Untuk mempermudah analisa data maka perbedaan massa spesimen sebelum dan setelah *pack carburizing* disajikan dalam bentuk diagram batang pada gambar 4.1 di bawah ini:



Gambar 4.1: Pengaruh Temperatur Pemanasan Terhadap Perbedaan Massa Spesimen Hasil Pack Carburizing

4.1.2 Data Hasil Perhitungan Konsentrasi Karbon (ΔC)

Proses difusi pada *pack carburizing* merupakan suatu proses perpindahan massa karbon dari lingkungan yang berkonsentrasi karbon tinggi menuju ke dalam spesimen yang konsentrasi karbonnya lebih rendah sehingga terjadi peningkatan kadar karbon di dalam spesimen. Hal ini menyebabkan adanya gradien konsentrasi karbon sebelum dan setelah perlakuan *pack carburizing*. Gradien konsentrasi tersebut secara nyata dapat diketahui berdasarkan penambahan nilai massa karbon setelah proses *pack carburizing*.

Pada peristiwa difusi ini, konsentrasi didefinisikan sebagai jumlah massa zat yang berdifusi atau berpindah per satuan volume benda padat (kg/m^3 atau gr/cm^3). Sehingga untuk memperoleh data gradien konsentrasi karbon pada *pack carburizing* diperlukan perhitungan massa karbon yang berdifusi dibagi dengan volume spesimen.

- Perhitungan massa karbon (m_c)

Massa karbon dihitung berdasarkan penambahan massa spesimen (Δm). Karena *pack carburizing* merupakan perlakuan penambahan karbon pada spesimen, maka penambahan massa pada *carburized* spesimen diasumsikan sebagai massa karbon. Perubahan massa karbon dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Tabulasi data perubahan massa karbon (Δm_c)

Suhu	Massa spesimen (gr)							
	Carburizer 60-100 μm				Carburizer 500-560 μm			
	No. spesimen	m_{awal}	m_{akhir}	Δm_c	No. spesimen	m_{awal}	m_{akhir}	Δm_c
800°C	1	64.2586	64.3655	0.1069	13	57.9043	57.9218	0.0175
	2	63.6438	63.7397	0.0959	14	58.0452	58.0681	0.0229
	3	65.0173	65.1302	0.1129	15	56.9043	56.9242	0.0199
850°C	4	62.8284	62.9747	0.1463	16	59.2291	59.2759	0.0468
	5	63.0506	63.2013	0.1507	17	57.1498	57.2022	0.0524
	6	61.0143	61.1544	0.1401	18	59.4165	59.4627	0.0462
900°C	7	61.0066	61.2067	0.2001	19	58.7118	58.7613	0.0495
	8	59.1335	59.3245	0.1910	20	55.3778	55.4392	0.0614
	9	60.7340	60.9341	0.2001	21	59.0575	59.1375	0.0800
950°C	10	59.9427	60.1463	0.2036	22	62.3227	62.4420	0.1193
	11	56.7203	56.9125	0.1922	23	64.6904	64.7769	0.0865
	12	61.7535	61.9543	0.2008	24	61.2115	61.3172	0.1057

- Perhitungan Volume Spesimen (V)

Spesimen yang digunakan merupakan silinder pejal dengan diameter 22 mm dan tebal ±20 mm. Rumus volume silinder pejal adalah:

$$V = \frac{1}{4} \cdot \Pi \cdot d^2 \cdot t \tag{4-1}$$

Keterangan:

V = Volume (m³)

Π = Phi=3.14

d = Diameter spesimen (m)

t = Tebal spesimen (m)

Contoh perhitungan:

Sebuah spesimen berbentuk silinder pejal berdiameter 22 mm dan tebal 19.68 mm maka volume spesimen tersebut dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$V = \frac{1}{4} \cdot \Pi \cdot d^2 \cdot t$$

$$V = \frac{1}{4} \cdot 3.14 \cdot (22)^2 \cdot 19.68$$

$$V = 7477.219 \text{ mm}^3$$

$$V = 7.477 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Hasil perhitungan massa karbon, volume spesimen dan konsentrasi karbon ditabulasikan dalam tabel 4.3.

Tabel 4.3 Data massa karbon, volume spesimen dan konsentrasi karbon

Suhu (°C)	Carburizer 60-100 μm			Carburizer 500-560 μm		
	Δm _c (kg)	V (m ³)	ΔC (kg/m ³)	Δm _c (kg)	V (m ³)	ΔC (kg/m ³)
800	0.0001069	8.279E-06	12.91235	0.0000175	7.477E-06	2.34044
	0.0000959	8.290E-06	11.56775	0.0000229	7.504E-06	3.05178
	0.0001129	8.385E-06	13.46408	0.0000199	7.363E-06	2.70262
850	0.0001463	8.119E-06	18.01876	0.0000468	7.606E-06	6.15271
	0.0001507	8.138E-06	18.51735	0.0000524	7.367E-06	7.11276
	0.0001401	7.872E-06	17.79645	0.0000462	7.652E-06	6.03764
900	0.0002001	7.865E-06	25.44261	0.0000495	7.641E-06	6.47855
	0.0001910	7.652E-06	24.96082	0.0000641	7.150E-06	8.96444
	0.0002001	7.975E-06	25.09110	0.0000800	7.656E-06	10.44961
950	0.0002036	7.774E-06	26.19130	0.0001193	8.066E-06	14.79025
	0.0001922	7.344E-06	26.17017	0.0000865	8.351E-06	10.35794
	0.0002008	7.853E-06	25.56867	0.0001057	7.941E-06	13.31109

4.1.3 Data Hasil Pengujian Foto Mikro

Pengujian foto mikro dilakukan untuk mengetahui jarak kedalaman difusi atom karbon ke dalam spesimen *pack carburizing*. Karena spesimen yang digunakan berbentuk silinder pejal maka jarak kedalaman difusi diasumsikan sebagai jari-jari lingkaran (r) sesuai dengan penampang spesimen. Pengambilan foto mikro menggunakan mikroskop logam dengan perbesaran 100x.



(a)

(b)

Gambar 4.2 : Contoh hasil pengujian foto mikro

(a) Spesimen tanpa perlakuan

(b) Spesimen hasil *pack carburizing* pada suhu 950°C

Hasil pengujian foto mikro kemudian diolah menggunakan *software* Inventor untuk mendapatkan dimensi ukuran yang akurat. Hasil pengukuran jarak kedalaman difusi ditabulasikan dalam tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil pengujian kedalaman difusi

Suhu (°C)	Kedalaman Difusi/jari-jari (m)					
	Carburizer 60-100 μm			Carburizer 500-560 μm		
	r_1	r_2	r_3	r_1	r_2	r_3
800	5.297E-05	9.561E-05	8.656E-05	1.008E-04	8.527E-05	7.752E-05
850	1.533E-04	1.279E-04	1.486E-04	1.305E-04	8.656E-05	1.318E-04
900	1.576E-04	1.641E-04	1.512E-04	1.602E-04	1.473E-04	1.641E-04
950	2.377E-04	2.003E-04	2.649E-04	1.964E-04	1.990E-04	1.861E-04

4.1.4 Data Hasil Perhitungan Koefisien Difusi

Koefisien difusi (*diffusivity*) karbon dalam proses *pack carburizing* pada penelitian ini dihitung berdasarkan Hukum I Fick dengan pengembangan *direct flux methode* yang dapat dijabarkan ke dalam bentuk persamaan berikut:

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (2-4)$$

Keterangan:

- J = Fluks difusi (kg/m².s)
- D = Koefisien difusi (*diffusivity*) (m²/s)
- C = Konsentrasi (kg/m³)
- x = Jarak difusi (m)

Dimana J (fluks difusi) adalah perbedaan massa dibagi dengan hasil perkalian antara luas penampang (A) dengan waktu difusi (t).

$$\frac{\Delta m}{A.t} = -D \frac{\partial C}{\partial r} \quad (4-2)$$

Keterangan:

- Δm = Selisih massa (kg)
- A = Luas penampang difusi/ luas permukaan spesimen (m²)
- t = Waktu difusi (s)
- D = Koefisien difusi (*diffusivity*) (m²/s)
- ∂C = Selisih konsentrasi karbon (kg/m³)
- ∂r = Kedalaman difusi/ jari-jari difusi

Dengan luasan difusi (A) berbentuk silinder pejal maka,

$$D = \frac{\Delta m}{(2\pi r^2 + 2\pi r h) \cdot t} \times \frac{\Delta r}{\Delta C} \quad (4-3)$$

Keterangan:

- D = Koefisien difusi (m²/s)
- Δm = Selisih massa (kg)
- π = Phi (3.14)
- r = Jari-jari (m)
- h = Tebal spesimen (m)
- t = Waktu (s)

Δr = Selisih jari-jari/kedalaman difusi (m)

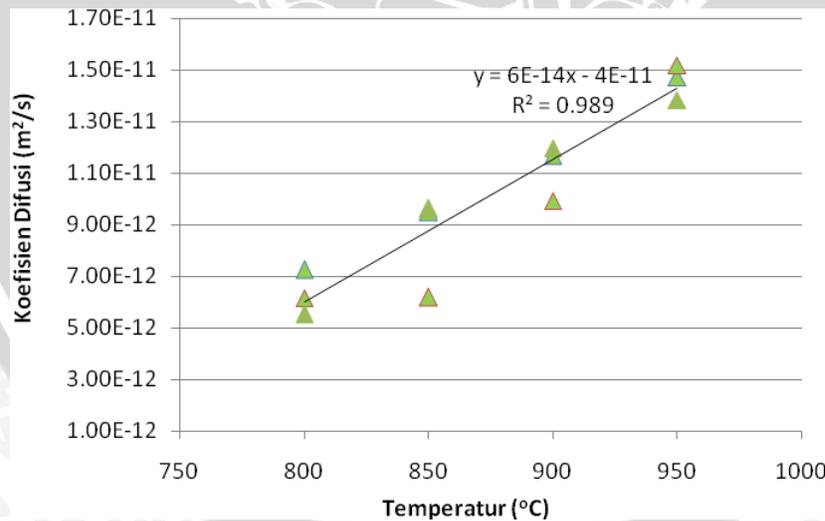
ΔC = Gradien konsentrasi (kg/m^3)

Berdasarkan data-data pengujian yang telah diperoleh dan perhitungan menggunakan *direct flux methode* pada Hukum 1 Fick, maka didapatkan nilai koefisien difusi sebagaimana tercantum dalam tabel 4.5 berikut:

Tabel 4.5 Data Perhitungan Nilai Koefisien Difusi Terhadap Variasi Temperatur Pemanasan.

Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Koefisien Difusi (m^2/s)							
	Carburizer 60-100 μm				Carburizer 500-560 μm			
	D_1	D_2	D_3	D_{rata2}	D_1	D_2	D_3	D_{rata2}
800	4.03E-12	7.27E-12	6.62E-12	5.97E-12	7.27E-12	6.16E-12	5.55E-12	6.33E-12
850	1.15E-11	9.64E-12	1.10E-11	1.07E-11	9.50E-12	6.20E-12	9.62E-12	8.44E-12
900	1.17E-11	1.20E-11	1.13E-11	1.16E-11	1.17E-11	9.94E-12	1.20E-11	1.12E-11
950	1.75E-11	1.43E-11	1.96E-11	1.71E-11	1.47E-11	1.52E-11	1.38E-11	1.46E-11

4.2 Analisa Grafik Dan Pembahasan

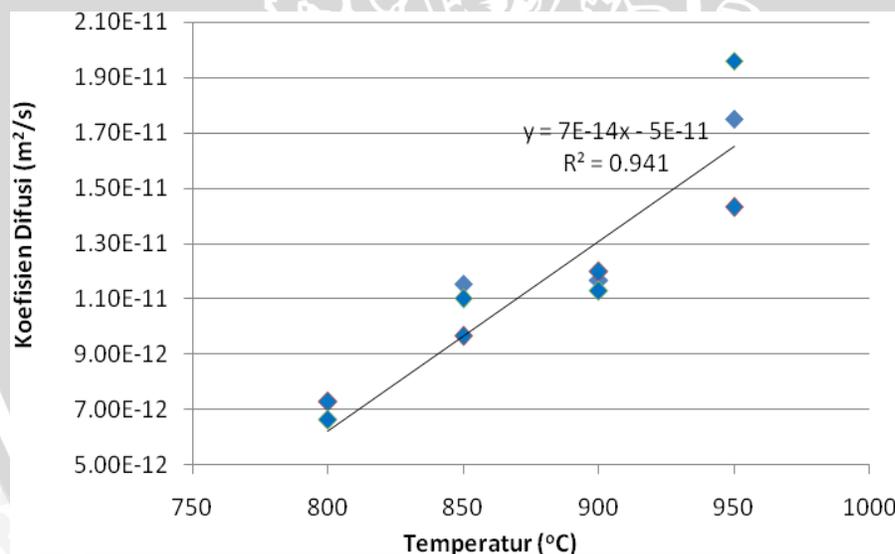


Gambar 4.3: Pengaruh Temperatur Pemanasan Terhadap Koefisien Difusi (*Diffusivity*) Karbon Pada Carburizer 500-560 μm

Berdasarkan grafik 4.3 terlihat bahwa nilai koefisien difusi (D) karbon pada ukuran carburizer 500-560 μm mengalami peningkatan sebanding dengan adanya

peningkatan temperatur. Nilai koefisien difusi (D) rata-rata tertinggi dimiliki oleh spesimen *pack carburizing* dengan suhu 950°C , yaitu sebesar $1.46\text{E-}11$. Hal ini disebabkan dalam proses difusi intersisi, atom-atom karbon membutuhkan energi untuk bergerak dari permukaan menuju bagian dalam spesimen (Budinski, 1983). Energi yang sering disebut energi aktivasi ini diperoleh melalui proses pemanasan. Semakin tinggi temperatur pemanasan maka atom-atom yang mendapatkan energi aktivasi semakin banyak, sehingga atom karbon yang bergerak menuju ke dalam spesimen semakin banyak dan akan meningkatkan ketebalan difusi karbon serta konsentrasi karbon di dalam spesimen. Seiring dengan meningkatnya ketebalan difusi dan konsentrasi karbon, maka koefisien difusi karbon pun meningkat.

Peningkatan koefisien difusi yang seiring dengan meningkatnya temperatur pemanasan juga terjadi pada spesimen *pack carburizing* dengan ukuran *carburizer* 60-100 μm . Hal ini terlihat pada gambar 4.4. Nilai koefisien difusi (D) rata-rata tertinggi dimiliki oleh spesimen *pack carburizing* dengan suhu 950°C , yaitu sebesar $1.71\text{E-}11$.



Gambar 4.4 Pengaruh Temperatur Pemanasan Terhadap Koefisien Difusi (*Diffusivity*) Karbon Pada *Carburizer* 60-100 μm

Apabila diamati nilai koefisien difusi pada *carburizer* 60-100 μm jauh lebih tinggi dibandingkan koefisien difusi pada *carburizer* 500-560 μm . Hal ini bersesuaian dengan pengertian proses *carburizing* yang mencakup tiga proses dasar yaitu: proses yang terjadi pada medium eksternal (karbon) berupa pembebasan elemen difusi menjadi atom (ion), kontak elemen difusi dengan permukaan matriks membentuk ikatan kimia

dan penetrasi elemen difusi menuju inti setelah menjadi keadaan jenuh dipermukaan matiks (Lakhtin, 1980). Berdasarkan pengertian tersebut jelas bahwa serbuk *carburizer* dengan ukuran yang lebih kecil akan mempermudah proses pembebasan elemen menjadi atom, sehingga akan meningkatkan jumlah elemen difusi yang mengalami kontak dengan permukaan logam untuk membentuk ikatan kimia. Adanya kontak medium eksternal (karbon) yang lebih tinggi akan meningkatkan laju difusi (fluks) karbon sehingga koefisien difusi pun meningkat.

Untuk mendukung hasil penelitian ini, dilakukan pula perhitungan koefisien difusi berdasarkan persamaan Arrhenus tentang pengaruh temperatur pemanasan terhadap koefisien difusi. Perhitungan dilakukan dengan memasukkan data berdasarkan tabel data difusi pada material (Brandes, 1992) di mana pada peristiwa difusi karbon ke dalam baja austenit diperoleh D_0 (koefisien difusi pre-eksponensial) sebesar $2.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ dan Q_d (energi aktivasi) sebesar 148 kJ/mol. Perhitungan ini dilakukan dengan *software* Matlab dengan memasukkan persamaan:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_d}{RT}\right) \quad (2-5)$$

Keterangan:

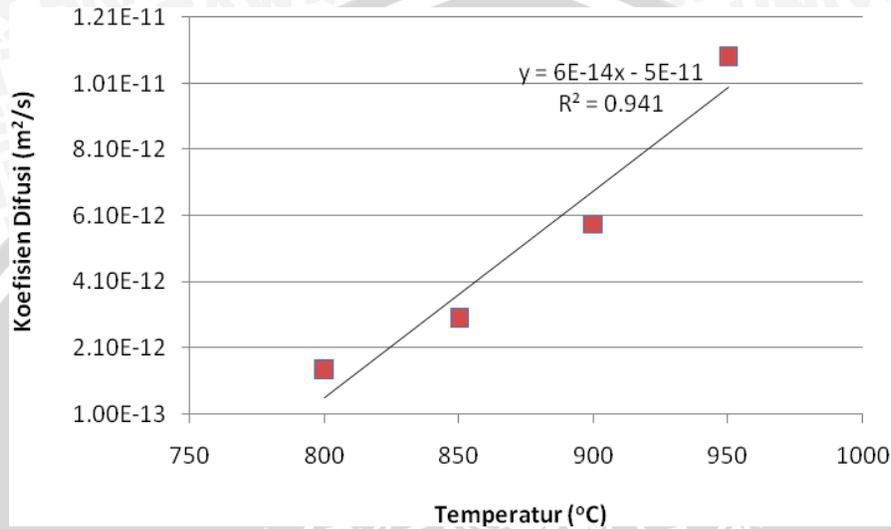
- D_0 = Koefisien difusi pre-eksponensial (m^2/s)
- Q_d = Energi aktivasi pada difusi (J/mol, kal/mol, atau eV/atom)
- R = Konstanta gas.
= 8,31 J/mol.K atau 1987 kal/mol.K atau $8,62 \times 10^{-5}$ eV/atom.K
- T = Temperatur mutlak (K)

Sehingga didapatkan nilai koefisien difusi seperti pada tabel 4.6 di bawah ini:

Tabel 4.6: Data Koefisien Difusi Berdasarkan Perhitungan Persamaan Arrhenus

Temperatur (°C)	Koefisien Difusi (m^2/s)
800	1.42E-12
850	2.98E-12
900	5.86E-12
950	1.09E-11

Apabila data-data tersebut diubah ke dalam bentuk grafik akan diperoleh kecenderungan yang sama seperti pada hasil eksperimen, dimana peningkatan temperatur mengakibatkan naiknya nilai koefisien difusi. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.5 sebagai berikut:



Gambar 4.5 Pengaruh Temperatur Pemanasan Terhadap Koefisien Difusi (*Diffusivity*) Berdasarkan Plot Persamaan Arrhenus

Berdasarkan persamaan tersebut diketahui bahwa semakin tinggi temperatur pemanasan maka koefisien difusi akan semakin meningkat. Koefisien difusi tertinggi terjadi pada saat temperatur 950°C sebesar 1.09E-11. Selain itu adanya nilai D_o , Q_d dan R yang konstan, maka persamaan Arrhenus:

$$D = D_o \exp\left(-\frac{Q_d}{RT}\right) \quad (2-5)$$

Berdasarkan logaritma persamaan 2-5 dihasilkan:

$$\ln D = \ln D_o - \frac{Q_d}{R} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (2-6a)$$

Atau apabila diubah menjadi bentuk log 10

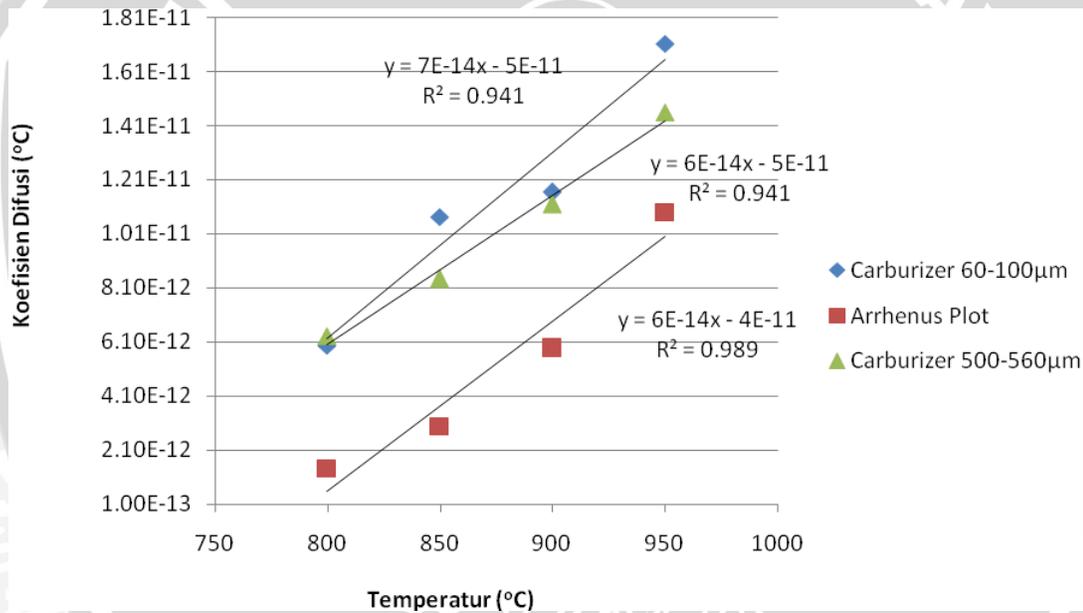
$$\log D = \log D_o - \frac{Q_d}{2.3R} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (2-6b)$$

Karena nilai D_0 , Q_d dan R adalah konstan, maka persamaan 2-6b dapat diubah ke dalam bentuk persamaan linear sebagai berikut:

$$y = b + mx \tag{4-4}$$

Oleh karena itu persamaan Arrhenus diinterpretasikan ke dalam garis linear yang menghubungkan antara pengaruh temperatur terhadap koefisien difusi seperti pada gambar 4.5.

Apabila hasil eksperimen pada spesimen *pack carburizing* dengan variasi temperatur pada *carburizer* 500-560 μm dan *carburizer* 60-100 μm dibandingkan dengan grafik perhitungan berdasarkan persamaan Arrhenus akan didapatkan grafik pengaruh temperatur pemanasan terhadap koefisien difusi seperti pada gambar 4.6.



Gambar 4.6 Pengaruh Temperatur Pemanasan Terhadap Koefisien Difusi (*Diffusivity*)

Berdasarkan gambar 4.6 dapat diketahui bahwa nilai koefisien difusi karbon pada *pack carburizing* sangat kecil dan berkisar antara 10^{-12} hingga 10^{-11} . Hasil eksperimen yang mengacu pada Hukum 1 Fick maupun perhitungan berdasarkan persamaan Arrhenus menunjukkan kecenderungan yang sama bahwa besarnya temperatur pemanasan berpengaruh terhadap nilai koefisien difusi. Semakin tinggi temperatur pemanasan maka koefisien difusi pun akan semakin besar. Nilai koefisien difusi terbesar terdapat pada hasil eksperimen dengan ukuran *carburizer* 60-100 μm kemudian koefisien difusi pada hasil eksperimen dengan ukuran *carburizer* 500-560 μm

dan nilai terkecil didapatkan berdasarkan persamaan Arrhenus. Hal ini menunjukkan bahwa besarnya koefisien difusi tidak hanya dipengaruhi oleh temperatur pemanasan, tetapi juga ukuran serbuk *carburizer*. Pada variasi temperatur sama, didapatkan nilai koefisien difusi terbesar pada ukuran *carburizer* yang paling kecil. Sementara koefisien difusi berdasarkan perhitungan dengan persamaan Arrhenus menjadi nilai koefisien difusi terkecil karena persamaan tersebut tidak memperhitungkan pengaruh ukuran *carburizer*, tetapi hanya mengacu pada nilai ideal koefisien difusi berdasarkan perubahan temperatur.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa besarnya temperatur pemanasan pada *pack carburizing* baja AISI 3115 berpengaruh terhadap koefisien difusi massa (*diffusivity*) karbon. Semakin tinggi temperatur pemanasan maka nilai koefisien difusi akan semakin meningkat. Nilai koefisien difusi tertinggi terjadi pada suhu 950°C pada masing-masing eksperimen maupun perhitungan persamaan Arrhenus. Selain itu ukuran serbuk *carburizer* juga berpengaruh terhadap nilai koefisien difusi, semakin kecil ukuran *carburizer* maka kontak yang terjadi antara karbon dengan material akan semakin banyak, sehingga koefisien difusi meningkat.

5.2 Saran

Dari penelitian ini dapat diambil beberapa saran untuk pengembangan penelitian mengenai koefisien perpindahan massa difusi (*diffusivity*) pada proses *pack carburizing* selanjutnya:

1. Pada penelitian selanjutnya dapat diteliti mengenai pengaruh *holding time* terhadap nilai koefisien difusi karbon.
2. Pada penelitian selanjutnya dapat digunakan pendekatan yang berbeda untuk menghitung koefisien difusi pada *pack carburizing*, misal dengan pendekatan Chilton-colburn, analogi melalui *heat transfer*, persamaan Zeldovich dan lain-lain.
3. Perlu juga diteliti tentang fenomena difusi pada *unsteady state diffusion* melalui pengaruh variasi *holding time* dan bentuk spesimen.

DAFTAR PUSTAKA

- Aniq, Ahmad.2007. *Pengaruh Suhu Carburizing Menggunakan Media Arang Batok Kelapa Terhadap Kekerasan dan Ketahanan Aus Roda Gigi Baja AISI 4140*. Semarang: Universitas Negeri Semarang.
- Anonymous a.* http://www.google.com/gambar/liquid_carburizing (diakses tanggal 30 Nopember 2011).
- Anonymous b.* http://www.google.com/gambar/gas_carburizing (diakses tanggal 30 Nopember 2011).
- Anonymous c.* http://www.oggix.com/proses_pack_carburizing (diakses tanggal 30 Nopember 2011).
- Anonymous d.* <http://www.wikipedia.com/Baja.htm> (diakses tanggal 1 Desember 2011).
- Anonymous e.* http://www.wikipedia.com/SAE_steel_grades.htm (diakses tanggal 1 Desember 2011).
- Brandes, E. A.1992. *Smithells Metals Reference Book 7th Edition*.Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Budinski, K. 1983. *Engineering Material Properties and Selection*. Reston Ohio: Mc.Millan Publishing Company.
- Clark, D.S. Vanney, W.R. 1961. *Physical Metallurgy For Engineer*. California: Pasadena.
- Guodong, Chen. 1994. *Solution of Diffusion Equation in Axisymmetrical Coordinates*.Ohio: Ohio University Library.
- Incropera, Dewitt. 1992. *Fundamental of Heat and Mass Transfer*. Bangalore: Mc Graw Hill Inc.
- Johnson, D. D. 2006. *Introduction to Engineering Material*. Illinois: MSE International.
- Kamenichny, I. 1969. *A Short Handbook of Heat Treatment*. Moscow: MIR Publisher.
- Karaveltchikova, Olga. 2007. *Carbon Diffusion in Steel- A Numerical Analysis Based on Direct Flux Integration*. Dressel: *Journal of Phase Equilibrium and Diffusion*. Page. 87-82.
- Lakhtin, Y.1980. *Engineering Physical Metallurgy and Heat Treatment*. Moscow: MIR Publisher.
- Palallo, Frederick. 1995. *Perlakuan Panas Logam*. Bandung: PPPG Teknologi Bandung.
- Sibanda, M. Eric, R.H. dan Koursarin A. 2005. *Solid State Diffusion of Carbon in The CO-5% Fe-C System at High Pressure: Metallography and Phase Equilibrium*. Wits: *Journal of The South Africa Institute of Mining and Metallurgy*. Page. 465-472.

Smith, R. P. 1953. *The Diffusion of Carbon by Steady State Method*. Acta Metallurgica Journal.

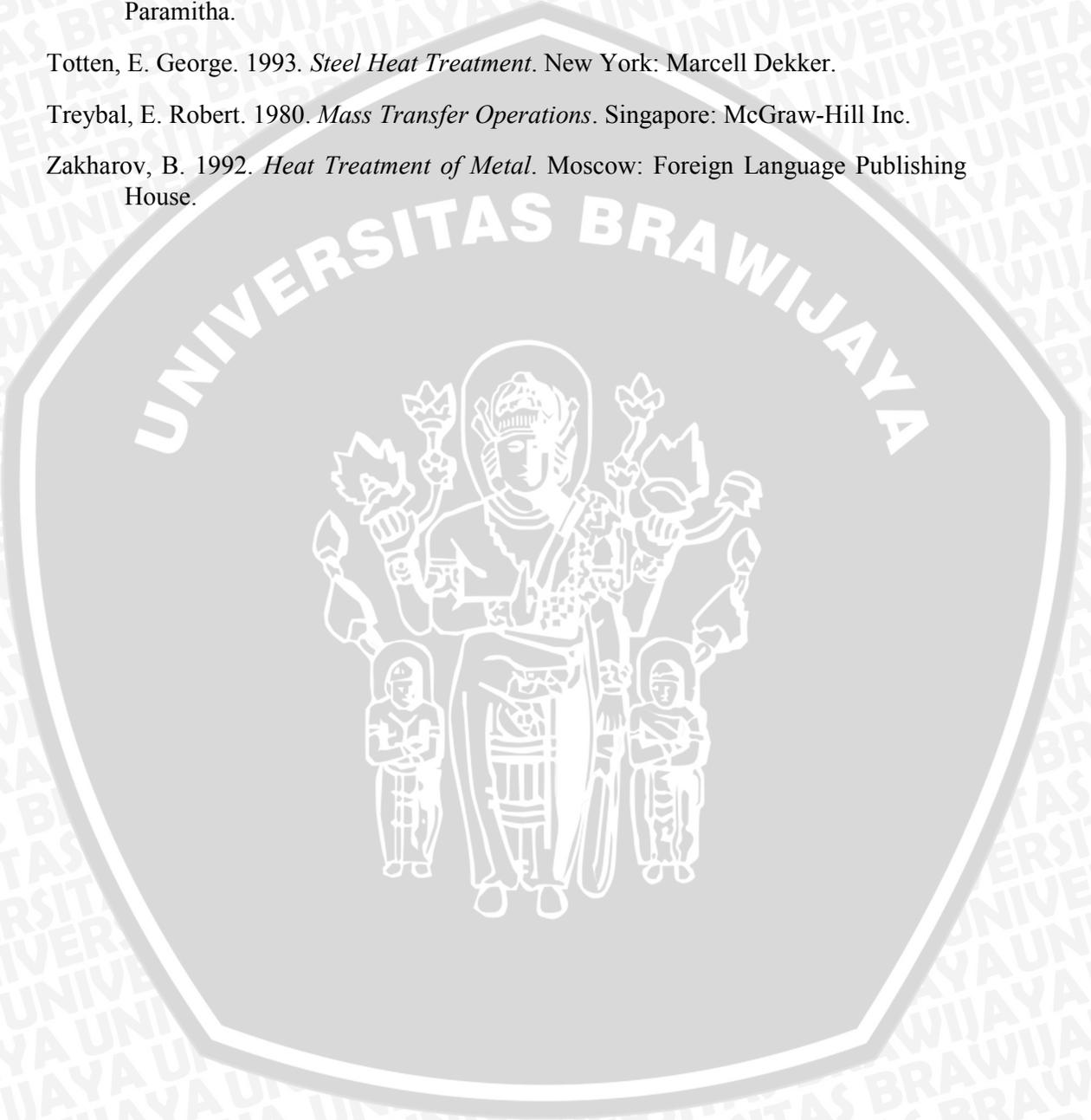
Sperisa, Distantina. 2007. *Diktat Ajar Prinsip-prinsip Perpindahan Massa*. Yogyakarta. PMD

Surdia, T. dan Saito S. 2000. *Pengetahuan bahan Teknik*. Jakarta: PT Pradnya Paramitha.

Totten, E. George. 1993. *Steel Heat Treatment*. New York: Marcell Dekker.

Treybal, E. Robert. 1980. *Mass Transfer Operations*. Singapore: McGraw-Hill Inc.

Zakharov, B. 1992. *Heat Treatment of Metal*. Moscow: Foreign Language Publishing House.



Lampiran 1. Foto Mikro Hasil *Pack Carburizing*



Foto mikro hasil *pack carburizing* pada suhu 800°C dengan *carburizer* berukuran 60-100µm

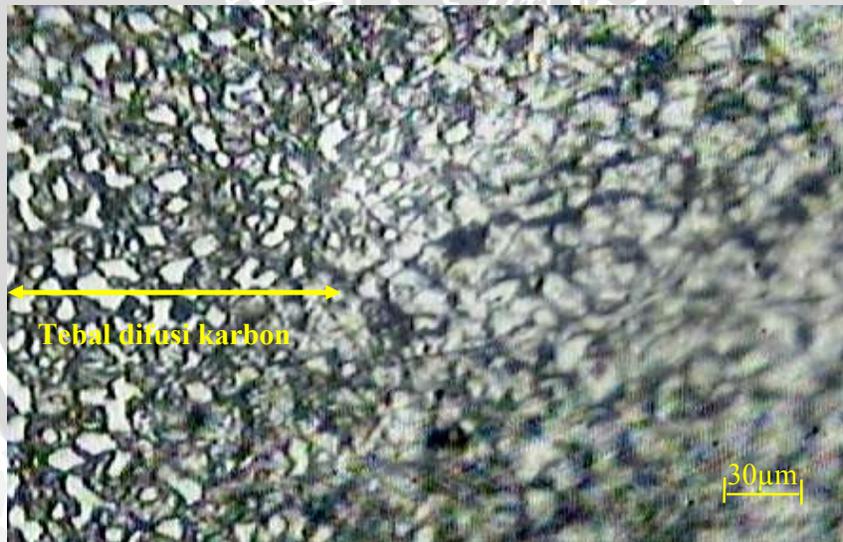


Foto mikro hasil *pack carburizing* pada suhu 850°C dengan *carburizer* berukuran 60-100µm

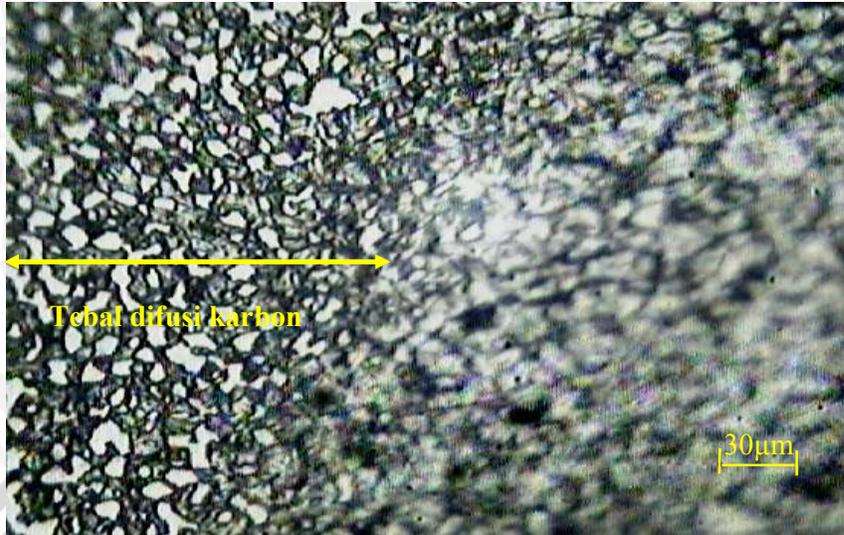


Foto mikro hasil *pack carburizing* pada suhu 900°C dengan *carburizer* berukuran 60-100µm

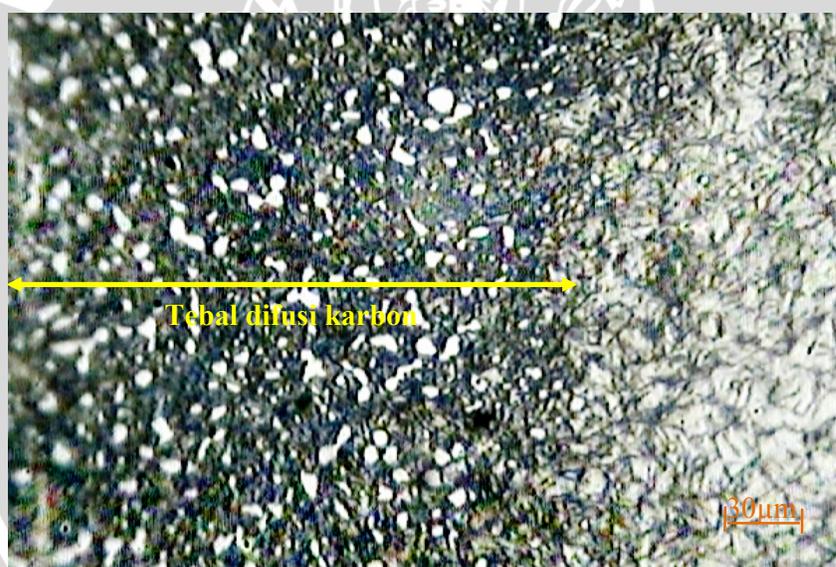


Foto mikro hasil *pack carburizing* pada suhu 950°C dengan *carburizer* berukuran 60-100µm

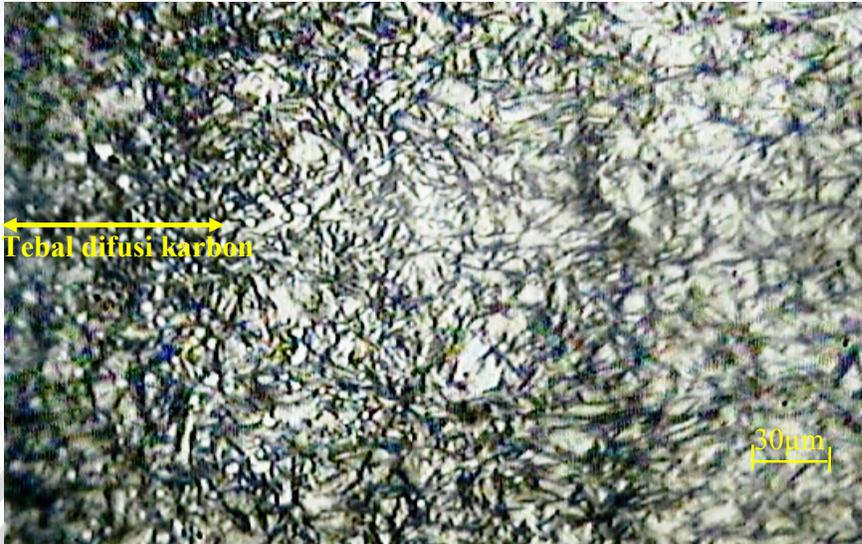


Foto mikro hasil *pack carburizing* pada suhu 800°C dengan *carburizer* berukuran 500-560 µm

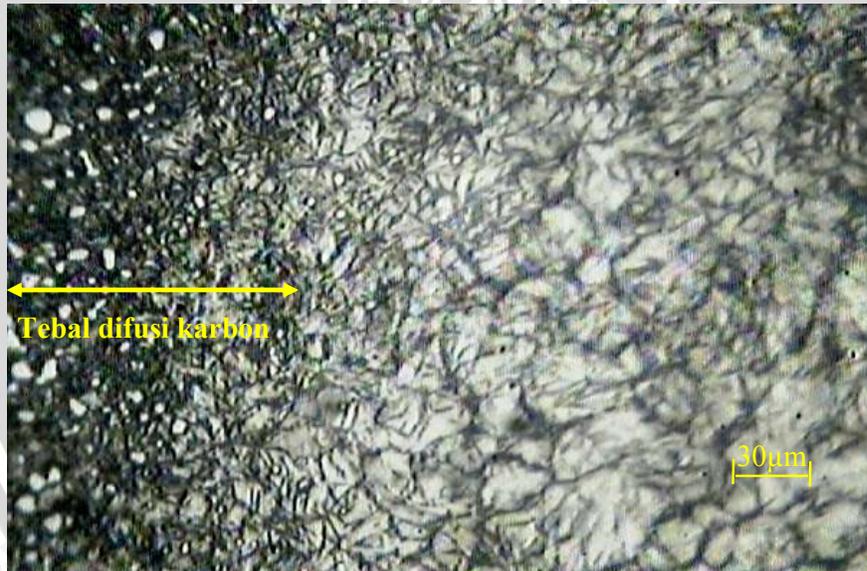


Foto mikro hasil *pack carburizing* pada suhu 850°C dengan *carburizer* berukuran 500-560 µm

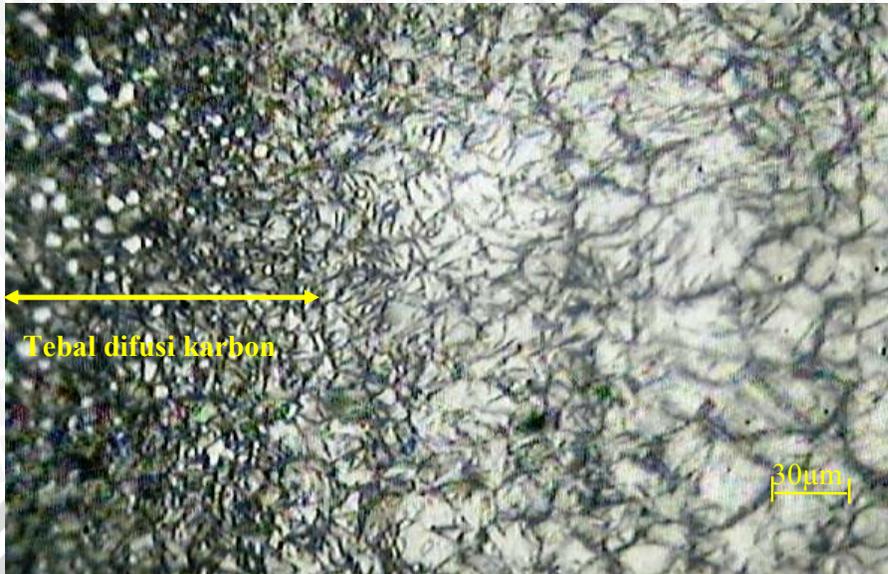


Foto mikro hasil *pack carburizing* pada suhu 900°C dengan *carburizer* berukuran 500-560 μm

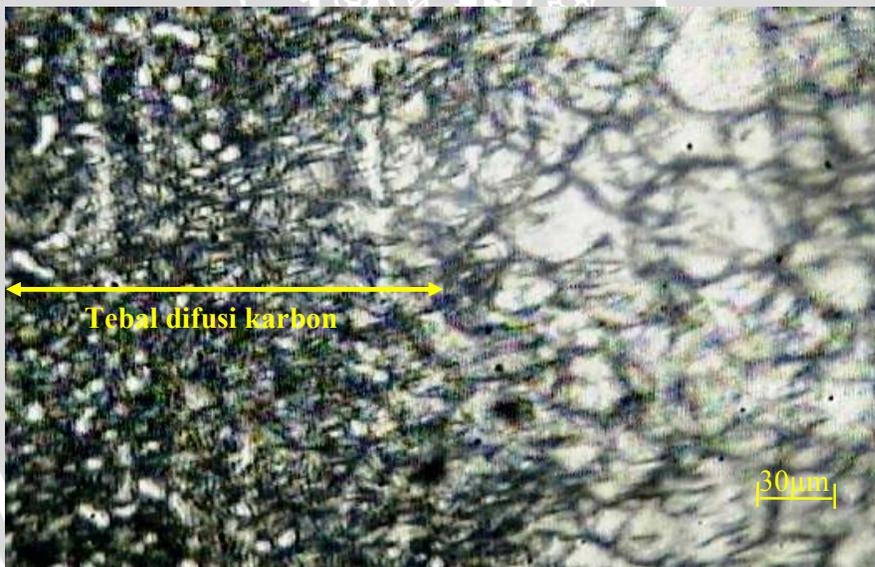
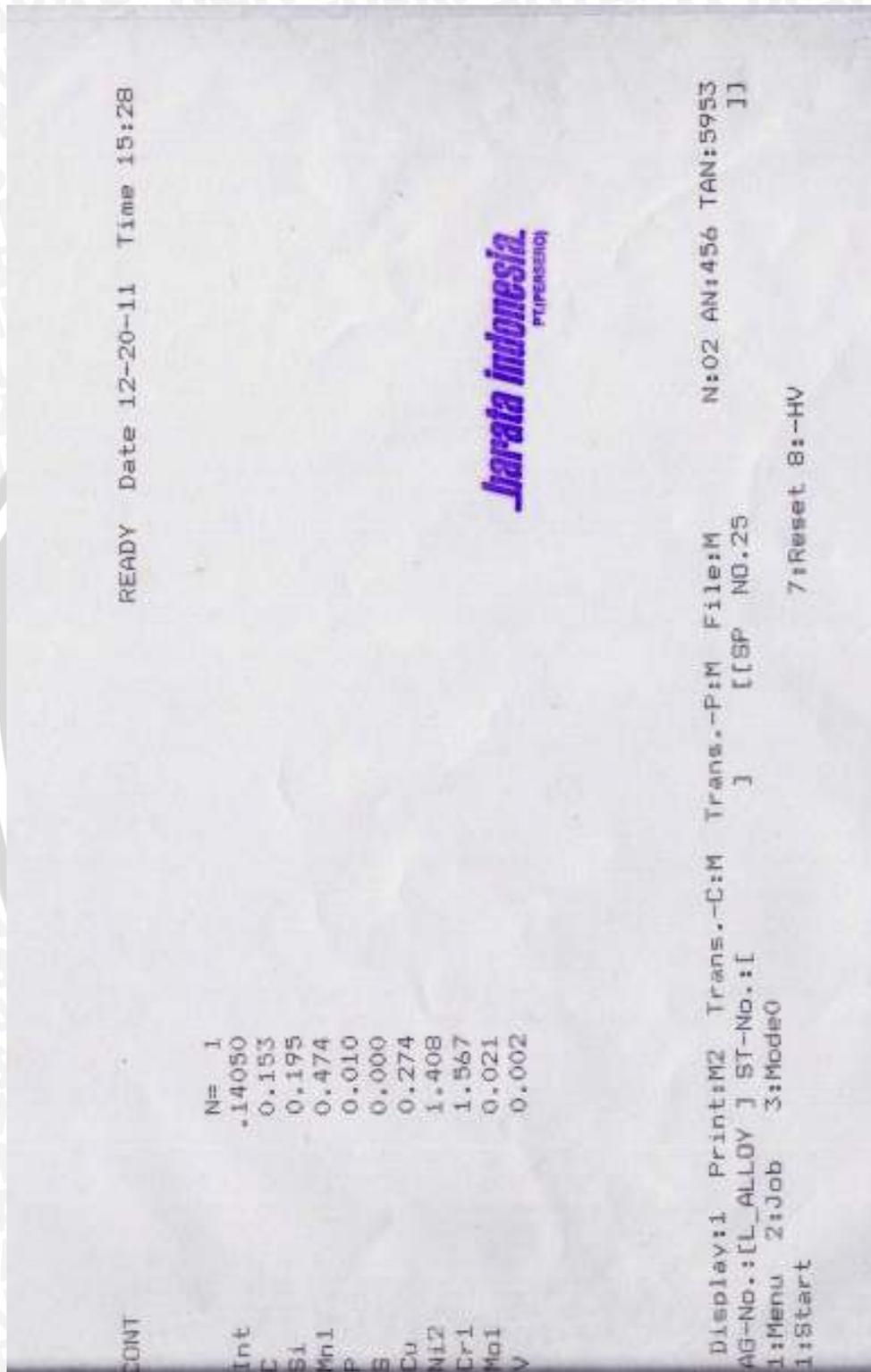


Foto mikro hasil *pack carburizing* pada suhu 950°C dengan *carburizer* berukuran 500-560 μm

Lampiran 2. Hasil Uji Komposisi Kimia Baja AISI 3115



TA STEEL

HQ 7210[®]

High Quality Case Hardening Steel

CHEMICAL ANALYSIS, %	C	Mn	Cr	Ni
	0.14 - 0.19	0.40 - 0.60	1.40 - 1.70	1.40 - 1.70
COMPARISON TO INTERNATIONAL STANDARDS	AISI/SAE/ASTM	3115		
	Werkstoff	1.5919		
	DIN	15 CrNi 6		
	AFNOR	16 NC 6		
CHARACTERISTICS & APPLICATIONS	HQ 7210 [®] is an alloyed case hardening steel with high core strength. It is used for application requiring a hard, wear resistance surface and a tough core, e.g. gears and bushing.			
	Compared to the more highly alloyed 3% nickel type, it has less tendencies to form retained austenite.			
	HQ 7210 [®] is fine grain treated (average ISO G8, ASTM 8) improving core toughness and safety in direct hardening without refining of the core. It is supplied in a well-controlled natural hardness giving optimal machinability.			
MECHANICAL PROPERTIES AS SUPPLIED*	Hardness	max. 217 Brinell		
	* All bars is soft annealed to DIN 17210/EN 10084			
SIZE RANGE	HQ 7210 is available in a large number of standard sizes:			
	Ø 16 - 250 mm	hot rolled bars		
	> Ø 250 mm	forged and pre-machined bars		
HEAT TREATMENT	Soft annealing	600 - 670°C. Hold at temperature for 2 hours. Cool with furnace max. 15°C per hour to 600°C, then freely in air. Hardness max. 217 Brinell.		
	Carburizing	880 - 920°C in box with carburizing powder, 850 - 900°C in salt bath. Mainly used for case depth up to 0.5 mm. 900 - 940°C in gas. When desired case depth has been reached, lower the temperature to 840°C before quenching.		
	Intermediated annealing	850 - 680°C for 2 hours with slow cooling to 600°C. Advisable when machining or straightening has to be done after carburizing.		

TA STEEL

PT TIRA ANDALAN STEEL

Jl. Pulo Ayang Kav. R1
Pulogadung Industrial Estate
Jakarta 13930 - Indonesia
P. O. Box 1010/JAT - Jakarta 13010

Phone : (021) 4602594 (Hunting)

Fax : (021) 4602593

Homepage : <http://www.tiraaustenite.com>email : headoffice@tiraaustenite.com



**LABORATORIUM PENGECORAN LOGAM
FAKULTAS TEKNIK JURUSAN MESIN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

Jl. MT Haryono 167 Malang Telp. (0341) 551611 – 551430 Pes.157 Malang 65145



SURAT KETERANGAN
No.18 /LAB.PL/ XI /2011

Yang bertanda tangan di bawah ini :

N A M A : Dr.Eng.Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng.

N I P : 19750710 199903 1 004

Menerangkan bahwa :

N A M A : IKA ISTIANA

N I M : 0710620067 - 62

MAHASISWA : Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya

Mahasiswa tersebut diatas telah selesai menggunakan Fasilitas Laboratorium Pengecoran Logam guna Penelitian / pengambilan data dalam rangka pengerjaan Skripsi.

Dengan judul : **Pengaruh Temperatur Pemanasan Terhadap Koefisien Perpindahan Massa Difusi (Diffusivity) Karbon Pada Proses Pack Carburizing Baja AISI 3115**

Fasilitas yang dipergunakan : **Pengguncang Rotap**

Waktu Pelaksanaan : 9 Desember s/d 16 Desember 2011

Demikian Surat Keterangan ini dibuat dengan sebenarnya untuk dapat dipergunakan seperlunya.

Malang , 21 Desember 2011

Kepala Laboratorium Pengecoran Logam

Dr.Eng.Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng.

NIP - 19750710 199903 1 004