

DISERTASI

**PERILAKU SIFAT MEKANIS BAJA KARBON
AKIBAT *PACK CARBURIZING* DENGAN MEDIA ARANG
TULANG KERBAU DAN BaCO_3**

***BEHAVIOR OF MECHANICAL PROPERTIES
ON CARBON STEEL DUE TO PACK CARBURIZING WITH
BUFFALO BONE CHARCOAL AND BaCO_3***



Oleh

**YAFET BONTONG
P1400315005**

**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2020**



Optimization Software:
www.balesio.com

**PERILAKU SIFAT MEKANIS BAJA KARBON
AKIBAT *PACK CARBURIZING* DENGAN MEDIA ARANG
TULANG KERBAU DAN $BaCO_3$**

***BEHAVIOR OF MECHANICAL PROPERTIES
ON CARBON STEEL DUE TO PACK CARBURIZING WITH BUFFALO
BONE CHARCOAL AND $BaCO_3$***

Disertasi
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor

Program Studi
Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh,

YAFET BONTONG

Kepada

PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2020



DISERTASI

PERILAKU SIFAT MEKANIS BAJA KARBON
AKIBAT *PACK CARBURIZING* DENGAN MEDIA ARANG
TULANG KERBAU DAN BaCO_3

Disusun dan diajukan oleh:

YAFET BONTONG

Nomor Pokok P1400315005

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Disertasi
pada tanggal 26 Agustus 2020
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui
Komisi Penasihat,


Prof. Dr. Ir. H. Hammada Abbas, MSME
Promotor


Rafiuddin Syam, ST., M.Eng. Ph.D
Kopromotor


Dr. H. Sapta Asmal, ST., MT
Kopromotor


Ketua Program Studi
S3 Teknik Mesin,


Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin,

Erwin Eka Putra, ST., MT

Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, MT



PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Yafet Bontong
Nomor mahasiswa : P1400315005
Program studi : S3 Teknik Mesin

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan disertasi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 20 Agustus 2020

Yang menyatakan,

Yafet Bontong



KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur kami panjatkan kehadiran Tuhan yang Maha Esa, oleh karena berkat, kasih dan pertolongan-Nya sehingga penulisan disertasi ini dapat diselesaikan dengan baik, sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Doktorat pada program Pascasarjana S3 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar. Dalam penyusunan disertasi ini kami menyadari masih banyak terdapat kekeliruan atau kekurangan. Hal ini tidak lain karena keterbatasan ilmu dan kemampuan yang kami miliki, karenanya berbagai masukan dan saran yang sifatnya membangun sangatlah diharapkan demi sempurnanya penulisan disertasi ini.

Tugas akhir ini dapat terselesaikan berkat peran serta dari berbagai pihak. Penulis menyadari bahwa dalam proses awal hingga selesainya tugas disertasi ini, banyak sekali pihak yang telah terlibat dan berperan serta untuk mewujudkan selesainya penelitian dan penulisan disertasi ini. Untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada,

1. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Hammada Abbas, MSME selaku Promotor, Bapak Rafiuddin Syam.,ST.,M.Eng.,Ph.D, Co-promotor I dan Bapak Dr.H.Sapta Asmal.,ST.,MT. Sebagai Co-promotor II, yang senantiasa memberikan masukan dan dorongan selama persiapan judul, desain penelitian,

pelaksanaan penelitian pembahasan sampai selesainya penulisan disertasi ini.



2. Ucapan terima kasih dan penghargaan juga penulis sampaikan kepada Dr. Ir. H. Ilyas Renreng, MT sebagai Ketua Departemen Teknik Mesin sekaligus, dosen penguji. Dr. Eng. Andi Erwin Eka Putra, ST.MT sebagai Ketua Program Studi S3 Teknik Mesin, dan Dr. H. Hairul Arsyad, ST.MT, Dr.Ir. H. Ahmad Yusran Aminy,.MT dan Dr.Eng. Lukmanul Hakim Arma.,ST.,MT selaku tim penguji yang banyak memberikan arahan dan masukan kepada penulis demi kelengkapan disertasi ini
3. Penghargaan yang setinggi tingginya kepada; Rektor Universitas Hasanuddin Prof. Dr. Aries Tina Pulubuhu, MA, Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, MT Direktur Program Pascasarjana Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Prof. Dr. Muhammad Ali, SE., MS, Bapak/ibu dosen Pascasarjana Universitas Hasanuddin yang telah mengarahkan dan membimbing dalam proses perkuliahan. Bapak/ibu staf Pascasarjana Universitas Hasanuddin dan staf Program Studi S3 Teknik Mesin yang telah membantu dalam proses administrasi, penulis menyampaikan banyak terima kasih.
4. Seluruh rekan-rekan mahasiswa pada Program Pascasarjana S3 Teknik Mesin Universitas Hasanuddin Makassar, yang tidak sempat kami tulis

nya satu persatu atas segala bantuan dan sarannya, penulis juga
lupa mengucapkan terima kasih



5. Kepada segenap pengurus Yayasan Perguruan Tinggi Kristen Makale (YPTKM) dan Rektor UKI Toraja serta segenap Pimpinan Universitas Kristen Indonesia Toraja (UKI-Toraja) yang memberikan izin studi lanjut serta biaya selama kuliah.
6. Segenap pimpinan dan dosen Fakultas Teknik UKI Toraja atas dorongan, doa dan bantuan selama penulisan disertasi ini.
7. Kepada istri saya yang tercinta Ruth Tasik.,SPd dan ketiga anak saya, Anugrarya Bontong Padatuan, Dwi Yasti Bontong Padatuan, Guardian Bontong Padatuan yang begitu bayak memberi dorongan, bantuan dan doa sehingga penulisan disertasi ini dapat saya selesaikan dengan baik.

Akhir kata, bantuan dan budi baik yang telah dapatkan, penulis menghaturkan terima kasih sebanyak-banyaknya atas semua yang telah diberikan dan hanya Tuhan Yang Maha Esa yang dapat memberikan balasan yang setimpal. Semoga laporan ini bermanfaat bagi kita semua dan bagi penulis sendiri.

Makassar, 26 Agustus 2020

Penulis

Yafet Bontong



ABSTRAK

YAFET BONTONG. Perilaku Sifat Mekanis Baja Karbon Akibat *Pack Carburizing* Dengan Media Arang Tulang Kerbau Dan BaCO_3 (Hammada Abbas, Rafiuddin Syam dan Sapta Asmal)

Baja karbon masih merupakan kebutuhan utama pada komponen permesinan, dimana bahan ini memiliki karakterisasi sifat mekanis dari lunak sampai yang paling keras. Baja memiliki beberapa unsur paduan salah satunya adalah karbon yang dapat berpengaruh terhadap sifat mekanis baja karbon tersebut. Sifat mekanis baja karbon rendah adalah merupakan pertimbangan utama pada suatu perencanaan konstruksi dari suatu elemen permesinan, baja karbon rendah memiliki unsur karbon yang cukup rendah sehingga nilai kekerasan, tegangan tarik, dan kemampuan menerima beban dinamis atau beban berulang juga berkurang. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperbaiki perilaku sifat mekanis baja karbon rendah, seperti komposisi karbon, struktur mikro, nilai kekerasan, nilai tegangan tarik, nilai fatigue failure, dan eksperimen nilai amplitudo getaran pada bola baja. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *pack carburizing*. Media karburasi adalah arang tulang kerbau mesh 20 dan 40 dengan aktivator BaCO_3 . Suhu yang digunakan pada proses *pack carburizing* 850°C dan 950°C . Perbandingan arang tulang kerbau (ATK) terhadap barium karbonat (BaCO_3) sebesar 60%:40%, 70%:30%, dan 80%:20%. Waktu tahan selama proses *pack carburizing* 2 jam. Dari hasil penelitian tentang perilaku sifat mekanis baja karbon rendah pada proses *pack carburizing* dengan menggunakan arang tulang kerbau (ATK) adalah berpengaruh terhadap komposisi karbon baja karbon rendah (BKR), dimana semakin tinggi persentase arang tulang kerbau maka nilai komposisi karbon meningkat. Nilai karbon meningkat dari 0,268% menjadi 0,735%. Begitupun terhadap struktur mikro, dimana fasa perlit dan sementit semakin dominan. Hasil penelitian juga menunjukkan *pack carburizing* mempengaruhi kekuatan mekanik terhadap baja karbon rendah, dimana nilai kekerasan meningkat dari 84,9 HRB menjadi 120,1 HRB, kekuatan tarik meningkat dari 404 MPa menjadi 545 MPa dan kekuatan fatigue mengalami peningkatan dari 36625 siklus menjadi 61435 siklus. Pada percobaan eksperimen sifat mekanik dari bola baja terhadap amplitudo getaran dengan membandingkan bola baja tanpa perlakuan dan yang sudah diproses *pack carburizing*, maka nilai amplitudo meningkat dari rata-rata 0,70 m menjadi rata-rata 0,91 m.

Kata kunci : *baja karbon rendah, pack karburizing, ATK, BaCO_3 , sifat mekanis.*



Rafiuddin Syam, ST., M.Eng., Ph.D



Optimization Software:
www.balesio.com

ABSTRACT

YAFET BONTONG. Behavior of Mechanical Properties of Carbon Steel Due to Pack Carburizing with Buffalo Bone and BaCO_3 (Hammada Abbas, Rafiuddin Syam and Sapta Asmal)

Carbon steel is still a major requirement in machining components, where this material has the mechanical characterization of characteristics from soft to hardest. Steel has several alloying elements, one of which is carbon, which can affect the mechanical properties of carbon steel. The low carbon steel characteristic is a major consideration in a construction plan of a machining element. The low carbon steel has a low carbon element so that the value of hardness, tensile stress, and the ability to accept dynamic or repetitive loads are also reduced. The purpose of this study is to improve the mechanical behavior of low carbon steel, such as carbon composition, microstructure, hardness value, tensile stress value, fatigue failure value, and experiment of vibration amplitude value on steel balls. The method used in this study is the pack carburizing method. The Carburizing media are buffalo bone charcoal mesh 20 and 40 with BaCO_3 activator. The temperature used in the carburizing pack process are 850°C and 950°C . The ratio of buffalo bone char (BBC) to barium carbonate (BaCO_3) are 60%: 40%, 70%: 30% and 80%: 20%. The holding time is 2 hours for the process of carburizing pack. The result of this research show that the carburizing pack process using buffalo bone char (BBC) affects to the low carbon steel (LCS) carbon composition, the higher percentage of buffalo bone char, the higher carbon composition value. The value of carbon composition increased from 0.268% to 0.735%. The carburizing pack process also affects to pearlite and cementite phases, where the phases are increased. The research result also show that pack carburizing process increase mechanical properties of low carbon steel, where hardness increased from 84.9 HRB to 120.1 HRB, tensile strength increased from 404 MPa to 545 MPa and fatigue strength increased from 36625 cycles to 61435 cycles. In experimental experiments, the mechanical properties of steel balls against vibration amplitude by comparing steel balls without treatment and those that have been packaged carburizing, then the value of the appearance increased from an average of 0.70 m to an average of 0.91 m.

Key words : *low carbon steel, carburizing pack, BBC, BaCO_3 , mechanical properties*



Rafiuddin Syam, ST., M.Eng., Ph.D.



Optimization Software:
www.balesio.com

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL.....	i
HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	viii
ABSTRACT.....	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR SINGKATAN.....	xvii

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah.....	10
C. Tujuan Penelitian.....	10
D. Batasan Masalah.....	11
E. Manfaat Penelitian	11

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. <i>Pack Carburizing</i>	13
1. Baja Karbon	21
2. Tulang Kerbau	26
3. Struktur Mikro	27
4. Kekerasan.....	29
5. Pengujian Tarik.....	33
6. Fatigue Failure.....	36
7. Kedalaman Lapisan Karburizing	41



B. Teori Getaran.....	43
1. Derajat Kebebasan	45
2. Persamaan Deferenensial Gerak (PDG).....	47
C. Kerangka Pemikiran	55
III. METODE PENELITIAN	
A. Tempat Dan Waktu Penelitian	58
B. Bahan Penelitian.....	58
C. Alat-alat Penelitian.....	61
D. Rancangan Penelitian.....	67
E. Prosedur Penelitian.....	68
F. Diagram Flow Chart	76
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
A. Persentase Karbon	77
B. Struktur Mikro	80
C. Kekerasan	85
D. Kekuatan Tarik	90
E. Fatigue.....	95
F. Spektrum Getaran.....	97
G. Kedalaman <i>Carburizing</i> (Case Depth).....	103
V. KESIMPULAN DAN SARAN	
A. Kesimpulan	107
B. Saran	109
DAFTAR PUSTAKA.....	xix



ANlam

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	: Kelarutan Karbon Pada Struktur Ferrit dan Austenit.....	24
Tabel 2.2	: Karakterisasi Arang Aktif Tulang Kerbau.....	27
Tabel 2.3	: Fasa Yang Ada Pada Baja	28
Tabel 2.4	: Variabel Pengujian Kekerasan Vickers.....	30
Tabel 2.5	: <i>Rockwell Hardness Scales</i>	32
Tabel 2.6	: <i>Superficial Rockwell Hardness Scales</i>	32
Tabel 2.7	: Hubungan Kekerasan Lapisan Dengan Kandungan Karbon.....	33
Tabel 4.1	: Data pengujian <i>Case Depth Hardness</i> dengan <i>Proses Pack Carburizing</i>	103
Tabel 4.2	: Nilai <i>Case Depth</i> pada waktu 2 jam dengan pendekatan persamaan Harris	106



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	: Kurva Laju-Invers untuk Baja SAE 1020.....	14
Gambar 2.2	: Kekerasan Akibat Proses <i>Quenching</i>	18
Gambar 2.3	: Temperatur <i>Tempering</i> Vs Kekerasan.....	18
Gambar 2.4	: Mekanisme Sisipan/Interstitial	23
Gambar 2.5	: Mekanisme Kekosongan/Vacancy.....	23
Gambar 2.6	: Metode Pengujian Kekerasan Mikro Vickers	30
Gambar 2.7	: Prinsip Kerja Metode Pengujian Kekerasan Rockwell	31
Gambar 2.8	: Spesimen Uji Tarik standart ASTM-E8	33
Gambar 2.9	: Kurva Tegangan-Regangan	34
Gambar 2.10	: Ilustrasi Penampang Samping Bentuk Perpatahan Benda Uji.....	36
Gambar 2.11	: Kurva S-N Baja 1020 dan Aluminium 2024	40
Gambar 2.12	: Lapisan Kekerasan Efektif <i>Carburizing</i>	42
Gambar 2.13	: Sistem derajat kebebasan (a) satu, (b) dua, (c) tiga.....	45
Gambar 2.14	: Diagram benda bebas untuk sistem getaran 1 derajat kebebasan.....	48
Gambar 2.15	: Diagram Benda Bebas Untuk Sistem Getaran 2 Derajat Kebebasan	49
Gambar 2.16	: Diagram Benda Bebas Untuk Sistem Getaran 3 Derajat Kebebasan	52
Gambar 3.1	: Baja Karbon Rendah	59
Gambar 3.2	: Spesimen Uji Kelelahan	59
Gambar 3.3	: Spesimen Uji Tarik.	59
Gambar 3.4	: Spesimen Uji Kekerasan	60
Gambar 3.5	: Bola Baja.	60
3.6	: a) Tulang kerbau, b) Arang tulang kerbau	60
3.7	: Barium Karbonat ($BaCO_3$)	61
3.8	:Tanah Liat	61



Gambar 3.9	: Dapur Pemanas.....	61
Gambar 3.10	: Kotak Baja	62
Gambar 3.11	: Mesin Uji Getaran.....	62
Gambar 3.12	: Alat Uji Kekerasan.....	63
Gambar 3.14	: Alat Pengujian Tarik	64
Gambar 3.15	: Alat uji Fatigue Failure.....	64
Gambar 3.16	: Alat Uji Komposisi.....	65
Gambar 3.17	: Bor Listrik	65
Gambar 3.18	: Kertas Amplas	65
Gambar 3.19	: Polishing dan Resin.....	66
Gambar 3.20	: Timbangan Digital.....	66
Gambar 3.21	: Kikir	66
Gambar 3.22	: Gergaji Besi.....	66
Gambar 3.23	: Saringan/Ayakan (a) Mesh 40; (b) Mesh 20	67
Gambar 3.24	: Dimensi Spesimen Uji Fatigue	70
Gambar 3.25	: Dimensi Spesimen Uji Kekerasan	71
Gambar 3.26	: Dimensi Spesimen Uji Tarik	71
Gambar 3.27	: Dimensi Spesimen Uji Struktur Mikro	72
Gambar 3.28	: Dimensi Spesimen Uji Komposisi.....	73
Gambar 3.29	: Skema Pengambilan Data XRD	74
Gambar 3.30	: Skema Uji Getaran	75
Gambar 3.31	: Diagram Flow Chart.....	76
Gambar 4.1	: Komposisi Karbon (C) Pada Masing-Masing Spesimen Pada Temperatur 850°C.....	77
Gambar 4.2	: Komposisi karbon (C) Pada Masing-Masing Spesimen Pada Temperatur 950°C.....	78
4.3	: Struktur Mikro Mesh 20 dan Mesh 40 Dengan Temperatur Pemanasan 850°C.....	81
4.4	: Struktur Mikro Mesh 20 dan Mesh 40 Pada Temperatur	



	Pemanasan 950°C	82
Gambar 4.5	: Kekerasan Terhadap Persentase ATK, Mesh 20 dan 40, temperatur 850°C.....	87
Gambar 4.6	: Kekerasan Terhadap Persentase ATK, Mesh 20 dan 40, Temperatur 950°C	87
Gambar 4.7	: Kekerasan Baja Karbon Rendah (BKR) Tanpa Penambahan Karbon Pada Temperatur 850°C :	89
Gambar 4.8	: Kekerasan Baja Karbon Rendah (BKR) Tanpa Penambahan Karbon Pada Temperatur 850°C :	89
Gambar 4.9	: Hubungan Persentase ATK Terhadap Kekuatan Tarik Pada Temperatur 850°C.....	91
Gambar 4.10	: Hubungan Persentase ATK Terhadap Kekuatan Tarik Pada Temperatur 950°C.....	92
Gambar 4.11	: Hubungan Tegangan Regangan, M40-T850	92
Gambar 4.12	: Hubungan Tegangan Regangan, M20-T850	93
Gambar 4.13	: Hubungan Tegangan Regangan, M40-T950	94
Gambar 4.14	: Hubungan Tegangan Regangan, M20-T950	94
Gambar 4.15	: Hubungan Beban Terhadap Jumlah Putaran Pada Temperatur 850°C	96
Gambar 4.16	: Hubungan Beban Terhadap Jumlah Putaran Pada Temperatur 950°C.....	96
Gambar 4.17	: Hubungan Frekuensi Getaran Terhadap Waktu Pada Temp. 850°C Mesh 40 Dengan Pelumas.....	98
Gambar 4.18	: Hubungan Frekuensi Getaran Terhadap Waktu Pada Temp. 850°C Mesh 40 Tanpa Pelumas	99
Gambar 4.19	: Hubungan Frekuensi Getaran Terhadap Waktu Pada Temp. 850°C Mesh 20 Dengan Pelumas.....	100
Gambar 4.20	: Hubungan Frekuensi Getaran Terhadap Waktu Pada Temp. 850°C Mesh 20 Tanpa Pelumas	100
Gambar 4.21	: Hubungan Frekuensi Getaran Terhadap Waktu Pada Temperatur 950°C Mesh 40 Dengan Pelumas ...	101



Gambar 4.22 : Hubungan Frekuensi Getaran Terhadap Waktu
Pada Temperatur 950°C Mesh 40 Tanpa Pelumas..... 101

Gambar 4.23 : Hubungan Frekuensi Getaran Terhadap Waktu
Pada Temperatur 950°C Mesh 20 Dengan Pelumas... 102

Gambar 4.24 : Hubungan Frekuensi Getaran Terhadap Waktu
Pada Temperatur 950°C Mesh 20 Tanpa Pelumas..... 102

Gambar 4.25 : Grafik *Case Depth Hardness* dengan *Proses Pack
Carburizing* 104



DAFTAR NOTASI

<u>Notasi</u>	<u>Keterangan</u>	<u>Satuan</u>
A	Luas penampang	mm ²
A ₀	Luas penampang mula-mula	mm ²
ΔL	Pertambahan Panjang	mm
BaCO ₃	Barium Carbonat	%
Cr	Cromium	%
CU	Tembaga	%
C	Carbon	%
CO	Carbon Monoksida	%
CaCO ₃	Calcium Carbonat	%
CO ₂	Carbon Dioksida	%
CaO	Barium Oksida	%
d	Diameter rata-rata injakan	mm
df	Diameter benda uji	mm
E	Modulus elastis	N/m ²
fe	Besi	%
HRC	Skala Rockwel	HRC
L ₀	Panjang mula-mula	mm
Ni	Nikel	%
Mn	Mangan	%
Mo	Molibden	%
P	Pospor	%
	Beban identasi	kg
	Sudut puncak	°
	Seng	%



Si	Silikon	%
TS	Tensile Strength	kg/mm ²
T	Temperatur <i>carburizing</i>	°C
T	Waktu	Jam
Σ	Gaya	N
σ _b	Tegangan bending	kg/mm ²
W	Tungsten/wolfram	%
W _{maks}	Beban bending	kg
Y	Titik luluh	N/mm ²
Y''	Titik luluh bawah	N/mm ²



BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kerbau merupakan salah satu komoditas ternak yang masih banyak dipelihara secara tradisional di Asia Tenggara khususnya Indonesia. Kerbau mempunyai peranan yang sangat penting bagi ekonomi peternakan sebagai penghasil susu, daging, dan tenaga kerja (Ihsan, 2015). Khusus bagi masyarakat toraja kerbau atau tedong merupakan pokok harta benda karena kerbau adalah hewan paling penting dalam kehidupan sosial masyarakat (Somba, 2019). Kerbau menjadi unsur yang sangat penting terutama pada acara rambu solo' (upacara pemakaman). Berdasarkan data dari penelitian (Rombe, 2011), jumlah kerbau yang dipotong untuk upacara kedukaan adalah sekitar 13.000 ekor per tahun. Jumlah kerbau yang sangat banyak ini tentunya akan menimbulkan limbah tulang yang banyak. Dimana pemanfaatan limbah tulang kebau saat ini hanya sebatas untuk membuat benda seni. Oleh karena itu perlu dikembangkan lebih jauh pemanfaatan limbah tulang kerbau.

Salah satu pemanfaatan limbah tulang kerbau yang dapat dikembangkan adalah menjadikan tulang kerbau sebagai media karburasi

proses *carburizing*. *Carburizing* merupakan salah satu treatment yang dilakukan pada logam dalam bidang teknik mesin khususnya material



teknik, untuk meningkatkan kekuatan mekanis logam. Hal ini disebabkan karena *carburizing* dapat menjadi alternatif untuk meningkatkan sifat mekanis logam terutama baja yang banyak digunakan baik sebagai material konstruksi maupun komponen permesinan.

Baja merupakan paduan yang sebagian besar terdiri dari unsur besi dan karbon 0,2%-2,1% (Choudhury dkk, 2001). Selain karbon, baja juga mengandung unsur-unsur lain seperti sulfur (S), fosfor (P), silikon (Si), mangan (Mn), dan unsur lain. Dimana unsur-unsur ini hanya dalam persentase kecil. Sifat baja karbon dipengaruhi oleh persentase karbon dan struktur mikro, sedangkan struktur mikro pada baja dipengaruhi oleh perlakuan panas dan komposisi baja. Karbon dengan campuran unsur lain dalam baja dapat meningkatkan nilai kekerasan, ketahanan pada goresan dan ketahanan pada temperatur. Menurut, (Arifin dkk., 2017) fungsi karbon dalam baja adalah sebagai unsur penguat dengan mencegah dislokasi bergeser pada kisi kristal (*crystal lattice*) atom besi.

Berdasarkan jumlah karbonnya, baja dapat diklasifikasikan menjadi tiga yaitu baja karbon rendah, baja karbon sedang dan baja karbon tinggi (Bahtiar dkk., 2017). Karbon rendah disebut baja ringan (*mild steel*) atau baja perkakas, bukan baja yang keras, karena kandungan karbonnya rendah

dari 0,3%. Baja karbon sedang mengandung karbon 0,3-0,6% dan memungkinkan baja untuk dikeraskan sebagian dengan pengerjaan panas (*heat treatment*) yang sesuai. Baja karbon tinggi mengandung karbon 0,6-



1,5%, dibuat dengan cara digiling panas (Arifin dkk., 2017). Salah satu jenis baja karbon yang banyak digunakan adalah baja karbon rendah. Penggunaan baja karbon rendah cukup banyak ditemukan pada komponen mesin maupun pada konstruksi lainnya. Pemilihan baja karbon rendah hal ini disebabkan karena sifatnya yang mudah dibentuk dan mampu mesin yang baik selain itu menurut (Arifin dkk., 2017) baja karbon rendah memiliki ketangguhan dan keuletan tinggi komposisi mesin yang terbuat dari baja karbon rendah dapat berupa roda gigi dan poros dengan beban yang relatif kecil.

Walau memiliki sifat mekanis yang cukup baik, baja karbon tetapi memiliki sifat kekerasan dan ketahanan aus yang rendah. Baja karbon rendah memiliki kekerasan rendah sehingga cepat aus dan umurnya menjadi relatif pendek apabila diberi pembebanan berulang atau dinamis. Dengan kondisi demikian salah satu metode untuk mengubah sifat mekanik baja karbon rendah adalah metode *pack carburizing*, sehingga kekuatan fatik dan nilai kekerasan meningkat, sementara laju keausan akan menurun (Malau dkk, 2008).

Beberapa studi atau penelitian yang telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh unsur paduan terhadap sifat mekanis baja. Unsur Ni, Mn, sedikit Cr

dapat membuat baja menjadi kuat dan ulet, dengan menguraikan ke ferrite. Unsur ini terutama digunakan dalam baja konstruksi. Kemudian yang bereaksi dengan karbon dalam baja dan membentuk karbida



yang lebih keras dari sementit misalnya Cr, W, Mn, dan V. Unsur ini terutama digunakan dalam baja perkakas (Muhammad Rozihan dkk., 2017). Kemudian (Binudi & Adjiantoro, 2018) dalam hasil penelitiannya mengatakan bahwa dengan penambahan unsur Ni, Cr dan Mn terlihat nilai kekerasan baja mengalami peningkatan.

Keunggulan baja adalah mudah dibentuk dan memiliki sifat-sifat seperti kekuatan tarik, ketangguhan, keuletan, kekerasan, elastisitas dan plastisitas. Selain itu baja mudah didapatkan di pasaran dalam bentuk plat, lembaran, pipa, batang, dan profil serta harganya relatif murah. Dari beberapa sifat baja tersebut, kekerasan dan ketangguhan merupakan sifat yang sangat penting dipertimbangkan dalam perencanaan konstruksi mesin khususnya pada bagian komponen yang meluncur atau bergesekan satu sama lainnya, terutama apabila pada saat yang bersamaan komponen atau bahan tersebut sekaligus diharuskan menahan beban. Dengan demikian maka dibutuhkan selain bagian permukaan komponen yang sangat keras agar tahan terhadap gesekan, juga harus dipertahankan pada bagian inti tetap liat atau ulet, sehingga tangguh terhadap beban terutama pada pembebanan yang berulang atau pembebanan dinamis (Nitha, 2018)

Sifat-sifat tersebut mutlak dibutuhkan, mengingat kondisi kerja dari

en pada operasinya sering mengalami pembebanan, baik beban maupun beban dinamis bahkan kadang-kadang mengalami beban kejutan yang sangat besar yang mengakibatkan terjadinya keretakan atau



perpatahan. Kebanyakan patahan lelah yang terjadi disebabkan oleh tegangan berulang, dan juga dijumpai pada tegangan kurang dari sepertiga kekuatan tarik statik pada bahan struktur tanpa konsentrasi tegangan. Dalam keadaan dimana pemusatan tegangan diperhitungkan, mungkin bahan akan putus pada tegangan yang lebih rendah. Jadi kelelahan memegang peranan utama dalam putusnya bahan secara mendadak pada penggunaan suatu struktur atau komponen (Nitha, 2018).

Semua patahan yang disebabkan kelelahan melalui tahapan proses terjadinya retakan lelah perambatan retak lelah patahan statik terhadap luas penampang sisa. Terjadinya retakan tidak dapat dielakkan apabila pemusatan tegangan di dalam struktur dan komponen tidak terhindarkan, kalau sebelumnya ada sesuatu yang berhubungan dengan terjadinya retakan atau retakan tak tampak atau inklusi dan presipitat yang mengakibatkan pemusatan tegangan. Maka hal tersebut perlu penelitian dengan maksud memperlambat perambatan retakan, dalam hal ini perlu memahami sifat khas perambatan retakan, terutama ketergantungan terhadap tegangan dan panjangnya retakan, yang mengakibatkan terjadinya kegagalan lelah.

Kegagalan lelah atau *fatigue failure* adalah kecenderungan dari bahan untuk patah bila menerima tegangan berulang-ulang (*cyclic stress*) yang masih jauh di bawah batas kekuatan elastisnya. Sebagian besar patahan yang terjadi pada konstruksi atau komponen permesinan disebabkan oleh kegagalan lelah. Kasus ini sangat berbahaya karena tanpa



menunjukkan tanda-tanda awal, hal ini dapat berpengaruh langsung baik terhadap keselamatan pemakai maupun berpengaruh secara ekonomis.

Kegagalan lelah yang terjadi meliputi paling tidak 90% keseluruhan kegagalan yang disebabkan oleh hal-hal yang bersifat mekanis (Fuchs dan Stephens, 1980). Komponen mesin yang mengalami pembebanan dinamis akan rusak pada tegangan yang jauh lebih rendah dari beban yang dibutuhkan untuk menimbulkan perpatahan pada penerapan tunggal (Schaffer dkk., 1999).

Meningkatnya sifat mekanik baja karbon biasanya mengandung beberapa unsur paduan. Unsur yang paling dominan pengaruhnya terhadap sifat-sifat baja adalah unsur karbon, meskipun unsur-unsur lain tidak bisa diabaikan begitu saja. Besar kecilnya persentase unsur karbon akan berdampak pada sifat mekanik dari baja tersebut, misalnya dalam hal kekerasan, keuletan, mampu bentuk dan sifat-sifat mekanik lainnya.

Pack carburizing adalah proses dimana karbon monoksida yang berasal dari senyawa padat terurai pada permukaan logam menjadi karbon baru dan karbon dioksida (Mittemeijer dkk., 2013). Baja pada suhu sekitar 850°C mempunyai afinitas terhadap karbon. Karbon diabsorpsi ke dalam logam membentuk larutan padat karbon besi dan pada lapisan luar

kadar karbon yang tinggi. Bila cukup waktu, atom karbon akan mempunyai kesempatan untuk berdifusi ke bagian-bagian sebelah dalam. Lapisan tergantung dari waktu dan suhu yang digunakan. Berdasarkan



media yang memberikan karbon, secara umum dapat dibagi tiga yaitu karburasi padat (*solid carburizing*), karburasi cair (*liquid carburizing*), dan karburasi gas (*gas carburizing*).

(Bahtiar dkk., 2017) melakukan penelitian, untuk mengetahui pengaruh *pack carburizing* terhadap baja karbon sedang menggunakan *cowbone* sebagai energizer. Persentase arang tulang sapi dan CaCO_3 adalah 40%:60%; 30%:70% dan 25%:75%; temperatur karburizing 850°C, 900°C dan 950°C, karburizing selama 8 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada persentase arang *cowbone* 40%, kedalaman permukaan baja 0,2 mm, memiliki nilai kekerasan 780 Hv dan pada 4mm nilai kekerasan 294 Hv. Pada persentase *cowbone* 30%, kedalaman permukaan baja 0,2 mm, memiliki nilai kekerasan dari 750 Hv dan pada 4mm, nilai kekerasan 283 Hv. Pada persentase *cowbone* 25%, kedalaman permukaan baja 0,2 mm memiliki nilai kekerasan 700 Hv dan pada 4mm, nilai kekerasan 216 Hv. Nilai kekerasan permukaan tertinggi pada kedalaman 2 mm yaitu 40% berat *cowbone* memiliki nilai kekerasan tertinggi 780 HV, untuk kedalaman 4mm pada berat 40% *cowbone* juga diperoleh kekerasan tertinggi sebesar 294 Hv. Hal ini menunjukkan bahwa arang tulang sapi dapat digunakan sebagai energizer.

Dalam penelitiannya, (Aras, A. S, 2013) melakukan penelitian, untuk mengetahui proses *pack carburizing* media arang kemiri dan barium kromat (BaCO_3) dan holding time terhadap sifat mekanis baja karbon. Media karbon yang digunakan adalah arang kemiri dengan



persentase berat sebesar 80% dan BaCO₃ 20%. Proses *pack carburizing* dilakukan pada suhu 950°C dan waktu tahan selama 4 dan 5 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu pemanasan 950°C dengan waktu tahan 5 jam memberikan kekerasan permukaan tertinggi (370,78 kg/mm²).

Kemudian (Irfan, 2007) melakukan penelitian serupa tentang proses *pack carburizing* dengan media arang kayu asam terhadap sifat mekanis dan struktur mikro terhadap baja rendah. Media karbon yang digunakan arang kayu asam dengan persentase berat 80% dan 20% CaCO₃. Proses *pack carburizing* dilakukan pada suhu pemanasan 900°C dan 950°C dengan waktu penahanan 3 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu 950°C memberikan kekerasan permukaan tertinggi (609,74 kg/mm²).

Dengan metode yang sama, (Iqbal dkk., 2007) melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh dari variasi temperatur terhadap perubahan sifat mekanis baja AISI 1020. Waktu tahan yang digunakan selama proses pengarbonan adalah 2 jam dengan suhu pemanasan masing-masing 850°C, 900°C dan 950°C. Media atau sumber karbon yang digunakan adalah serbuk arang tempurung kelapa dicampur dengan 25% BaCO₃ sebagai katalis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu pemanasan 950°C memberikan kekerasan permukaan tertinggi (883 kg/mm²). Kemudian beberapa penelitian

n, mengatakan bahwa tulang sapi (*cowbone*) dapat digunakan sumber energi pada proses *pack carburizing* baja, dari penelitian dapat disimpulkan adanya peningkatan kekerasan pada permukaan



baja setelah mengalami *pack carburizing* dengan menggunakan arang tulang sapi (*cowbone*) dibanding dengan menggunakan arang (Ihom, 2013). Adanya CaCO_3 dalam tulang sapi (*cowbone*) yang berperan membantu memasok karbon yang baru. (Okongwu dan Paranthaman, 1987); (Aramide dkk., 2010) (Amstead dkk., 1992) (Ihom, dkk, 2013).

Salah satu pengujian yang dapat dilakukan pada pengujian baja karbon rendah yang telah *dipack carburizing* adalah dengan uji getaran. Getaran didefinisikan sebagai gerak osilasi dari sistem mekanis disekitar titik atau posisi seimbang. Getaran terjadi karena adanya gaya berulang. (Herdiman, 2009) Kemudian menurut (Abbas & Rahman, 2014) getaran adalah suatu gerakan yang berulang dengan sendirinya pada suatu selang waktu tertentu yang dapat terjadi pada sistem dimana memiliki massa dan sifat elastis serta padanya bekerja gangguan. Dengan melakukan uji getaran dapat dilihat efek mekanis pada logam setelah *pack karburizing*.

Dengan latar belakang tersebut, penulis tertarik untuk kemudian melakukan penelitian tentang sifat mekanis baja karbon rendah dengan proses *pack carburizing* menggunakan sumber karbon arang tulang kerbau dan barium karbonat (BaCO_3) sebagai katalis dengan waktu penahanan selama 2 jam. Adapun judul yang diangkat adalah “ ***Perilaku Sifat Mekanis***

Carbon Akibat Pack Carburizing Dengan Media Arang Tulang dan BaCO_3 ”.



B. Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini dibuat perumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana perilaku komposisi karbon pada baja karbon rendah akibat *pack carburizing* ?
2. Bagaimana perilaku struktur mikro pada baja karbon rendah akibat *pack carburizing*?
3. Bagaimana perilaku kekerasan (*hardness*) baja karbon rendah akibat *pack carburizing* ?
4. Bagaimana perilaku tegangan tarik (*stress*) baja karbon rendah akibat *pack carburizing* ?
5. Bagaimana perilaku beban dinamis (*fatigue failure*) baja karbon rendah akibat *pack carburizing* ?
6. Bagaimana perilaku *pack carburizing* pada bola baja terhadap analisis spektrum geteran?

C. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah:

1. Untuk mengasesmen pengaruh *pack carburizing* pada baja karbon rendah terhadap komposisi karbon.
2. Untuk mengasesmen pengaruh *pack carburizing* pada baja karbon

ah terhadap struktur mikro

ik mengasesmen pengaruh *pack carburizing* pada baja karbon

ah terhadap kekerasan (*hardness*)



4. Untuk mengasesmen pengaruh *pack carburizing* pada baja karbon rendah terhadap tegangan tarik (*stress*)
5. Untuk mengasesmen pengaruh *pack carburizing* pada baja karbon rendah terhadap beban dinamis (*fatigue failure*)
6. Untuk mengasesmen pengaruh *pack carburizing* pada bola baja terhadap analisis getaran .

D. Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Bahan yang digunakan adalah baja karbon rendah dan bola baja.
2. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *pack carburizing* .
3. Media karburasi arang tulang kerbau mesh 20 dan 40 dengan aktivator $BaCO_3$.
4. Suhu yang digunakan pada proses *pack carburizing*, $850^{\circ}C$ dan $950^{\circ}C$
5. Perbandingan arang tulang kerbau (ATK) terhadap barium karbonat ($BaCO_3$) sebesar 60% : 40% , 70% : 30% dan 80% : 20%
6. Waktu tahan selama proses *pack carburizing* 2 jam.
7. Media pendingin setelah *pack carburizing* menggunakan *aquades*.

E. Manfaat Penelitian

Penelitian ini dapat dicapai beberapa manfaat:



1. Bagi akademisi, sebagai referensi dan kajian terhadap baja karbon yang telah diberi perlakuan *pack carburizing* dengan menggunakan arang tulang kerbau sebagai alternatif sumber karbon.
2. Bagi industri manufaktur, memberikan informasi tentang sifat mekanis baja karbon yang mengalami perlakuan *pack carburizing* untuk penggunaan material konstruksi pemesinan.
3. Bagi mahasiswa, sebagai referensi penelitian selanjutnya dalam suatu penelitian yang berbeda pada metode penelitian proses *pack carburizing*.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Pack Carburizing

Pack Carburizing adalah proses dimana karbon monoksida yang berasal dari senyawa padat terurai pada permukaan logam menjadi karbon baru dan karbon dioksida (Mittemeijer dkk., 2013). *Pack Carburizing* juga diartikan sebagai proses pengerasan permukaan material yang dilakukan dengan menggunakan kotak besi tahan panas dengan penambahan karbon aktif. Tahap preparasi proses *pack carburizing* dengan menggunakan penambahan bahan pengikat. Salah satu bahan pengikatnya yaitu unsur karbonat (CO_3) yang berguna mempercepat proses karburisasi (*activator*). Tahap awal dari proses *pack carburizing* yaitu nilai batas jenuh maksimal dari unsur karbon dapat mencapai 1,2 %C pada permukaan baja. Semakin tinggi temperatur dan periode pelaksanaan pada proses *Pack Carburizing*, maka hasil yang didapatkan akan semakin baik (Sakura dkk., 2017).

Carburizing diartikan sebagai proses perlakuan panas 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

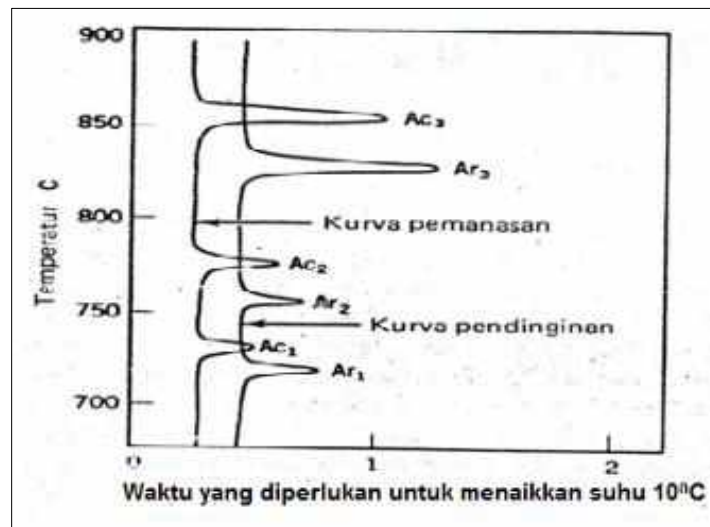
il, ketangguhan ditingkatkan atau dihasilkan suatu permukaan yang i sekeliling inti yang ulet. Laju pendinginan merupakan faktor



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 (Farisie, 2019)

Selain perlakuan panas yang tepat, komposisi kimia baja juga perlu diketahui. Hal ini disebabkan perubahan komposisi kimia, khususnya unsur karbon dapat mengakibatkan perubahan sifat-sifat fisis dan sifat mekanis. Secara umum selain unsur karbon, baja juga mengandung nikel (Ni), khromium (Cr), mangan (Mn), molybdenum (Mo), tungsten/wolfram (W), silikon (Si), vanadium (V), tembaga (Cu), belerang (S), seng (Sn) dan fosfor (P) dengan kadar yang berbeda (Farisie, 2019).

Bila sepotong baja dengan kadar karbon 0,20% dipanaskan secara merata dengan lambat dan suhunya dicatat pada selang waktu tertentu, akan diperoleh kurva seperti pada Gambar 2.1 berikut :



Gambar 2.1: Kurva Laju-Invers untuk Baja SAE 1020 (Amstead dkk., 1992)



Baja karbon 0,20% tersebut kemudian dipanaskan pada suhu 870°C, di atas titik A_{r3} 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. Bila didinginkan sampai mencapai suhu di bawah titik A_{r3} , 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 A_{r2} baja bersifat magnetik, dan bila baja didinginkan sampai pada garis A_{r1} , ferit yang terbentuk akan bertambah. Pada garis A_{r1} austenit yang masih ada akan bertransformasi menjadi suatu struktur baru yang disebut perlit. Perlit tampak sebagai lapisan yang terdiri dari lempeng ferit dan karbida besi berselang seling.

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

kan di atas daerah kritis bawah dan kadang-kadang di atas daerah kritis atas (Nasution, 2017).



Bila kadar karbon baja melampui 0,20% dimana ferit mulai terbentuk dan mengendap dari austenit. Baja yang berkadar karbon 0,80% disebut baja eutektoid dan strukturnya adalah 100% perlit. Pada titik eutekoid 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 (Amstead dkk., 1992).

Suhu pengerasan austenisasi dan suhu rekristalisasi suatu baja, ditentukan berdasarkan pada persentase kandungan karbon. Pedoman untuk menentukan suhu pengerasan ini dapat menggunakan beberapa cara seperti diagram besi-besi karbida ($\text{Fe-Fe}_3\text{C}$) untuk baja karbon seperti terlihat pada Gambar. 2.2, suhu pengerasan berada pada 30-50°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 komponen, yaitu dapat dilakukan dengan pengarbonan, penitrisasi frekuensi tinggi atau nyala api dan sebagainya.



Pada proses pengarbonan padat dalam kotak, digunakan 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 ke dalam campuran tersebut dimasukkan baja berupa spesimen yang akan di keraskan. Kotak kemudian ditutup rapat untuk menghindari udara dari luar dan kemudian dipanaskan pada $750\text{-}950^\circ\text{C}$, 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 $750\text{-}950^\circ\text{C}$, kemudian dihaluskan dengan jalan pengerasan kedua atau di-*quenching* pada 800°C seperti terlihat pada Gambar 2.2, dan di-*tempering* pada $150\text{-}200^\circ\text{C}$ pada gambar 2.3 sebelum dipergunakan.

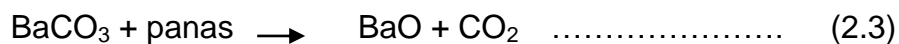
Reaksi pengarbonan dapat dijelaskan sebagai berikut :



Kemudian CO berdisosiasi menjadi C_{at} :



Gas yang dihasilkan oleh *energizer* dapat terjadi dengan persamaan reaksi :



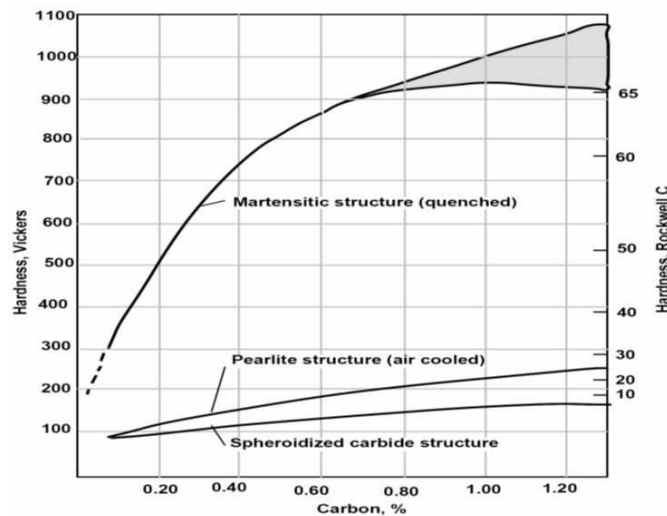
kemudian gas karbon dioksida (CO_2) bereaksi dengan *carburizer* padat

untuk gas karbon monoksida (CO) dengan persamaan reaksi :

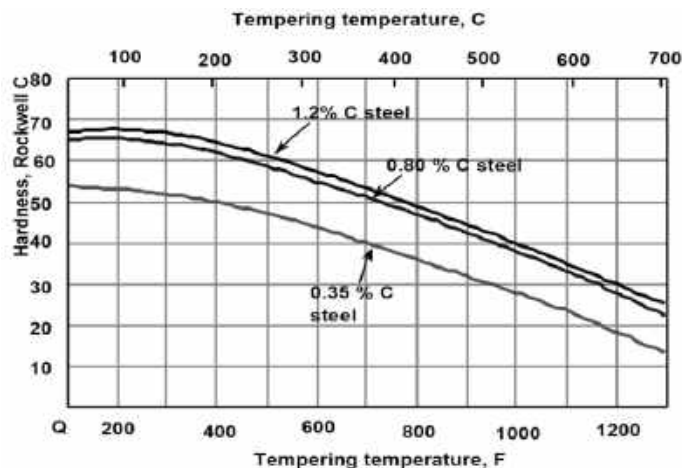


C larut ke dalam baja (Surdia, T. dan Shinroku, 1992)





Gambar 2.2: Kekerasan Akibat Proses *Quenching* (Meyrick dan Wagoner, 2001)



Gambar 2.3: Temperatur *Tempering* Vs Kekerasan (Meyrick dan Wagoner, 2001)

Perlakuan panas pada baja karbon rendah didasarkan pada prinsip termokimia dengan sistem difusi, yaitu suatu cara untuk mengubah sifat-sifat

dan substrat, maka dibutuhkan bahan tambahan dari luar yang akan terdifusi ke permukaan substrat (Suarsana & Sugita, 2009.).



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*.

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 750-950°C. Karbon yang digunakan dapat berbentuk serbuk padat, cair atau gas. Tebal lapisan karbon yang terbentuk pada permukaan tergantung pada lama pemanasan yang dilakukan, yaitu bervariasi dari 0,5-2 mm dengan laju pelapisan 0,1 mm/jam. Proses *carburizing* ini akan menaikkan kadar karbon pada lapisan permukaan baja sekitar 0,75-1,20%. Proses *carburizing* tidak dapat dilakukan pada semua baja, tergantung pada kadar karbon yang terdapat di dalam baja tersebut dan umumnya proses *carburizing* dilakukan pada baja karbon rendah (>0,35%C).

carburizing ini sering dilakukan untuk mengeraskan permukaan roda bubungan atau *cam* (Suryanto, dkk., 2003). Untuk mempercepat difusi karbon masuk kedalam benda uji pada saat proses pengarbonan,



maka perlu menambahkan unsur lain seperti BaCO_3 , NaCO_3 dan lain-lain. Penelitian tentang efek proses *pack carburizing* terhadap kelelahan baja ST60 menggunakan arang kayu dan barium karbonat (BaCO_3) ditambah natrium karbonat (NaCO_3), temperatur 850°C dan 950°C ditahan selama 5 jam (Yasa, I.N., 2000). Hasilnya menunjukkan bahwa kekerasan pada permukaan meningkat dari 220,856 HVN menjadi 417,139 HVN dan umur lelah juga meningkat dari 2.017.451 menjadi 4.154.577 siklus. Penelitian tentang hubungan antara *case depth* karbon akibat proses *carburizing* terhadap kekuatan *fatigue* baja SAE 8620. Proses *carburizing* dilakukan dengan temperatur 940°C ditahan selama 45 menit, 3 dan 5 jam dilanjutkan dengan proses *quenching* pada temperatur 850°C ditahan 15, 30 dan 30 menit. Hasilnya menunjukkan bahwa semakin lama waktu penahanan maka *case depth* dan kekuatan *fatigue* baja karbon SAE 8620 semakin tinggi (Asi dkk., 2007).

Penelitian lain mengenai pengaruh waktu tahan karburasi padat terhadap kekerasan 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) (Sudarsono, 2003.). Penelitian tentang pengaruh komposisi media karburasi

arang kayu dan barium karbonat terhadap kekerasan dan keausan karbon rendah. Barium karbonat (BaCO_3) divariasikan 15%, 20%, 25% dengan temperatur perlakuan 850°C , 900°C dan 950°C dan ditahan



selama 2 jam. Hasil yang diperoleh adalah kekerasan permukaan tertinggi, yaitu 667% dan ketahanan terhadap keausan sebesar 816% terutama diperoleh pada proses karburasi pada temperatur 950°C dengan penambahan barium karbonat sebesar 20% (Suryanto dkk, 2005).

Proses karburasi pada pahat bubut baja ST37 dengan suhu 950°C media arang batok ditahan 2 jam dilanjutkan dengan proses *quenching*. Hasilnya menyimpulkan bahwa baja ST37 yang dikenai proses karburasi dapat digunakan untuk memotong baja atau material lainnya yang lebih lunak (Rumendi, U. dan Purnawarman, O., 2006). 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).

1. Baja Karbon

Baja dengan kadar karbon yang berbeda dengan sendirinya memerlukan perlakuan panas yang berbeda pula, mengingat adanya perbedaan suhu kritis pada lapisan-lapisan yang berbeda. Selama proses karburisasi yang cukup lama terjadi pertumbuhan butir dalam baja, oleh karena itu baja perlu dipanaskan hingga suhu kritis inti, kemudian didinginkan

demikian diperoleh inti dengan butir-butir yang halus. Baja kemudian
kan di atas suhu transformasi lapisan luar, lalu dicelup untuk
oleh lapisan yang keras dan halus. Baja karbon rendah dengan



kadar $C=0,15\%$ umumnya dikeraskan melalui pencelupan (*quenching*), dimana selama proses karburisasi pada temperatur dan waktu tertentu kadar lapisan luar karbon dapat tingkatkan dari 0,9 -1,2%C.

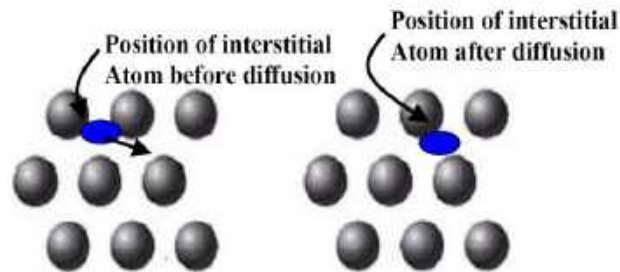
Berdasarkan medianya, proses *carburizing* dikelompokkan menjadi tiga jenis yaitu proses *solid* atau *pack carburizing*, proses *liquid carburizing* dan proses *gas carburizing*. Proses *pack carburizing* didefinisikan sebagai proses pelapisan permukaan baja dengan karbon padat pada temperatur tinggi (850-950°C). Pada temperatur kritis, baja memiliki kecenderungan untuk berafinitas dengan karbon, dimana karbon akan diabsorpsi kedalam logam/baja membentuk larutan padat dimana lapisan luar memiliki karbon dengan kadar yang tertinggi. Pada proses *pack carburizing*, dimana atom-atom karbon masuk ke dalam permukaan spesimen melalui proses difusi. Difusi didefinisikan sebagai mekanisme atom berpindah ke dalam atau keluar dari benda uji (spesimen).

Apabila suatu material temperaturnya dinaikkan, maka energinya akan meningkat yang menyebabkan atom-atom bergerak sehingga menimbulkan jarak antar atom yang lebih besar. Suatu atom bila memiliki energi yang cukup untuk mendobrak ikatannya dan melompat ke posisi yang baru, maka pada saat yang sama akan terjadi suatu proses pergerakan yang disebut

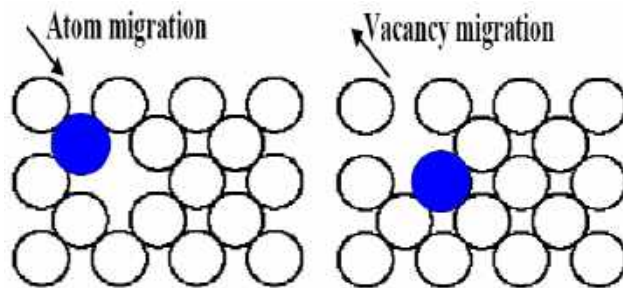
difusi. Pergerakan ini akan diikuti oleh pergerakan atom lain yang akan sampai terjadi kondisi yang stabil dan peristiwa ini umumnya berlangsung melalui dua mekanisme yaitu sisipan (interstitial) gambar 2.4



dan kekosongan (vacancy) gambar 2.5 (Vlack, 2004), Bertone dan Nelly, 2000).



Gambar 2.4: Mekanisme Sisipan/Interstitia (Bertone dan Nelly, 2000)



Gambar 2.5: Mekanisme Kekosongan/Vacancy (Bertone dan Nelly, 2000)

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 perbandingan ukuran atom karbon dengan ukuran celah yang



tersedia menunjukkan bahwa beberapa distorsi akan terjadi pada saat atom karbon masuk kedalam kisi besi (Abbaschian & Robert, 1994).

Kelarutan atom karbon di dalam austenit cenderung lebih besar dibandingkan dengan ferrit (tabel 2.1), hal ini disebabkan struktur kubus pemusatan sisi maka celah yang tersedia pada austenit menjadi lebih besar. Perbedaan kelarutan ini sangat berarti dalam perlakuan panas baja dan secara penuh dimanfaatkan untuk menamabah kekuatan baja. Secara teori menyatakan bahwa pada temperatur ruang, kelarutan karbon sangat rendah dibawah kandungan sisipan aktual dari beberapa jenis besi murni, sehingga selama perlakuan panas kelebihan karbon akan mengendap menjadi besi karbida dan secara umum peristiwa ini terjadi pada perlakuan panas yang melibatkan proses *quenching* dari austenit.

Tabel 2.1. Kelarutan Karbon Pada Struktur Ferrit dan Austenit

Struktur	Temperatur (°C)	Kelarutan atom C (% berat)
Austenit(besi γ)	1150	2,04
	723	0,8
Ferrit (besi α)	723	0,02
	20	<0,00005

Sumber : Honeycombe & Bhadesia, 1995

1.1.Baja Karbon Rendah

Kandungan karbon dari baja karbon rendah 0,01%-0,25% dan strukturnya terdiri dari fasa ferit dan pearlit menjadikan baja karbon rendah bersifat lunak dan kekuatannya lemah namun keuletan dan tngguhannya sangat baik. Baja karbon rendah kurang responsif



terhadap perlakuan panas untuk mendapatkan mikrostruktur marthensit maka dari itu untuk meningkatkan kekuatan dari baja karbon dapat dilakukan dengan proses roll dingin maupun karburasi.

1.2. Baja Karbon Sedang

Baja ini mengandung karbon antara 0,25%-0,6%. Baja ini didalam perdagangan biasanya dipakai sebagai alat-alat perkakas, baut, poros, engkol, roda gigi, ragum pengas dan lain-lain.

1.3. Baja karbon Tinggi

Kandungan karbon baja karbon tinggi antara 0,6%-1,4%. Baja ini biasanya digunakan untuk keperluan alat-alat konstruksi yang berhubungan dengan suhu yang tinggi.

1.4. Struktur Baja Karbon

Struktur baja dibedakan menjadi tiga bentuk utama :

1. Ferit yaitu Kristal besi murni (Fe) terletak rapat saling berdekatan tidak teratur, baik bentuk maupun besarnya. Ferit merupakan bagian baja yang paling lunak.
2. Perlit merupakan campuran padat antara ferit dan sementit dengan kandungan zat arang sebesar 0,8%. Kristal ferit terdiri dari serpihan sementit halus yang memperoleh penempatan saling berdampingan dalam lapisan tipis.

Karbida besi (Fe_3C) suatu senyawa kimia antara besi (Fe) dengan karbon (C) sebagai unsur struktur tersendiri dinamakan sementit.



2. Tulang Kerbau

Kerbau merupakan hewan yang memiliki potensi untuk ditenakkan sebagai panghasil susu dan daging. Khusus untuk masyarakat Toraja, selain untuk dikonsumsi daging kerbau menjadi salah satu unsur penting dalam acara adat terutama dalam upacara pemakaman (rambu solo'). Berdasarkan data (Rombe, 2011) jumlah kerbau yang dipotong atau dikorbankan di Toaja adalah sekitar 13.000 ekor per tahun. Dengan meningkatnya kebutuhan kerbau menyebabkan tingginya limbah tulang kerbau yang dihasilkan. Pada saat ini pemanfaatan limbah tulang kerbau hanya sebatas sebagai bahan kerajinan sehingga pemanfaatannya belum optimal. Menyikapi hal tersebut maka digunakan alternatif lain yaitu sebagai adsorben, adsorben adalah zat yang mempunyai sifat mengikat pada permukaan dan sifat ini sangat menonjol pada padatan berpori (Sukardjo,2002).

Menurut (Darmayanto, 2009.) kandungan organik penyusun tulang kerbau sebesar 35% sehingga sangat memungkinkan untuk dijadikan bahan baku pembuatan arang aktif. Jumlah arang aktif dalam tulang hewan sekitar 7-10% (Fawell dkk., 2006). Arang aktif merupakan senyawa amorf yang dapat dihasilkan dari bahan-bahan yang mengandung karbon

dari arang yang diperlakukan secara khusus untuk mendapatkan permukaan lebih luas. Luas permukaan arang aktif berkisar 400-800 m² dengan ukuran pori antara 5-10 A. Arang tulang memiliki daya serap



yang tinggi karena arang tulang memiliki pori-pori dalam jumlah besar (Triyana dkk., 2003).

Menurut (Handayani dkk., 2015), tulang kerbau merupakan bahan sisa yang belum dimanfaatkan secara optimal. Salah satu alternatif pemanfaatannya adalah digunakan sebagai adsorben dalam bentuk arang aktif. Arang aktif diperoleh melalui aktivasi dengan menggunakan Na_2CO_3 dengan konsentrasi optimal 5%. Hasil karakterisasi kadar air, kadar abu, adsorpsi iodium dan luas permukaan didapatkan masing-masing 5,66%, 10,21%, 207,48%mg/g dan 5,1058 Fe^{3+} dan Pb^{2+} sebesar 99,93 dan 99,94% yang dianalisis SSA.

Tabel 2.2: Karakterisasi Arang Aktif Tulang Kerbau

No	Parameter	Konsentrasi Aktivator (Na_2CO_3)			
		0,0%	2,5%	5,0%	7,5%
1	Kadar air (%)	2,99	19,09	5,66	12,43
2	Kadar abu (%)	14,74	23,81	10,21	15,87
3	Adsorpsi iodium(mg/g)	126,82	128,70	207,48	173,03
4	Luas permukaan (m^2/g)	42,992	44,588	51,058	43,116

Sumber : Ardha Handayani dkk (JOM MIPA Vol.No.1 Februari, 2015)

3. Struktur Mikro

Menurut (Callister & Rethwisch, 2011),(Smallman & Bishop, (Suardia & Saito, 1985). Struktur mikro adalah pengujianography untuk melihat struktur atau fasa pada logam. Sifat-sifat



mekanik dan fisik suatu logam akan ditentukan oleh gambar bentuk struktur mikronya. Penentuan sifat mekanik logam dapat dilihat pada gambar dari ketidak teraturan butir, ukuran butir, distribusi fasa, unsur pengatur, perubahan karena deformasi dan lainnya .

Tabel 2.3: Fasa Yang Ada Pada Baja

	Fasa dan simbol	struktur	pengelasan
Menurut Kristal	Austenit (γ)	Fcc	Paramagnetik dan stabil pada temperatur tinggi Stabil pada temperatur rendah, kelarutan padat terbatas, dapat berada bersama Fe_3C (sementit) atau lainnya. Austenit metastabil didinginkan dengan laju pendinginan cepat tertentu. Terjadi hanya presipitasi Fe_3C , unsur paduannya tetap larut Fasa menstabil terbentuk dengan pendinginan cepat, semua unsur paduan masih larut dalam keadaan padat.
	Ferit (α)	Bcc	
	Bainit (α')	Bcc	
	Martensit (α')	bct	
Menurut Keadaan	Perlit		Lapisan ferit dan Fe_3C γ dan α dalam orientasi pada perispitasi ferit berbentuk cabang-cabang seperti pohon, struktur ini terbentuk karena segregasi karbon pada pembekuan. Sorbit adalah perlit halus dan trostit adalah bainit. Nama ini tidak banyak dipakai
	Widmanstaetten		
	Dendrit		
	Sorbit Trostit		

Catatan: *fcc* = *face centered cubic*

Bcc = *body centered cubic*

Bct = *body centered tetragonal*

Sumber (Suardia & Saito, 1985)

Pengujian struktur mikro menggunakan mikroskop dengan besaran tertentu setelah benda kerja dipoles (Setiawan, 2013).
Terdapat beberapa jenis mikroskop yang digunakan mikroskop *electron*, mikroskop



field ion, mikroskop *field emission*, dan mikroskop sinar-X (Zainuri dkk., 2011). Khusus untuk fasa logam baja dapat dilihat pada tabel 2.3.

4. Kekerasan

Kekerasan (*hardness*) adalah kemampuan bahan untuk tahan terhadap penggoresan, pengikisan, keausan, indentasi, penetrasi dan mampu menahan beban sampai pada terjadinya deformasi plastis. Pengujian kekerasan bertujuan untuk mengevaluasi perlakuan panas, dan mendeteksi pengerasan atau pelunakan akibat *overheating*, dekarburisasi ataupun pengerasan permukaan.

Metode pengukuran kekerasan, yaitu dilakukan dengan cara material diindentasi menggunakan indenter pada permukaan benda uji dengan beban tertentu kemudian bekas penekanan yang terbentuk diukur. Indenter biasanya terbuat dari baja yang dikeraskan, tungsten karbida dan intan yang berbentuk piramid ber alas bujur sangkar dengan sudut puncak antara dua sisi yang berhadapan 136° .

Secara umum pangujian 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

At, kedua diagonal bekas injakan diukur dan diambil rata-ratanya, dan kekerasan indentasi Vickers (HV) dihitung dengan persamaan :



$$H_v = \frac{2.P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} \dots\dots\dots (2.6)$$

dimana : P = beban indentasi (kg)

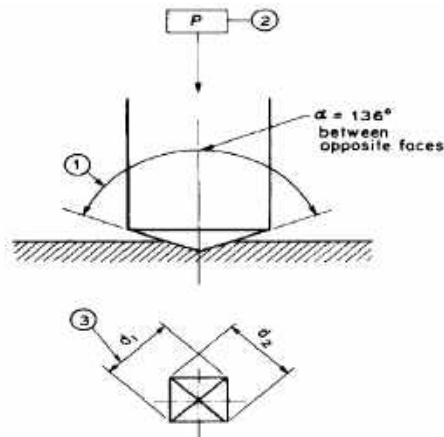
d = diagonal rata-rata bekas injakan (mm)

θ = sudut puncak = 136°

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \dots\dots\dots (2.7)$$

Sehingga diperoleh :

$$H_v = \frac{1,854P}{d^2} \left(\frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2} \right) \dots\dots\dots (2.8)$$



Gambar 2.6: Metode Pengujian Kekerasan Mikro Vickers (ASTM E-92)

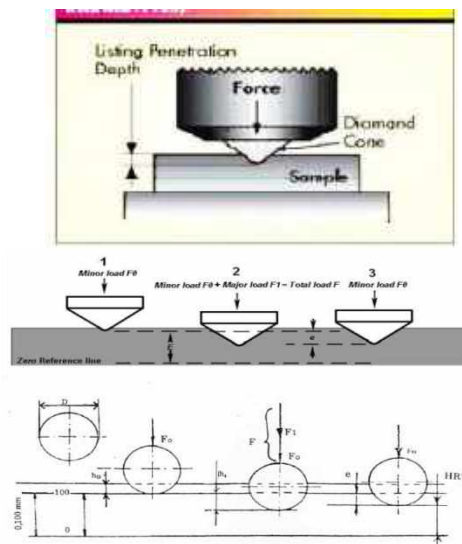
Tabel 2.4: Variabel Pengujian Kekerasan Vickers

Number	Symbol	Designation
1	----	Angle at the vertex of the pyramidal indenter (136°)
2	P	Test force in kilograms-force
	d	Arithmetic mean of the two diagonals d_1 and d_2

(Sumber: Handbook ASTM E-92)



Selain metode vickers, pengujian kekerasan juga digunakan adalah metode rockwell. Metode Rockwell merupakan metode yang juga umum digunakan untuk mengukur kekerasan karena sangat mudah dilakukan dan tidak memerlukan keterampilan khusus. Beberapa skala yang berbeda dapat digunakan dari kemungkinan kombinasi berbagai indenters dan beban yang berbeda, yang memungkinkan pengujian hampir semua paduan logam (dan juga beberapa polimer). Dengan sistem ini, angka kekerasan ditentukan oleh perbedaan kedalaman penetrasi yang dihasilkan dari penerapan beban minor awal diikuti oleh beban besar yang lebih besar; pemanfaatan beban minor meningkatkan akurasi pengujian. Atas dasar besarnya beban besar dan kecil, ada dua jenis pengujian: Rockwell dan Rockwell superfisial (Callister & Rethwisch, 2011). Prinsip kerja metode rockwell dapat dilihat pada gambar 2.7,



Gambar 2.7 : Prinsip Kerja Metode Pengujian Kekerasan Rockwell (Callister & Rethwisch, 2011)



Persamaan Hardness Rockwell dapat dilihat pada persamaan (2.9)

$$HR = E - e \dots\dots\dots (2.9)$$

Di mana,

E = Konstanta dengan nilai 100 untuk indenter intan dan 130 untuk indenter bola.

e = Kedalaman penetrasi permanen karena beban utama (F1) diukur dengan satuan 0,002 mm. Jadi, $e = h/0,002$

Tabel 2.5: *Rockwell Hardness Scales*

Scale Symbol	Indenter	Major Load (kg)
A	Diamond	60
B	$\frac{1}{16}$ - in. ball	100
C	Diamond	150
D	Diamond	100
E	$\frac{1}{8}$ - in. ball	100
F	$\frac{1}{16}$ - in. ball	60
G	$\frac{1}{16}$ - in. ball	150
H	$\frac{1}{8}$ - in. ball	60
K	$\frac{1}{8}$ - in. ball	150

Sumber: (Callister & Rethwisch, 2011)

Tabel 2.6: *Superficial Rockwell Hardness Scales*

Scale Symbol	Indenter	Major Load (kg)
15 N	Diamond	15
30N	Diamond	30
45N	Diamond	45
15T	$\frac{1}{16}$ - in. ball	15
30T	$\frac{1}{16}$ - in. ball	30
45T	$\frac{1}{16}$ - in. ball	45
15W	$\frac{1}{8}$ - in. ball	15
30W	$\frac{1}{8}$ - in. ball	30
45W	$\frac{1}{8}$ - in. ball	45

Sumber: (Callister & Rethwisch, 2011)



Berikut hubungan antara kekerasan lapisan dengan kandungan karbon menurut (Boyer & Gall, 1985)

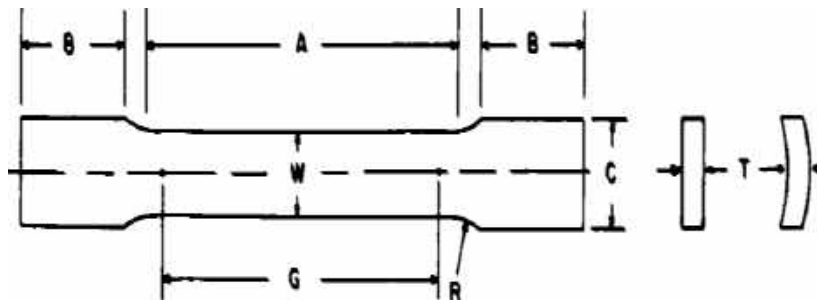
Tabel 2.7: Hubungan Kekerasan Lapisan Dengan Kandungan Karbon

Kandungan karbon (%)	Kekerasan lapisan (HRc/HV)
0,28 – 0,32	35/345
0,33 – 0,42	40/392
0,43 – 0,52	45/446
$\geq 0,53$	50/513

Sumber : (Boyer dan Gall, 1985)

5. Pengujian Tarik

Proses pengujian tarik bertujuan untuk mengetahui kekuatan tarik benda uji. Pembebanan tarik adalah pembebanan yang diberikan pada benda dengan memberikan gaya tarik berlawanan arah pada salah satu ujung benda yang diatur pada ASTM E-8. Untuk dimensi ukur bisa dilihat pada gambar 2.8



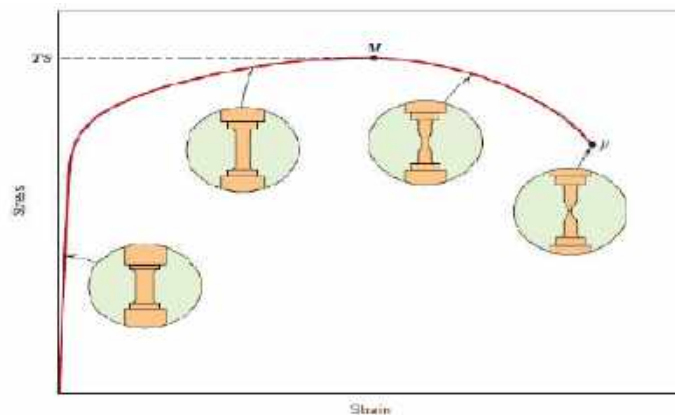
Gambar 2.8: Spesimen Uji Tarik standart ASTM-E8
Sumber: *Annual book of ASTM standards*. ASTM, 2001

Penarikan gaya terhadap beban akan mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk (deformasi) bahan tersebut. Proses terjadinya deformasi pada bahan uji adalah proses pergeseran butiran kristal logam



yang mengakibatkan melemahnya gaya elektromagnetik setiap atom logam hingga terlepas ikatan tersebut oleh penarikan gaya maksimum.

Pada pengujian tarik beban diberikan secara kontinu dan pelan-pelan bertambah besar, bersamaan dengan itu dilakukan pengamatan mengenai perpanjangan yang dialami benda uji dan dihasilkan kurva tegangan-regangan yang ditunjukkan pada gambar 2.9. Pada pengujian tarik beban diberikan secara kontinu dan pelan-pelan bertambah besar, bersamaan dengan itu dilakukan pengamatan mengenai perpanjangan yang dialami benda uji dan dihasilkan kurva tegangan-regangan.



Gambar 2.9: Kurva Tegangan-Regangan
(Sumber: <http://www.google.com> sutrisnoc2-5972-3-bab2)

Tegangan dapat diperoleh dengan membagi beban dengan luas penampang mula benda uji.

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_0} \dots\dots\dots (2.13)$$

σ_u = Tegangan nominal (kg/mm²)



Fu = Beban maksimal (kg)

Ao = Luas penampang mula dari penampang batang (mm²)

Regangan (persentase pertambahan panjang) yang diperoleh dengan membagi perpanjangan panjang ukur (L) dengan panjang ukur mula-mula benda uji.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

dimana ; ε = Regangan (%)

L = Panjang akhir (mm)

L₀ = Panjang awal (mm)

Pembebanan tarik dilakukan terus-menerus dengan menambahkan beban sehingga akan mengakibatkan perubahan bentuk pada benda berupa pertambahan panjang dan pengecilan luas permukaan dan akan mengakibatkan kepatahan pada beban. Persentase pengecilan yang terjadi dapat dinyatakan dengan rumus sebagai berikut:

$$q = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

dimana ; q = Reduksi penampang (%)

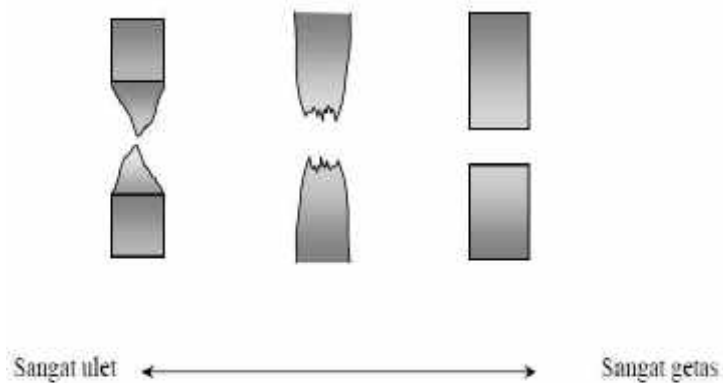
A₀ = Luas penampang mula (mm²)

A₁ = Luas penampang akhir (mm²)

Tempel hasil pengujian tarik dapat menunjukkan beberapa tampilan patahan diilustrasikan pada Gambar 2.10 sesuai dengan tingkat keuletannya. Perpatahan ulet memberikan karakteristik berserabut (*fibrous*)



dan gelap (*dull*), sementara perpatahan getas ditandai dengan permukaan patahan yang berbutir (*granular*) dan terang. Perpatahan ulet umumnya lebih disukai karena bahan ulet umumnya lebih tangguh dan memberikan peringatan lebih dahulu sebelum terjadinya kerusakan.



Gambar 2.10: Ilustrasi Penampang Samping Bentuk Perpatahan Benda Uji tarik sesuai dengan tingkat keuletan/kegetasan (Akhmad, 2009) (Sumber: <http://www.google.com> sutrisnoc2-5972-3-bab2)

Perpatahan ulet memberikan karakteristik berserabut (*fibrous*) dan gelap (*dull*), sementara perpatahan getas ditandai dengan permukaan patahan yang berbutir (*granular*) dan terang. Perpatahan ulet umumnya lebih disukai karena bahan ulet umumnya lebih tangguh dan memberikan peringatan lebih dahulu sebelum terjadinya kerusakan.

6. Fatigue Failure

Sejauh ini diandaikan bahwa tegangan yang diberikan adalah konstan, baik besar maupun arahnya. Dalam kenyataannya adalah struktur dan beban dalam rekayasa, sebagian besar mengalami tegangan baik maupun arahnya berubah-ubah, sehingga mengakibatkan terjadinya



fatigue failure. Seorang perekayasa Inggris, Sir William Fairbairn menemukan bahwa sebatang gelagar baja yang semestinya mampu menahan beban statik hingga 12 ton selama waktu yang tidak terbatas, ternyata telah gagal akibat beban berulang hanya tiga ton gaya tetapi dialami sebanyak tiga juta kali. Baru sesudah kecelakaan beruntun pesawat terbang dari maskapai Comet dalam tahun 1950-an, *fatigue failure* yang parah dan tidak terduga itu menarik perhatian umum (Trethewey & Chamberlain, 1991).

Istilah *fatigue* berlaku untuk perilaku logam yang mengalami tegangan periodik dengan nilai tertentu (seringkali di bawah tegangan luluh) menyebabkan perubahan sifat mekanik yang dapat dideteksi. Dalam praktek, sejumlah kegagalan dalam pemakaian disebabkan oleh *fatigue*, maka para ahli rekayasa sangat memperhatikan fenomena penyebab terjadinya *fatigue failure*. Beberapa kegagalan disebabkan oleh desain komponen yang kurang baik, sebagian lagi karena kondisi material. Secara garis besar pertimbangan kegagalan dapat dibagi atas tiga aspek: (1) aspek rekayasa, (2) aspek metalurgi secara keseluruhan dan (3) aspek perubahan struktural skala-halus dan skala atomik.

Amplitudo siklus tegangan yang diterapkan terhadap spesimen

dipakan satu-satunya variabel tunggal penting untuk menentukan umur tetapi kinerja material juga sangat dipengaruhi oleh beberapa kondisi, dan lain (1) persiapan permukaan, (2) Efek temperatur, (3) Frekuensi



siklus tegangan (4) Tegangan rata-rata dan (5) Lingkungan (Smallman & Bishop, 1999). Pada umumnya *fatigue failure* dijumpai pada poros dimana beban eksentrik yang menghasilkan variasi tegangan, dan tegangan maksimum terdapat pada permukaan poros. Tegangan lengkung yang dialami sayap dan bagian bawah badan pesawat terbang ketika bergerak di darat, menunjukkan bahwa sistem tegangan sesungguhnya tidak bervariasi sebagai sinusoidal biasa. Serentetan kecelakaan pesawat terbang disebabkan kegagalan kabin yang bertekanan, merupakan contoh yang sangat spektakuler dari tipe *fatigue failure* tersebut.

Kegagalan lelah didefinisikan sebagai jumlah siklus tegangan yang dicapai material sampai pada terjadinya perpatahan dengan pembebanan tertentu yang dapat menyebabkan patah getas, rapuh tetapi tanpa deformasi. Batas lelah (*fatigue limit* atau *endurance limit*) dinyatakan sebagai besarnya beban maksimal yang mengakibatkan umur lelah menjadi tak terhingga.

Kekuatan lelah (*fatigue strength*) didefinisikan sebagai besarnya tegangan yang menyebabkan terjadinya kegagalan lelah pada suatu siklus tertentu. Tegangan-tegangan benda uji yang diperoleh lewat pengujian tarik, pengujian geser, pengujian puntir didasarkan pada beban steady-

Dari pengujian tarik dan pengujian puntir terlihat bahwa jika beban masih berada pada daerah elastis (*yielding*) benda uji, maka benda uji tidak akan mengalami kerusakan berarti. Tetapi dalam



prakteknya sering dijumpai bahwa pembebanan tidak selalu dalam keadaan normal statis, melainkan dengan beban tidak normal atau beban dinamis yang besarnya bervariasi secara kontinu.

Kerusakan benda uji biasanya disebabkan oleh beban berulang-ulang pada harga tegangan-tegangan yang masih berada dibawah harga elastis (*yielding point*) dan jumlah percobaan membuktikan bahwa kerusakan yang timbul pada benda uji terjadi pada suatu harga yang disebut tegangan kelelahan (*endurance* atau *fatigue*). Harga tegangan kelelahan ini lebih kecil dibandingkan tegangan elastis yang diperoleh lewat pengujian tarik. Batas ketahanan (*endurance limit*) suatu bahan ditentukan lewat percobaan terhadap benda uji penampang bulat dengan beban lengkung.

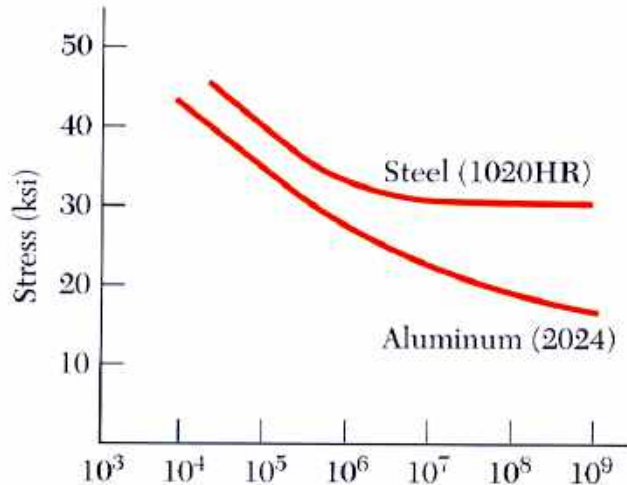
Bila benda uji mendapat beban lengkung-puntir dalam jangka waktu tertentu, maka tegangan lengkung bervariasi secara kontinu dari harga maksimum (tekanan) ke harga maksimum (tarikan). Tegangan kelelahan atau *endurance limit* benda uji tersebut didefenisikan sebagai harga maksimum tegangan lengkung yang dihasilkan selama percobaan, jadi tegangan kelelahan adalah σ_e (V Malau, 1999).

Perkiraan batas dan kekuatan leleh material dapat ditentukan dengan

perhitungan empiris dan juga dapat dicari melalui suatu pengujian digambarkan dalam bentuk kurva S-N (Gambar 2.11). Baik secara



teoritis maupun praktis masalah kegagalan lelah sangat berbahaya, karena perpatahan yang terjadi tanpa menunjukkan tanda-tanda awal.



Gambar 2.11: Kurva S-N Baja 1020 dan Aluminium 2024

Harga *fatigue failure* dapat ditentukan dengan persamaan (Akita & Tokaji, 2006):

$$\sigma_b = \frac{\text{Momen bending (Mb)}}{\text{Momentahanan bending (Wb)}} \dots\dots\dots (2.9)$$

dimana: $Mb = \frac{W.L}{2}$ dan $Wb = \frac{\pi}{32} \cdot (df)^3$

sehingga $\sigma_b = \frac{Mb}{Wb} = \frac{(WL/2)}{(\pi/32)(df)^3} \dots\dots\dots (2.10)$

Jika jarak tumpuan (L) pada pengujian ini = mm, maka :

$$\sigma_b = \frac{100.W}{\pi/32(d^3)} = \frac{3200.W}{\pi.(df)^3} \dots\dots\dots (2.11)$$

Sehingga beban bending maksimum (W_{maks}) diperoleh :

$$W_{maks} = \frac{\pi.(df)^3}{3200} \cdot \sigma_b \dots\dots\dots (2.12)$$



dimana σ_b adalah tegangan bending (kg/mm^2); W_{maks} adalah beban bending (kg); df adalah diameter benda uji (mm).

7. Kedalaman Lapisan *Carburizing* (Case depth)

Beberapa variabel yang berpengaruh terhadap *case depth* antara lain waktu, temperatur, komposisi media karburisasi dan kandungan karbon di dalam baja tersebut. Penentuan kedalaman lapisan karburisasi dapat dirujuk dengan persamaan Harris (Boyer & Gall, 1985), yaitu :

$$\text{Case depth} = \frac{31,6\sqrt{t}}{10^{(6700/T)}} \text{ (mm)} \dots\dots\dots (2.5)$$

dimana : T = temperatur *carburizing* (Rankine)

t = waktu (jam)

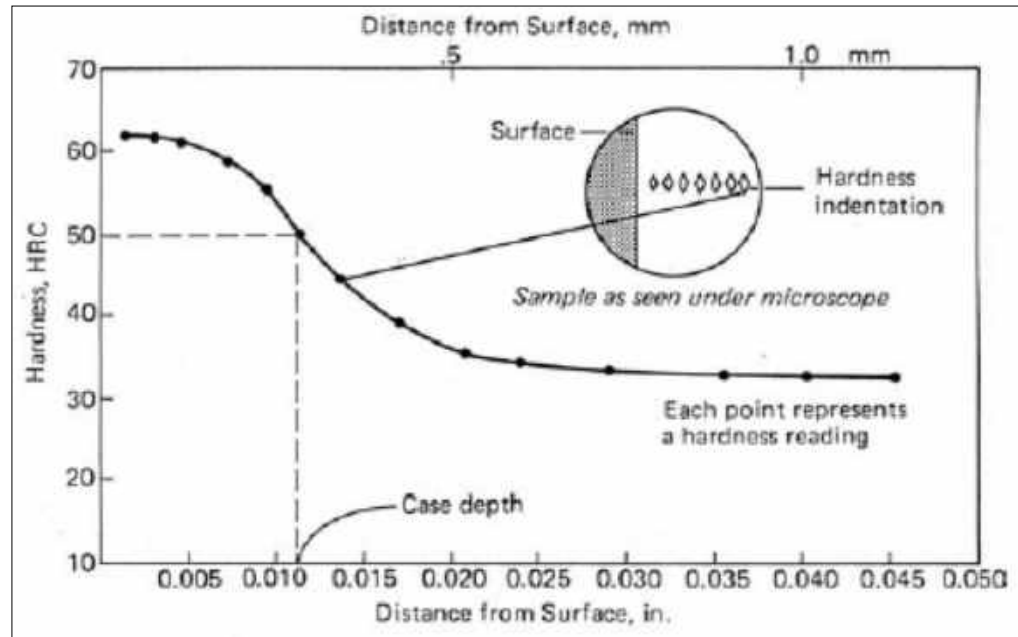
Persamaan tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur, maka lapisan *carburizing* akan semakin dalam, tetapi makin ke inti kandungan karbon akan semakin rendah. Berdasarkan persamaan (2.5) maka diperoleh *case depth* untuk temperatur *carburizing* 850°C (2022°R), 900°C (2112°R) dan 950°C (2202°R) berturut-turut adalah 0,027 inch (0,686 mm), 0,037 inch (0,889 mm) dan 0,049 inch (1,245 mm).

Total *case depth* didefinisikan sebagai jumlah kedalaman *carburizing* mulai dari permukaan sampai pada tercapainya kandungan karbon 0,04% yang lebih tinggi dari bahan dasarnya. Kedalaman lapisan efektif

didefinisikan sebagai jarak (mm) dari permukaan dimana kekerasan lebih dari 15% dibandingkan kekerasan pada permukaan (Gambar



2.12), dan batas kekerasan yang umum digunakan adalah 50 HRC setara dengan 513 HV (Prabhudev, 1988).



Gambar 2.12: Lapisan Kekerasan Efektif *Carburizing*

Penelitian tentang pengaruh *case depth* karbon akibat proses *carburizing* terhadap kekuatan *fatigue* baja AISI 8620, memberikan hasil bahwa semakin tinggi nilai *case depth* karbon kemampuan *fatigue* dan harga kekerasan juga semakin tinggi (Genel & Demirkol, 1999a). Pengukuran *case depth* dapat dilakukan secara mekanis dengan menggunakan alat uji kekerasan mikro, dengan metode Vickers ataupun Knoop yang menggunakan beban paling kecil yaitu sebesar 0,5 kg. Hal yang sama juga terjadi pada penelitian (Setiamarga dkk., 2017) tentang *carburizing* sprocket sepeda motor, dimana hasil perhitungan, kadar karbon pada bagian permukaan adalah sekitar 0,75%C. Selain itu terjadi



kenaikan kadar karbon dari 0,08%C menjadi sekitar 0,75%C pada permukaan yang menyebabkan terjadinya peningkatan kekerasan dan perubahan struktur mikro.

B. Teori Getaran

Masalah getaran berhubungan dengan gerak osilasi benda dan gaya yang berhubungan dengan gerak tersebut (Kelly, 2012). Semua benda yang mempunyai massa dan elastisitas mampu bergetar. Pada umumnya mesin dan struktur rekayasa (engineering) mengalami getaran sampai derajat tertentu, dan rancangannya selalu memerlukan pertimbangan sifat osilasinya.

Sistem yang beresilasi secara luas dapat digolongkan sebagai sistem *linier* atau *tidak linier*. Pada sistem linier prinsip superposisi berlaku dan pengembangan teknik matematika yang ada dapat dilaksanakan dengan baik. Sebaliknya, teknik untuk menganalisis sistem tidak-linier kurang dikenal. Namun pengetahuan tentang sistem tidak linier tetap dibutuhkan, sebab semua sistem cenderung menjadi tidak linier dengan bertambahnya amplitudo osilasi.

Ada dua kelompok getaran yang umum, yaitu getaran bebas dan paksa. *Getaran bebas* terjadi bila sistem beresilasi akibat gaya yang ada dalam sistem itu sendiri dan tidak ada gaya luar yang bekerja. Sistem yang

bebas akan mengalami getaran pada satu atau lebih frekuensi
ya, yang merupakan sifat sistem dinamika yang dibentuk oleh
i massa dan kekakuannya. Sedangkan getaran yang terjadi karena



rangsangan gaya luar disebut *getaran paksa*. Jika rangsangan tersebut beresilasi, maka sistem dipaksa untuk bergetar pada frekuensi rangsangan. Jika frekuensi rangsangan sama dengan salah satu frekuensi natural sistem, maka diperoleh keadaan *resonansi* dan memungkinkan terjadinya osilasi besar yang berbahaya (Mustafa, 2011.)

Peningkatan frekuensi pribadi suatu sistem menyebabkan terjadinya getaran yang sangat besar. Getaran tersebut mengakibatkan terjadinya kerusakan pada suatu bagian tertentu dari sistem tersebut . Oleh karena itu, kita berusaha untuk mengurangi efek-efek merugikan dari getaran dengan jalan mengisolasi, mengabsorpsi, meredam dan lain sebagainya. Semua sistem yang bergetar mengalami redaman sampai derajat tertentu karena energi didisipasi oleh gesekan dan tahanan lain. Jika redamannya kecil, maka pengaruhnya sangat kecil pada frekuensi natural sistem. Olehnya itu perhitungan frekuensi natural biasanya dilaksanakan atas dasar tidak ada redaman.

Pada umumnya getaran bebas benda adalah jumlah ragam utama. Pada ragam utama getaran, tiap partikel benda melakukan gerak harmonik sederhana pada frekuensi yang sesuai dengan akar tertentu. Pada sistem ini benda mempunyai distribusi massa dan elastisitas kontinyu. Setiap partikel melewati kedudukan setimbangnya masing-masing secara bersama. Untuk

menentukan kedudukan tiap partikel dalam benda elastik, diperlukan

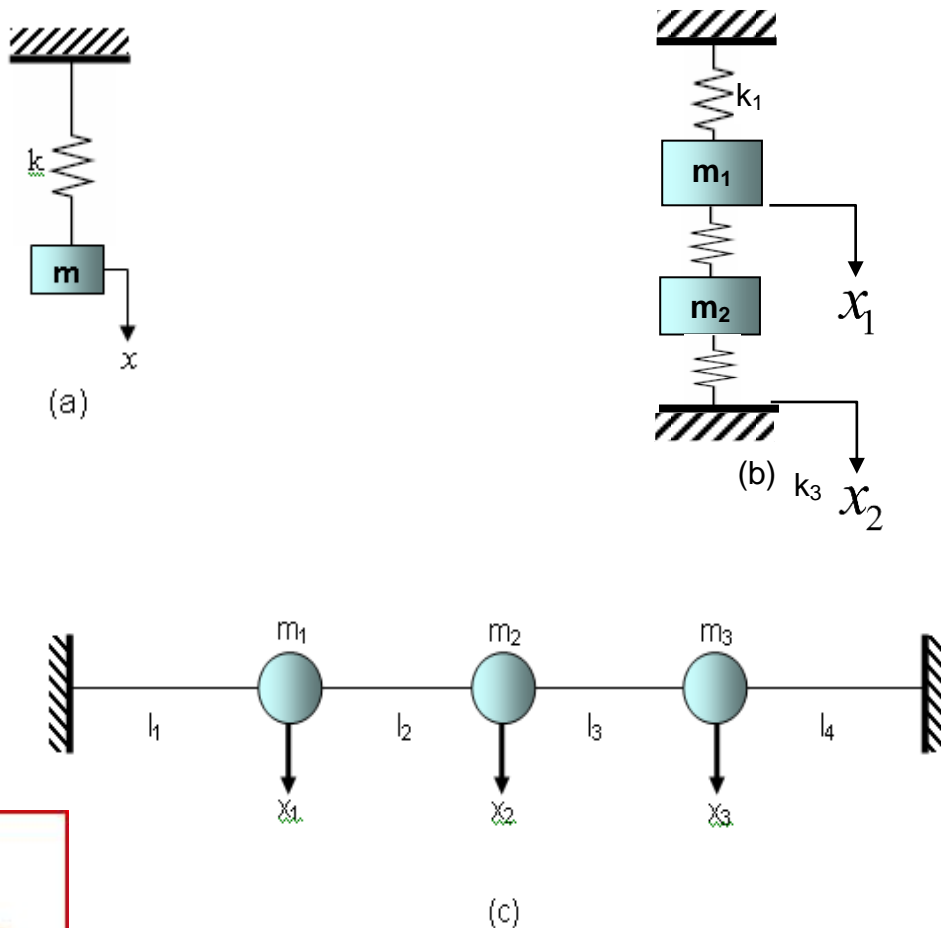


koordinat yang tak terhingga jumlahnya, sehingga benda semacam itu mempunyai derajat kebebasan tak terhingga.

1. Derajat Kebebasan

Pada dinamika struktur jumlah koordinat-koordinat bebas (*independent coordinates*) yang diperlukan untuk menetapkan susunan atau posisi sistem pada setiap saat dinyatakan dengan derajat kebebasan.

Berikut ini adalah contoh struktur berderajat kebebasan satu (a), berderajat kebebasan dua (b), berderajat kebebasan tiga (c).



Gambar 2.13: Sistem derajat kebebasan (a) satu, (b) dua, (c) tiga



Pada gambar (2.13a) mempunyai satu derajat kebebasan karena hanya membutuhkan satu koordinat dalam gerakannya, pada gambar (2.13b) mempunyai dua derajat kebebasan karena membutuhkan dua koordinat untuk menggambarkan gerakannya. Sedangkan pada gambar (2.13c) mempunyai tiga derajat kebebasan karena membutuhkan tiga koordinat dalam menggambarkan gerakannya.

Sebuah sistem dengan dua derajat kebebasan mempunyai dua frekuensi natural dalam gerakannya. Bila getaran bebas terjadi pada salah satu frekuensi natural ini, maka terdapat hubungan antara amplitudo-amplitudo kedua koordinatnya. Konfigurasi hubungan tersebut dinyatakan sebagai ragam normal (*normal mode*). Sistem dua derajat kebebasan mempunyai dua getaran ragam normal sesuai dengan kedua frekuensi naturalnya. Getaran bebas yang dimulai oleh kondisi apapun pada umumnya membentuk superposisi dua getaran ragam normal (*normal mode vibration*). Namun, getaran harmonik paksa akan terjadi pada frekuensi eksitasi dan amplitudo kedua koordinat akan menuju ke suatu maksimum pada kedua frekuensi naturalnya.

Sistem dengan multi derajat kebebasan adalah sistem dengan derajat kebebasan yang banyak. Sistem dengan distribusi massa yang kontinyu,

ti beam atau batang mempunyai jumlah derajat kebebasan yang k. Untuk sistem dengan derajat kebebasan yang banyak, dalam



beberapa hal, gerakan-gerakan antara koordinatnya dapat harmonis. Bentuk gerakan ini disebut mode utama pada getaran.

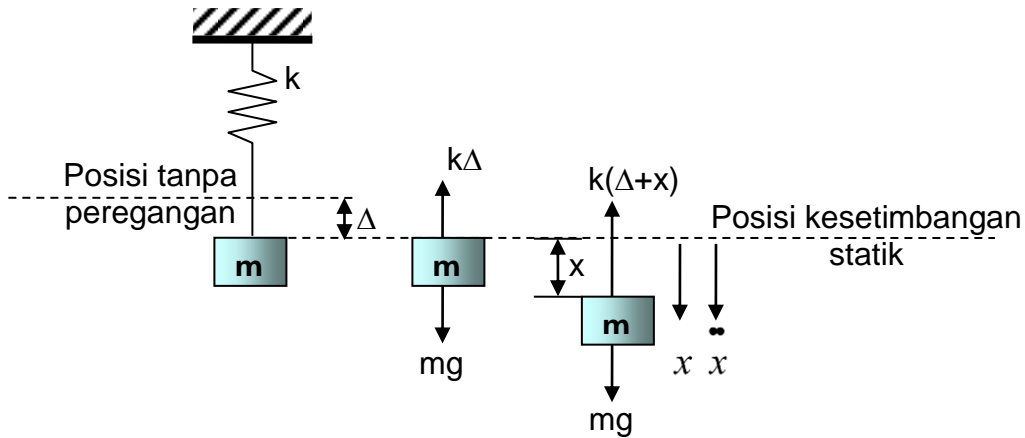
Pada umumnya struktur berkesinambungan mempunyai jumlah derajat kebebasan tak terhingga. Namun dengan proses idealisasi atau seleksi sebuah model matematis yang tepat dapat mereduksi jumlah derajat kebebasan menjadi suatu jumlah diskrit dan untuk beberapa keadaan dapat menjadi berderajat kebebasan tunggal. Ini dilakukan agar persoalan getaran dapat menjadi lebih sederhana untuk dianalisis.

2. Persamaan Differensial Gerak (PDG)

Untuk memperoleh frekuensi pribadi, maka terlebih dahulu menentukan persamaan differensial gerak suatu sistem. Persamaan differensial yang akan diturunkan adalah model sistem derajat kebebasan satu, dua, dan tiga seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.14, 2.15 dan 2.16

Untuk kasus pada gambar (2.13a).Diagram benda bebasnya adalah :





Gambar 2.14: Diagram benda bebas untuk sistem getaran 1 derajat kebebasan.

Dengan memberikan perpindahan awal x kemudian dilepaskan maka sistem bergetar bebas. Dari diagram benda bebas di atas dan Hukum II Newton, diperoleh persamaan differensial geraknya adalah :

$$\sum F = m \cdot a \Rightarrow m \cdot a = \sum F$$

$$m\ddot{x} = mg - k(\Delta + x) \quad mg = k\Delta$$

$$m\ddot{x} + kx = 0$$

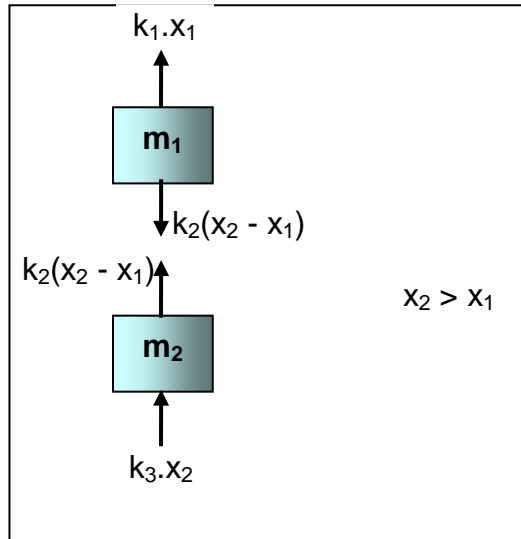
$$\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0 \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

Dari persamaan (2.13) diperoleh frekuensi pribadi yaitu :

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

Untuk kasus pada gambar (2.13b). Diagram benda bebasnya adalah





Gambar 2.15: Diagram benda bebas untuk sistem getaran 2 derajat kebebasan.

Pada gambar tersebut, diasumsikan x_2 lebih besar dari x_1 , sehingga pegas k_2 , mengalami tarikan, dengan gaya tarik sebesar : $k_2(x_2 - x_1)$.

Dari Hukum II Newton dan diagram benda bebas, maka diperoleh persamaan differensial geraknya yaitu :

$$m \cdot a = \sum F \Rightarrow m_1 \ddot{x}_1 = -k_1 x_1 + k_2(x_2 - x_1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -k_2(x_2 - x_1) - k_3 x_2 \dots\dots\dots(2.15)$$

Atau dapat ditulis dalam bentuk :

$$\ddot{x}_1 + \left(\frac{k_1 + k_2}{m_1}\right) x_1 - \frac{k_2}{m_1} x_2 = 0$$

$$\ddot{x}_1 - \frac{k_2}{m_2} x_1 + \left(\frac{k_2 + k_3}{m_2}\right) x_2 = 0 \dots\dots\dots(2.16)$$

ka penyelesaiannya dikembalikan kepada bentuk yang sama pada maan penurunan tingkat dua, maka bentuk penyelesaiannya adalah :



$$\begin{aligned} x_1 &= A_1 \sin(\omega t + \phi) \\ x_2 &= A_2 \sin(\omega t + \phi) \end{aligned} \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana A_1 , A_2 adalah amplitudo, ϕ adalah fasa, dan ω adalah frekuensi sudut yang akan ditentukan terlebih dahulu.

Substitusi persamaan (2.17) dan turunan keduanya ke persamaan (2.16), maka diperoleh :

$$\begin{aligned} \left[\left(\frac{k_1+k_2}{m_1} - \omega^2 \right) A_1 - \frac{k_2}{m_1} A_2 \right] \sin(\omega t + \phi) &= 0 \\ \left[-\frac{k_2}{m_2} A_1 + \left(\frac{k_2+k_3}{m_2} - \omega^2 \right) A_2 \right] \sin(\omega t + \phi) &= 0 \end{aligned} \dots\dots\dots(2.18)$$

Karena penyelesaiannya bergantung pada t untuk semua nilai, maka syarat penyelesaiannya secara umum adalah :

$$\begin{aligned} \left[\left(\frac{k_1+k_2}{m_1} - \omega^2 \right) A_1 - \frac{k_2}{m_1} A_2 \right] &= 0 \\ -\frac{k_2}{m_2} A_1 + \left(\frac{k_2+k_3}{m_2} - \omega^2 \right) A_2 &= 0 \end{aligned} \dots\dots\dots(2.19)$$

Persamaan di atas dikenal sebagai persamaan amplitudo, karena akan ditentukan amplitudo A_1 , dan A_2 , jika frekuensi ditentukan lebih dahulu. Dengan menghilangkan kondisi trivial $A_1 = 0 = A_2$, maka persamaan (2.19) dapat ditentukan jika determinan dari amplitudo sama dengan nol, sehingga :

$$\begin{vmatrix} \left(\frac{k_1+k_2}{m_1} - \omega^2 \right) & \left(-\frac{k_2}{m_1} \right) \\ \left(-\frac{k_2}{m_2} \right) & \left(\frac{k_2+k_3}{m_2} - \omega^2 \right) \end{vmatrix} = 0 \dots\dots\dots(2.20)$$



Dengan menghitung determinannya diperoleh :

$$\left(\frac{k_1+k_2}{m_1}-\omega^2\right)\left(\frac{k_2+k_3}{m_2}-\omega^2\right)-\left(-\frac{k_2}{m_1}\right)\left(-\frac{k_2}{m_2}\right)=0$$

$$\omega^4-\left(\frac{k_1+k_2}{m_1}+\frac{k_2+k_3}{m_2}\right)\omega^2+\left(\frac{k_1k_2+k_1k_3+k_2k_3}{m_1m_2}\right)=0 \quad \dots\dots\dots(2.21)$$

Persamaan di atas disebut persamaan karakteristik, yang memiliki akar bilangan karakteristik ω^2 . Untuk kasus getaran, biasanya tergantung pada persamaan frekuensi.

Agar diperoleh pengertian yang jelas terhadap penyelesaian di atas, persoalan dibuat lebih sederhana dengan mengambil $k_1 = k_2 = k_3 = k$, dan $m_1 = m_2 = m$, sehingga persamaan (2.21) menjadi :

$$\omega^4-4\frac{k}{m}\omega^2+3\left(\frac{k}{m}\right)^2=0 \quad \dots\dots\dots(2.22)$$

Solusi persamaan (2.22) menghasilkan frekuensi pribadi dari sistem :

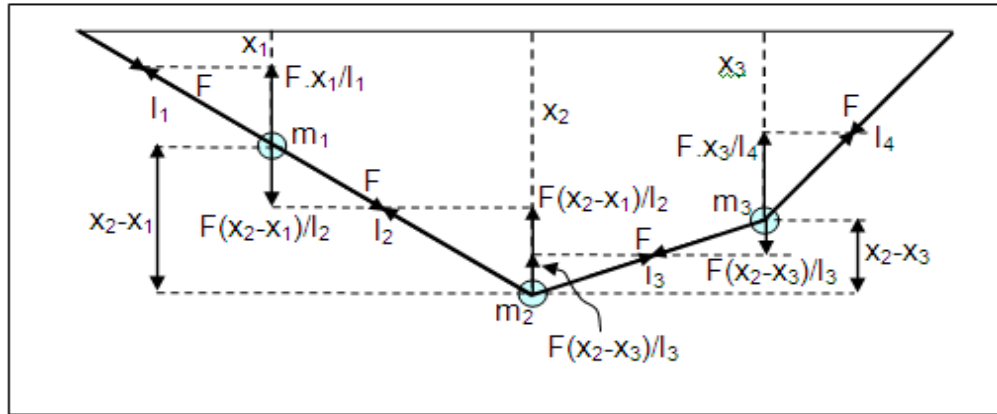
$$\omega_1^2=\frac{k}{m} \Rightarrow \omega_1=\sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\omega_2^2=\frac{3k}{m} \Rightarrow \omega_2=\sqrt{\frac{3k}{m}} \quad \dots\dots\dots(2.23)$$

Untuk kasus pada gambar (2.13c).

Diagram benda bebasnya adalah :





Gambar 2.16: Diagram Benda Bebas Untuk Sistem Getaran 3 Derajat Kebebasan

Pada gambar (2.16) tersebut, diasumsikan bahwa :

- Perpindahan-perpindahan dinamis adalah kecil sehingga tegangan F dalam tali tidak berubah secara berarti.
- Panjang elemen $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l$.
- Massa $m_1 = m$; $m_2 = 3m$; $m_3 = 2m$.

Dari Hukum II Newton dan diagram benda bebas, maka diperoleh persamaan differensial geraknya yaitu :

$$\sum F = m \cdot a \Rightarrow m \cdot a = \sum F$$

$$m_1 \ddot{x}_1 = -F \frac{x_1}{l_1} + F \left(\frac{x_2 - x_1}{l_2} \right)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -F \left(\frac{x_2 - x_1}{l_2} \right) - F \left(\frac{x_2 - x_3}{l_3} \right)$$

$$F \left(\frac{x_2 - x_3}{l_3} \right) - F \frac{x_3}{l_4} \dots\dots\dots(2.24)$$



Koefisien-koefisien $\frac{F}{l_1}$, $\frac{F}{l_2}$, $\frac{F}{l_3}$ dan $\frac{F}{l_4}$ dianggap sebagai konstanta pegas ekivalen untuk suatu sistem yang terdiri dari serangkaian pegas k_1 , k_2 , k_3 , dan k_4 yang disusun secara bergantian dengan massa-massa tersebut.

Persamaan (2.24) di atas dapat ditulis dalam bentuk matriks :

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{F}{l_1} + \frac{F}{l_2}\right) & -\frac{F}{l_2} & 0 \\ -\frac{F}{l_2} & \left(\frac{F}{l_2} + \frac{F}{l_3}\right) & -\frac{F}{l_3} \\ 0 & -\frac{F}{l_3} & \left(\frac{F}{l_3} + \frac{F}{l_4}\right) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.25)$$

Pemecahan persamaan harmonik dan turunan keduanya dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{Bmatrix} \sin(\omega t + \phi) \text{ dan } \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} = -\omega^2 \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{Bmatrix} \sin(\omega t + \phi) \quad \dots (2.26)$$

Substitusi persamaan (2.26) ke persamaan (2.25), serta asumsi nilai panjang dan massa yang ditentukan, maka diperoleh persamaan amplitudo sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{2F}{l_1} - m\omega^2\right) & -\frac{F}{l_1} & 0 \\ -\frac{F}{l_1} & \left(\frac{2F}{l_1} - 3m\omega^2\right) & -\frac{F}{l_1} \\ 0 & -\frac{F}{l_1} & \left(\frac{2F}{l_1} - 2m\omega^2\right) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(2.27)$$

Jika persamaan (2.27) dikalikan dengan $-\frac{l}{F}$ dan menetapkan $\frac{ml}{F}\omega^2 =$

ka :



$$\begin{bmatrix} (\xi-2) & 1 & 0 \\ 1 & (3\xi-2) & 1 \\ 0 & 1 & (2\xi-2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.28)$$

Persamaan (2.28) menggambarkan faktor frekuensi langsung. Untuk yang lain dari kasus trivial dari nilai-nilai A sama dengan nol, sehingga persamaan (2.29) menjadi :

$$\begin{bmatrix} (\xi-2) & 1 & 0 \\ 1 & (3\xi-2) & 1 \\ 0 & 1 & (2\xi-2) \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.29)$$

Jika persamaan (2.29) diselesaikan, maka diperoleh persamaan karakteristik dan solusinya sebagai berikut :

$$6\xi^3 - 22\xi^2 + 21\xi - 4 = 0$$

$$\xi_1 = 0.2528; \quad \xi_2 = 1.1809; \quad \xi_3 = 2,2329 \dots\dots\dots(2.30)$$

Nilai-nilai dari persamaan (2.) disubsitusi kepersamaan $\frac{ml}{F} \omega^2 = \xi$, maka diperoleh frekuensi pribadi yaitu :

$$\omega_1^2 = 0,2528 \frac{F}{ml} \Rightarrow \omega_1 = \sqrt{0,2528 \frac{F}{ml}}$$

$$\omega_2^2 = 1,1809 \frac{F}{ml} \Rightarrow \omega_2 = \sqrt{1,1809 \frac{F}{ml}}$$

$$2,2329 \frac{F}{ml} \Rightarrow \omega_3 = \sqrt{2,2329 \frac{F}{ml}} \dots\dots\dots(2.31)$$



C. Kerangka Pemikiran

Keunggulan baja adalah mudah dibentuk dan memiliki sifat-sifat seperti kekuatan tarik, ketangguhan, keuletan, kekerasan, elastisitas, plastisitas dan dinamis . Selain itu baja mudah didapatkan di pasaran dalam bentuk plat, lembaran, pipa, batang, dan profil serta harganya relatif murah. Dari beberapa sifat baja tersebut, kekerasan dan ketangguhan merupakan sifat yang sangat penting dipertimbangkan dalam perencanaan konstruksi mesin khususnya pada bagian komponen yang meluncur atau bergesekan satu sama lainnya, terutama apabila pada saat yang bersamaan komponen atau bahan tersebut sekaligus diharuskan menahan beban. Dengan demikian maka dibutuhkan selain bagian permukaan komponen yang sangat keras agar tahan terhadap gesekan, juga harus dipertahankan pada bagian inti tetap liat atau ulet, sehingga tangguh terhadap beban terutama pada pembebanan yang berulang atau pembebanan dinamis.

Suhu pengerasan suhu austenisasi atau suhu rekristalisasi suatu baja, besarnya ditentukan berdasarkan pada presentasi kandungan karbon. Pedoman untuk menentukan suhu pengerasan ini dapat menggunakan beberapa cara seperti (1) diagram besi-besi karbida ($Fe-Fe_3C$) untuk baja karbon (gambar. 2.2), suhu pengerasan berada pada $30^{\circ}C-50^{\circ}C$ di atas suhu (gambar. 2.2), suhu pengerasan berada pada $30^{\circ}C-50^{\circ}C$ di atas suhu yang ditunjukkan pada bagian yang diarsir), (2) standar perlakuan panas bahan (seperti standar AISI) dan (3) 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*).

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 di keraskan. Kotak kemudian ditutup rapat untuk menghindari udara dari luar dan kemudian dipanaskan $750\text{-}950^\circ\text{C}$, 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 $750\text{-}950^\circ\text{C}$, kemudian dihaluskan dengan jalan pengerasan kedua atau di*quenching*.

Sifat-sifat tersebut mutlak dibutuhkan, mengingat kondisi kerja dari komponen pada operasinya sering mengalami pembebanan, baik beban statis maupun beban dinamis bahkan kadang-kadang mengalami beban kejut yang sangat besar yang mengakibatkan terjadinya perpatahan. Kebanyakan patahan lelah yang terjadi disebabkan oleh tegangan berulang, dan juga dijumpai pada tegangan kurang dari sepertiga kekuatan tarik statik pada bahan struktur tanpa konsentrasi tegangan. Dalam keadaan dimana

tan tegangan diperhitungkan, mungkin bahan akan putus pada n yang lebih rendah. Jadi kelelahan memegang peranan utama



dalam putusnya bahan secara mendadak pada penggunaan suatu struktur atau komponen.

Kekerasan (*hardness*) adalah kemampuan bahan untuk tahan terhadap penggoresan, pengikisan, keausan, indentasi, penetrasi dan mampu menahan beban sampai pada terjadinya deformasi plastis. Pengujian kekerasan bertujuan untuk mengevaluasi perlakuan panas, dan mendeteksi pengerasan atau pelunakan akibat *overheating*, dekarburisasi ataupun pengerasan permukaan.

Metode pengukuran kekerasan, yaitu dilakukan dengan cara material diindentasi menggunakan indentor pada permukaan benda uji dengan beban tertentu kemudian bekas penekanan yang terbentuk diukur. Indentor biasanya terbuat dari baja yang dikeraskan, tungsten karbida dan intan yang berbentuk piramid ber alas bujur sangkar dengan sudut puncak antara dua sisi yang berhadapan 136° .

