

DISERTASI

**ANALISIS PENGARUH PENARIKAN PROSES PACK
CARBURIZING TERHADAP SIFAT MEKANIK
BAJA KARBON**

*Analysis of the effect of tensile of pack carburizing process on the
mechanical properties of carbon steel*

NITHA

D043181002



**PROGRAM STUDI DOKTOR TEKNIK MESIN
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**



PENGAJUAN DISERTASI

**ANALISIS PENGARUH PENARIKAN PROSES PACK
CARBURIZING TERHADAP SIFAT MEKANIK
BAJA KARBON**

Disertasi
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor
Program Studi Ilmu Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh

**NITHA
D043181002**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**



ANALISIS PENGARUH PENARIKAN PROSES PACK CARBURIZING TERHADAP SIFAT MEKANIK BAJA KARBON

NITHA
D043181002

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Disertasi yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Doktor Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 29 November 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,



Prof. Dr. Ir. Onny Suryono Sutresman, M. T.
NIP. 195207061978121001

Co-Promotor



Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, S.T, M.T.
NIP. 197404151999031001

Co-Promotor



Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar, S.T., M.T.
NIP.19760206 201012 1 002

Dekan Fakultas Teknik Universitas
Hasanuddin



Muhammad Isran Ramli,
S.T., M.T., ASEAN Eng
NIP. 19760206 200012 1 002

Ketua Program Studi S3 Teknik Mesin



Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar, S.T., M.T.
NIP.19760206 201012 1 002



PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Nitha
Nomor mahasiswa : D043181002
Program studi : S3 Teknik Mesin

Dengan ini menyatakan bahwa, disertasi berjudul “Analisis Pengaruh Penarikan Proses Pack Carburizing Terhadap Sifat Mekanik Baja Karbon” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof. Dr. Ir. Onny Suryono Sutresman, M.T, sebagai Pembimbing Utama, Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, S.T, M.T. sebagai Co-promotor 1 dan Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar, S.T., M.T. sebagai Co-promotor 2). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di Prosiding ICITAMEE 2022. The 4 International Conference on Information Technology, Advanced Mechanical and Electrical Engineering (ICITAMEE) Universitas Muhammadiyah Yogyakarta 9-10 Agustus 2023, sebagai artikel dengan judul “The Effect Of Applying The Tensile Load On The Pack Carburizing Process Temperature Below Normal Carburizing Temperature On The Hardness Of Carbon Steel” dan di Jurnal Identifying of chemical composition changes during the carburizing process of carbon steel under tension”. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies ISSN 1729-3774_Vol 4. No.12 (124) 2023.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 12 Desember 2023

Yang menyatakan


Nitha

METERAN TEMPEL
F7CAKX799322621



Optimized using
trial version
www.balesio.com

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang maha Kuasa atas rahmatnya sehingga disertasi ini dapat diselesaikan.

Dalam penyusunan disertasi ini tidak luput dari beberapa kendala, namun karena adanya bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak sehingga disertasi ini dapat selesai dengan baik, dan untuk itu penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Onny S. Sutresman, M.T., sebagai Promotor, Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, S.T., M.T., sebagai Co-promotor- 1, dan Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar, S.T., M.T., sebagai Co-promotor-2.
2. Prof. Dr. Ir. Ilyas Renreng, M.T., Dr. Hairul Arsyad, S.T., M.T., Dr. Muhammad Syahid, S.T., M.T., Azwar Hayat, S.T., M.Sc., Ph.D, sebagai komisi tim penguji dan Prof. Ir. I Nyoman Gede Wardana, M.Eng., Ph.D, sebagai penguji eksternal.
3. Rektor Universitas Hasanuddin, Dekan Fakultas Teknik, Ketua Departemen Teknik Mesin, dan Ketua Program Studi S3, Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program doktor serta para dosen, para pegawai, dan rekan-rekan dalam tim penelitian.
4. Kepada civitas akademika UKI Toraja yang selalu memberi dukungan moral dan materi selama menempuh program pendidikan doktor.
5. Rekan-rekan dan laboran di Laboratorium Metalurgi Fisik, Departemen Teknik Mesin, UNHAS di Gowa serta laboran di Laboratorium Struktur Mikro, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Muslim Indonesia, Makassar.
6. Seluruh rekan-rekan mahasiswa pada program pasca kedoktoran Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Gowa, yang tidak sempat ditulis namanya satu persatu atas segala bantuan dan sarannya.

Akhirnya, kepada kedua orang tua tercinta, suami serta anak-anak, saya mengucapkan terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan memotivasi serta dukungan yang tak ternilai baik secara moril maupun materi selama saya menempuh pendidikan.

Penulis
Nitha



ABSTRAK

NITHA. *Analisis Pengaruh Penarikan Proses Pack Carburizing Terhadap Sifat Mekanik Baja Karbon* (dibimbing oleh **Onny S. Sutresman, Lukmanal Hakim Arma** dan **Andi Amijoyo Mochtar**)

Penelitian dengan *pack carburizing* pada temperatur lebih rendah dari temperatur *carburizing* normal dan beban penarikan hingga batas proposional material baja karbon. Dengan tujuan mengetahui pengaruh dari beban penarikan pada *carburizing* temperatur pemanasan lebih rendah terhadap kekerasan, struktur mikro, komposisi unsur pada baja karbon. Untuk mencapai tujuan tersebut dilakukan *carburizing* dengan persentase 80% arang tulang kerbau dan 20% BaCO₃, ukuran butir mesh 20, *holding time* 4 jam, pendinginan secara perlahan dengan beban penarikan $\frac{1}{4} \sigma_p$ $\frac{1}{2} \sigma_p$ $\frac{3}{4} \sigma_p$, dan σ_p (tegangan proporsional) serta baja karbon sebagai material uji. Pengujian yang digunakan adalah pengujian kekerasan, uji *metalography*, uji *SEM*, *EDS* dan *mapping* untuk melihat struktur mikro, jenis unsur, persentase unsur dalam material. Diperoleh nilai kekerasan tertinggi pada beban penarikan sebesar tegangan proporsional yakni pada temperatur 600^oC nilai kekerasan 103,93 HRB, temperatur 650^oC nilai kekerasan 104,33 HRB, temperatur 700^oC nilai kekerasan 104,80 HRB, dan pada temperatur 750^oC nilai kekerasan 106,60 HRB, sedangkan *carburizing* tanpa penarikan temperatur 800^oC nilai kekerasan 105,2 HRB. Pada temperatur 700^oC, temperatur 750^oC, terlihat pertambahan struktur perlit ditandai dengan warna gelap disetiap peningkatan temperatur. Semakin banyak struktur mikro perlit yang terbentuk maka semakin tinggi nilai kekerasannya. Pada temperatur 700^oC persentase perlit sebesar 40,187%, temperatur 750^oC persentase perlit sebesar 52,234%. Komposisi unsur karbon (C) dan ferrous (Fe) pada *raw* material sebesar 0,15%, setelah di *carburizing* temperatur 700^oC beban penarikan σ_p terjadi kenaikan unsur karbon menjadi 0,73%. Sedangkan pada *carburizing* temperatur 750^oC beban penarikan σ_p juga terjadi kenaikan unsur karbon sebesar 1,26%. Dengan adanya pertambahan unsur karbon pada permukaan material ini mengindikasikan terjadinya difusi pada material dengan terbentuknya fase perlit yang lebih banyak pada permukaan serta ditandai pula terjadinya distribusi kekerasan dari *surface* ke *core* yang ditandai dengan peningkatan persentase karbon dan nilai kekerasan yakni 104,8 HRB untuk temperatur 700^oC dan 106,60 HRB untuk temperatur 750^oC. Pada proses *carburizing* di bawah temperatur *carburizing* normal dengan beban penarikan sebesar tegangan proporsional diperoleh efisiensi daya listrik sebesar 2,1254 KWh atau sebesar 7,115% dan penghematan temperatur sebesar 50^oC.

Kata kunci: beban penarikan, kekerasan, *pack carburizing*, temperatur rendah, difusi karbon, komposisi kimia, struktur mikro



ABSTRACT

NITHA. *Analysis of the effect of tensile of pack carburizing process on the mechanical properties of carbon steel* (supervised by **Onny S. Sutresman, Lukmanal Hakim Arma,** and **Andi Amijoyo Mochtar**)

Research with pack carburizing at temperatures lower than normal carburizing temperatures and pulling loads up to proportional limits of carbon steel materials. With the aim of knowing the effect of the tensile load on carburizing lower heating temperature on carbon steel's hardness, microstructure, and elemental composition. To achieve this goal, carburizing was carried out with a percentage of 80% buffalo bone charcoal and 20% BaCO₃, mesh grain size 20, holding time of 4 hours, slow cooling with a drawing load of $1/4 \sigma_p$, $1/2 \sigma_p$, $3/4 \sigma_p$, and σ_p (proportional stress) and carbon steel as test materials. The tests used are hardness testing, metallographic tests, SEM tests, EDS, and mapping to see the microstructure, type of elements, and percentage of elements in the material. The highest hardness value was obtained at the tensile load of proportional stress, namely at a temperature of 600°C a hardness value of 103.93 HRB, a temperature of 650°C a hardness value of 104.33 HRB, a temperature of 700°C a hardness value of 104.80 HRB, and at a temperature of 750°C a hardness value of 106.60 HRB, while carburizing without tensile at a temperature of 800°C a hardness value of 105.2 HRB. At a temperature of 700°C and 750°C, the increase in pearlite structure is marked by a dark color with each increase in temperature. The more perlite microstructures formed, the higher the hardness value. At 700°C the percentage of pearlite is 40.187%, and at 750°C the percentage of perlite is 52.234%. The composition of carbon (C) and ferrous (Fe) elements in the raw material is 0.15% after carburizing temperature 700°C tensile load σ_p there is an increase in carbon elements to 0.73%. While at the carburizing temperature of 750°C, the tensile load σ_p also increased carbon element by 1.26%. The addition of carbon elements on the surface of this material indicates diffusion in the material with the formation of more pearlite phases on the surface. It is also marked by the distribution of hardness from surface to core which is characterized by an increase in the percentage of carbon and hardness values of 104.8 HRB for temperatures of 700°C and 106.60 HRB for temperatures of 750°C. In the carburizing process under normal carburizing temperature with a drawing load of proportional voltage, electrical power efficiency of 2.1254 KWh or 7.115% and temperature savings of 50°C are obtained.

Keywords: load tensile, hardness, pack carburizing, low temperature, carbon diffusion, chemical composition, microstructure



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1. 1 Latar belakang	1
1. 2 Rumusan Masalah	5
1. 3 Tujuan Penelitian.....	5
1. 4 Batasan Masalah.....	5
1. 5 Manfaat Penelitian.....	6
BAB II KERANGKA KONSEPTUAL DAN HIPOTESIS PENELITIAN	7
2. 1 Kerangka Konseptual	7
2.1.1 <i>Carburizing</i>	7
2.1.2 <i>Difusi</i>	11
2.1.3 Baja Karbon.....	13
2.1.4 Arang Tulang Kerbau	14
2.1.5 Struktur Mikro Baja Karbon	15
2.1.6 Pengujian Kekerasan	16
2.1.7 Efisiensi Energi Listrik.....	23
2. 2 Novelti	24
TOPIK PENELITIAN I.....	26
abstrak	26
pendahuluan	27



3.3 Metode.....	29
3.3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	30
3.3.2 Bahan dan Alat Penelitian	30
3.3.3 Prosedur Penelitian.....	34
3.3.4 Skema Alat Uji Tungku Beban Penarikan	36
3.3.5 Tahapan Penelitian I.....	38
3.4 Hasil Dan Pembahasan.....	39
3.4.1 Hasil Penelitian	39
3.4.2 Pembahasan.....	41
3.5 Kesimpulan.....	44
DAFTAR PUSTAKA	45
BAB IV TOPIK PENELITIAN II	48
4. 1 Abstrak	48
4. 2 Pendahuluan	49
4. 3 Metode.....	52
4.3.1 Tempat Penelitian.....	52
4.3.2 Bahan dan Alat Penelitian	53
4.3.3 Prosedur pengujian.....	54
4.3.4 Tahapan Penelitian Topik II.....	55
4. 4 Hasil Dan Pembahasan.....	55
4.4.1 Hasil Penelitian	55
4.4.2 Pembahasan.....	68
4. 5 Kesimpulan.....	72
DAFTAR PUSTAKA	74
HASAN UMUM.....	77



ya listrik yang digunakan untuk mencapai temperatur 800⁰C dan di tahan

selam 4 jam adalah.....	80
b. Daya listrik yang digunakan untuk mencapai temperatur 750 ⁰ C dan di tahan selam 4 jam adalah.....	81
BAB VI_KESIMPULAN DAN SARAN.....	82
6.1. Kesimpulan.....	82
6.2. Saran	83
DAFTAR PUSTAKA	84



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Kurva Laju-Invers untuk Baja SAE (B.H. et al., 1992).....	8
Gambar 2 Kekerasan akibat proses Quenching (G & R.H, 2020).....	10
Gambar 3 Temperatur Tempering terhadap Kekerasan.....	10
Gambar 4 Mekanisme Sisipan/Interstitial (Vlack, 1991)	12
Gambar 5 Mekanisme Kekosongan/Vacancy (Vlack, 1991).....	12
Gambar 6 Shore Scleroscope (Ashby & Jones, 2012).....	18
Gambar 7 Indentor kekerasan Brinell (B.H. et al., 1992).....	19
Gambar 8 Metode Pengujian Kekerasan Mikro Vickers (ASTM E-92).....	21
Gambar 9 Bentuk Baja karbon untuk spesimen	30
Gambar 10 Arang tulang kerbau	31
Gambar 11 Barium Carbonat ($BaCO_3$).....	31
Gambar 12 Furnance	31
Gambar 13 Tungku beban Tarik.....	32
Gambar 14 Alat uji microhardness	32
Gambar 15 Ayakan Mesh 20	33
Gambar 16 Amplas.....	33
Gambar 17 Autosol dan resin.....	33
Gambar 18 Timbangan Digital.....	34
Gambar 19 Layout alat uji tungku beban penarikan.....	36
Gambar 20 Layout heater tungku	36
Gambar 21 Bentuk penempatan material dalam tungku penarikan	37
Gambar 22 Diagram Alir Penelitian Topik Penelitian I	38
Gambar 23 (a) Alat uji tungku beban tarik (b) Termocouple digital dan load cell.....	39
 24 Grafik pengaruh beban penarikan dengan temperatur yang lebih rendah dari temperatur carburizing normal terhadap nilai kekerasan baja karbon.....	41
25 Pengamatan Struktur Mikro (a) temperatur 700°C, (b) temperatur 750°C, (c) temperatur 800°C tanpa beban penarikan.....	43



Gambar 26 Pengamatan Struktur Mikro (a) raw material, (b) temperatur 700 ⁰ C, (c) temperatur 750 ⁰ C pada penarikan sebesar σ_p	43
Gambar 27 (a) penampang batas butir, (b) foto mikro permukaan spesimen (Callister, 2007)	50
Gambar 28 Diagram Fasa Fe-C (Callister, 2007).....	52
Gambar 29 Spesimen pengamatan struktur mikro.....	53
Gambar 30 Mikroskop metalography.....	53
Gambar 31 Mikroskop JEOL JCM 6000 plus (SEM,EDS).....	54
Gambar 32 Diagram Alir Penelitian Topik Penelitian II.....	55
Gambar 33 Struktur mikro raw material.....	56
Gambar 34 Struktur mikro beban penarikan σ_p pada temperatur 700 ⁰ C.....	56
Gambar 35 Struktur mikro beban penarikan σ_p temperatur 750 ⁰ C	57
Gambar 36 Struktur mikro tanpa beban penarikan pada temperatur 800 ⁰ C	57
Gambar 37 Struktur mikro tanpa beban penarikan pada temperatur 800 ⁰ C	58
Gambar 38 Gambar hasil pengamatan EDS untuk letak dan spektrum unsur pada raw Material, (a) mapping raw material, (b) C, (c) Fe, (d)Mg, (e) Si, (f) P.	60
Gambar 39 Gambar hasil pengamatan EDS untuk letak dan spektrum unsur pada carburizing temperatur 700 ⁰ C, (a) mapping (b) C, (c) Si, (d)Mg, (e) P, (f) Fe61	
Gambar 40 Gambar hasil pengamatan EDS untuk letak dan spektrum unsur pada carburizing temperatur 750 ⁰ C, (a) mapping (b) C, (c) Mg, (d)Si, (e) P, (f) Fe62	
Gambar 41 Gambar hasil pengamatan EDS untuk letak dan spektrum unsur pada carburizing temperatur 800 ⁰ C tanpa penarikan, (a) mapping (b) C, (c) Mg, (d)Si, (e) P, (f) Fe.....	63
Gambar 42 Grafik persentase unsur pada raw material.....	65
Gambar 43 Grafik elemen unsur pada Carburizing 700 ⁰ C penarikan σ_p spot terluar (1) 66	
Gambar 44 Grafik elemen unsur pada Carburizing 750 ⁰ C penarikan σ_p spot terluar (1) 67	
Gambar 45 Grafik elemen unsur pada Carburizing 800 ⁰ C tanpa beban penarikan spot terluar (1)	68
26 Lapisan karburasi (carburizing layer) pada carburizing.....	69



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Tabulasi Data Difusi.....	13
Tabel 2 Variabel Pengujian Kekerasan Vickers (ASTM E-92).....	21
Tabel 3 Tabulasi Data Difusi.....	29
Tabel 4 Data hasil penelitian nilai kekerasan baja karbon pada kondisi tungku yang berbeda	40
Tabel 5 Data hasil penelitian nilai kekerasan baja karbon pada kondisi <i>carburizing</i> tanpa beban penarikan.....	40
Tabel 6 Data nilai kekerasan pada temperatur carburizing 600 ⁰ C, 650 ⁰ C, 700 ⁰ C, dan 750 ⁰ C dengan beban penarikan	40
Tabel 7 Data Nila rata-rata hasil penelitian pada temperatur carburizing 600 ⁰ C, 650 ⁰ C, 700 ⁰ C, dan 750 ⁰ C dengan beban penarikan.....	41
Tabel 8 Komposisi arang tulang.....	51
Tabel 9 Persentase perlite pada carburizing beban penarikan σ_p pada temperatur 700 ⁰ C, 750 ⁰ C, dan 800 ⁰ C tanpa penarikan	58
Tabel 10 Data komposisi kimia material Carburizing temperatur 700 ⁰ C, 750 ⁰ C, 800 ⁰ C tanpa penarikan.....	64
Tabel 11 Data komposisi unsur material raw material	65
Tabel 12 Data komposisi unsur material Carburizing 700 ⁰ C penarikan σ_p	66
Tabel 13 Data komposisi unsur material Carburizing 750 ⁰ C penarikan σ_p	67
Tabel 14 Data komposisi unsur material Carburizing 800 ⁰ C tanpa penarikan.....	68
Tabel 15 Data komposisi kimia unsur C dan Fe material temperatur (700 ⁰ C, 750 ⁰ C) Carburizing dengan penarikan σ_p , dan 800 ⁰ C tanpa penarikan pada permukaan terluar.....	70
Tabel 16 Data komposisi kimia unsur Fe material Carburizing pada surface ke core....	71



DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/singkatan	Arti dan keterangan
S	= Sulfur
P	= Fosfor
Si	= Silicon
Mn	= Mangan
BaCO ₃	= Barium Carbonate
CaCO ₃	= Calcium Carbonate
HR _B	= <i>Hardness</i> Rockwell skala B
HR _C	= <i>Hardness</i> Rockwell skala C
H _V	= <i>Hardness</i> Vickers
ATK	= Arang tulang kerbau
σ_p	= Tegangan Proporsional (kN/mm ²)
Fe	= Besi
Fe ₃ C	= Besi Carbida
NaCO ₃	= Natrium Carbonate
BHN	= <i>Hardness</i> Brinnell
P	= Besar beban Indentor (kg)
D	= Diameter Indentor (mm)
D	= Diameter indentasi (mm)
T	= Kedalaman indentasi (mm)
d_r	= Diameter rata-rata bekas injakan metode Vickers (mm)
Θ	= sudut puncak (136°)
T	= Temperatur Carburizing (°C)
l_o	= Panjang mula-mula (mm)
l_l	= Panjang akhir (mm)



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Proses pengerasan permukaan ini sangat di pengaruhi oleh jumlah kadar karbon yang terkandung pada baja. Baja karbon merupakan campuran dari besi dan karbon yang ditambah unsur –unsur sulfur (S), Posfor (P), silicon (Si) dan mangan (Mn). Salah satu cara untuk melakukan pengerasan permukaan adalah dengan proses pengarbonan dengan media carbon padat atau *pack carburizing*.

Untuk melakukan proses *carburizing* ini, diperlukan tungku pembakar yang dirancang tahan panas serta mudah dioperasikan, aman dengan bahan bakar batu bara, untuk penguji tungku yang telah dirancang dilakukan pengujian pada baja karbon rendah dengan menggunakan media karburisasi campuran arang tempurung kelapa dan $BaCO_3$. Temperatur pemanasan $980^{\circ}C$ dan waktu tahan 4 jam. Kemudian dilanjutkan dengan proses *quenching*. Dari hasil *metallography* dapat dilihat sampel uji yang telah dilakukan karburisasi, pada sisi luarnya terlihat struktur mikro *martensite* dan bagian tengah *ferrite – pearlite*. Ini menunjukkan bahan uji telah terjadi pengerasan permukaan dengan bertambahnya unsur karbon pada permukaan bahan uji (Nurzal, 2014).

Penelitian lain dengan meningkatkan mutu logam terutama kekerasannya dengan proses karburisasi. Menurut penelitian (Kuswanto, 2010) yang meneliti tentang perlakuan *pack carburizing* pada baja karbon rendah sebagai material alternatif untuk pisau potong dimana proses dari *pack carburizing* adalah didalam ruangan dapur dilakukan pemanasan secara bertahap, tahap pertama $200^{\circ}C$ selama 1 jam, tahap ke dua $500^{\circ}C$ selama 1 jam dan $700^{\circ}C$ selama 1 jam, terakhir pada temperatur *carburizing* $900^{\circ}C$ selama 1 jam. Selanjutnya dilakukan pendinginan secara perlahan-lahan, dimana dapur dimatikan dan ditunggu sampai turun pada temperatur $350^{\circ}C$. Setelah mencapai temperatur tersebut, pintu dapur dibuka untuk mengeluarkan kotak *carburizing*. Diluar ruangan dapur tutup kotak ng dibuka, semua spesimen dikeluarkan untuk didinginkan secara



Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa pemanfaatan media lokal dalam hal ini tulang sapi (CaCO_3) dapat dipergunakan sebagai alternatif pengganti katalisator BaCO_3 (barium karbonat) dalam proses karburasi padat. Dengan semakin besar besaran butiran katalisator, maka laju penyerapan karbon paling cepat terjadi pada proses dengan penahanan waktu 15 menit dengan komposisi dari 1 kg campuran yang terdiri 70% karbon (arang kayu nani) dan 30% tulang sapi (CaCO_3) dengan besaran butiran 5 mm yaitu sebesar 2.89 HRC. Kemudian diikuti dengan besaran butiran katalisator 3 mm dan 1 mm dengan nilai 155.19 HRC dan 154.18 HRC, dimana peningkatan laju nilai kekerasan rata-rata terbesar terjadi pada besaran butiran katalisator 5 mm sebesar 155.90 HRC atau 35.90% meningkat dari nilai kekerasan awal (Nanulaitta, 2012).

Hasil penelitian lain menunjukkan bahwa carburizer dengan arang tulang kambing memberikan kekerasan permukaan yang paling tinggi (556.37 HV) diikuti oleh arang bambu (532.01 HV), arang pelepah kelapa (363.41 HV) dan arang tulang bebek (340.41 HV). Sedangkan dari segi kedalaman tingkat kekerasan, carburizer dengan arang bambu memberikan efektifitas kedalaman yang paling tinggi yaitu sampai 2.6 mm diikuti oleh carburizer dengan arang tulang kambing, arang tulang bebek dan arang pelepah kelapa dengan kedalaman kekerasan berturut-turut sebesar 1.4 mm, 1.2 mm dan 1 mm (Ketut Putra Negara, 2016).

Pada penelitian sebelumnya (Bontong et al., 2018) arang tulang kerbau proses *pack carburizing* berpengaruh pada kekerasan, kekuatan, dan keausan baja karbon yang dipanaskan pada temperatur pemanasan 850°C dan 950°C dengan ukuran butir arang tulang kerbau mesh 20 dan mesh 30 serta persentase volume arang tulang kerbau dengan BaCO_3 60% ATK+40% BaCO_3 , 70% ATK+30% BaCO_3 , 80% ATK+20% BaCO_3 . Diperoleh bahwa terjadi peningkatan kekerasan permukaan baik baja karbon rendah kekerasan tertinggi pada temperatur pemanasan 850°C pada mesh 20 dengan persentase volume 80% ATK+20% BaCO_3 yakni 318.749 kg/mm^2 , dan untuk baja karbon sedang tertinggi terjadi pada suhu 850°C dengan ukuran butir arang tulang mesh 20 dengan volume persentase arang tulang kerbau 80% ATK+20% BaCO_3 yakni 400.738 kg/mm^2 .



Pada temperatur pemanasan 850⁰C dan 950⁰C kekuatan tarik baja karbon rendah makin meningkat baik pada tiap volume persentase arang tulang kerbau mesh 20 dan mesh 30 dibandingkan pada keadaan normal. Kekuatan tarik tertinggi pada material yang di *pack carburizing* yakni pada ukuran butir mesh 20 dengan temperature pemansan 950⁰C dengan persentase 80%ATK+20%BaCO₃ yakni 1806.532 N/mm², begitu pula pada baja karbon sedang, kekuatan tarik yang mengalami *pack carburizing* dibandingkan dengan yang normal dan tertinggi pada mesh 20 dengan temperatur pemansan 850⁰C dengan presentase arang tulang kerbau 80%ATK + 20%BaCO₃ yakni 2199.579 N/mm². Hal ini menggambarkan bahwa proses *pack carburizing* dengan media arang tulang kerbau berpengaruh terhadap kekerasan, kekuatan tarik baja karbon rendah dan sedang (Bontong et al., 2018).

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Priadi, Setyadi, & Siradj, 2003) pengujian tarik panas dilakukan pada variasi temperatur 850⁰C, 900⁰C, 950⁰C dan laju regangan 0.01 dan 1/detik. Hasil pengujian tarik panas menunjukkan semakin tinggi temperatur akan menurunkan tegangan tarik maksimum dan tegangan alir baja S48C. Penurunan tegangan maksimum paling tinggi terjadi pada temperatur 950⁰C sebesar 85% dari kondisi temperatur kamar, sedangkan penurunan tegangan alir paling tinggi terjadi pada temperatur pengujian 950⁰C sebesar 31% dibanding temperatur 850⁰C, regangan (ϵ) 0.23 dan kecepatan/laju regangan ($\dot{\epsilon}$) 1/detik dengan sebesar 27% dibanding temperatur dengan regangan yang sama tetapi $\dot{\epsilon}$ 0.01/detik. Untuk kenaikan laju regangan dari 0.01/detik menjadi 1/detik pada kisaran temperatur 850⁰C-950⁰C akan meningkatkan tegangan alir sebesar 46-53%.

Dalam pengaplikasian kebijakan konservasi energi di Indonesia, dimana permasalahan utamanya adalah konsep manajemen energi yang mengutamakan penyediaan/perluasan akses energi dengan diikuti permasalahan cadangan energi fosil yang semakin berkurang dan adanya peningkatan ekonomi. Maka pemerintah memberlakukan peraturan yaitu PP No.70 Tahun 2009 tentang Konservasi Energi.



Perlu analisa peluang hemat energi yaitu untuk mengetahui potensi pemanfaatan energi yang dapat diterapkan pada ruangan yang tidak masuk efisien dalam menggunakan energi listrik. Berdasarkan standar Intensitas

Konsumsi Energi (IKE) kategori efisien dalam Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia No. 13 Tahun 2012 (Duldes S. Lambey, 2021)

Dari hal tersebut di atas penulis ingin mengembangkan proses *pack carburizing* pada temperatur lebih rendah dari temperatur *carburizing* normal. Metode tersebut dapat dilakukan dengan penarikan pada kondisi panas hingga batas proporsional material baja karbon tanpa terjadi deformasi pada baja karbon. Metode ini memanfaatkan arang tulang kerbau sebagai sumber *energizer* dan $BaCO_3$ sebagai katalisator. Pada proses *pack carburizing* pada umumnya dilakukan pada temperatur $750^{\circ}C$ - $950^{\circ}C$ dimana hal ini membutuhkan waktu lama dan biaya yang lebih besar sehingga dibutuhkan suatu metode untuk mengurangi waktu pemanasan serta menurunkan temperatur pemanasannya. Untuk memperoleh kekerasan yang sama dengan proses *pack carburizing* tapi temperatur yang lebih kecil maka dapat dilakukan pemberian gaya luar atau penarikan dengan beban sambil dilakukan proses *pack carburizing*. Logam pada kondisi panas jika diberi beban akan memudahkan terjadinya regangan sehingga jarak antar atom (*interspace atom*) baja karbon akan semakin besar yang memudahkan karbon berdifusi masuk kedalam baja. Dimana Peningkatan kekerasan terjadi bila suhu naik, atom-atom bergetar dengan energi yang lebih besar, dan sejumlah kecil atom akan berpindah dalam kisi. Bila atom mengisi kekosongan, maka terjadi lubang atau kekosongan baru. Kekosongan baru ini dapat diisi oleh atom lain yang berasal dari sekitar material. Sebagai hasil akhir dapat dikatakan bahwa atom melakukan gerak acak dalam kristal. Mekanisme gerak acak dapat diterapkan pada atom karbon yang bergerak diantara atom besi, dari posisi sisipan yang satu ke posisi sisipan berikutnya (Shaifudin et al., 2018; Vlack, 1991). Dari hal tersebut maka dilakukan penelitian dengan pemberian beban sampai batas tegangan proporsional tanpa terjadinya deformasi yang bertujuan mengurangi temperatur dan waktu untuk melakukan proses *pack carburizing*. Dengan pemberian beban maka diharapkan menimbulkan regangan



ih besar yang mengakibatkan ruang antar atom semakin besar dan cinkan carbon mudah masuk berdifusi walaupun pada temperatur di mperatur *carburizing* normal, hal ini berdampak pada efisiensi

penggunaan energi dengan penghematan penggunaan listrik sehingga adanya reduksi temperatur pemanasan yang berdampak pada pengurangan biaya. Penelitian ini dilakukan pada proses *pack carburizing* dengan temperatur lebih rendah dari temperatur *carburizing* normal yaitu 600⁰C, 650⁰C, 700⁰C, dan 750⁰C dengan beban tarik $\frac{1}{4} \sigma_p$, $\frac{1}{2} \sigma_p$, $\frac{3}{4} \sigma_p$, dan σ_p serta arang tulang kerbau sebagai sumber *energizer* dan BaCO₃ sebagai katalisator dengan presentase 80% ATK+20%BaCO₃, *holding time* 4 jam, mesh 20, dan pendinginan secara perlahan di dalam tungku. Berdasarkan hal tersebut di atas mendasari penulis mengambil judul penelitian “*Analisis pengaruh penarikan proses pack carburizing terhadap sifat mekanik baja karbon*”.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh penarikan pada proses *pack carburizing* terhadap kekerasan baja karbon?
2. Bagaimana pengaruh penarikan pada proses *pack carburizing* terhadap struktur mikro baja karbon?
3. Bagaimana pengaruh penarikan pada proses *pack carburizing* terhadap komposisi karbon baja karbon?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Untuk menganalisa pengaruh penarikan proses *pack carburizing* terhadap kekerasan baja karbon.
2. Untuk menganalisa pengaruh penarikan proses *pack carburizing* terhadap struktur mikro baja karbon.
3. Untuk menganalisa pengaruh penarikan proses *pack carburizing* terhadap komposisi karbon baja karbon.

1.4 Batasan Masalah



ar penelitian ini dapat mencapai tujuan yang diharapkan maka penulis batasan pada :
han yang digunakan adalah baja karbon dalam bentuk pejal.

2. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah penarikan proses *pack carburizing*.
3. Media karburasi arang tulang kerbau mesh 20 dan aktivator BaCO₃.
4. Beban penarikan sebesar $\frac{1}{4} \sigma_p$, $\frac{1}{2} \sigma_p$, $\frac{3}{4} \sigma_p$, dan σ_p .
5. Suhu yang digunakan pada proses penarikan *pack carburizing*, 600°C, 650°C, 700°C, dan 750°C.
6. Perbandingan volume arang tulang kerbau dengan BaCO₃ sebesar 80% : 20%.
7. Waktu tahan dalam tungku selama proses *pack carburizing* 4 jam.
8. Media pendingin setelah *pack carburizing* menggunakan pendingin dalam tungku.
9. Tidak dilakukan proses *quenching*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Manfaat teoritis

Dengan melakukan penelitian ini maka besarnya nilai kekerasan, struktur mikro, dan komposisi karbon pada baja karbon sebelum dan sesudah mengalami penarikan *pack carburizing* dapat ditentukan, sehingga penelitian ini bisa memberikan sumbangan ilmiah baru dibidang material konstruksi khususnya pemanfaatan baja karbon sebagai material konstruksi.

2. Manfaat di bidang teknik

Dengan mengetahui nilai sifat mekanis baja karbon yakni nilai kekerasan, struktur mikro dan komposisi karbon pada baja karbon setelah mengalami penarikan proses *pack carburizing*, maka praktisi dibidang teknik dapat menggunakannya dalam menganalisis, memilih dan mendesain baja karbon sebagai bahan teknik lebih efektif pada berbagai kebutuhan teknik dibidang konstruksi, dengan aplikasi pada material baja yang rentan terhadap tarikan, dan kekerasan pada kondisi panas. Diharapkan sebagai bahan referensi baru untuk



ruan metode dalam peningkatan kekerasan pada proses *pack carburizing* temperatur rendah dengan pemberian beban penarikan.

BAB II

KERANGKA KONSEPTUAL DAN HIPOTESIS

PENELITIAN

2.1 Kerangka Konseptual

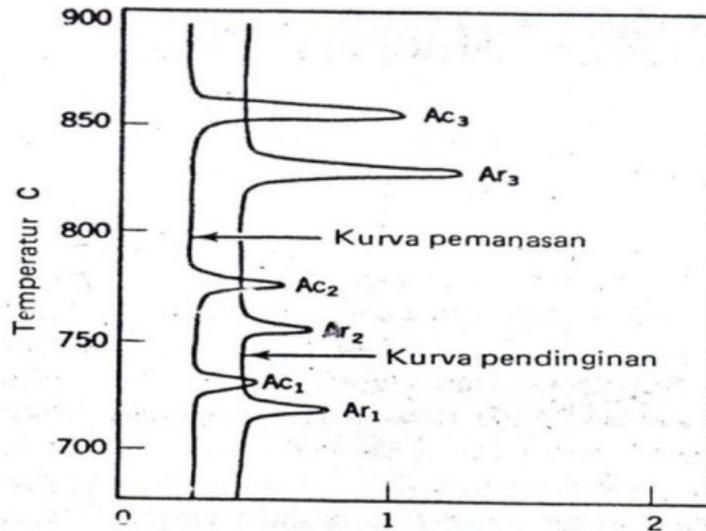
2.1.1 *Carburizing*

Perlakuan panas pada baja karbon didasarkan pada prinsip termokimia dengan sistem difusi, yaitu suatu cara untuk mengubah sifat-sifat permukaan substrat, maka dibutuhkan bahan tambah dari luar dan bahan tambahan tersebut akan terdifusi ke permukaan substrat. Perlakuan panas pada baja juga didasarkan pada prinsip metalurgi fisik yang berkaitan dengan proses, sifat-sifat dan struktur mikro. Pada proses perlakuan panas, keseluruhan proses menggunakan panas untuk mengubah struktur baja. Untuk mengubah sifat-sifat permukaan baja dapat dilakukan dengan mengubah struktur dan bentuk permukaan dengan perlakuan termomekanis atau *thermomechanical treatment* (DNK et al., 2017).

Chemical heat treatment pada baja merupakan proses pemanasan baja dengan menambahkan zat-zat tertentu saat pemanasan, kemudian didinginkan. *Chemical heat treatment* ini dapat berupa (1) *carburizing*, (2) *nitriding*, (3) *cyaniding* atau *carbonitriding*, dan (4) *diffusion coating*. *Carburizing* adalah proses pelapisan permukaan baja dengan karbon melalui pemanasan baja pada suhu 800⁰C–950⁰C, dimana proses pemanasan dan pendinginan logam dalam keadaan padat untuk mengubah sifat-sifat fisis dan mekanis logam tersebut. Melalui perlakuan panas yang tepat, tegangan dalam dapat dikurangi, besar butir dapat diperbesar atau diperkecil, ketangguhan ditingkatkan atau dihasilkan suatu permukaan yang keras di sekeliling inti yang ulet. Laju pendinginan merupakan faktor pengendali, dimana pendinginan yang lebih cepat dari pada pendinginan kritis akan menghasilkan struktur yang keras sedangkan pendinginan yang lambat akan menghasilkan struktur yang lebih lunak.

Pada baja dengan kadar karbon 0,20% dipanaskan secara merata dengan suhu yang dicatat pada selang waktu tertentu, maka diperoleh kurva umbar 1 sebagai berikut.





Gambar 1 Kurva Laju-Invers untuk Baja SAE (B.H. et al., 1992)

Perubahan - perubahan yang terjadi pada titik - titik kritis adalah merupakan perubahan alotropik. Menurut definisinya, suatu perubahan alotropik adalah perubahan yang mampu balik atau *reversible* pada struktur atom suatu logam yang diikuti dengan perubahan sifat. Perubahan titik - titik tersebut harus diketahui, mengingat perlakuan panas pada baja meliputi pemanasan di atas daerah ini. Baja tidak dapat dikeraskan kecuali dipanaskan di atas daerah kritis bawah dan kadang - kadang di atas daerah kritis atas (Smallman & Bishop, 1999)

Baja karbon 0.20% yang dipanaskan pada suhu 870°C , di atas titik Ar_3 baja merupakan larutan padat dari karbon dalam besi-gamma dan disebut austenit. Atom - atom besi membentuk kisi kubik pemusatan sisi (*face centered cubic*) dan bersifat non magnetik. Dan didinginkan sampai mencapai suhu di bawah titik Ar_3 , atom - atom akan membentuk kisi kubik pemusatan ruang (*body centered cubic*). Struktur yang baru ini disebut ferit atau besi - alpha dan merupakan larutan padat karbon dan besi - alpha. Daya larut karbon dalam besi - alpha jauh lebih rendah dibandingkan bila karbon di dalam besi - gamma. Pada titik Ar_2 baja bersifat magnetik, dan bila baja didinginkan sampai pada garis Ar_1 , ferit yang terbentuk akan bertambah. Pada garis Ar_1 austenit yang masih ada akan bertransformasi menjadi suatu struktur baru yang disebut perlit. Perlit tampak



apipisan yang terdiri dari lempeng ferit dan karbida besi berselang seling.

la baja dengan kadar karbon melampui 0.20% dimana ferit mulai dan mengendap dari austenit. Baja yang berkadar karbon 0.80% disebut

baja eutektoid dan strukturnya adalah 100% perlit. Pada titik eutektoid tersebut adalah suhu terendah dalam logam dimana terjadi perubahan dalam keadaan larutan padat, dan merupakan suhu kesetimbangan terendah dimana austenit terurai menjadi ferit dan sementit (B.H. et al., 1992).

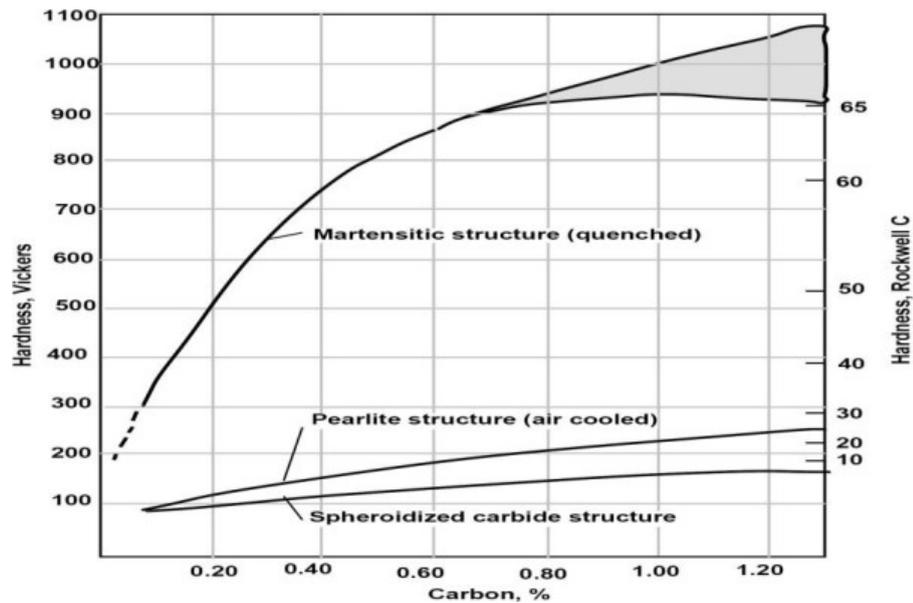
Suhu pengerasan suhu austenisasi dan suhu rekristalisasi baja, besarnya ditentukan berdasarkan pada persentase kandungan karbon. Pedoman untuk menentukan suhu pengerasan ini dapat menggunakan beberapa cara seperti diagram besi – besi karbida ($\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$) untuk baja karbon, suhu pengerasan berada pada $30^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}$ di atas suhu kritis standar perlakuan panas bahan (misalnya AISI) dan dengan menggunakan katalog produk. Baja dengan kandungan karbon di bawah 0.35% tidak dapat dikeraskan kecuali dilakukan penambahan unsur karbon terlebih dahulu pada bahan yang akan dikeraskan melalui proses karburasi (*carburizing*).

Komponen dan struktur yang terbuat dari baja mempunyai permasalahan bukan hanya dalam soal kekerasan, keuletan atau ketangguhan, tetapi juga dalam hal kelelahan yang disebabkan oleh keausan permukaan karena adanya tegangan bolak-balik dan tegangan lengkung. Untuk mengatasi permasalahan tersebut perlu memberikan kekerasan pada permukaan komponen, yaitu dapat dilakukan dengan pengarbonan, penitrisasi arus frekuensi tinggi atau nyala api dan sebagainya.

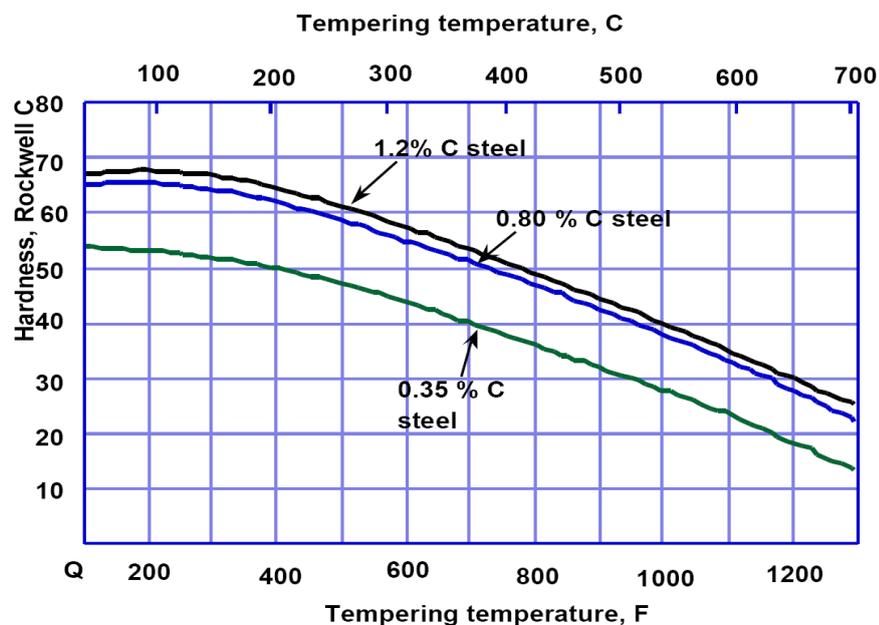
Pada proses pengarbonan padat dalam kotak, menggunakan arang yang dicampur dengan larutan tertentu seperti NaCO_3 , CaCO_3 atau BaCO_3 yang berfungsi sebagai bahan *activator* dan sekaligus sebagai unsur energizer, kemudian kedalam campuran tersebut dimasukkan baja berupa spesimen yang akan dikeraskan. Kotak kemudian ditutup rapat untuk menghindari udara dari luar dan kemudian dipanaskan 750°C - 950°C , dengan demikian maka permukaan baja akan mempunyai kadar karbon yang lebih tinggi. Karena struktur baja menjadi kasar yang disebabkan pemanasan yang lama, maka setelah pengerasan pertama pada 750°C - 950°C , kemudian dihaluskan dengan jalan pengerasan kedua atau *diquenching* pada 800°C (Gambar 2) sementara *ditempering* pada 150°C - 200°C

3) sebelum digunakan.





Gambar 2 Kekerasan akibat proses Quenching (G & R.H, 2020)



Gambar 3 Temperatur Tempering terhadap Kekerasan

Penelitian sebelumnya tentang pemanfaatan media lokal dalam hal ini tulang sapi (CaCO_3) dapat dipergunakan sebagai alternatif pengganti katalisator BaCO_3 (Barium Carbonat) dalam proses karburasi dengan semakin besar besaran butiran katalisator, laju penyerapan karbon paling cepat terjadi pada proses enahanan waktu 15 menit dengan komposisi dari 1 kg campuran yang)% karbon (arang kayu nani) dan 30% tulang sapi (CaCO_3) dengan utiran 5 mm yaitu sebesar 2.89 HRC. Kemudian diikuti dengan besaran



butiran katalisator 3 mm dan 1 mm dengan nilai 155.19 HRC dan 154.18 HRC dimana peningkatan laju nilai kekerasan rata-rata terbesar terjadi pada besaran butiran katalisator 5 mm sebesar 155.90 HRC atau 35.90% meningkat dari nilai kekerasan awal (Nanulaitta, 2012).

Penelitian mengenai pengaruh waktu tahan karburasi padat terhadap kekerasan dilakukan oleh Sudarsono terhadap permukaan baja AISI – SAE 1522 dengan arang tempurung kelapa dan NaCO_3 sebesar 20% sebagai bahan pengaktif. Hasilnya adalah 570 HV (2 jam), 753 HV (3 jam) dan 773 HV (4 jam) (F. D. & JW, 2003). Penelitian tentang pengaruh komposisi media karburasi serbuk arang kayu barium karbonat terhadap kekerasan dan keausan baja karbon rendah. Barium karbonat (BaCO_3) divariasikan 15%, 20%, 25%, dan 30% dengan temperatur perlakuan 850°C , 900°C dan 950°C dan ditahan selama 2 jam. Hasil yang diperoleh adalah kekerasan permukaan tertinggi, yaitu 67% dan ketahanan terhadap keausan sebesar 86% terutama diperoleh pada proses karburasi pada temperatur 950°C dengan penambahan barium karbonat sebesar 20% (Suryanto, 2005).

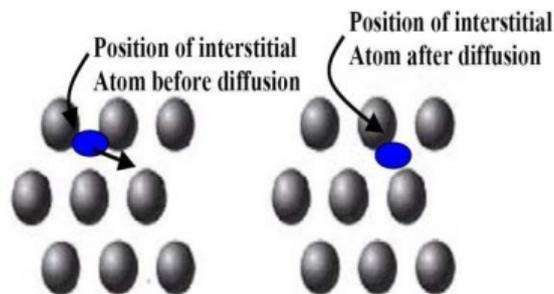
Proses karburasi pada pahat bubut baja ST 37 dengan suhu 950°C media arang batok ditahan 2 jam dilakukan oleh (Ismy, 2009) dilanjutkan dengan proses *quenching*. Hasilnya diperoleh bahwa baja ST 37 yang dikenai proses karburasi dapat digunakan untuk memotong baja atau material lainnya yang lebih lunak. Penelitian tentang pengaruh proses *carburizing* terhadap perilaku *fatigue* bertakik baja tahan karat austenit AISI 316 hasilnya menunjukkan bahwa ketahanan *fatigue* sampel yang dikarburasi meningkat dibandingkan dengan sampel tanpa perlakuan (Akita & Tokaji, 2006).

2.1.2 Difusi

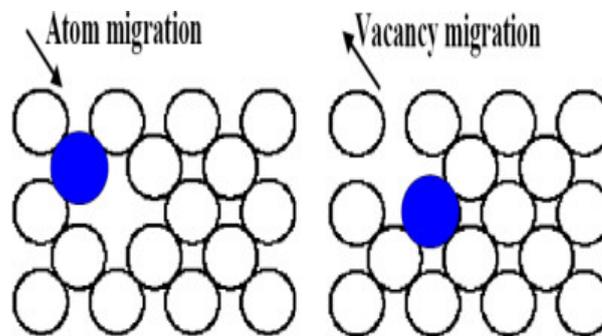
Difusi didefinisikan sebagai mekanisme atom berpindah ke dalam atau keluar dari benda uji. Apabila suatu material temperaturnya dinaikkan, maka energinya akan meningkat yang menyebabkan atom-atom bergerak sehingga akan jarak antar atom yang lebih besar. Suatu atom bila memiliki energi cukup untuk mendobrak ikatannya dan berpindah ke posisi yang baru, maka atom yang sama akan terjadi suatu proses pergerakan yang disebut proses pergerakan ini akan diikuti oleh pergerakan atom lain yang berdekatan



sampai terjadi kondisi yang stabil dan peristiwa ini umumnya berlangsung melalui dua mekanisme yaitu sisipan (*interstitial*) (Gambar 4) dan kekosongan (*vacancy*) (Gambar 5).



Gambar 4 Mekanisme Sisipan/Interstitial (Vlack, 1991)



Gambar 5 Mekanisme Kekosongan/Vacancy (Vlack, 1991)

Struktur ferit (besi α) dan austenit (besi γ) memiliki kemampuan untuk menampung atom-atom penyisip seperti atom karbon untuk membentuk larutan padat. Karena ukuran atom karbon relatif kecil dibandingkan dengan atom besi, sehingga memungkinkan atom karbon masuk kedalam kisi besi α dan besi γ sebagai atom yang larut secara interstisi. Unsur paduan logam seperti mangan, nikel dan krom memiliki atom yang relatif besar sehingga bila masuk kedalam besi akan membentuk larutan padat substitusi oleh karena itu, maka perbandingan ukuran atom karbon dengan ukuran celah yang tersedia menunjukkan bahwa beberapa distorsi akan terjadi pada saat atom karbon masuk ke dalam kisi besi (Abbaschian et al., 2009).



Kisi pada logam dapat dipengaruhi oleh banyak faktor, termasuk suhu, komposisi material, ukuran butiran, dan jenis cacat kristal. Misalnya, pada suhu yang tinggi, atom-atom logam dapat bergerak lebih mudah dan proses difusi

dapat terjadi lebih cepat, sementara pada suhu rendah, proses difusi dapat lebih lambat. Dalam rekayasa material, pemahaman dan pengendalian difusi pada logam sangat penting untuk mencapai sifat dan kinerja yang diinginkan dalam aplikasi praktis (Fick, 1855).

Suhu memiliki pengaruh paling besar pada koefisien dan laju difusi. Misalnya, untuk difusi sendiri Fe dalam α -Fe, koefisien difusi meningkat kira-kira enam kali lipat (dari 3.0×10^{-21} hingga 1.8×10^{-15} in kenaikan suhu dari 500°C menjadi 900°C (Tabel 1). Suhu memiliki pengaruh paling besar pada koefisien dan laju difusi (Callister, 2007). Ketergantungan suhu dari dapat di lihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Tabulasi Data Difusi

Diffusing Species	Host Metal	D_0 (m/s ²)	Activation Energy (QA)		Calculated Values	
			kJ/mol	eV/atom	(T(°C))	D(m/s ²)
Fe	α -Fe (BCC)	2.8×10^{-4}	251	2.6	500	3.0×10^{-21}
					900	1.8×10^{-15}
Fe	g-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	g-Fe	2.5×10^{-5}	148	1.53	900	5.9×10^{-12}
					1100	5.3×10^{-11}
Ca	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	4.2×10^{-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}

Source: E. A. Brandes and G. B. Brook (Editors), *Smithells Metals Reference Book, 7th edition, ButterworthHeinemann, Oxford, 1992.*

2.1.3 Baja Karbon

Baja merupakan salah satu jenis logam yang banyak digunakan dengan unsur karbon sebagai salah satu dasar campurannya. Di samping itu baja juga mengandung unsur-unsur lain seperti sulfur (S), Posfor (P), Silikon (Si), Mangan



dan sebagainya yang jumlahnya dibatasi. Sifat baja pada umumnya sangat dipengaruhi oleh presentase karbon dan struktur mikro. Struktur mikro pada baja dipengaruhi oleh perlakuan panas dan komposisi baja. Karbon dengan

unsur campuran lain dalam baja membentuk karbid yang dapat menambah kekerasan, tahan gores dan tahan suhu baja. Perbedaan presentase karbon dalam campuran logam baja karbon menjadi salah satu cara mengklasifikasikan baja. Berdasarkan kandungan karbon, baja dibagi menjadi tiga macam, yaitu :

1. Baja karbon rendah

Baja karbon rendah (*low carbon steel*) mengandung karbon dalam campuran baja karbon kurang dari 0.3%. Baja ini bukan baja yang keras karena kandungan karbonnya yang rendah kurang dari 0.3%C. Baja karbon rendah tidak dapat dikeraskan karena kandungan karbonnya tidak cukup untuk membentuk struktur martensit (Hari, 1999).

2. Baja karbon menengah

Baja karbon sedang mengandung karbon 0.3%C – 0.6%C (*medium carbon steel*) dan dengan kandungan karbonnya memungkinkan baja untuk dikeraskan sebagian dengan perlakuan panas (*heat treatment*) yang sesuai. Baja karbon sedang lebih keras serta lebih kuat dibandingkan dengan baja karbon rendah (Hari, 1999).

3. Baja karbon tinggi

Baja karbon tinggi mengandung 0.6%C – 1.5%C dan memiliki kekerasan tinggi namun keuletannya lebih rendah, hampir tidak dapat diketahui jarak tegangan lumernya terhadap tegangan proporsional. Sedangkan pada baja karbon tinggi, pengerasan dengan perlakuan panas tidak memberikan hasil yang optimal dikarenakan terlalu banyaknya martensit sehingga membuat baja menjadi getas (Hari, 1999).

2.1.4 Arang Tulang Kerbau

Arang tulang (*carbo animalis*) adalah bahan berpori, hitam, berbutir yang dihasilkan dari pembakaran tulang hewan. Komposisinya bervariasi tergantung cara pembuatannya, namun sebagian besar terdiri dari trikalsium fosfat (atau hidroksiapatit) 57–80%, kalsium karbonat 6–10% dan karbon 7–10% (well & Bailey, 2006). Hal ini terutama digunakan untuk filtrasi dan asi.

Arang tulang kerbau mempunyai peran yang sangat penting bagi ekonomi ternak sebagai penghasil susu, daging, dan tenaga kerja (Ihsan, 2015).



Kerbau juga merupakan hewan paling penting dalam kehidupan sosial masyarakat Toraja, karena sebagai hewan potong pada upacara orang meninggal atau kedukaan (Somba, 2019). Berdasarkan data dari penelitian (Rombe, 2011), jumlah kerbau yang dipotong untuk upacara kedukaan adalah sekitar 13.000 ekor per tahun. Kerbau yang sangat banyak ini tentunya akan menimbulkan limbah tulang yang banyak. Menyikapi hal tersebut maka digunakan alternatif yaitu sebagai adsorben. Adsorben adalah zat yang mempunyai sifat mengikat pada permukaan dan sifat ini sangat menonjol pada padatan berpori (Sukardjo, 1999), kandungan organik penyusun tulang kerbau sebesar 35%. Kandungan karbon dalam tulang yang cukup banyak sehingga sangat memungkinkan dijadikan sebagai bahan baku pembuatan arang aktif. Arang aktif merupakan senyawa amorf yang dapat dihasilkan dari bahan-bahan yang mengandung karbon atau dari arang yang diperlakukan secara khusus untuk mendapatkan permukaan lebih luas. Luas permukaan arang aktif berkisar 400-800 m²/gram dengan ukuran pori antara 5-10 Å. Arang tulang memiliki daya serap yang tinggi karena arang tulang memiliki pori-pori dalam jumlah besar. Untuk memanfaatkan tulang kerbau sebagai sumber karbon maka akan diproses menjadi arang selanjutnya sebagai media karburasi pada proses *carburizing*.

2.1.5 Struktur Mikro Baja Karbon

Baja karbon merupakan logam paduan yang terbuat dari campuran besi dan karbon dengan kadar karbon tidak lebih dari 2.11%. Struktur mikro baja karbon terdiri dari komposisi kimia dan fase-fase kristal yang memiliki tiga jenis struktur yakni: pearlite, ferrite, dan sementite (Bhadeshia & Honeycombe, 2006; Callister, 2007; Smallman & Bishop, 1999).

1. Ferrite

Ferrite merupakan struktur mikro utama pada baja karbon murni yang mempunyai sifat magnetik serta memiliki kristal yang kubik beserta dengan satu



Struktur ferrite lebih lunak dan rapuh dibandingkan struktur pearlite dan sementite. Baja karbon dengan kadar karbon rendah akan cenderung memiliki jumlah struktur ferrite yang tinggi. Pada baja karbon dengan kandungan

karbon rendah (biasanya di bawah 0.02%), struktur mikro yang dominan adalah ferrit. Ferrit memiliki keuletan yang tinggi tetapi kekerasan yang rendah

2. Sementite

Sementite adalah struktur mikro pada baja karbon yang paling keras karena terdiri atas senyawa intermetalik Fe_3C . Struktur ini terbentuk melalui reaksi antara karbon dan besi dengan waktu pendinginan yang sangat lambat. Proses pembentukan sementite dari pearlite atau martensite dipercepat dengan proses pemanasan. Struktur sementite akan membentuk bila temperatur pendinginan terlalu lambat atau panjang.

3. Pearlite

Pearlite terbentuk dari beberapa elemen semacam ferrit dan sementit. Struktur pearlite membentuk secara alami pada baja karbon apabila terjadi pendinginan yang lambat. Pearlite terdiri dari campuran serbuk besi alfa (ferrit) dan serbuk besi karbida (cementit) yang membentuk lapisan-lapisan yang terlihat seperti corak yang terdiri dari butir yang saling berdekatan. Struktur pearlite memiliki kekuatan dan kekerasan yang sedang, dengan daya tahan deformasi yang tahan lama dan lebih elastis dibandingkan dengan sementit. Oleh karena itu, pearlite adalah struktur mikro yang paling sering digunakan pada baja karbon. Ukuran dan proporsi dari perlit pada baja tergantung pada temperatur pendinginan setelah perlakuan panas.

Selain struktur-struktur ini, terdapat juga beberapa struktur mikro lainnya yang dapat terbentuk pada baja karbon, seperti martensit dan ausenit, yang terbentuk melalui perlakuan panas yang berbeda. Martensit adalah struktur yang sangat keras dan rapuh, sedangkan ausenit adalah struktur stabil yang terbentuk pada baja tahan karat. Struktur mikro baja karbon sangat penting dalam merancang proses perlakuan panas yang sesuai untuk mencapai sifat-sifat mekanik yang diinginkan, seperti kekuatan, keuletan, dan kekerasan.

2.1.6 Pengujian Kekerasan



Kekerasan (*hardness*) adalah kemampuan bahan untuk tahan terhadap abrasi, pengikisan, keausan, indentasi, penetrasi, dan mampu menahan tegangan tarik tanpa mengalami deformasi plastis. Pengujian kekerasan bertujuan untuk mengevaluasi perlakuan panas, dan mendeteksi pengerasan atau pelunakan

akibat *overheating*, dekarburisasi ataupun pengerasan permukaan (Ashby & Jones, 2012; Dieter & Bacon, 1976).

Pengujian kekerasan dibagi menjadi 3 jenis berdasarkan sifat pengujiannya, antara lain sebagai berikut :

1. Metode Goresan

Pengujian kekerasan dengan metode gores dilakukan dengan cara mengukur kemampuan suatu material dengan menggoreskan material uji kepada spesimen.

Skala uji yang digunakan adalah skala Mohs, yang terdiri dari 10 nilai material standar yang sesuai dalam menggores material dari nilai 1 yang paling lunak sampai dengan nilai 10 paling keras. Skalanya adalah sebagai berikut :

- 1) Talk/Gips;
- 2) Gypsum;
- 3) Calcite;
- 4) Fluorite;
- 5) Apatite;
- 6) Orthoclase;
- 7) Quartz;
- 8) Topas;
- 9) Corundum;
- 10) Diamond (Intan).

Kelemahan dari skala Mohs adalah jarak antara intervalnya kurang spesifik yaitu nilai kekerasan tiap benda kurang akurat.

2. Metode Dinamik

Pengujian kekerasan dengan metode dinamik (kekerasan pantul) dilakukan dengan cara menghitung energi *impact* yang dihasilkan oleh indenter yang dijatuhkan pada permukaan spesimen. Alat yang digunakan untuk pengujian ini adalah Shore Scleroscope.





Gambar 6 Shore Scleroscope (Ashby & Jones, 2012)

Indentor dijatuhkan pada permukaan material, kemudian pantulan yang amat tinggi yang terjadi. Perbedaan ketinggian saat dijatuhkan dan pantulannya menunjukkan besarnya energi yang diserap material. Pada metode dinamik indentor berupa bola.

3. Metode Indentansi

Pengujian kekerasan dengan metode indentansi (metode penekanan) adalah dengan cara mengukur ketahanan suatu material terhadap gaya tekanan yang diberikan oleh indentor dengan memperhatikan besar beban yang diberikan dan besar indentansi. Uji kekerasan dengan metode indentansi ini terdiri atas beberapa cara, antara lain :

A. Uji Kekerasan Brinell

Uji kekerasan ini paling pertama diterima secara luas dan standar yang ditemukan oleh J.A.Brinell pada tahun 1900. J.A.Brinell mengujinya dengan cara melakukan indentansi pada permukaan spesimen. Indentor berupa bola baja yang memiliki variasi beban dari 500 kg sampai 1500 kg untuk *intermediate hardness* dan 3000 kg untuk *hard metal*. Pada material yang sangat keras digunakan bola karbida untuk memperkecil distorsi indentor. Prinsip dari pengujian kekerasan ini adalah dengan menekan indentor selama waktu 30 detik. Lalu diameter hasil

diukur dengan menggunakan mikroskop optik.

diameter harus dihitung dua kali pada sudut tegak lurus yang berbeda.

dan dirata-ratakan. Kekerasan Brinell adalah besar beban indentor per luas



permukaan hasil indentansi. Dapat dirumuskan sebagai berikut nilai kekerasan (BHN).

$$BHN = \frac{2 \cdot P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{P}{\pi D t} \dots\dots\dots(1)$$

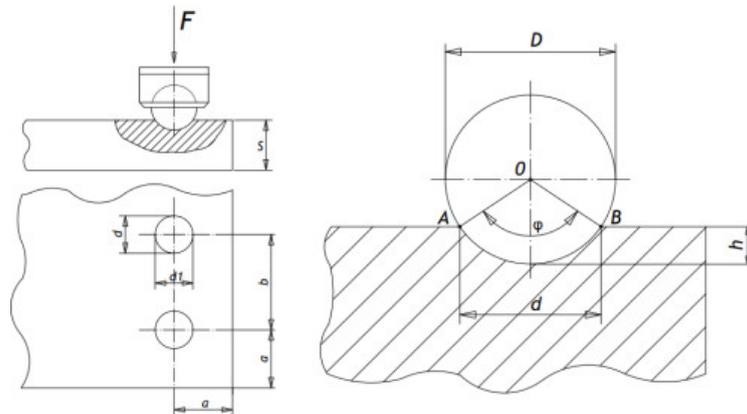
Keterangan :

P = besar beban indenter (kg)

D = diameter indenter (mm)

d = diameter indentasi (mm)

t = kedalaman indentasi (mm)



Gambar 7 Indentor kekerasan Brinell (B.H. et al., 1992)

BHN bukan merupakan sebuah besaran fisik yang kurang baik, karena tidak meliputi tekanan rata-rata pada seluruh permukaan indentasi.

1) Kelemahan dari Uji Brinell

Kelemahan dalam pengujian kekerasan Brinell adalah uji Brinell tidak dapat digunakan pada benda yang tipis dan kecil. Begitu juga dengan halnya uji Brinell tidak dapat digunakan pada material yang sangat lunak maupun sangat keras.

2) Keuntungan dari Uji Brinell

Adapun keuntungan dari uji Brinell adalah pada pengujian ini tidak terpengaruh oleh permukaan material yang kasar dan bekas penekan yang cukup jelas sehingga mudah diamati.



B. Uji Kekerasan Meyer

Uji yang dilakukan oleh Meyer untuk perbaikan dari uji sebelumnya yaitu uji Brinell. Meyer berpendapat bahwa tekanan rata-rata pada permukaan indentasi harus diperhitungkan dalam nilai kekerasan (tidak dapat diuji pada Brinell).

$$MHN = \frac{4P}{\pi d^2} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

P = besar beban indenter (kg)

d = diameter indentasi (mm)

1) Keuntungan dari Metode Meyer

Hasil lebih stabil, harga kekerasan tidak bergantung pada besar beban.

2) Kelemahan dari Metode Meyer

Kurang sensitif terhadap bahan indenter daripada Brinell. Untuk material yang diproses secara *cold working*, nilai kekerasan Meyer konstan dan independen terhadap besar beban, sedangkan kekerasan Brinell berukuran dengan semakin besarnya beban. Untuk spesimen yang terlalu kecil, maka deformasi material daerah sekitar penekanan tidak sepenuhnya plastis, sehingga hasil pengukuran kurang akurat.

C. Uji Kekerasan Vickers

Secara umum pengujian kekerasan menggunakan metode Vickers dengan skala mikro (*micro hardness*) yang dilakukan berdasarkan standar ASTM. Pada pengujian Vickers, pembebanan diberikan secara perlahan tanpa adanya beban kejut dan ditahan 10-15 detik. Setelah indenter terangkat, kedua diagonal bekas injakan diukur dan diambil rata-ratanya, kemudian kekerasan indentasi Vickers (HV) dihitung dengan persamaan :

$$HV = \frac{2.P.\sin(\theta / 2)}{d^2} \dots\dots\dots (3)$$

dimana : P = beban indentasi (kg)

d = diagonal rata-rata bekas injakan (mm)

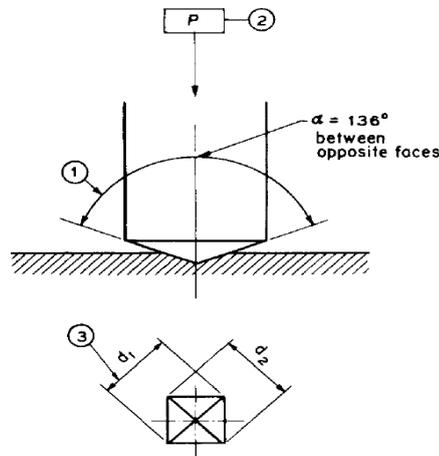
θ = sudut puncak = 136°

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \dots\dots\dots (4)$$

di diperoleh :



$$HV = \frac{1,854 P}{d^2} \left(\frac{kgf}{mm^2} \right) \dots\dots\dots (5)$$



Gambar 8 Metode Pengujian Kekerasan Mikro Vickers (ASTM E-92)

Tabel 2 Variabel Pengujian Kekerasan Vickers (ASTM E-92)

Number	symbol	Designation
1	Angle at the vertex of the pyramidal indenter (136 ⁰)
2	<i>P</i>	Test force in kilograms-force
3	<i>d</i>	Arithmetic mean of the two diagonals <i>d</i> ¹ and <i>d</i> ²

1) Keuntungan dari Uji Vickers

Keuntungan dari uji Vickers adalah skala kekerasannya yang kontinu untuk rentang yang luas, dari yang sangat lunak dengan nilai 5 maupun material yang sangat keras dengan nilai 1500 karena indentor intan yang sangat keras. Selain pada uji Vickers, beban tidak perlu diubah dan tidak bergantung pada besar beban indentor. Selanjutnya, uji Vickers ini dapat dilakukan pada benda-benda dengan ketebalan yang tipis sampai 0,006 inci.

2) Kelemahan dari Uji Vickers

Pada uji Vickers ini membutuhkan waktu yang cukup lama untuk menentukan nilai kekerasan sehingga jarang dipakai pada pengujian yang rutin. Uji Vickers juga hanya terbatas untuk material dalam skala kecil dan sangat terbat untuk material dengan ukuran yang lebih besar.

3) Kekerasan Rockwell

Kekerasan Rockwell memperhitungkan kedalaman indentasi dalam beban konstan sebagai penentu nilai kekerasan. Sebelum pengukuran, dibebani beban minor sebesar 10 kg untuk mengurangi kecenderungan



ridging dan *sinking* akibat beban indenter. Sesudah beban minor diberikan, spesimen langsung dikenakan beban mayor. Kedalaman indentasi yang terkorvesi dalam skala langsung dapat diketahui nilainya dengan membaca dial *gauge* pada alat. Dial tersebut terdiri dari 100 bagian yang masing-masing mempresentasikan penetrasi sebesar 0.0002 mm. Dial disesuaikan sedemikian rupa sehingga nilai kekerasan yang tinggi berkorelasi dengan kecil penetrasi. Kekerasan Rockwell dapat dibagi menjadi beberapa jenis antara lain

a. Rockwell A

Indenter berupa kerucut intan dengan pembebanan 60 kg. Umumnya digunakan pada jenis logam yang sangat keras.

b. Rockwell B

Indenter berupa bola baja dengan diameter 1.6 mm dan pembeban 100 kg. Umumnya digunakan pada material yang lunak.

c. Rockwell C

Indenter berupa kerucut intan dengan pembeban 150 kg. Umumnya digunakan untuk logam-logam yang diperkeras dengan pemanasan. Pembagian ini berdasarkan kombinasi jenis indenter yang digunakan dengan beban yang diberikan. Kelemahan dari uji kekerasan ini adalah perlu faktor konversi agar hasil dapat dibandingkan.

E. Uji Kekerasan *Microhardness*

Metalurgi jaman sekarang yang berkembang membutuhkan penentuan kekerasan pada permukaan yang sangat kecil. Pada pengujian spesimen ini, metode yang paling tepat digunakan adalah indenter Knoop. Metode ini merupakan pengembangan dari uji Vickers namun beban yang lebih kecil. Indenter Knoop adalah piramida intan yang membentuk indentasi berbentuk layang-layang dengan perbandingan diagonal 7:1 yang menyebabkan kondisi regangan pada daerah terdeformasi. Nilai kekerasan Knoop (KHN) dapat didefinisikan besarnya beban dibagi dengan luas daerah proyeksi indentasi tersebut. Atau dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$K_{HN} = \frac{P}{I^2C} \dots\dots\dots(6)$$

- P = beban (kg)
- C = konstanta indenter



Kelebihan dari indentor Knoop adalah kedalaman dan luas daerah indentasi Knoop hanya sekitar 15% dari luas daerah Vickers. Oleh karena itu, metode ini cocok untuk spesimen yang tipis, kecil atau kecenderungan untuk patah getas saat pengujian.

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam melakukan uji kekerasan :

- Alat uji kekerasan dikalibrasi terlebih dahulu
- Indentor harus bersih dan memiliki posisi dengan baik.
- Permukaan spesimen harus bersih dan diampelas dahulu.
- Arah penekan indentor harus tegak lurus
- Jarak antar penekan tidak boleh berdekatan (3 diameter indentor)
- Tidak boleh melakukan penekanan pada ujung spesimen
- Digunakan alas sesuai dengan bentuk spesimen agar tidak mudah goyang/berputar/geser.

2.1.7 Efisiensi Energi Listrik

Konservasi energi adalah upaya mengefisienkan pemakaian energi untuk suatu kebutuhan agar pemborosan energi dapat dihindarkan. Tingkat keberhasilan penggunaan energi secara efisien sangat dipengaruhi perilaku, kebiasaan, kedisiplinan dan kesadaran masyarakat akan pentingnya hemat energi. Selain efisiensi energi, cara lain yang dapat dilakukan adalah perbaikan dan perawatan peralatan listrik sehingga pengendalian penggunaan energi dapat terpantau. (BSN, 2000)

Efisiensi energi didefinisikan sebagai rasio energi keluaran dibagi dengan energi masukan:

$$\eta = \frac{E_{Keluar}}{E_{Masuk}} \times 100\% \dots\dots\dots (7)$$

η adalah efisiensi dalam persen (%).

E_{in} adalah energi masukan yang dikonsumsi dalam joule (J).

E_{out} adalah energi keluaran atau pekerjaan aktual dalam joule (J).



Efisiensi daya didefinisikan sebagai rasio daya keluaran dibagi dengan daya masukan:

$$\eta = \frac{P_{\text{Keluar}}}{P_{\text{Masuk}}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (8)$$

η adalah efisiensi dalam persen (%).

P in adalah konsumsi daya input dalam watt (W).

P out adalah daya keluaran atau pekerjaan aktual dalam watt (W).

Berdasarkan standar Intensitas Konsumsi Energi (IKE) kategori efisien dalam Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia No. 13 Tahun 2012 dan penetapan tarif listrik PLN tahun 2021 yang digunakan untuk menghitung potensi penghematan disesuaikan dengan golongan tarif tenaga listrik (tariff *adjustment*).

2.2 Novelti

Adapun novelti dari penelitian ini bahwa dengan proses *pack carburizing* pada temperatur lebih rendah dari temperatur *carburizing* normal dengan pemberian beban penarikan pada kondisi panas hingga batas proposional material baja karbon tanpa terjadi deformasi akan menghasilkan peningkatan kekerasan pada permukaan baja karbon melalui difusi karbon. Pemberian beban penarikan dapat menyebabkan terjadinya regangan yang dapat memperlebar jarak antar atom (*interspace atom*) sehingga mempercepat laju difusi. Dengan harapan dengan laju difusi meningkat dapat memperbanyak masuknya karbon ke dalam material yang berakibat kekerasan meningkat dalam hal ini dapat menyamai atau melebihi nilai kekerasan dengan proses *carburizing* normal. Dalam penelitian ini, *pack carburizing* dilakukan pada temperatur lebih rendah dari temperatur *carburizing* normal, yaitu 600°C, 650°C, 700°C, dan 750°C dengan tujuan adanya pengurangan temperatur yang berdampak pada efisiensi waktu dan biaya operasional. Beban tarik yang digunakan adalah $\frac{1}{4} \sigma_p$, $\frac{1}{2} \sigma_p$, $\frac{3}{4} \sigma_p$, dan σ_p , dengan

akan arang tulang kerbau sebagai sumber energizer dan BaCO₃ sebagai
 r dengan presentase 80% ATK + 20% BaCO₃. Proses *carburizing* di
 selama 4 jam dengan mesh 20, dan pendinginan dilakukan secara



perlahan di dalam tungku. Dalam penelitian ini, variabel yang dipertimbangkan adalah temperatur *carburizing*, beban tarik, jenis arang, jenis material, komposisi campuran *carburizing*, *holding time*, ukuran butir, dan pendinginan. Dengan menggabungkan faktor-faktor ini, diharapkan dapat ditemukan kombinasi yang optimal untuk mencapai peningkatan kekerasan permukaan baja karbon tanpa mengakibatkan deformasi pada material dengan kondisi temperatur dibawah temperatur *carburizing* normal sambil diberi beban penarikan sebesar tegangan proporsional. Hal ini juga dapat diperoleh efisiensi waktu pemanasan serta pengurangan biaya pemanasan.

