3100098009940

TUGAS AKHIR
NA 1701

ANALISA STATISTIK MENGENAI KORELASI KEKUATAN IMPACT DAN FATIGUE SUATU MATERIAL DENGAN PARAMETER TENSILE

RSke
620.112
Pra
a-1
1997

PERPUSTAKAAN
I T S
Tgl. Terima 25-Nov-97
Terima Dari H
No. Agenda Prp 7088

Oleh :

HARMAN PRASONGKO

NRP. 4193 100 030

JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA

1997

JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN ITS

SURAT KEPUTUSAN TUGAS AKHIR (NA 1701)
No. : 46 /PT12.FTK2/M/1997

Nama Mahasiswa	:	Harman Prasongko
Nomor Pokok	:	4193100030
Tanggal diberikan tugas	:	14. Maret. 1997
Tanggal selesai tugas	:	26. Juli. 1997
Dosen Pembimbing	:	1. Ir. Soeweify, M.Eng
		2.

Uraian / judul tugas akhir yang diberikan :

#ANALISA STATISTIK MENGENAI KORELASI KEKUATAN IMPACT DAN FATIGUE SUATU MATERIAL-DENGAN PARAMETER TENSILE#

sOn

Surabaya, 31 Maret 1997
Jurusan Teknik Perkapalan FTK-ITS
Ketua,

DEPARTEMEN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN

Ir. Koestowo Sastro Wiyono
NIP. 130 687 430.

Tembusan :
1. Yth. Dekan FTK-ITS.
2. Yth. Dosen Pembimbing.
3. Arsip.

PENGESAHAN

Surabaya, Oktober 1997

Menyetujui :

Dosen Pembimbing Tugas Akhir

Ir. Soeweify, M.Eng.

NIP. 130 368 597

ABSTRAK

MILIK PERPUSTAKAAN

ABSTRAK

Pengujian fatigue *memiliki beberapa kendala yakni keakuratan hasil pengujian, jumlah material uji yang cukup banyak, waktu pengujian yang lama, alat uji yang terbatas jumlahnya serta biaya pengujian yang mahal. Dengan demikian, diperlukan metode yang lebih mudah dan praktis untuk mengetahui sifat lelah (*fatigue*) suatu material.*

Sejauh ini belum diperoleh hubungan yang menunjukkan kekuatan impact *dan* fatigue *suatu material, sehingga diperlukan analisa untuk menentukan korelasinya. Dengan menggunakan statistika data dan informasi dari hasil pengujian* impact *dan* fatigue *didapat model prediksi dan diagram skematik yang menunjukkan korelasi kedua hal tersebut.*

Analisa korelasi dengan Regresi Linier Sederhana (Bivariate) dan metode kuadrat terkecil biasa (OLS), menunjukkan hubungan tensile *dengan* fatigue *berkorelasi positif dan* tensile *dengan* impact *berkorelasi negatif.*

Korelasi impact *dan* fatigue *dirumuskan secara matematis dan ditunjukkan dengan diagram tumpang-tindih (*overlay*) berdasarkan harga* tensile. *Untuk dua atau lebih material dengan* impact *yang lebih rendah cenderung memiliki* fatigue *yang lebih tinggi.*

KATA PENGANTAR

KATA PENGANTAR

Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, segala puji bagi Mu yang telah memberikan rahmat dan hidayah serta kekuatan fisik maupun mental, sehingga mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini sesuai yang diharapkan.

Tugas Akhir dengan judul **"ANALISA STATISTIK MENGENAI KORELASI KEKUATAN IMPACT DAN FATIGUE SUATU MATERIAL DENGAN PARAMETER TENSILE"** ini disusun sebagai salah satu persyaratan utama kelulusan studi di Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dengan gelar Sarjana Teknik Perkapalan. Tugas Akhir ini merupakan rangkuman dari perkuliahan terutama yang menyangkut permasalahan sifat mekanis dan penganalisaan data hasil pengujian material. Diharapkan dengan penekanan pembahasan pada bidang ilmu bahan serta kelelahan dan kepecahan mampu memberikan alternatif baru dalam permasalahan sifat material utamanya kekuatan impact dan fatigue yang akhirnya dapat memberikan sumbangan positif bagi perkembangan bidang rekayasa struktur.

Dengan keterbatasan yang ada pada Tugas Akhir ini maka tidak menutup kemungkinan dari pembahasan yang lebih mendalam, yang dapat memberikan inspirasi dan diskusi mengenai permasalahan yang

dibahas melalui sudut pandang lain, untuk kesempurnaan Tugas Akhir ini serta sumbangan bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Akhirnya penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah membantu Tugas Akhir ini, diantaranya :

- Prof. Ir. Soegiono selaku Rektor Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Bapak Digul Siswanto, MSc. selaku Dekan, beserta staf pengajar Fakultas Teknologi Kelautan ITS.
- Ir. Koestowo SW. dan Ir. Andjar Suharto selaku Ketua dan Sekretaris Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan ITS.
- Ir. Murdijanto, M.Eng. selaku Dosen Wali yang telah membantu selama kuliah.
- Ir. Soeweify, M.Eng. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan ide dan dukungan dalam Tugas Akhir ini.
- Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D. yang telah mempertajam kesignifikansian Tugas Akhir ini.
- Kepala dan seluruh teknisi Laboratorium Konstruksi & Kekuatan serta Laboratorium Teknologi Mekanik & CNC, Fakultas Teknologi Kelautan ITS yang telah membantu pengujian.
- Ir. Samudro, M.Eng. dari Direktorat Pengkajian Ilmu Kelautan BPPT dan Ir. Achmad Djuhairi, M.Eng. dari Divisi General Engineering PT. PAL INDONESIA yang telah memberikan data, informasi, dan material.
- Semua Guruku yang telah memberikan ilmunya dengan tulus ikhlas.

- Kedua Orang Tuaku Suharso, Kakakku Luki Harmawati serta seluruh handai-taulan yang telah memberikan dorongan dan kekuatan yang tidak ternilai harganya baik moril maupun materiil.
- Alfiyatussholichah dari Jurusan Statistik, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam ITS yang telah membantu analisa statistik.
- Angkatan P-33 Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan ITS.
- Teman-temanku belajar dan bermain yang tidak dapat disebutkan satu persatu.
- dan pihak-pihak lain yang telah membantu Tugas Akhir ini.

Surabaya, Oktober 1997

Penulis

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI

Lembar Judul

Surat Keputusan Tugas Akhir

Lembar Pengesahan

Abstrak

Kata Pengantar i

Daftar Isi iv

Daftar Tabel vii

Daftar Gambar viii

Daftar Notasi x

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Umum 1

1.2. Tujuan 3

1.3. Batasan Masalah 4

1.4. Metodologi 6

BAB II TEORI *IMPACT*

2.1. Pendahuluan 8

2.2. Lingkup dan Penggunaan 13

2.3. Pengujian *Impact*

2.3.1. Prinsip Pengujian 19

2.3.2. Uji *Impact* Batang-Takik (*Notched-Bar*) 22

2.3.3. Peralatan 28

2.3.4. Spesimen 33

2.3.5. Prosedur 34

2.3.6. Pengamatan 38

2.3.7. Variabel Yang Mempengaruhi 42

BAB III TINJAUAN *FATIGUE*

3.1. Pendahuluan 49

3.2. Siklus Tegangan (*Stress Cycle*) 51

3.3. Kurva *S-N* 53

3.4. Sifat-sifat Statistik Kelelahan 56

3.5. Lingkup dan Pemakaian 61

3.6. Hubungan Sifat Lelah 64

BAB IV *TENSILE* DAN BAJA KARBON

4.1. Kekuatan Tarik (*Tensile Strength*) 66

4.2. Kurva Tegangan-Regangan Rekayasa 68

4.3. Klasifikasi Baja Karbon 70

4.4. Sifat Baja Karbon 71

4.5. Sifat Tarik Baja 74

BAB V ANALISA DAN PEMBAHASAN

5.1. Metode 79

5.2. Interpretasi

5.2.1. Korelasi *Tensile* dengan *Fatigue* 82

5.2.2. Korelasi *Tensile* dengan *Impact* 86

5.3. Verifikasi

5.3.1. Verifikasi *Tensile* dengan *Fatigue* 88

5.3.2. Verifikasi *Tensile* dengan *Impact* 90

5.4. Diagram Skematik 91

5.5. Korelasi *Impact* dengan *Fatigue* 92

BAB VI PENUTUP

6.1. Kesimpulan 95

6.2. Saran 96

Daftar Pustaka 98

Lampiran A : Data dan Pengujian 101

Lampiran B : *Running-out* SPSS 129

Lampiran C : Tabel 157

DAFTAR TABEL

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Efek Sudut Takik Terhadap Energi Impact Pada Mild Steel.

Tabel 2.2. Efek Radius 45^0 Takik V Terhadap Energi Impact Pada 0.65 Persen Baja Karbon.

Tabel 4.1. Klasifikasi Baja Karbon.

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. (a) Tegangan Elastis di Ujung Takik Pada Pelat Tipis (Plane Stress); (b) Tegangan Elastis di Ujung Takik Pada Plane Strain; Distribusi σ_z Terhadap z Pada x = 0 (Plane Strain); (d) Distribusi Tegangan Selama Lokal Yield (Plane Strain).

Gambar 2.2. Kurva Suhu-Peralihan Untuk Dua Jenis Baja (Memperlihatkan Ketergantungan Hasil Pada Suhu Kamar).

Gambar 2.3. Diagram Mesin Impact Charpy atau Izod.

Gambar 2.4. Plot Beberapa Fungsi Impact.

Gambar 2.5. Spesimen Uji Charpy (ASTM E 23).

Gambar 2.6. Spesimen Uji Izod (ASTM E 23).

Gambar 2.7. Peletakan Spesimen.

Gambar 2.8. Perubahan Temperatur Pada Spesimen Baja Saat Dipindah Dari Larutan -40^{0}C.

Gambar 2.9. Skematik Ayunan Pendulum.

Gambar 2.10. Diagram Energi Impact Material Akibat Perubahan Temperatur.

Gambar 3.1. Siklus Tegangan Lelah, (a) Tegangan Balik; Tegangan Berulang; (c) Siklus Tegangan Irregular.

Gambar 3.2. Kurva Kelelahan Material Ferrous dan Nonferrous.

Gambar 3.3. Penggambaran Data Kelelahan Berdasarkan Kemungkinan

(*Probability*).

Gambar 3.4. Kumpulan Kurva-kurva *S-N*, Masing-masing Menggunakan 10 Buah Spesimen Baja Berasal Dari Batang Yang Sama.

Gambar 4.1. Kurva Tegangan-Regangan (*Stress-Strain*) Rekayasa.

Gambar 4.2. Pengaruh Karbon Pada Sifat Tarik Baja Karbon.

Gambar 4.3. Diagram Tegangan-Regangan (*Stress-Strain Diagrams*) Untuk Bermacam Baja.

Gambar 4.4. Sifat-sifat Tarik Perlit dan Speroidit Pada Baja Eutektoid.

Gambar 5.1. Kurva Distribusi *t* Student.

DAFTAR NOTASI

DAFTAR NOTASI

a - Tinggi pendulum sebelum berayun

A - Perbandingan amplitude (*amplitude ratio*)

A_0 - Luas penampang lintang awal spesimen

α - Sudut jatuh pendulum

α - Tingkat keberartian (*level of significant*)

α_i - Konstanta (*intersep*)

b - Tinggi pendulum setelah berayun

B - Tebal pelat

β - Sudut jatuh pendulum

β_i - Koefisien kemiringan (*slope coefficient*)

C - Konstanta empiris persamaan Basquin

Cv - Energi yang diperlukan untuk mematahkan spesimen uji Charpy

df - Derajat kebebasan (*degree of freedom*)

e - Kesalahan pengganggu (*error terms*)

e - Regangan konvensional (*conventional strain*)

F - Fatigue

F - Uji distribusi *F*

g - Percepatan gravitasi 9.806 m/s^2

h - Tinggi jatuhnya pendulum

H_0 - Hipotesa null

H_1 - Hipotesa alternatif

i - Bilangan cacah

I - Impact

$K\sigma$ - Konsentrasi tegangan plastis maksimum

m - Massa pendulum

n, N - Ukuran sampel, jumlah data

N - Jumlah siklus hingga terjadi kegagalan (*failure*)

p - Konstanta empiris persamaan Basquin

P - Kemungkinan kegagalan (*probability to failure*)

P_{maks} - Beban tarik maksimum

r - Panjang lengan pendulum

R - Koefisien korelasi Pearson

R - Perbandingan tegangan (*stress ratio*)

r_y - Panjang daerah plastis (*plastic zone*)

R^2 - Koefisien determinasi

σ - Standar deviasi

σ_a - Tegangan amplitude atau bolak-balik, tegangan beragam

σ_m - Tegangan rata-rata, tegangan tetap

σ_{maks} - Tegangan maksimum

σ_{min} - Tegangan minimum

σ_{nom} - Tegangan nominal

σ_o - Tegangan awal

σ_r - Jangkauan tegangan

σ_u - Tegangan tarik maksimum (*ultimate tensile stress*)

σ_x - Tegangan arah sumbu x

σ_y - Tegangan arah sumbu y

σ_z - Tegangan arah sumbu y

σ^2 - Varians

t - Uji distribusi *t* Student

T - Tensile

UTS - Kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*)

v - Kecepatan tangensial impact

W - Berat pendulum

ω - Sudut antara sisi takik

x - Sumbu x

X - Variabel bebas (independent), variabel penduga (penaksir)

y - Sumbu y

Y - Variabel tak bebas (dependent), variabel respons

$\hat{Y}$ - Variabel taksiran (estimasi)

z - Sumbu z

BAB I

PENDAHULUAN

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. UMUM

Dalam menyeleksi material yang utama diperhatikan oleh seorang rekayasawan adalah membandingkan dan mencocokkan sifat-sifat material sesuai keperluan komponen yang digunakan dalam perencanaan konstruksi suatu struktur. Untuk mengetahui kondisi pembebanan dan lingkungan kerja dimana komponen beroperasi, maka rekayasawan harus selektif dalam menentukan material berdasarkan data pengujian atau sertifikat inspeksi yang disertakan disetiap material. Karena itu mereka harus mengetahui sifat yang akan dipertimbangkan, bagaimana menentukan, dan batasan yang harus diambil untuk aplikasinya. Dengan mengenal prosedur pengujian, kemampuan dan batasan material maka rekayasawan dapat menentukan apakah spesifikasi material dapat langsung diterapkan dalam konstruksi suatu struktur.

Pada konstruksi yang lebih banyak menggunakan material baja seperti halnya pada konstruksi kapal dan bangunan lepas pantai, sering terjadi kegagalan struktur yang disebabkan adanya cacat berupa retak akibat pembebanan yang dinamis. Kelemahan dari penggunaan logam baja sebagai material dasar dari konstruksi adalah terjadinya penggetasan. Material getas akan mengalami "patah getas" (*brittle fracture*) yaitu kegagalan struktur secara mendadak akibat mendapat beban berulang

yang masih berada dibawah beban kerja yang direncanakan atau berada dibawah titik luluh (*yield point*) material, dan beban kejut yang menumbuk material dengan cepat dan seketika (*sudden impact*). Apabila hal ini terjadi, timbul kerugian ekonomis akibat menurunnya umur kerja struktur dan berkurangnya keselamatan dalam penggunaan struktur.

Kemampuan beroperasi pada konstruksi adalah kriteria utama dalam memilih material yang didasarkan pada sifat rekayasa engineering material, yang secara umum terdiri dari sifat fisik, sifat mekanik dan sifat atau komposisi kimia. Sifat mekanik dibedakan menjadi dua, yaitu sifat statis yang disebabkan oleh pembebanan statis meliputi; kuat tarik (*tensile*) yang mencakup batas luluh (*yield*), batas maksimum (*ultimate*), kemuluran (*elongation*) dan pertambahan luas (*reduction of area*); kuat tekan (*compression*); kuat geser (*shear*); kuat lentur (*bending*); kuat puntir (*torsion*); dan kekerasan (*hardness*) material. Sifat dinamis yang disebabkan oleh pembebanan dinamis meliputi; kuat tumbuk (*impact*), kuat lelah (*fatigue*) atau ketahanan lelah (*endurance*) material. Semuanya diatas perlu dilakukan pengujian untuk mengetahui sifat mekanik material yang akan dipakai dalam konstruksi suatu struktur sesuai dengan beban operasi dan lingkungan kerjanya.

Pada awal mulanya, penentuan sifat getas dan ulet material didasarkan dari hasil pengujian *impact* yang meliputi uji *drop-weight*, *Charpy* dan *Izod*, yang memberikan petunjuk patah getas (*brittle fracture*) dan patah ulet (*ductile fracture*) akibat beban mendadak yang bekerja

pada material. Setelah berkembang teori kelelahan dan kepecahan (*fracture mechanic*), diketahui bahwa penggetasan pada material yang mengalami patah getas disebabkan pula oleh pembebanan berulang yang masih dibawah titik luluh material.

Pengujian lelah (*fatigue*) sampai sekarang masih memiliki beberapa kendala, diantaranya hasil pengujian yang masih belum menunjukkan keakuratan, keterbatasan alat dan mesin yang tergolong sedikit jumlahnya, spesimen uji yang banyak jumlahnya didukung dengan hasil pengujian statis, waktu yang cukup lama dan biaya yang mahal. Sedang pengujian *impact* masih relatif sederhana dibanding pengujian *fatigue*.

Pada saat ini diperlukan metode yang lebih mudah dan praktis untuk mengetahui sifat lelah (*fatigue*) material, sehingga dapat meningkatkan efektifitas dan efesiensi kerja. Tuntutan tersebut mendasari pemikiran penggunaan analisa statistik dari hasil data dan informasi pengujian material, sebagai salah satu alternatif yang menunjukkan hubungan kekuatan *impact* dan *fatigue* suatu material. Diharapkan dengan korelasi dan diagram skematik dapat diperkirakan sifat lelah material dari harga *impact* yang telah diperoleh.

1.2. TUJUAN

Tujuan penulisan ini adalah memberikan tinjauan secara akademis mengenai korelasi kekuatan *impact* dan *fatigue* suatu material. Tinjauan dilakukan dengan menganalisa data sekunder *fatigue* dan *impact* material

dengan menggunakan prinsip-prinsip statistik dan sebagai verifikasi dilakukan pengujian berdasarkan teori kelakuan dan kekuatan material. Analisa data disusun menjadi diagram skematik yang menunjukkan korelasi kedua hal tersebut.

Hasil analisa tersebut diharapkan dapat memberikan masukan untuk mengetahui sifat lelah suatu material berdasarkan harga *impact* yang dihasilkan. Secara ringkas dapat dikatakan, dengan cukup melakukan pengujian *impact* dapat diperkirakan sifat lelah suatu material.

Manfaat yang diperoleh adalah membantu dalam desain struktur yang dikenal dengan *safe-life* dan *fail-safe* desain, serta meningkatkan efesiensi waktu, tenaga dan biaya dengan cukup melakukan satu pengujian.

1.3. BATASAN MASALAH

Dalam Tugas Akhir mengenai korelasi kekuatan *impact* dan *fatigue* ini batasan-batasan analisa data dan material, berikut dianggap berlaku:

1. Karena *impact* dan *fatigue* sama-sama merupakan sifat dinamis yang diperoleh dari pengujian dinamis, maka disetiap data atau sertifikat material hanya diwakili oleh salah satu dari kedua harga tersebut. Hal ini menuntut adanya parameter lain yang membantu dalam menghubungkan kekuatan *impact* dan *fatigue* material.
2. Harga *tensile* dipilih sebagai parameter yang menghubungkan kekuatan *impact* dan *fatigue* material, karena kuat tarik adalah sifat

mekanik utama yang umum dipakai dan dijumpai disetiap data atau sertifikat material. Ketergantungan *impact* dan *fatigue* terhadap sifat tarik material telah dijelaskan pada teori kelakuan dan kekuatan mekanik material.

3. Karena keterbatasan data, maka material yang dipakai adalah baja karbon (*carbon steel*) dengan variasi harga *tensile*, dan baja karbon merupakan material yang paling banyak dipakai pada konstruksi kapal, bangunan lepas pantai maupun general engineering.
4. Harga *tensile* adalah parameter yang menyatakan kekuatan tarik (*tensile strength*), atau kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength, UTS*) suatu material, yang dinyatakan dalam bentuk tegangan.
5. Kekuatan *impact* (*impact strength*) adalah besarnya energi yang diserap (*energy absorption*) untuk mematahkan spesimen pada temperatur tertentu.
6. Kekuatan *fatigue* (*fatigue strength*) adalah tegangan maksimum akibat beban berulang yang dapat bekerja dalam jumlah, umur (*life*) dan jenis pembebanan tertentu tanpa menimbulkan kegagalan. Jumlah siklus pembebanan hingga terjadi pengintian (*initiation*) atau Ni dianggap sebagai kegagalan lelah (*fatigue failure*) material.
7. Untuk menyamakan dimensi, maka tegangan dan energi masing-masing dinyatakan dengan satuan Mega-Pascal (MPa) dan Joule (J),

sedang untuk mengubah dari satuan lain (kgf/mm^2, ksi, dan lb-ft) digunakan faktor konversi.

8. Perlakuan pada material, yaitu perlakuan panas (*annealed*, *quenched*, *aged*, *tempered*, *normalized*, *hardened*) dan pengerjaan logam (*drawn*, *formed*, *rolled*, *forged*) diabaikan, karena merupakan proses metalurgi dan produksi yang mempengaruhi struktur mikro serta meningkatkan service performans material.

1.4. METODOLOGI

Untuk mendapatkan hasil analisa yang dapat mendasari pengambilan kesimpulan mengenai korelasi kekuatan *impact* dan *fatigue* suatu material, disusun metodologi sebagai berikut :

1. Studi literatur mengenai teori *tensile*, *impact* dan *fatigue*.
2. Data *tensile*, *impact* dan *fatigue* material.

   Data sifat mekanik material didapat dari data sekunder berbagai sumber; baik dari referens, handbook, jurnal, skripsi/thesis, dan hasil penelitian lain yang mendukung.
3. Analisa data.

   Menyusun data sekunder *tensile*, *impact* dan *fatigue* dengan menggunakan prinsip-prinsip statistik, analisa korelasi dan regresi linier sederhana dengan metode kuadrat terkecil biasa, menjadi model prediksi dan diagram skematik yang menunjukkan hubungan *tensile* dengan *impact* serta *tensile* dengan *fatigue*. Dan

menyimpulkan korelasi *impact* dengan *fatigue* berdasarkan konsep matematis dan diagram tumpang-tindih (*overlay*) dari kedua korelasi sebelumnya dengan parameter *tensile*.

4. Pemeriksaan hasil analisa.

   Sebagai verifikasi dilakukan pengujian *impact* dari beberapa jenis baja karbon yang berbeda kuat tariknya di Laboratorium Konstruksi dan Kekuatan. Sedangkan pengujian *fatigue* diperoleh dari data hasil penelitian Ir. Samudro, M.Eng. (Ilmuwan dan Praktisi), mengingat keterbatasan alat, spesimen, waktu, serta biaya. Dan diamati apakah hasil analisa telah memenuhi kriteria yang diinginkan.

BAB II

TEORI *IMPACT*

BAB II

TEORI *IMPACT*

2.1. PENDAHULUAN

Jenis terpenting dari pembebanan dinamis adalah beban yang bekerja secara mendadak karena tumbukan massa yang bergerak. Pada bagian ini menerangkan beberapa aspek perilaku material yang mengalami beban *impact*. Dimana kecepatan dan energi kinetik yang memukul benda diubah, sehingga terjadi perpindahan energi yang bekerja pada bagian yang menerima pukulan. Mekanika *impact* mempertimbangkan perpindahan energi (*energy transfer*), energi serap (*energy absorption*) dan penghamburan (*dissipation*).

Energi dari suatu pukulan dapat diserap dalam beberapa cara; melalui deformasi elastis, deformasi plastis, efek histeris, aksi gesekan, efek inersia dari anggota atau bagian suatu sistem yang bergerak. Efek beban *impact* sebagai penghasil tegangan tergantung pada besarnya energi yang dikeluarkan penyebab terjadinya deformasi. Dalam menyepakati masalah-masalah yang melibatkan beban *impact*, banyak cara dilakukan dimana beban akan melawan kerja aktual sehingga jenis informasi yang diharapkan dapat tercapai.

Dalam mendesain beberapa jenis struktur dan mesin yang pasti menerima beban *impact*, bertujuan untuk menyediakan penyerapan energi yang mungkin melewati batas elastis dan berpegang pada beberapa jenis

peredam untuk menghamburkannya. Pada struktur semacam ini, daya kelentingan (*resilience*) material merupakan hal yang penting, dan data kelentingan yang didapatkan dari pembebanan statis cukup memadai untuk hal ini.

Kepuasan performans bagian suatu struktur atau mesin, seperti peralatan pukul pengeboran, transmisi dan automotif motor, peralatan jalan kereta api, rel dan bantalan besi penahan, pembatas jalan raya, dan lainnya tergantung pada keuletan bagian tersebut terhadap benturan beban kejut (*shock loading*). Meskipun pendekatan langsung pada masalah telah digunakan uji yang melibatkan beban *impact*, akan tetapi solusi masalah tidaklah mudah. Tanpa keraguan akan hasil pengujian *impact*, mempunyai kontribusi tidak langsung dalam perbaikan desain suatu bagian, tetapi secara keseluruhan pengujian tersebut hanya dibatasi arti untuk menghasilkan data perencanaan awal (*basic design data*).

Pada sebagian besar pengujian untuk menentukan karakteristik energi serap material karena beban *impact*, obyeknya adalah menggunakan energi pukulan yang menyebabkan penjalaran (*rupture*) pada spesimen uji. Hal itu membantu dalam menyelesaikan masalah yang luas dengan melibatkan energi serap elastis dan masalah data tentang kapasitas energi kepecahan yang tepat.

Dalam beberapa percobaan penelitian sifat-sifat material akibat beban *impact*, ditentukan oleh hubungan tegangan-regangan-waktu (*stress-strain-time relations*). Umumnya, penelitian tentang sifat dinamis

menghendaki sangat khusus dan terdapat kesukaran prosedur percobaan yang tidak disesuaikan dengan pengujian normal, meskipun penyimpangan kontribusi telah dibuat agar dimengerti tidak hanya masalah *impact* tetapi mekanika dari regangan plastis dan kepecahan. Perkembangan peralatan pengukuran elektronik, *electric strain gages*, dan *high-speed oscillographs* mempunyai ketepatan menaksir daerah penelitian sampai kelakuan material akibat beban kerja yang sangat cepat.

Dalam beberapa pengujian dibatasi pengukuran regangan atau defleksi akibat beban *impact* yang terjadi, tetapi sebagian besar umumnya dipakai pengujian *impact* yang disebut uji batang-takik (*notched-bar*), kecuali energi yang diperlukan untuk menghasilkan kepecahan telah ditentukan. Dalam pengujian tersebut, salah satu tujuan adalah untuk mencapai ukuran relatif kecenderungan yang memperlihatkan kegetasan dengan penurunan temperatur, khususnya dipengaruhi oleh kahadiran unsur pokok minor dalam komposisi atau struktur partikel sebuah logam.

Untuk berbagai penggunaan, pengetahuan mengenai perilaku makroskopik material memberikan informasi yang memadahi. Tetapi, bila material gagal akibat beberapa kondisi dapat cukup diterangkan dalam batas kelakuan dari mikrostruktur. Untuk mengerti tentang kelakuan logam dalam bentuk batang-takik akibat beban *impact*, menuntut suatu pengetahuan tentang mekanisme kepecahan yang dipengaruhi oleh struktur kristal yang majemuk.

Sifat material yang menyatakan untuk bekerja sampai terjadi kepecahan dikenal dengan "ketegaran" (*toughness*). Ketegaran tergantung dari kekuatan (*strength*) dan keuletan (*ductility*) material serta tidak tergantung dari jenis pembebanan. Suatu kenyataan, jika harga energi yang diserap mempengaruhi kelakuan material, dan perbedaan mengukur keuletan material kemungkinan didapat dari pembebanan *impact* daripada pembebanan statis.

Tidak semua material memberikan respon yang sama dalam variasi kecepatan bila mendapatkan beban, beberapa material menunjukkan apa yang disebut "kepekaan kecepatan" (*velocity sensitivity*) lebih besar daripada yang lain. Salah satu contoh yang menunjukkan perbedaan yang besar dalam pembebanan kecepatan rendah dan kecepatan tinggi adalah gelas biasa, yang akan tembus dengan lubang mulus oleh peluru dengan kecepatan tinggi, namun akan pecah berantakan bila diberi beban terpusat dengan kecepatan yang rendah.

Selain baja karbon rendah (*low carbon steel*) dan baja karbon sedang (*medium carbon steel*), ketegaran relatif dari beberapa seri baja ditentukan oleh *impact* dan pengujian statis pada spesimen tarik tanpa takik, yang terlihat kurang lebih sama, meskipun kerja aktualnya dikehendaki sampai terjadi kepecahan akibat beban *impact* (dimana kecepatan pukul tidak kurang dari harga kritis, seperti keadaan uji *impact* biasa), kemungkinan bekerja 25 persen lebih dari kerja yang dicapai oleh diagram tegangan-regangan statis (*static stress-strain diagram*) umumnya.

Keuletan ditentukan oleh beban *impact* yang tidak lebih besar dari beban statis, dalam masalah ini diambil contoh baja krom-nikel yang mempunyai ketegaran *impact* kurang dari ketegaran statis. Hal itu telah ditegaskan oleh Mann yang didasarkan oleh mesin *impact* pada umumnya, mempunyai korelasi yang baik antara hasil pengujian tarik (tanpa takik) akibat *impact* dengan beban statis, yang diperoleh jika daerah dibawah diagram tegangan-regangan sesungguhnya digunakan untuk menghitung energi kepecahan[1].

Beberapa material, ketegarannya tidak menyimpang terlalu besar melebihi batas kecepatan pukul, tetapi diatas kecepatan kritis (yang berbeda pada tiap material) energi yang diperlukan agar material pecah akan berkurang secara cepat bersamaan dengan bertambahnya kecepatan [Mann; Clark dan Duwez]. Kecepatan kritis ini menjadi penghubung perambatan regangan plastis dan dipengaruhi oleh panjang potongan yang dipakai untuk percobaan beban impact [Clark dan Duwez].

Selain itu, bentuk dari material akan berpengaruh besar dalam kapasitasnya menahan beban *impact*. Pada temperatur kamar, sebuah batang lurus dari logam ulet (*ductile*) yang tidak bertakik tidak akan pecah karena beban *impact*, melainkan bengkok. Agar terjadi kepecahan dalam sekali uji, maka spesimen batang logam ulet dibuat bertakik. Takikan ini menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan yang tinggi, sehingga sebagian besar energi penjalaran diserap dalam daerah yang terlokasi pada spesimen uji dan cenderung menyebabkan jenis kepecahan yang

getas (*brittle*). Kecenderungan dari material ulet untuk bertingkah seperti material getas bila pecah dalam keadaan bertakik disebut sebagai "kepekaan takik" (*notch sensitivity*). Material-material yang secara praktis mempunyai sifat-sifat yang sama dalam uji tarik statis, atau bahkan dalam uji *impact* dalam keadaan tidak bertakik, kadang-kadang menunjukkan perbedaan bila diuji dengan adanya takik. Jadi jelas, bahwa pengujian *impact* tanpa takik dan pengujian batang-takik benar-benar berbeda kategorinya.

Dari ilustrasi diatas, jelaslah bahwa tidak semua material akan memberi respon yang sama dalam pembebanan *impact*.

2.2. LINGKUP DAN PENGGUNAAN

Dalam penelitian sifat material akibat pembebanan dinamis, banyak tujuan dan cara digunakan, dan lebih banyak lagi akan kemungkinan dihasilkannya usaha mempelajari seluk-beluk mekanika deformasi dan kepecahan yang disebabkan oleh beberapa variabel yaitu komposisi, temperatur, kecepatan pembebanan, dan geometri dari spesimen. Dapat diambil tinjauan singkat dari hasil penelitian semacam ini, dalam rangka menerangkan beberapa perilaku material.

Pengujian *impact* yang ideal adalah seluruh energi suatu pukulan menjadi satu yang dihubungkan dengan spesimen uji. Kenyataan ideal ini tidak pernah terjadi; beberapa energi selalu hilang melalui gesekan, deformasi dari penyangga dan pendulum, serta melalui getaran peralatan

mesin uji. Dalam beberapa pengujian, tidak mungkin memperoleh suatu ketepatan ukuran yang akurat dari energi serap spesimen. Selanjutnya, hasil utama yang diperoleh dari pengujian *impact* tergantung banyak pada bentuk spesimen yang digunakan. Hal ini merupakan kenyataan yang menuntut perhatian mengenai standarisasi bagian-bagian jenis uji yang diberikan jika hasil kesepakatan telah diperoleh, dan biasanya menghindarkan persamaan-persamaan langsung hasil pengujian *impact* yang berbeda jenis. Tiap jenis pengujian *impact* memiliki bidang khusus tersendiri untuk digunakan. Dalam hubungan ini, juga dilihat penerapan suatu pengujian yang tidak memaksakan pembatasan material untuk digunakan dalam bagian-bagian yang menjadi subyek *impact*.

ASTM komisi A-3 tentang baja menerangkan bahwa pengujian *impact* baja untuk keperluan produksi mengikuti (ASTM A 370-61T):

- Pengujian *impact* adalah suatu pengujian dinamis dengan menentukan spesimen, mesin atau permukaan dasar dan biasanya bertakik, memukul dan menghancurkan dengan satu ayunan dengan desain alat mesin uji khusus dan energi yang diserap untuk menghancurkan spesimen kemudian diukur.
- Harga energi ditentukan dengan persamaan-persamaan kualitatif pada penentuan spesimen dan tidak dapat dikonversikan dalam bentuk-bentuk energi yang membantu dalam perhitungan desain rekayasa.
- Sifat takikan menunjukkan bahwa pengujian individu dipakai hanya untuk ukuran spesimen, geometri takikan, dan kondisi pengujian yang

terlibat selama berlangsung, dan tidak dapat dipakai untuk ukuran dan kondisi spesimen lain.

- Keperluan *impact* minimum umumnya spesifik hanya pada material yang dicelup (*quenched*) dan ditemper (*tempered*) atau dinormalkan (*normalized*), untuk menentukan spesifikasi produk.

Dalam melakukan pengujian *impact*, beban yang bekerja berupa lenturan (*flexure*), tarik (*tension*), tekan (*compression*), atau puntir (*torsion*). Pembebanan lentur paling banyak dilakukan; pembebanan tarik sedikit dilakukan; pembebanan tekan dan puntir digunakan hanya pada kepentingan khusus. Pukulan *impact* disampaikan melalui jatuhnya pemberat (*dropping weight*), ayunan pendulum (*swinging pendulum*), atau putaran roda (*rotating flywheel*). Beberapa pengujian diciptakan agar terjadi penjalaran (*rupture*) pada spesimen uji dengan satu kali pukul; tanpa memakai pengulangan pukulan. Dalam beberapa pengujian jenis terakhir, pengulangan pukulan dari besaran tetap; yaitu uji penambahan-jatuh (*increment-drop test*) dimana tinggi dari jatuhnya pemberat dinaikkan secara bertahap sampai kepecahan terjadi.

Pengujian *impact* yang paling banyak dipakai di Amerika adalah "Charpy" dan "Izod," keduanya memakai prinsip pendulum. Pengujian tersebut menggunakan spesimen bertakik kecil yang nantinya rusak secara lentur. Pada pengujian Charpy, spesimen disangga dengan batang sederhana (*double-anvil*), sedangkan pada pengujian Izod disangga dengan kantilever (*single-anvil*). Dengan pengujian demikian, energi paling

banyak diserap pada daerah yang berdekatan dengan takikan, dan kegagalan jenis patah getas (*brittle fracture*) akan selalu terjadi. Hal itu menjadi observasi, bahwa pengujian tersebut tidak dikehendaki untuk pembebanan kejut pada operasinya; mereka semata-mata memberi tahanan relatif bagian spesimen logam takik untuk kepecahan akibat pukulan. Hal tersebut telah diketahui bahwa hasil menunjukkan perbedaan kondisi logam yang tidak ditunjukkan oleh pengujian lain. Hasil memperlihatkan kesensitifan variasi dari struktur baja akibat perlakuan panas (*heat-treatment*); akibat perubahan kecil yang penting dalam komposisi yang menyebabkan "kegetasan" (*embrittlement*), demikian juga variasi dalam kandungan sulfur atau phospor; dan akibat variasi campuran elemen-elemen. Selain itu, pengujian tersebut bila dipakai pada spesimen dengan temperatur rendah, mempunyai kegunaan dalam menunjukkan apakah keuletan cukup memadai pada temperatur tesebut. Apabila uji Charpy atau Izod tidak dapat secara langsung memprediksi sifat ulet atau getas baja yang digunakan pada struktur unit yang luas, maka digunakan uji penerimaan atau uji pengidentifikasian untuk membedakan bagian-bagian dari baja yang sama atau untuk memilih antara baja yang berbeda apabila korelasi dengan sifat sesungguhnya telah didapat[2].

Prosedur mengenai uji Charpy dan Izod telah distandarkan (ASTM E 23), dan spesifikasi batas kekuatan *impact* telah dibuat untuk material yang dipergunakan dalam beberapa produk seperti bagian mesin pesawat terbang, gigi transmisi, bagian dari sabuk traktor, daun turbin, beberapa

jenis penempaan (*forging*), dan pipa serta pelat baja untuk temperatur dinas yang rendah. Uji Charpy dan Izod juga digunakan untuk menentukan tahanan *impact* dari material plastik dan pembungkus elektrik (ASTM D 256).

Besi tuang (*cast iron*) tidak selalu dipakai pada bagian yang harus mempunyai tahanan kejut tinggi, dan hasil dari pengujian lentur-statis (*static-flexure*) memberi banyak keterangan yang diperlukan untuk memperkirakan kapasitas energi relatif dari besi tuang. Tetapi, beberapa penyelidikan mengenai tahanan *impact* dari besi tuang telah dihasilkan, dan bermacam prosedur telah dipakai, termasuk pengujian pendulum dengan sekali ayun (*single-blow pendulum*), pengujian penambahan-jatuh (*increment-drop*), dan pengujian ayunan berulang (*repeated-blow*). Metode ayunan berulang serta kedua prosedur pengujian Charpy dan Izod untuk besi tuang telah distandarkan dalam ASTM A 327. Semua metode pengujian tersebut memakai pembebanan lenturan; pengujian *impact* tarik (*impact tension*) besi tuang tidak memberikan hasil yang baik. Spesimen tanpa takik adalah standar, sejak mereka menemukan yang lebih memuaskan dengan spesimen bertakik. Besi tuang tidak sepeka (se-*notch sensitive*) baja; ini disebabkan efek takikan dari lapisan grafit baja tuang, yang tidak bertambah besar dengan efek tambahan dari takikan luar.

Pembebanan *impact* digunakan sebagai pengujian penerimaan beberapa produk logam seperti rel dan poros. American Railway Engineering Association (AREA) mengklaskan untuk baja rel dipakai

pengujian penambahan-jatuh (ASTM A 1) dengan menggunakan mesin tersendiri, detilnya juga dispesifikasikan. Juga untuk poros dipakai pengujian ayunan berulang yang dispesifikasikan dalam ASTM A 383. Pengujian semacam ini mempunyai petunjuk yang menghubungkan performans material pada kondisi dinas.

Pengujian *impact* dengan tarik (*tension*) telah dibuat lebih luas untuk keperluan percobaan. Pengujian ayunan tunggal (*single-blow*) dengan mesin drop-weight atau dengan mesin pendulum yang diubah sesuai spesimen tarik, dan dengan mesin *flywheel*. Pengujian *impact* tarik menghasilkan kelayakan untuk mempelajari perilaku material ulet akibat pembebanan *impact* tanpa kesukaran memperkenalkan pemakaian celah atau takikan, meskipun spesimen tarik bertakik telah dipakai dalam beberapa pengujian. Jenis mesin *flywheel*, mampu menyediakan kecepatan *impact* yang sangat tinggi; penelitian mengenai kecepatan transisi atau kritis telah dihasilkan dengan jenis mesin tersebut [Mann; Clark dan Duwez].

Pengujian menggunakan pemberat yang dijatuhkan sebagai jenis *impact* tekan (*compression impact*) digunakan untuk beberapa material plastik (ASTM D 3029). Pada ketinggian 0.66 meter, massa diatur hingga kelihatan kerusakan yang terjadi 50 persen dari sampel. Pengujian serupa dipakai untuk pipa termoplastik (ASTM D 2444).

Untuk pengujian alat-alat baja (*tool steels*) digunakan pengujian *impact* puntir (*torsion impact*). Pengujian peralatan pertukangan (*carpenter*

test) memiliki beberapa keunggulan [Luerssen dan Greene]. Pengujian memberikan penawaran metode penyelidikan dan pengecekan yang optimum terhadap kondisi perlakuan panas dari produk seperti bagian bor, keran dan peralatan tumbuk.

2.3. PENGUJIAN *IMPACT*

2.3.1. Prinsip Pengujian

Efek ayunan tergantung pada seluruh massa dari bagian yang menerima ayunan sesuai energi dan massa yang memukul benda. Item yang menghendaki standarisasi adalah pondasi, landasan (*anvil*), penyangga (*supports*), spesimen, serta massa pemukul dan kecepatannya.

Bentuk prinsip dari mesin *impact* dengan pendulum ayunan tunggal adalah (1) massa yang bergerak penghasil energi kinetik cukup untuk menimbulkan kepecahan pada spesimen (2) landasan dan penyangga merupakan tempat meletakkan spesimen untuk menerima pukulan, dan (3) mengukur energi sisa dari massa yang bergerak setelah spesimen tersebut pecah.

Pendulum harus disangga jika jatuh secara vertikal tanpa penahan lateral, dan roda engsel (*bearing*) harus memiliki gesekan yang kecil. Pendulum harus cukup tegar sehingga getaran yang mungkin terjadi tidak menyebabkan perubahan serius pada hasil pengujian. Mekanisme kerja

jangan sampai menimbulkan gerak jatuh bebas dari pendulum akibat beberapa efek pengikatan, cepat rambat, atau getaran.

Landasan harus cukup kokoh kaitannya dengan energi dari pukulan sehingga tidak menyebabkan beberapa energi hilang melalui deformasi atau getaran. Tujuan menyangga spesimen agar spesimen tersebut dalam posisi yang akurat untuk menerima *impact.*

Tepi pemukul dari pendulum harus sesuai dengan garis vertikal melewati pusat rotasi dimana pendulum tersebut menggantung tanpa penahan. Garis gaya aksi antara spesimen dan pendulum harus melewati pusat peralatan saat berlangsungnya *impact.* Hal ini patut dipertimbangkan bahwa pusat peralatan sedekat mungkin dengan tepi pemukul.

Mesin harus dirancang dimana jarak antar landasan tidak berkurang (lebarnya) saat bergeraknya pendulum. Pada mesin lebar standar harus ditambah, kaitannya untuk mencegah penyempitan antara spesimen dan landasan. Hal ini diilustrasikan pada Gambar 2.7a.

Untuk menunjukkan ayunan pendulum pada jenis mesin Charpy dan Izod setelah spesimen pecah, lengan yang menahan pendulum menggerakkan penunjuk geser (*friction pointer*) secara bertahap dalam angular atau unit energi. Penunjuk geser, merupakan sumbu rotasi yang sesuai dengan pendulum, semata-mata sebuah lengan yang dapat memutar roda engsel secara kencang dimana penunjuk mencegah dari perubahan posisi akibat beratnya itu sendiri. Tekanan roda engsel harus diatur hingga minimum untuk mencegah kelebihan daya atau penurunan

mendadak dari penunjuk. Pada permulaan setiap pengujian, penunjuk tersebut diatur untuk membuat kontak dengan pendulum dan untuk menunjukkan pembacaan sebenarnya ketika berakhir menggantung vertikal.

Pada mesin Oxford landasan dinaikan pada pendulum dimana pukulan pendulum dapat mengayun bebas dan kemudian diukur perpindahan energi pada landasan. Hubungan energi dicapai dari gerakan kedua pendulum.

Pada mesin *drop-weight* bentuk prinsip gerakan massa adalah untuk mengetahui besarnya energi kinetik, tetapi tidak begitu penting pada besaran kepecahan yang disebabkan oleh pukulan tunggal. Beberapa mesin *drop-weight* tidak direncanakan untuk mengukur sisa energi kinetik dari pemberat setelah menghancurkan spesimen. Dalam pengujian penambahan-jatuh, dimana tinggi pemberat bertambah secara bertahap, merupakan suatu pendekatan pengukuran beban energi terkecil yang menghendaki kepecahan tercapai. Pada beberapa mesin, variasi kecepatan dari hubungan energi dihitung. Pada mesin pukul berulang (*repeated-blow*) harus banyak perlengkapan untuk menjaga melengkungnya spesimen dari pemindahan tanpa menahan atau mengatur bagian belakang.

Pada mesin *drop-weight* yang terpenting adalah sumbu dari pemukul (*tup*) dan penuntun (*guide*) vertikal dan lurus, penyangga dan landasan pada kedudukan dimana pukulan dapat disalurkan langsung

pada spesimen. Gesekan pada penuntun harus minimum dengan menjaganya bebas dari kotoran atau debu; dapat dilumasi dengan bubuk grafit.

Untuk maksud tertentu, pembahasan lebih mendalam tentang prosedur pengujian *impact* dibatasi dengan uji Charpy dan Izod untuk material logam. Karena dipertimbangkan dapat mewakili pekerjaan uji *impact*[3].

2.3.2. Uji *Impact* Batang-takik (*Notched-Bar*)

Berbagai jenis pengujian *impact* batang-takik telah digunakan untuk menentukan kecenderungan bahan bersifat getas. Dengan jenis uji ini dapat diketahui perbedaan sifat bahan yang tidak teramati dalam uji tarik. Hasil yang diperoleh dari uji batang-takik tidak dengan sekaligus memberikan besaran rancangan yang dibutuhkan, karena tidak mungkin mengukur komponen tegangan tiga sumbu pada takik. Selain itu, tidak terdapat kesempatan umum mengenai penafsiran atau makna hasil pengujian takik ini.

Para peneliti kepatahan getas logam telah menggunakan berbagai bentuk spesimen uji untuk pengujian *impact* dengan takikan. Secara umum spesimen uji dikelompokkan kedalam dua golongan standar[4]. Spesimen uji Charpy yang banyak digunakan di Amerika Serikat, dan spesimen uji Izod yang lazim digunakan di Inggris. Spesimen uji Charpy mempunyai luas penampang lintang bujur sangkar (10 x 10 mm) dan mengandung takik "V" 45^0, dengan jari-jari dasar 0.25 mm dan kedalaman 2 mm. Spesimen uji

diletakkan pada tumpuan dalam posisi mendatar dan bagian yang tak bertakik diberi beban *impact* dengan ayunan bandul (kecepatan *impact* sekitar 16 ft/detik). Spesimen akan melengkung dan patah pada laju regangan yang tinggi, kira-kira 10^3 perdetik. Spesimen uji Izod, yang saat ini jarang digunakan, mempunyai penampang lintang bujur sangkar atau lingkaran dan bertakik V didekat ujung yang dijepit. Perbedaan cara pembebanan antara uji Izod dan Charpy, ditunjukkan pada Gambar 2.7.

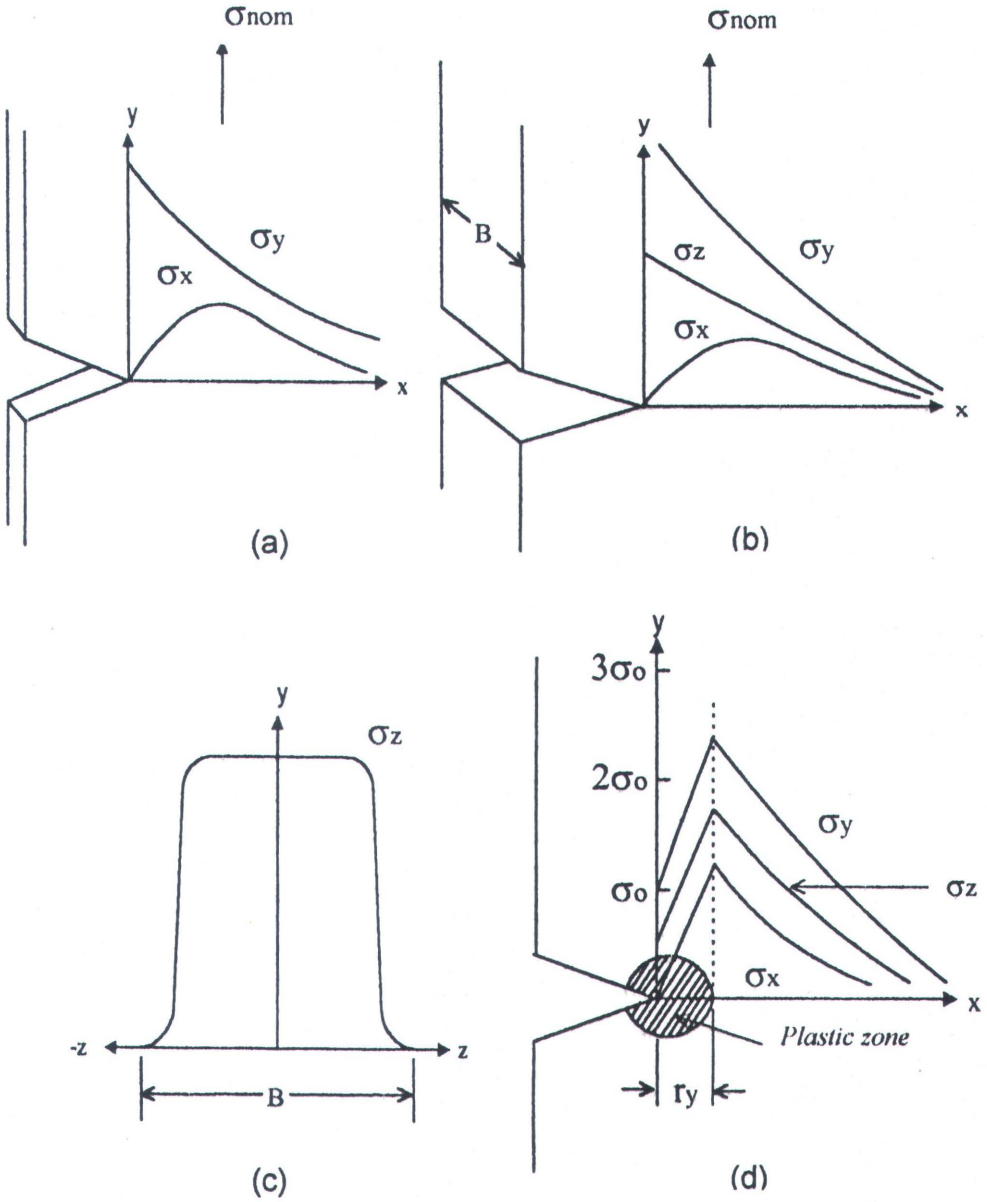
Kendala plastis pada takik menghasilkan keadaan tegangan tiga sumbu serupa dengan yang terdapat pada Gambar 2.1. Konsentrasi tegangan plastis maksimum diberikan oleh persamaan :

$$K\sigma = (1 + \pi / 2 - \omega / 2)$$

dimana ω adalah sudut antara sisi takik. Nilai relatif ketiga tegangan utama sangat tergantung pada dimensi batang dan ukuran takik. Spesimen standar cukup tebal untuk menjamin pembebanan regangan bidang yang tinggi dan terbentuknya triaksidialitas pada hampir diseluruh penampang lintang takik. Dengan demikian, spesimen takik V standar, memberikan kondisi yang baik bagi pengujian patah getas. Oleh karena itu, pemakaian spesimen bukan standar [McNicol] harus dilakukan dengan hati-hati.

Pada uji *impact* diukur energi yang diserap untuk mematahkan spesimen. Setelah spesimen patah, bandul berayun kembali. Makin besar energi yang diserap, makin rendah ayunan kembali dari bandul. Energi perpatahan yang diserap biasanya dinyatakan dalam joule atau foot-pound

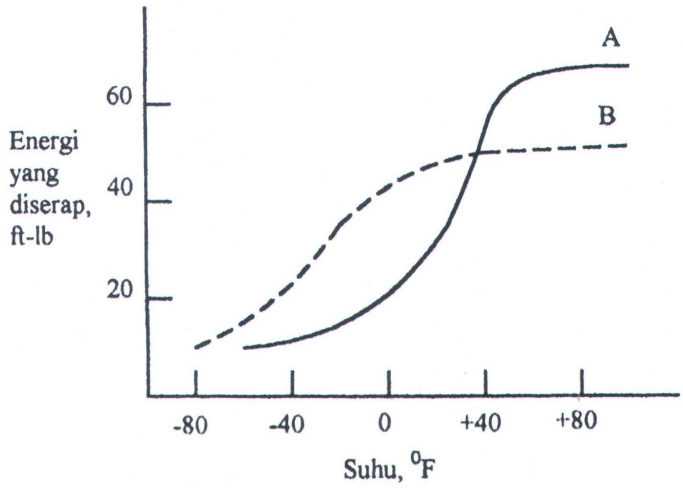
dan dibaca langsung pada skala penunjuk (*dial*) yang telah dikalibrasi yang terdapat pada mesin uji.



Gambar 2.1. (a) Tegangan Elastis di Ujung Takik Pada Pelat Tipis (*Plane Stress*); (b) Tegangan Elastis di Ujung Takik Pada *Plane Strain*; Distribusi σ_z Terhadap z Pada x = 0 (*Plane Strain*); (d) Distribusi Tegangan Selama Lokal *Yield* (*Plane Strain*).

Energi yang diperlukan untuk mematahkan spesimen uji Charpy seringkali diberi tanda Cv, sebagai contoh Cv 25 ft-lb. Di Eropa hasil uji *impact* seringkali dinyatakan sebagai energi yang diserap tiap satuan luas penampang lintang benda uji. Perlu diingat bahwa energi perpatahan yang diukur dengan uji *impact* hanyalah energi relatif dan tidak bisa digunakan secara langsung dalam persamaan perancangan.

Pengukuran lain dari uji *impact* yang biasanya dilakukan adalah penelaahan permukaan patahan untuk menentukan jenis patahan yang terjadi; patahan berserat (patahan geser), granular (patahan belah), atau campuran dari keduanya. Bentuk patahan yang berbeda-beda ini dapat ditentukan dengan mudah, walaupun pengamatan permukaan patahan tidak menggunakan perbesaran. Facet permukaan patahan belah yang datar memperlihatkan daya pemantul cahaya yang tinggi serta penampilan yang berkilat. Sementara permukaan patahan ulet berserat yang berbentuk dimpel menyerap cahaya serta penampilan yang buram. Biasanya dibuat suatu perkiraan berapa persen patahan permukaan yang terjadi berupa patahan belah (atau serat). Patahan berbentuk serat, pertama kali tampak di sekitar permukaan luar dari spesimen (tepi geseran) dimana kendala tiga sumbu (*triaxial*) berakhir. Minimal pengukuran jenis ketiga yaitu pengukuran keuletan dalam bentuk persen pengkerutan spesimen pada takik, kadang-kadang dilakukan pula pada uji *impact*.



Gambar 2.2. Kurva Suhu-Peralihan Untuk Dua Jenis Baja (Memperlihatkan Ketergantungan Hasil Pada Suhu Kamar).

Uji *impact* batang-takik sangat bermanfaat apabila dilakukan pada berbagai suhu sedemikian hingga besarnya suhu peralihan ulet-getas dapat ditentukan. Pada Gambar 2.2 tampak jenis kurva yang dapat diperoleh. Besarnya energi yang diserap akan berkurang apabila suhunya turun, tetapi pada beberapa jenis material, penurunan nilai tersebut tidak terjadi pada nilai temperatur tertentu. Hal ini akan mempersulit penentuan suhu peralihan secara tepat. Dalam memilih material berdasarkan ketangguhan terhadap takik atau kecenderungan untuk mengalami patah getas, maka faktor yang menentukan adalah suhu peralihan. Gambar 2.2 memperlihatkan bahwa penilaian berdasarkan nilai ketahanan *impact* pada satu suhu tertentu dapat menimbulkan kesalahan. Baja A memperlihatkan ketangguhan takik yang lebih tinggi pada suhu kamar; tetapi suhu

peralihannya lebih tinggi daripada baja B. Bahan dengan suhu peralihan paling rendah merupakan material yang lebih baik.

Uji *impact* batang-takik menghasilkan sebaran hasil percobaan yang cukup besar [Fahey; Bishop, Markworth, dan Rosenfield], khususnya pada daerah suhu peralihan. Penyebab utama penyebaran tersebut adalah perbedaan setempat dari sifat baja, sedangkan penyebab yang lain adalah kesulitan untuk mempersiapkan takik yang seragam. Baik bentuk maupun kedalaman takik merupakan besaran yang kritis, demikian pula peletakan spesimen.

Keuntungan utama uji *impact* takik V adalah: 1) mudah dilakukan; 2) murah dan 3) benda ujinya kecil. Pengujian dapat dilakukan pada suhu ruang. Selain itu, bentuk spesimen yang digunakan sangat cocok untuk mengukur ketangguhan takik pada material berkekuatan rendah seperti baja karbon atau baja konstruksi. Uji tersebut juga dapat digunakan untuk memperbandingkan pengaruh paduan dan perlakuan panas pada ketangguhan takik; serta sering digunakan untuk keperluan pengendalian kualitas material. Kesukaran utama yang dihadapi ialah bahwa hasil uji *impact* kurang mungkin dimanfaatkan dalam perancangan. Karena besar "level tegangan" tidak diberikan, sukar untuk menghubungkan data *Cv* dengan performans pemakaian. Selain itu, tidak terdapat hubungan antara data *impact* dengan ukuran cacat. Sebagai tambahan, sebaran hasil uji yang besar mempersulit penentuan kurva-kurva suhu peralihan secara cermat[5].

Sebagai perbandingan data sifat tarik (*tensile properties*) dan kekuatan *impact* (*impact strength*), beberapa jenis material seperti paduan tembaga-berilium dan baja stainless 304, memperlihatkan bahwa proses penguatan dapat menurunkan kekuatan *impact*. Perlakuan metalurgi pada material menimbulkan kekuatan tarik yang lebih tinggi dibanding material yang sama dengan hanya memberikan perlakuan panas saja, tetapi menurunkan kekuatan *impact* pada semua temperatur[6].

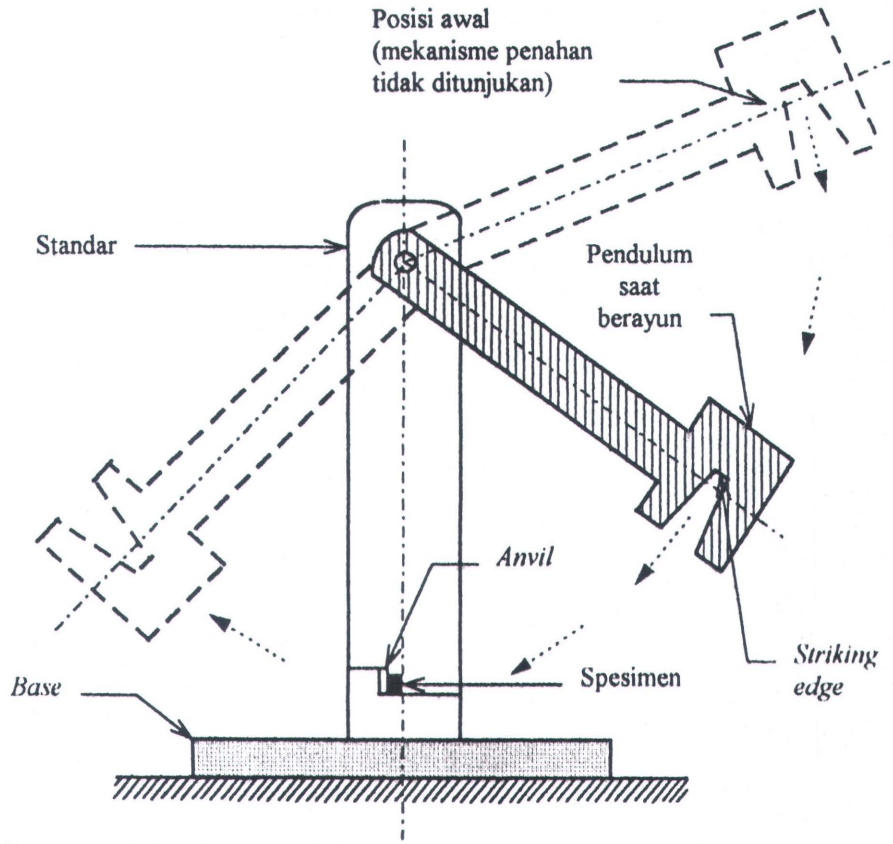
2.3.3. Peralatan

Sesuai dengan pembahasan mengenai dua jenis dasar mesin yaitu pendulum dan drop-weight. Prinsip keduanya telah diterangkan pada bagian terdahulu. Dimana massa dilepas dari jarak tertentu diatas titik *impact* dan memukul spesimen.

Energi kinetik pemukul saat menumbuk adalah $(mv^2)/2$, sama dengan energi potensial relatif pemukul sebelum dilepas (mgh), dimana m adalah massa pemukul dan v $(=\{2gh\}^{1/2})$ adalah kecepatan tangensial *impact* (g adalah percepatan gravitasi 9.806 m/s^2 dan h adalah tinggi jatuhnya pemukul). Energi yang hilang karena gesekan umumnya berkisar kurang dari 1 persen sesuai kualitas mesin. Dengan catatan bahwa tinggi jatuhnya pemukul menentukan kecepatan, tinggi dengan massa bersama-sama menentukan besarnya energi.

Mesin pendulum dapat digunakan untuk bentuk uji Charpy, Izod atau *impact*-tarik. Beberapa mesin dibuat hanya untuk satu atau dua dari uji tersebut, seperti mesin *impact* Charpy yang ditunjukkan dengan ilustrasi

Gambar 2.3. Yang lebih umum, mesin modern (*Universal pendulum impact tester*) oleh Courtesy Tinius Olsen Testing Machine Company, mempunyai pemukul dan penyangga spesimen yang mengijinkan untuk digunakan pada beberapa pengujian dan lainnya yang tepat.



Gambar 2.3. Diagram Mesin *Impact* Charpy atau Izod.

Untuk pengujian dan material yang berbeda, terdapat perbedaan tingkat energi kinetik dan kecepatan tangensial saat menumbuk. Hal ini dapat diubah dengan mengatur satu atau lebih dari tiga variabel, yaitu jarak dari pusat massa terhadap pusat rotasi dari pendulum, massa dari pemukul, dan posisi dari lengan pendulum sebelum dilepas.

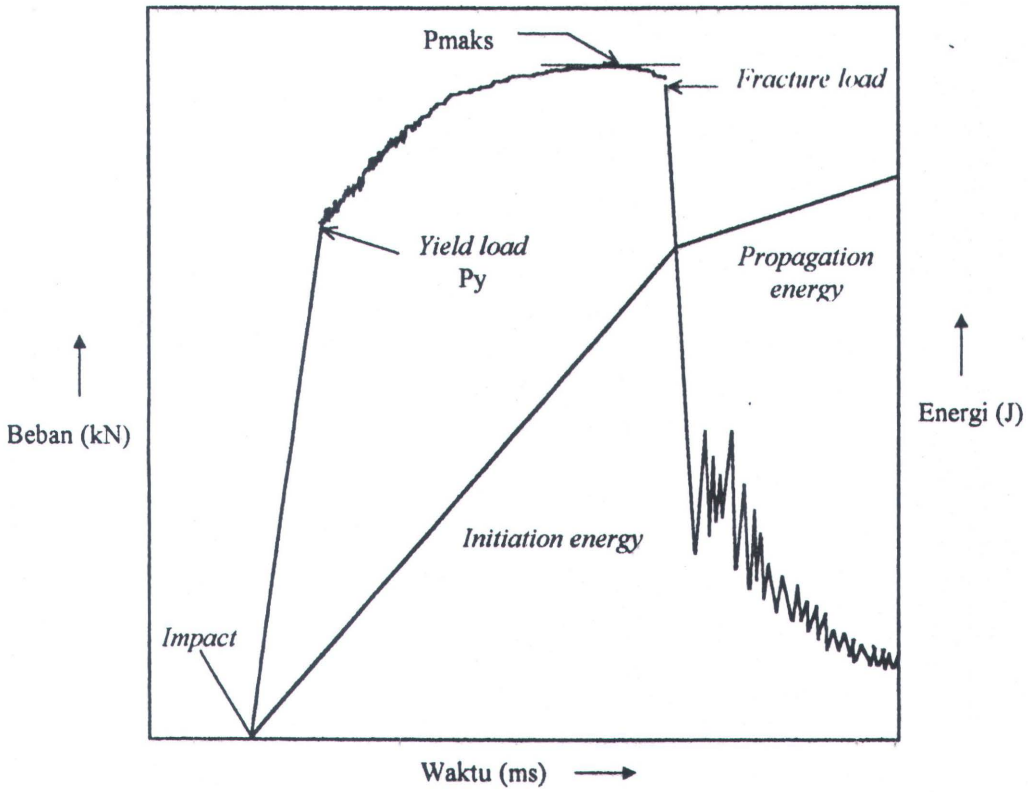
Jika bagian mesin dibuat sedemikian agar dapat diatur, maka hal tersebut tidak dapat dipraktekkan untuk mengubah panjang dari lengan. Mengubah massa pemukul apabila inisial posisi lengan adalah layak dan beberapa mesin memberikan keleluasaan tersebut.

Mesin tertentu, seperti di atas mempunyai berat pemukul (dengan lengan) 27.25 kg dan ketinggian 1.34 m; energi potensial adalah (27.25)*(9.806)*(1.34) = 358 J. Kecepatan *impact* adalah $\{2*(9.806)*(1.34)\}^{1/2}$ = 5.126 m/s dengan sedikit menghiraukan gesekan, dimana umumnya dibawah 1 persen. Pada perencanaan khusus energi diatur dibawah 0.2 J dan kecepatan sampai 0.1 m/s.

Jenis paling sederhana dari peralatan terdiri dari sebuah penunjuk (*pointer*) yang menunjukkan posisi dari pendulum pada skala melingkar. Skala selalu dikalibrasi untuk menunjukkan energi potensial, lebih baik dari kenaikan anguler.

Sebagai tambahan, alat uji dapat dilengkapi dengan peralatan elektronik. *Electric strain gages* mengukur beban selama *impact*, yang biasanya terjadi dari 0.1 sampai 4.0 ms. Kecepatan pemukul selama selang tersebut diukur dengan sebuah batang bersinar dan kombinasi fotosensor, yang memberikan sistim data-akuisisi. Mikroprosesor komputer menjalankan jarak, energi, dan output lain yang diinginkan. Fungsi yang dihasilkan ditunjukkan dengan *oscilloscope* dan dicetak dengan *plotter*. Beban dan energi diplot terhadap waktu, yang diilustrasikan pada Gambar

2.4. Sistim prosesor juga mampu menyimpan dan menampilkan hasil untuk analisa dan *print-out* selanjutnya.



Gambar 2.4. Plot Beberapa Fungsi *Impact*.

Mesin *Drop-weight* oleh *Courtesy Tinius Olsen Testing Machine Company* mempunyai prinsip digunakan sebagai uji lentur (*flexure*) termasuk uji Charpy, selain itu dapat menyesuaikan spesimen lain dengan benar.

Pemukul dinaikkan dengan motor listrik sesuai keinginan, dan menaksir, sesuai posisi. Mesin ini mencapai ketinggian jatuh sampai 2.5 m, tetapi selalu dipakai 0.6 m. Kecepatannya hingga 7 m/s tetapi umumnya sekitar 3 m/s.

Massa pemukul berkisar antara 10 sampai 200 kg, tetapi perlengkapan lainnya dapat menaikkan massa hingga sekitar 750 kg. Energi yang dicapai sampai sebesar 18 kJ, walaupun biasanya hanya 400 sampai 500 J.

Oleh karena itu dapat diamati bahwa tinggi jatuh dan kecepatan mesin *drop-weight* cenderung mirip atau kurang dari yang ditunjukkan mesin pendulum, tetapi massa pemukul dan tingkat energi lebih besar, terkadang sangat besar.

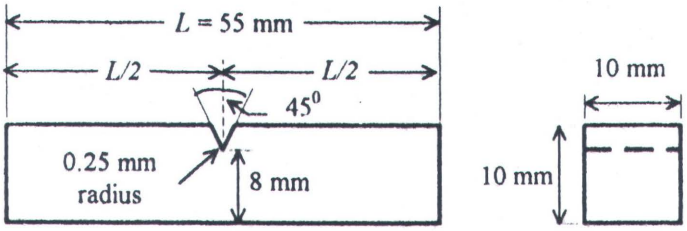
Berbeda dengan jenis uji pendulum, uji *drop-weight* tidak mengharuskan menghancurkan spesimen. Dan mungkin secara otomatis hancur akibat pantulan pada batas *impact* untuk sekali ayun. Alat uji disertai gambar khusus lain, termasuk sistim alarm untuk menjaga operator terhadap keadaan yang berbahaya.

Peralatan minimum terdiri dari sebuah drum kosong bebas yang berputar pada sumbu vertikal dan diletakkan pada landasan didekat kolom penuntun. Pensil dibawa oleh pemukul ditekan dengan sebuah pegas berlawanan dengan selembar kertas yang dilindungi permukaan drum, menghasilkan grafik yang dapat menentukan ketinggian jatuh dari pemukul dan menyesuaikan defleksi dari spesimen.

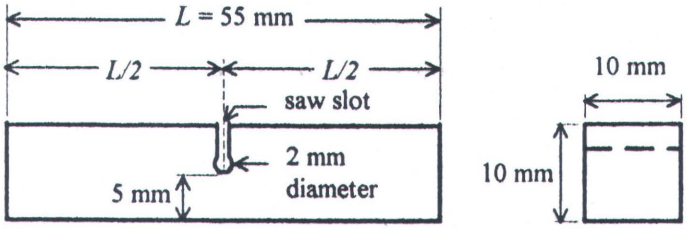
Alat uji modern yaitu apabila bentuk peralatan pemukul serta tujuan analisa dan sistim pencatatan sama seperti yang dijelaskan pada mesin pendulum sebelumnya.

2.3.4. Spesimen

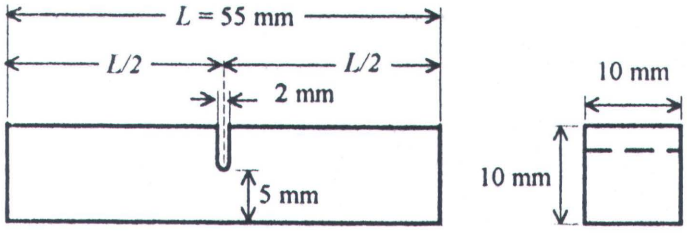
Untuk menyamakan pengujian, yang relatif lebih dari harga absolut, maka spesimen harus dispesifikasikan. Apabila standar spesimen tidak digunakan, maka dimensinya harus sama.



(a) Spesimen Takik V

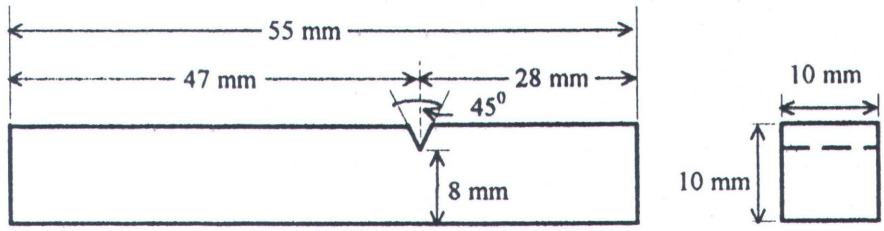


(b) Spesimen Takik Keyhole



(a) Spesimen Takik U

Gambar 2.5. Spesimen Uji Charpy (ASTM E 23).



Gambar 2.6. Spesimen Uji Izod (ASTM E 23).

Standar spesimen untuk uji Charpy mempunyai ukuran 10 x 10 x 55 mm, takikan dapat dilihat pada Gambar 2.5a (ASTM E 23). Ukuran lain digunakan untuk keperluan khusus. Untuk spesifikasi lain yakni takik lubang (*keyhole*) atau U ditunjukkan pada Gambar 2.5b dan c. Spesimen dirancang berbentuk batang sederhana dengan panjang 40 mm, takikan melintang terhadap panjang batang.

Untuk uji Izod, ukuran spesimen 10 x 10 x 75 mm, takikan diilustrasikan pada Gambar 2.6, yang ditahan kantilever vertikal dengan takikan melintang terhadap panjang batang[7].

2.3.5. Prosedur

Pada masalah ini yang diperhatikan adalah ketentuan pelaksanaan pengujian. Penguji *impact* dapat dengan mudah menghancurkan spesimen baja yang kecil seukuran jari dalam waktu milidetik. Mudah membayangkannya, dengan jari biasa apalagi dengan lengan atau kepalan tangan. Tetapi untuk melakukannya dibutuhkan suatu peralatan uji yang bagian tersebut dikenal sebagai mesin *impact*.

Untuk mempersiapkan pengujian, dimensi spesimen harus diukur dengan ketelitian 0.1 persen. Khususnya pada ukuran takik, jika ada.

Pada mesin multiguna, landasan (*anvil*) dan pemukul (*striker*) dirancang sesuai pengujian yang direncanakan: Charpy, Izod, dan *impact*-tarik. Penutup harus kedap dan mesin sendiri harus rata serta umumnya dalam keadaan baik jika digunakan.

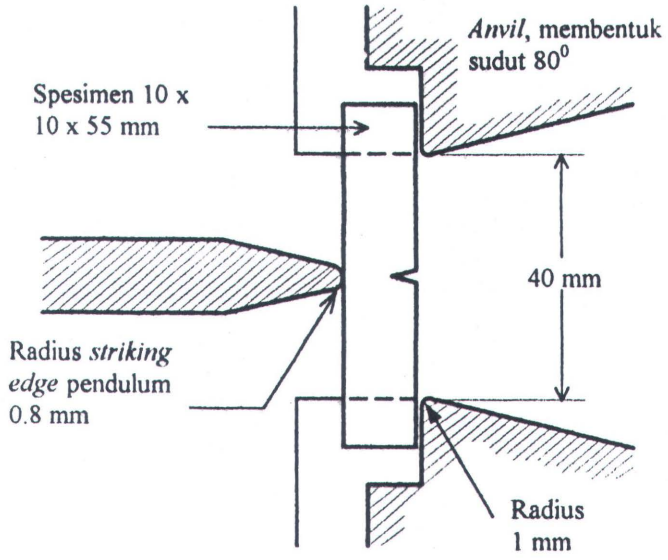
Apabila tinggi jatuh diatur (untuk mesin pendulum atau mesin *drop-weight*), harus diperkirakan kelurusan spesimen dengan pemukul *impact*. Untuk memperoleh energi *impact*, maka massa pemukul diatur sesuai keinginan. Kekurangan standar atau keterangan, menghendaki beberapa percobaan.

Penunjuk (*pointer*) harus diatur dan jika menggunakan peralatan elektronik harus dicek, dihubungkan, dan dinyalakan.

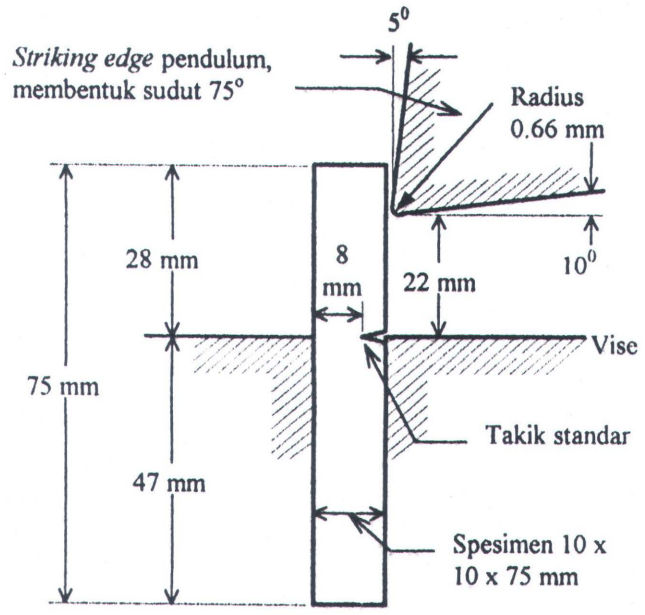
Selanjutnya, spesimen diletakkan ketika pemukul masih dalam posisi ditahan. Untuk uji Charpy, spesimen diatur sesuai Gambar 2.7a, dengan takik membelakangi *striking edge*. Spesimen Izod diatur sesuai Gambar 2.7b, dengan takik menghadap *striking edge*.

Spesimen *impact*-tarik ditahan bagian belakang pemukul, dan blok pemukul ditahan oleh spesimen.

Pengujian menunjukan ketahanan *impact* material pada temperatur rendah yang biasanya dengan mencelupkan spesimen dengan cairan dingin dalam bejana, kurang lebih 2 sampai 3 cm cairan diatas dan dibawah spesimen.



(a) Uji Charpy (Tampak Atas).

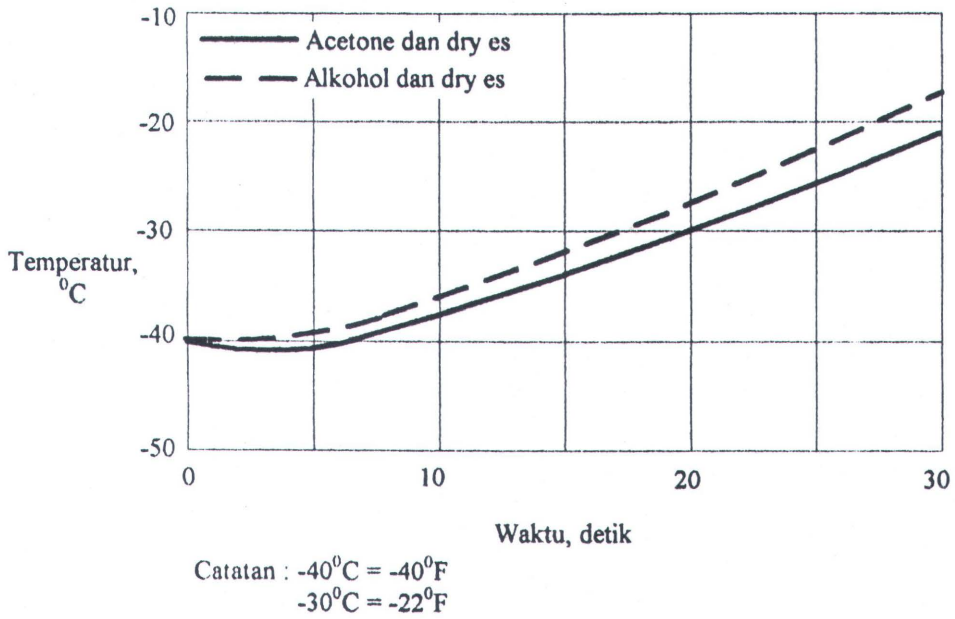


(b) Uji Izod (Tampak Samping).

Gambar 2.7. Peletakan Spesimen.

Untuk temperatur sampai -78^{0}C, dipakai alkohol atau acetone, dapat pula ditambahkan gumpalan kecil es kering (*dry es*). Untuk memperoleh temperatur rendah seperti nitrogen cair (-195^{0}C), pendinginan dilakukan dengan mencelupkan kedalam cairan alkohol sampai -123^{0}C, isopentane sampai -157^{0}C, dan nitrogen cair sendiri sampai -195^{0}C.

Termometer yang sesuai untuk menunjukkan temperatur paling rendah adalah jenis raksa sampai -40^{0}C, jenis alkohol atau bimetallic sampai -100^{0}C, serta jenis pentane untuk temperatur yang lebih rendah lagi.



Gambar 2.8. Perubahan Temperatur Pada Spesimen Baja Saat Dipindah Dari Larutan -40^{0}C.

Spesimen diharapkan menahan temperatur selama 15 menit dan menjaga tetap konstan antara +0^0 sampai -2^{0}C selama 5 menit sebelum

diuji. Pengujian harus selesai dalam 5 detik setelah pemindahan spesimen dari larutan pendingin. Dapat dilihat pada Gambar 2.8, pada -40^{0}C tidak terlalu terlihat perubahan temperatur yang terjadi selama 5 detik pada pendingin alkohol.

Jika digunakan *thermocouple* sensor dengan remote yang dapat dipasang pada spesimen sebelum dicelupkan dalam larutan pendingin, setelah spesimen diletakkan pada mesin uji, maka dapat dilihat temperaturnya. Ketika temperatur berubah dan sesuai yang diinginkan, pengujian dapat segera dilakukan[8].

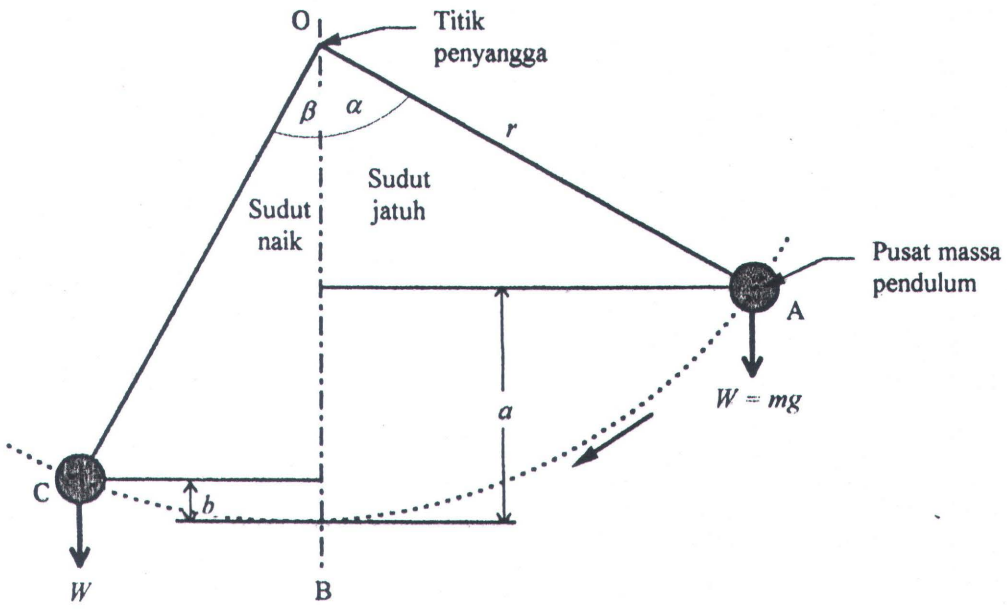
2.3.6. Pengamatan

Pada pengujian *impact* yang perlu diperhatikan dan dicatat secara tepat adalah jenis, ukuran dan temperatur spesimen; jenis pengujian yang digunakan; massa pemukul; dan tinggi jatuh yang menentukan kecepatan *impact*.

Pada pengujian temperatur rendah, temperatur larutan sangat menentukan, lamanya pencelupan dan waktu memindahkan spesimen untuk diuji. Temperatur aktual pengujian dapat ditaksir dengan diagram seperti Gambar 2.8. Apabila dipakai *thermocouple* maka temperatur spesimen dapat ditentukan secara langsung.

Pada permasalahan lain, hasil pengujian *impact* beberapa baja sangat sensitif terhadap perubahan temperatur. Oleh karena itu temperatur aktual pengujian begitu penting dan dicantumkan pada seluruh hasil pengujian; terlebih lagi range temperatur transisi harus ditunjukkan.

Setelah pengujian, spesimen harus diamati. Bentuk, tekstur, dan kemiringan (inklinasi) permukaan patah, terlebih lagi yang berkaitan dengan takikan. Bentuk patahan spesimen menjadi petunjuk kepatahan (*fracture*) pada material.



Gambar 2.9. Skematik Ayunan Pendulum.

Pada uji pendulum, perhitungan energi yang dikehendaki untuk mencapai kepecahan sangat penting. Dari Gambar 2.9 dapat dilihat bahwa energi potensial pendulum sebelum dilepas (titik A) adalah *mga*. Setelah dilepas, energi potensial berkurang dan energi kinetik bertambah, sampai dengan sebelum terjadi *impact* (titik B) dimana energi potensial nol dan energi kinetik maksimum. Pada B sejumlah energi yang penting untuk memecahkan spesimen terhambur. Selanjutnya pendulum berayun dan energi kinetik yang tertinggal kembali berubah menjadi energi potensial,

dan proses berhenti ketika pendulum mencapai jarak terjauh C, dimana energi potensialnya adalah mgb. Selisih antara energi potensial A dan C adalah energi kepecahan, yang sama dengan $mg(a-b)$. Dalam pengujiannya harga tersebut dapat dilihat pada penunjuk (*pointer*).

Pada mesin normal, skala penunjuk merupakan kalibrasi dari unit energi, dan dibaca dengan satuan joule. Jika skala dalam derajat, pembacaan harus diperhitungkan sampai 0.2 derajat. Tinggi a dan b sama dengan $r(1 - \cos \alpha)$ dan $r(1 - \cos \beta)$. Apabila m diberikan dalam kg, g adalah 9.806 m/det^2, serta a dan b dalam m, energi dinyatakan dalam joule (J), tanpa mempertimbangkan volume material yang terlibat.

Energi yang hilang disebabkan oleh empat faktor, yaitu :

1. Gesekan poros bearing, ketika pendulum tepat pada nadir, dan total gayanya paling besar.
2. Tahanan udara pendulum, merupakan fungsi kecepatan dan juga terbesar pada nadir.
3. Tahanan gesek pointer, yang mendekati konstan.
4. Energi kinetik yang berpindah pada spesimen atau bagian spesimen yang pecah, yang tergantung pada massa dan kecepatannya.

Umumnya total energi yang hilang kurang dari 1 persen dan pada beberapa pengujian dapat diabaikan.

Agar lebih presisi, kesalahan kecil tersebut dapat direduksi sedikit dengan percobaan dan taksiran. Besarnya gesekan poros bearing dan tahanan udara dapat didekati dengan membiarkan pendulum berayun

bebas untuk beberapa siklus (*cycle*) dan diamati kehilangan energinya, dengan mengasumsikan energi yang hilang rata-rata per unit sudut akan memberikan koreksi yang akurat. Efek gesekan penunjuk dapat direduksi dengan mengatur penunjuk pada posisi sedekat mungkin terhadap harga pengujian yang diharapkan. Energi kinetik spesimen dapat diestimasi dengan besarnya massa dan menganggap kecepatannya sama dengan kecepatan pendulum setelah memecahkan spesimen, hasilnya menjadi koreksi terhadap energi kepecahan.

Pada pengujian *drop-weight*, energi *impact* merupakan bagian terpenting, khususnya harga untuk memecahkan spesimen. Energi kinetik pemukul sama dengan energi potensial sebelum dilepas, yang sedikit hilang akibat gesekan dan tahanan udara.

Apabila tidak menghasilkan kegagalan (*failure*) pada spesimen, maka defleksi yang terjadi dicatat dan digunakan untuk menentukan batas proporsional, modulus elastisitas, dan kelentingan (*resilience*) material, yang dijelaskan pada ASTM D 143.

Pemakaian peralatan elektronik lebih detil dalam mencacat dan menganalisa hasil pengujian. Biasanya dalam bentuk grafik kuva beban-waktu dan kurva energi-waktu, yang sesuai kronologi teori kelakuan *impact* selama fase elastis dan inelastis. Dan semua yang dihasilkan mulai dari gaya, waktu, dan jarak diukur serta dihitung. Terlebih analisa statistik, seperti pencocokan kurva yang mungkin ditampilkan.

Data terpenting pada pengujian adalah kecepatan dan energi *impact*, kemiringan (*slope*) kurva beban-defleksi di daerah elastis, waktu tempuh, beban maksimum pecah, dan defleksi selama berbagai fase pembebanan. Sistim proses data yang modern mengacu pada seluruh hasil tersebut, kemudian ditampilkan dan disimpulkan dalam bentuk tabel dari seluruh seri pengujian[9].

2.3.7. Variabel Yang Mempengaruhi

Pengujian *impact* material yang didapat dari bermacam mesin memberikan hasil yang berbeda, yang disebabkan oleh (1) variasi jumlah energi *impact* yang berpindah akibat getaran bagian mesin, (2) variasi kecepatan pukul pendulum, dan (3) ukuran serta bentuk spesimen.

Dengan bentuk takik yang sama, hasil dari mesin Charpy dan Izod jelas berbeda, dimana hasil Charpy cenderung lebih tinggi dari hasil Izod[10].

- **Kecepatan**

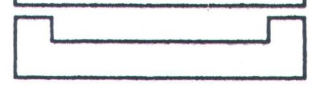
Melebihi range kecepatan mesin (3 sampai 5 m/det), kecepatan *impact* tidak mempengaruhi hasil pengujian. Apabila percobaan dihubungkan dengan sebuah mesin yang mampu menaikkan kecepatan hingga 300 m/det terlihat bahwa diatas kecepatan kritis, tahanan *impact* menurun. Harga kecepatan kritis dan rata-rata penurunan tahanan *impact* dengan bertambahnya kecepatan berbeda untuk material yang berlainan. Kecepatan kritis sedikit lebih besar untuk baja yang dianil (*annealed*) daripada baja yang sama dalam kondisi dikeras (*hardened*). Range kecepatan yang dihasilkan dalam pengujian Charpy dan Izod terlihat baik

dibawah kecepatan kritis untuk baja karbon biasa; beberapa baja paduan ternyata mempunyai kecepatan yang dekat dengan range kecepatan untuk pengujian Charpy dan Izod.

- **Spesimen**

Pada beberapa kasus yang tidak mungkin memperoleh lebar spesimen standar dari batang yang digunakan. Pengurangan salah satu lebar atau tebal spesimen mengurangi volume logam kaitannya dengan distorsi dan karena itu cenderung menurunkan energi serap (*absorbsi*) ketika memukul spesimen. Apabila terdapat pengurangan ukuran, cenderung pula menurunkan tingkat penahanan dan mereduksi kecenderungan terjadinya patah getas (*brittle fracture*) yang mungkin bertambah dengan banyaknya energi serap. Hal ini penting, dimana standar spesimen menunjukkan suatu patah getas, dan penyempitan spesimen menghendaki energi serap yang lebih besar. Pengujian aktual menunjukkan bahwa harga Charpy spesimen, pada temperatur ruang, memiliki luas satu-empat dan dua-tiga dari standar spesimen, yang merupakan proporsi kasar terhadap luas dari ukuran spesimen, tetapi pada temperatur rendah penyempitan spesimen beberapa baja memperlihatkan tiga kali energi tahanan total dari sebuah spesimen standar [Habart dan Herge].

Hasil pengujian *mild steel* ditunjukkan pada Tabel 2.1 untuk kedalaman takik 5 mm dan radius 0.67 mm terlihat bahwa sudut takik tidak mempengaruhi harga *impact* sampai melampaui 60^0.

Sudut takik	Bentuk spesimen	Harga *impact* Charpy	
		J	ft-lb
0^0		30.0	22.1
30^0		33.1	24.4
60^0		31.3	23.1
90^0		35.1	25.9
120^0		56.7	41.8
150^0		89.8	66.2
180^0		85.6	63.1

Tabel 2.1. Efek Sudut Takik Terhadap Energi *Impact* Pada *Mild Steel.*

Ketajaman takik mempunyai pengaruh terhadap energi *impact* material [Batson dan Hyde; Kahn, Imbembo, dan Ginsberg]. Pada Tabel 2.2, energi *impact* menurun bersama naiknya ketajaman takik yang disebabkan berkurangnya konsentrasi tegangan. Dan telah dibuktikan bahwa ketajaman bentuk takik, lebih membedakan antara hasil pengujian kegetasan (*brittle*) dan ketegaran (*toughness*) material, dan ketegaran material sedikit dipengaruhi radius takikan [Batson dan Hyde]. Karena bentuk takik runcing sulit dihasilkan, maka radius 0.25 mm diambil sebagai standar takik V.

Penggunaan takik yang landai memberikan sebaran harga *impact* yang besar untuk material yang getas atau tegar; terlebih lagi takik yang

landai terlihat lebih sensitif dalam membedakan temperatur atau komposisi material.

Radius takik (pada kedalaman 2 mm),mm	Harga *impact* Charpy	
	J	ft-lb
Runcing	30.0	22.1
0.17	33.1	24.4
0.34	31.3	23.1
0.68	35.1	25.9

Tabel 2.2. Efek Radius 45^0 Takik V Terhadap Energi *Impact* Pada 0.65 Persen Baja Karbon.

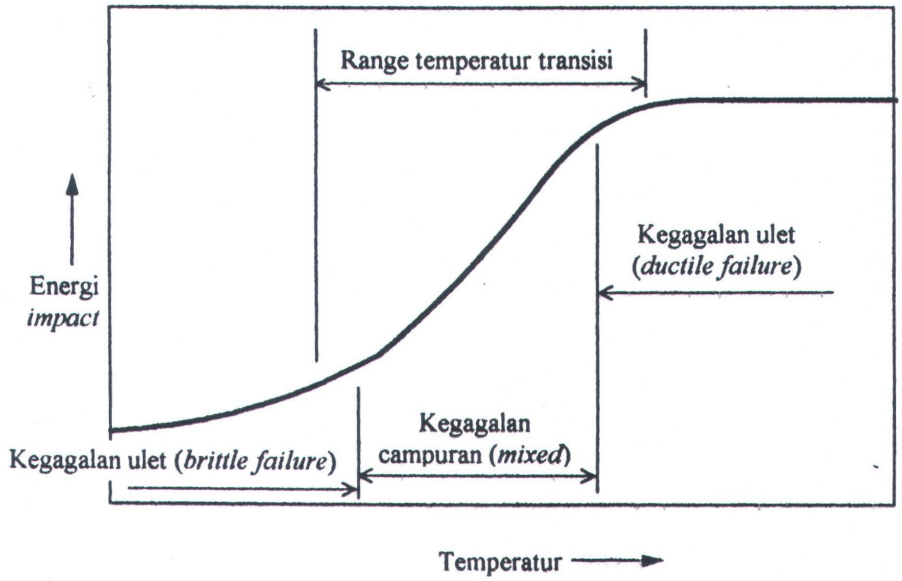
Untuk alasan tersebut, dalam pengujian *impact* Charpy menghendaki kedalaman 2 mm dengan takik V daripada takik keyhole yang memiliki kedalaman 5 mm, meskipun banyak digunakan pada pengujian temperatur rendah.

- **Temperatur**

Perbedaan tajam terlihat pada pengaruh relatif temperatur pada kekuatan statis dan keuletan material, temperatur memiliki efek pada tahanan *impact* batang-takik.

Gambar 2.10 menampilkan variasi energi *impact* akibat perubahan temperatur pada pengujian material. Dibawah temperatur kritis menimbulkan kegagalan getas (*brittle fracture*) dengan energi serap

rendah. Diatas temperatur kritis menimbulkan kegagalan ulet (*ductile fracture*) dengan energi serap yang lebih banyak dari kegagalan getas. Antara kedua temperatur kegagalan tersebut terdapat "range temperatur-transisi", dimana karakter kegagalan patah merupakan campuran (*mixed*). Range temperatur-transisi untuk beberapa baja lebih pendek.



Gambar 2.10. Diagram Energi *Impact* Material Akibat Perubahan Temperatur.

Daerah kritis standar takik V untuk baja terjadi pada titik beku (*freezing point*) dan temperatur ruang. Daerah kritis tersebut juga dipengaruhi oleh ketajaman dan kedalaman bentuk takik.

- **Kegagalan (*Failure*)**

Ada dua mode kegagalan *metallic* atau *kristalline* material yaitu "kepatahan memisah" (*separation fracture*) dan "kepatahan geser atau slip" (*shear or sliding fracture*). Kepatahan memisah terjadi antar kristal

saat pembentukan, atau terjadi karena pemisahan batas kristal atau melewati *intercrystalline* material. Kepatahan geser akibat detrusi yang melintasi kristal atau didalam *intercrystalline* material.

Akhir kegagalan terjadi setelah deformasi plastis. Apabila tidak terjadi deformasi plastis sebelum menjalar, maka kegagalan ini disebut "patah getas" (*brittle fracture*). Dan bila terjadi deformasi plastis dimana terdapat regangan plastis, maka kegagalan jenis ini disebut "patah ulet" (*ductile fracture*).

Faktor yang menghalangi deformasi plastis dan cenderung menyebabkan patah getas adalah (1) tegangan yang menimbulkan tegangan geser relatif kecil dari tegangan tarik, (2) deformasi akibat diskontinuitas atau takikan, (3) tegangan yang cepat (*rapid stress*), (4) temperatur yang rendah (*low temperatur*), dan (5) bentuk struktur atau komposisi material.

Pada pengujian batang-takik, transisi dari kegagalan ulet ke getas selalu melewati range temperatur atmosfer karena efek takikan dan regangan yang cepat sehingga mengurangi deformasi plastis. Keadaan material yang bertakik menjadi faktor kritis yang menentukan jenis kegagalan, dan temperatur transisi maupun energi serap merupakan petunjuk yang mempengaruhi ketegaran dan kegetasan material.

[1] H. E. Davis, G. E. Troxell, dan G. F. W. Hauck, "The Testing of Engineering Materials", edisi ke-4, part 2, chap. 13, hal. 221-223, McGraw-Hill International Book Company, New York, 1982.

[2] H. E. Davis, G. E. Troxell, dan G. F. W. Hauck, "op cit", hal. 223-226.

[3] H. E. Davis, G. E. Troxell, dan G. F. W. Hauck, "op cit", hal. 226-227.

[4] Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, ASTM Designation E 23, "1994 Annual Book of ASTM Standards", vol. 03.01, hal. 140-159, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.

[5] George E. Dieter, "Mechanical Metallurgy", edisi SI Metric, part 3, chap. 14, hal. 472-475, McGraw-Hill Book Company, London, 1988.

[6] William K. Dalton, "The Technologi of Metallurgy", chap. 12, hal. 286, Macmillan Publishing Company, New York, 1995.

[7] Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, ASTM Designation E 23, "op cit" ; H. E. Davis, G. E. Troxell, dan G. F. W. Hauck, "op cit", hal. 231-232.

[8] H. E. Davis, G. E. Troxell, dan G. F. W. Hauck, "op cit", hal. 233-234.

[9] H. E. Davis, G. E. Troxell, dan G. F. W. Hauck, "op cit", hal. 235-236.

[10] H. E. Davis, G. E. Troxell, dan G. F. W. Hauck, "op cit", hal. 237-241.

BAB III

TINJAUAN *FATIQUE*

BAB III

TINJAUAN *FATIGUE*

3.1. PENDAHULUAN

Sejak 1830 telah diketahui bahwa material logam yang dikenai tegangan berulang akan rusak pada tegangan yang jauh lebih rendah dibanding yang dibutuhkan untuk menimbulkan perpatahan pada penerapan beban tunggal. Kegagalan yang terjadi pada keadaan beban dinamis dinamakan "kegagalan lelah" (*fatigue failure*), barangkali karena pada umumnya kegagalan tersebut hanya terjadi setelah periode pemakaian yang cukup lama. Kegagalan *fatigue* makin menonjol sejalan dengan perkembangan peralatan teknologi seperti; mobil, pesawat terbang, kapal, kompresor, pompa, turbin dan lain-lainnya. Kesemuanya mengalami beban berulang dan getaran. Hingga kini sering dinyatakan bahwa kelelahan meliputi paling tidak 90 persen dari seluruh kegagalan yang disebabkan oleh hal-hal yang bersifat mekanis.

Kegagalan lelah adalah hal yang sangat membahayakan, karena terjadi tanpa petunjuk awal. Kelelahan mengakibatkan patah yang terlihat rapuh, tanpa deformasi pada patahan tersebut. Pada skala makroskopik, permukaan patahan biasanya dikenal dari bentuk bidang perpatahan, ada bagian yang halus akibat gesekan yang terjadi sewaktu retak merambat dan daerah kasar, perpatahan ulet terjadi pada waktu penampang tidak dapat menerima beban. Seringkali perkembangan retakan ditandai oleh

sejumlah cincin atau garis pantai (*beach mark*), bergerak ke dalam dari titik dimana kegagalan mulai terjadi. Dan kegagalan biasanya terjadi pada bagian dimana terdapat konsentrasi tegangan metalurgis, seperti inklusi.

Akibat beban-beban yang berulang, kegagalan mungkin terjadi karena kelelahan. Kemampuan material menahan tegangan yang bekerja akibat beban berulang disebut "ketahanan" (*endurance*). Kekuatan lelah (*fatigue strength*) adalah tegangan maksimum akibat beban berulang yang dapat bekerja tanpa menimbulkan kegagalan. Jika jumlah siklus tegangan yang bekerja sangat besar, kekuatan lelah cenderung mencapai harga batas, disebut sebagai "batas lelah" (*fatigue limit*)[1].

Terdapat tiga faktor dasar yang diperlukan agar terjadi kegagalan lelah. Ketiga hal tersebut adalah (1) tegangan tarik maksimum yang cukup tinggi, (2) variasi atau fluktuasi tegangan yang cukup besar, dan (3) siklus penerapan tegangan cukup besar. Selain itu, masih terdapat sejumlah variabel-variabel lain yakni; konsentrasi tegangan, korosi, suhu, kelebihan bahan, struktur metalurgis, tegangan-tegangan sisa, dan tegangan kombinasi, yang cenderung untuk mengubah kondisi kelelahan. Karena belum memiliki pengetahuan dasar yang kuat mengenai sebab-sebab terjadinya kelelahan pada material logam, maka diperlukan pembahasan mengenai faktor-faktor tersebut diatas dari segi empiris. Karena banyaknya data seperti ini, maka hanya terdapat kemungkinan untuk menggambarkan hubungan faktor tersebut diatas dengan kelelahan.

3.2. SIKLUS TEGANGAN (*STRESS CYCLE*)

Sebagai langkah awal, diberikan definisi singkat mengenai tegangan berfluktuasi yang dapat menyebabkan kelelahan. Gambar 3.1 menggambarkan jenis-jenis siklus tegangan yang dapat menyebabkan kelelahan. Gambar 3.1a menggambarkan suatu "siklus tegangan lengkap" yang berbentuk sinusoidal. Gambar tersebut adalah keadaan ideal yang dihasilkan oleh mesin *fatigue* balok putar [R. R. Moore] dan dianggap sebagai putaran poros dengan kecepatan konstan tanpa beban lebih. Untuk siklus tegangan tipe demikian, tegangan maksimum dan minimum sama besarnya. Tegangan minimum adalah tegangan terendah aljabar pada suatu siklus. Tegangan tarik dianggap positif, dan tegangan tekan dianggap negatif. Gambar 3.1b menggambarkan suatu "siklus tegangan berulang", dengan tegangan maksimum σ_{maks} dan tegangan minimum σ_{min} tidak sama. Keduanya adalah tegangan tarik. Suatu siklus tegangan dapat terdiri dari tegangan maksimum dan minimum dengan tanda berbeda atau keduanya berupa tekanan. Gambar 3.1c menggambarkan suatu siklus tegangan yang rumit, yang mungkin terdapat pada suatu bagian tertentu, seperti pada sayap pesawat yang menerima beban berlebih periodik yang tak terduga besarnya disebabkan oleh hembusan udara yang keras.

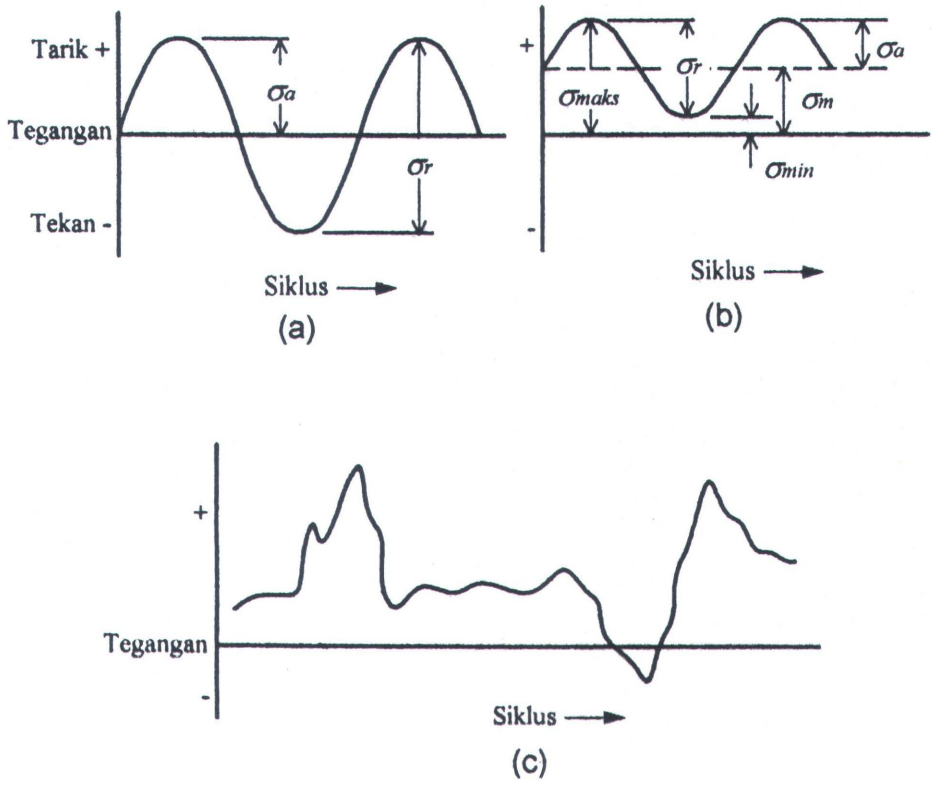
Siklus tegangan berfluktuasi, terdiri dari 2 komponen; tegangan "rata-rata" atau tegangan tetap σ_m, dan tegangan "bolak-balik" atau tegangan beragam, σ_a. Seperti yang tampak pada Gambar 3.1b, daerah

tegangan adalah perbedaan aljabar antara tegangan maksimum dan tegangan minimum pada suatu siklus.

$$\sigma_r = \sigma_{maks} - \sigma_{min}$$

Besarnya tegangan bolak-balik adalah ½ dari jangkauan tegangan.

$$\sigma_a = \sigma_r/2 = (\sigma_{maks} - \sigma_{min})/2$$



Gambar 3.1. Siklus Tegangan Lelah, (a) Tegangan Balik; (b) Tegangan Berulang; (c) Siklus Tegangan Irregular.

Tegangan rata-rata adalah harga rata-rata aljabar tegangan maksimum dan minimum pada siklus:

$$\sigma_m = (\sigma_{maks} + \sigma_{min})/2$$

Untuk mengemukakan data-data kelelahan, digunakan dua buah besaran perbandingan yakni:

Perbandingan tegangan (*stress ratio*):

$$R = \sigma_{min}/\sigma_{maks}$$

Perbandingan amplitude (*amplitude ratio*):

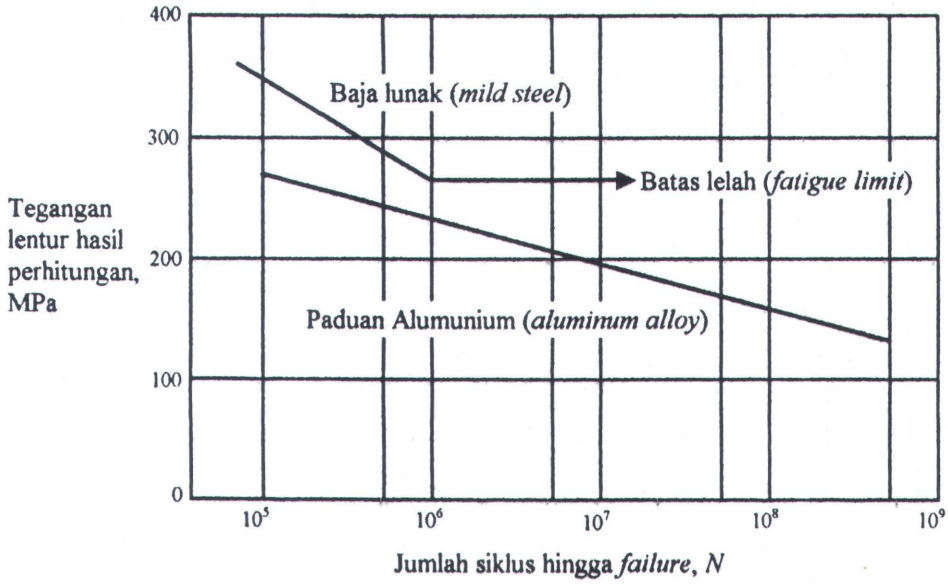
$$A = \sigma_a/\sigma_m = (1 - R)/(1 + R)$$

3.3. KURVA *S-N*

Metode dasar dalam penyajian data kelelahan rekayasa adalah menggunakan kurva *S-N*, yakni pemetaan tegangan *S* terhadap jumlah siklus hingga terjadi kegagalan *N*. Untuk skala *N*, hampir selalu digunakan skala log. Tegangan yang dipetakan dapat berupa σ_a, σ_{maks}, atau σ_{min}. Nilai tegangan tersebut biasanya adalah tegangan nominalnya, dengan demikian tidak terdapat penyesuaian untuk konsentrasi tegangan. Hubungan *S-N* ditentukan bagi nilai-nilai σ_m, R, atau A tertentu. Hampir semua cara-cara penentuan sifat-sifat lelah suatu bahan diperoleh dengan cara lenturan balik lengkap, dimana tegangan rata-ratanya bernilai nol. Gambar 3.2 menunjukkan kuva *S-N* yang diperoleh dari uji balok putar (*rotating beam test*).

Perlu diketahui bahwa kurva *S-N* diatas, terutama berkaitan dengan kegagalan lelah pada jumlah siklus yang besar ($N > 10^5$ siklus). Pada keadaan demikian, tegangannya bersifat elastis, tetapi material akan berdeformasi secara plastis setidak-tidaknya pada daerah yang sempit.

Pada tegangan-tegangan tinggi dengan cepat umur lelah (*fatigue life*) turun, tetapi deformasi plastis keseluruhan mempersulit penafsiran dengan menggunakan besaran tegangan. Untuk daerah kelelahan siklus rendah ($N < 10^4$ atau 10^5) pengujian dilakukan dengan pengendalian siklus elastis ditambah regangan plastis.



Gambar 3.2. Kurva Kelelahan Material Ferrous dan Nonferrous.

Dari Gambar 3.2 terlihat bahwa jumlah siklus tegangan yang materialnya dapat bertahan sebelum mengalami kelelahan, akan bertambah jika tegangannya turun. *N* adalah jumlah siklus tegangan yang menyebabkan terjadinya patah sempurna benda uji. Uji kelelahan pada tegangan rendah untuk material bukan besi, biasanya dilakukan untuk 10^7 dan kadang-kadang hingga $5x10^8$ siklus. Untuk beberapa material teknik yang penting, seperti baja dan titanium, kurva *S-N* untuk daerah tegangan

batas tertentu berubah menjadi datar. Dibawah tegangan batas, yang dinamakan "batas lelah" (*fatigue limit*), atau "batas ketahanan" (*endurance limit*), nampaknya material tahan terhadap siklus pembebanan dengan jumlahnya tak hingga, tanpa terjadi kegagalan. Sebagian besar material bukan besi, seperti alumunium, magnesium dan paduan tembaga, memiliki kurva *S-N* dengan gradien yang turun sedikit demi sedikit sejalan dengan bertambahnya jumlah siklus. Material demikian tidak mempunyai batas lelah yang sejati, karena kurva *S-N* tidak pernah menjadi horisontal. Pada keadaan tersebut, umumnya sifat-sifat lelah suatu bahan diberikan oleh kekuatan patah pada siklus tertentu, misalnya 10^8 siklus.

Kurva *S-N* di daerah siklus tinggi digambarkan dengan persamaan Basquin:

$$N\sigma_a{}^p = C$$

dalam hal ini σ_a adalah tegangan amplitude dan p serta C adalah konstanta empiris.

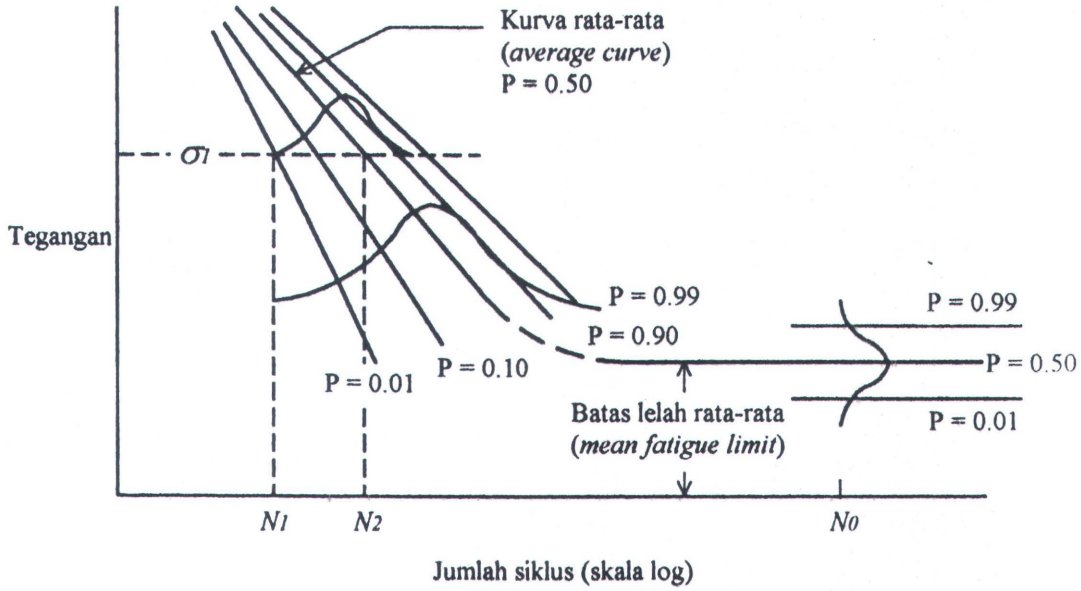
Prosedur yang biasa digunakan untuk menentukan kurva *S-N* adalah menguji spesimen pertama pada tegangan tinggi, disini diharapkan terjadi kegagalan pada siklus pembebanan yang kecil, misalnya digunakan tegangan sebesar 2/3 kekuatan tarik material. Kemudian tegangan uji diturunkan untuk spesimen-spesimen berikutnya hingga satu atau dua spesimen tidak rusak pada siklus tegangan tertentu, biasanya sekitar 10^7 siklus. Tegangan tertinggi pada saat tidak terjadi kegagalan dianggap sebagai batas lelah. Untuk material-material yang tidak mempunyai batas

lelah, biasanya pengujian dihentikan berdasarkan pertimbangan praktis, pada tegangan rendah, kira-kira pada siklus pembebanan 10^8 atau $5x10^8$ siklus. Kurva-kurva *S-N* umumnya ditentukan dengan menggunakan spesimen sekitar 8 sampai 12. Biasanya terdapat penyimpangan data yang cukup besar, walaupun dapat digambarkan suatu kurva yang baik tanpa menemui kesulitan. Akan tetapi, jika beberapa spesimen diuji pada tegangan yang sama, maka terdapat penyimpangan nilai yang cukup besar pada nilai-nilai siklus tertentu dimana terjadi kegagalan. Selisih antara siklus minimum dan maksimum dapat mencapai satu siklus log. Selain itu, telah terbukti bahwa batas lelah baja mengalami variasi yang cukup besar, oleh karena itu penentuan batas lelah dengan cara-cara yang dijelaskan diatas dapat menghasilkan kesalahan yang cukup besar[2].

3.4. SIFAT-SIFAT STATISTIK KELELAHAN

Banyak perhatian dicurahkan pada analisis data dan sebab-sebab aneka ragam hasil pengujian kelelahan. Karena umur kelelahan (*fatigue life*) dan batas kelelahan (*fatigue limit*) merupakan besaran statistik, maka disadari bahwa kurva nilai rata-rata dari pengujian dengan spesimen terbatas mempunyai penyimpangan yang cukup besar. Juga diperlukan pemakaian istilah kemungkinan spesimen mencapai ketahanan yang pasti pada nilai tegangan tertentu atau kemungkinan kegagalan pada tegangan di sekitar batas kelelahan. Untuk melakukan hal diatas, pengujian harus menggunakan jumlah spesimen yang cukup banyak, sehingga parameter

statistik untuk pendekatan besarnya kemungkinan dapat ditentukan. Metode dasar untuk menampilkan data-data kelelahan harus merupakan permukaan tiga dimensi, yang menyatakan hubungan antara tegangan, jumlah siklus hingga gagal, dan kemungkinan terjadinya kegagalan. Gambar 3.3 menunjukkan bagaimana permukaan tiga dimensi tersebut dapat dinyatakan dalam pemetaan dua dimensi.



Gambar 3.3. Penggambaran Data Kelelahan Berdasarkan Kemungkinan (*Probability*).

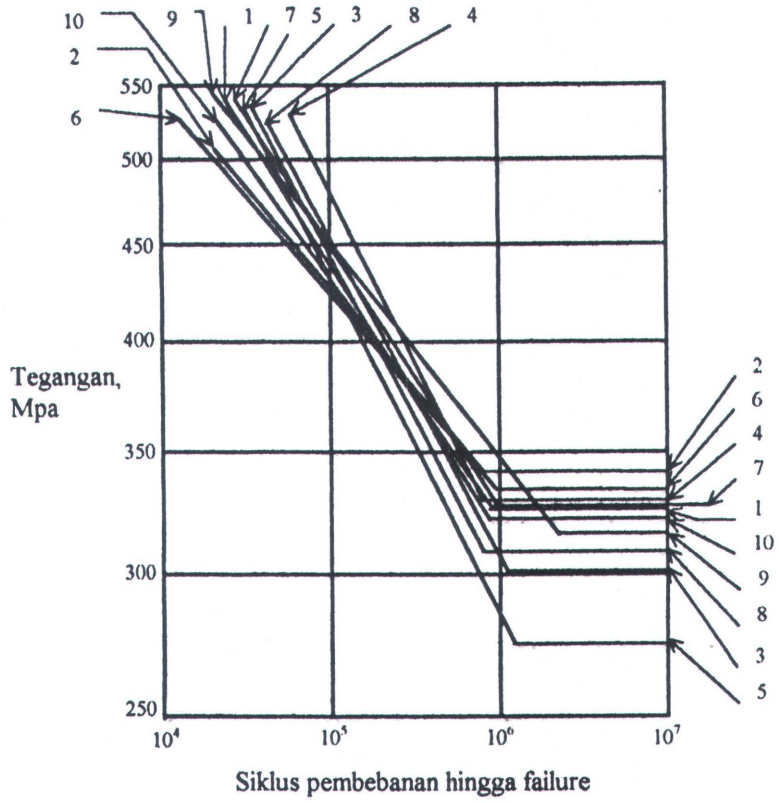
Distribusi ketahanan lelah pada tegangan konstan secara skematis ditunjukkan pada gambar diatas, dan berdasarkan hal ini diperoleh kurva kegagalan pada kemungkinan yang konstan. Jadi pada σ_1, 1% spesimen diharapkan gagal pada siklus N_1, dan 50% pada siklus N_2, dan seterusnya. Gambar 3.3 juga memperlihatkan menurunnya penyebaran nilai ketahanan lelah jika tegangannya naik. Fungsi distribusi statistik yang

menggambarkan distribusi ketahanan lelah pada tegangan tetap, tidak diketahui dengan tepat. Untuk mengetahui fungsi tersebut secara tepat dibutuhkan lebih dari 1000 spesimen sejenis, pada kondisi uji yang seragam dengan tegangan tetap. Muller-Stock melakukan pengujian pada 200 spesimen baja pada tegangan tunggal, dan ternyata bahwa distribusi frekuensi *N* mengikuti distribusi "gaussian" atau distribusi normal, jika ketahanan lelah dinyatakan sebagai fungsi log *N*. Untuk keperluan rekayasa, akan cukup teliti bila diasumsikan suatu distribusi normal logaritmik ketahanan lelah pada ketahanan tetap pada daerah yang mempunyai kemungkinan kegagalan P = 0,10 hingga P = 0.90. Akan tetapi, seringkali merupakan hal yang penting untuk dapat melakukan pendugaan ketahanan lelah pada daerah yang mempunyai kemungkinan kegagalan 1% atau yang lebih kecil. Pada batas distribusi yang ekstrim tersebut, anggapan bahwa distribusi ketahanan terhadap logaritma siklus adalah normal, tidak berlaku lagi, walaupun anggapan tersebut masih sering dipergunakan. Cara pendekatan lain yang dapat digunakan adalah distribusi nilai ekstrim atau distribusi Weibull.

Untuk memperoleh interpretasi statistik batas lelah, kita harus mengkaitkannya dengan distribusi tegangan pada ketahanan lelah konstan. Batas lelah baja dinyatakan sebagai nilai ambang yang tajam, dibawah nilai tersebut semua spesimen mempunyai ketahanan tak terhingga. Akan tetapi, akhir-akhir ini terbukti bahwa batas lelah merupakan besaran statistik yang riil, dan diperlukan cara-cara khusus

untuk menentukan nilai tersebut secara teliti. Sebagai contoh, pada paduan baja tempa (*heat-treated alloy forging steel*) yang mengalami perlakuan panas, daerah tegangan yang mencakup batas lelah 95% spesimen mempunyai nilai dari 40.000 psi hingga 52.000 psi. Suatu contoh kesalahan yang mungkin terjadi pada cara pengujian biasa dengan menggunakan beberapa buah spesimen ditunjukkan pada gambar 3.4. Gambar tersebut meliputi 10 buah kurva *S-N* yang diperoleh dengan cara-cara konvensional untuk batang paduan baja yang sama, dengan menguji 10 spesimen. Spesimen yang digunakan sedapat mungkin identik, sehingga tidak terdapat hamburan data yang berlebihan atau ketidak tentuan dalam penggambaran kurva *S-N*. Dari gambar dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan yang besar pada nilai batas lelah baja pengukuran yang disebabkan oleh kenyataan bahwa kurva dibuat berdasarkan data-data yang tidak cukup.

Dalam menentukan batas lelah suatu bahan, diperoleh bukti bahwa setiap spesimen mempunyai batas lelahnya sendiri, tegangan diatas batas akan menyebabkan terjadinya kegagalan, tetapi tegangan dibawah batas tidak menyebabkan kegagalan. Nilai tegangan kritis ini beragam antara satu benda uji dengan benda uji yang lain tanpa penyebab yang jelas. Telah diketahui bahwa inklusi pada baja mempunyai pengaruh yang besar terhadap batas lelah dan keragaman nilainya, tetapi baja yang dilebur dalam vakum juga menunjukkan penyebaran nilai batas lelah yang besar.



Gambar 3.4. Kumpulan Kurva-kurva *S-N*, Masing-masing Menggunakan 10 Buah Spesimen Baja Berasal Dari Batang Yang Sama.

Persoalan statistik dalam penentuan nilai batas lelah dengan teliti, diperumit oleh kenyataan bahwa tidak dapat mengukur nilai batas lelah tunggal untuk suatu spesimen. Hanya dapat menguji suatu spesimen pada tegangan tertentu, dan jika spesimennya gagal, maka tegangan uji tersebut berada diatas nilai batas lelah spesimen yang bersangkutan. Karena spesimen tidak dapat diuji kembali, meskipun tidak terjadi kerusakan, maka dibuat suatu pendekatan statistik batas lelah dengan cara menguji sekelompok spesimen-spesimen pada berbagai nilai tegangan, untuk mengetahui berapa banyak yang rusak pada setiap nilai

tegangan. Jadi didekat batas lelah, maka kelelahan tersebut merupakan hal yang "tidak pasti", dan hal yang dapat kita lakukan adalah meramalkan (*estimate*) perilaku spesimen dengan menggunakan jumlah spesimen yang banyak. Dua buah metode statistik yang digunakan untuk melakukan peramalan statistik disebut "analisa kebenaran" (*probit analysis*) dan "metode tangga" (*staircase method*). Uraian mengenai pemakaian kedua metode analisis penentuan batas lelah tersebut diatas telah ada. Terdapat beberapa penjelasan yang sangat baik mengenai persoalan ini yang telah diterbitkan[3].

3.5. LINGKUP DAN PEMAKAIAN

Hanya pada jenis struktur tertentu menghendaki pertimbangan kelelahan (*fatigue*) material. Umumnya yang mendapat fluktuasi tegangan seperti jembatan dan bangunan (kecuali bagian yang mendapat getaran) yang dapat mengalami kegagalan. Dan harus diestimasi bahwa tegangan-tegangan pada jembatan dan rel kereta api biasanya berulang sekitar 2 juta kali dalam satu periode yakni 50 tahun. Sebelum ada material, seperti baja kuat-tinggi (*high-strength steel*), material sangat mudah mengalami kegagalan lelah (*fatigue failure*). Di tahun 1979 atap-atap bangunan di kota Kansas rusak akibat pasaknya mengalami kegagalan lelah selama beberapa tahun setelah pembangunan.

Pada beberapa contoh, terlebih pada mesin yang bekerja cepat dan bagian yang mendapat getaran, akan terlihat fluktuasi tegangan yang

terjadi dan berulang selama beroperasinya mesin atau struktur tersebut. Piston motor pesawat terbang mendapat 20 juta kali tegangan berulang dalam 200 jam saat terbang. Terlebih lagi tegangan yang relatif tinggi terjadi, ketika motor dikehendaki menghasilkan tenaga maksimum dengan ukuran poros yang kecil untuk mengurangi beratnya. Tegangan yang bekerja pada poros suatu turbin, jika dioperasikan terus selama 10 tahun, akan berulang $16x10^9$ kali, dan tegangan pada daun berulang $250x10^9$ kali. Karena itu kelelahan harus dipertimbangkan dalam mendesain suatu bagian struktur yang mendapat tegangan siklus seperti; poros motor, pasak, pegas, gigi roda, daun turbin, bagian pesawat terbang dan mobil, bagian mesin uap atau mesin gas, rel kereta api, tali baja, as mobil, dan bagian-bagian mesin atau struktur lain yang mendapat beban berulang (*cyclic loading*).

Pengujian yang paling sederhana untuk menunjukkan batas lelah material adalah dengan pembebanan "flexural" yang berulang dengan spesimen "batang-putar" (*rotating-beam*), dimana tegangan maksimum ditentukan dengan rumus sederhana. Pengujian kelelahan flexural lainnya adalah dengan spesimen triangular yang dibebani sebagaimana batang kantilever (ASTM B 593 dan D 671).

Pada beberapa pengujian kelelahan, spesimen dibebani tarik secara aksial dengan tegangan berulang. Konstanta amplitude ditentukan oleh ASTM E 466.

Apabila digunakan spesimen bertakik, batas lelah material ditentukan oleh fungsi konsentrasi tegangan maksimum yang terbentuk. Dan memang pengujian dengan pembebanan berulang telah digunakan untuk mengevaluasi faktor konsentrasi tegangan (*stress-concentration factors*).

Walaupun pengaruh dari range tegangan pada batas lelah tidak diteliti, tetapi dengan keterangan yang cukup telah mampu mengestimasi batas lelah material akibat jenis pembebanan tertentu. Data hasil pengujian juga dapat memperkirakan kekuatan lelah (*fatigue strength*) material akibat pembebanan aksial dan akibat pembebanan puntir atau torsional. Dan tiap jenis material, memperlihatkan beberapa korelasi terhadap "kekuatan statis ultimat" (*static ultimate strength*).

Adanya ketidakpastian dalam analisa tegangan, mempersulit hasil uji lelah pada spesimen kecil yang diperlukan dalam mendesain bagian struktur yang rumit. Untuk memperoleh keterangan langsung mengenai kelakuan suatu bagian struktur akibat beban berulang, pengujian kelelahan telah dibuat untuk berbagai jenis dan ukuran spesimen, seperti as, poros, paku keling, pasak, dan sambungan las. Pengujian kelelahan umumnya tidak dipakai untuk uji pemeriksaan (*inspection test*) atau uji kendali mutu (*quality-control test*) material.

Seperti penjelasan sebelumnya, selama umur kerja normal (*normal service life*) struktur tidak akan berubah jumlah siklus tegangannya dimana dapat mengurangi kekuatan material terhadap batas lelah. Untuk

mendesain struktur berdasarkan batas lelah memerlukan biaya yang cukup besar. Hubungannya dalam menentukan pengaruh tegangan yang bekerja, dan kemungkinan digunakan pengujian lelah siklus-rendah (*low-cycle fatigue test*). Dan pengamatan umumnya pada kelakuan tegangan-regangan setelah deformasi plastis (ASTM E 606).

Hal yang berkaitan dengan pengujian kelelahan dan hasil analisa statistik diberikan dalam ASTM E 206, dan untuk pengujian siklus-rendah dalam ASTM E 513. Serta semua pengujian kelelahan dapat dipakai pada temperatur rendah atau tinggi, seperti halnya pengujian pada temperatur normal atau temperatur ruang (*room temperatur*)[4].

3.6. HUBUNGAN SIFAT LELAH

Hubungan antara batas lelah dengan sifat mekanik yang lain perlu dikaji, sebab biaya yang terlibat dan waktu yang diperlukan untuk menentukan batas lelah cukup besar. Hal ini dilakukan karena tidak terdapat hubungan langsung antara batas lelah dengan sifat fisik. Kekuatan elastis (*elastic strength*), kekuatan maksimum (*ultimate strength*), dan keuletan (*ductility*) terlihat mempengaruhi kekuatan lelah (*fatigue strength*). Kegagalan lelah (*fatigue failure*) merupakan kelanjutan masalah kepecahan (*fracture*) pada material. Hal ini yang mendasari dilakukannya pendekatan korelasi antara batas lelah dengan kekuatan tarik (*tensile strength*), daripada korelasi antara batas lelah dengan sifat fisik material[5].

[1] George E. Dieter, "Mechanical Metallurgy", edisi SI Metric, part 3, chap. 12, hal. 375-376, McGraw-Hill Book Company, London, 1988.

[2] George E. Dieter, "op cit", hal. 378-380.

[3] Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (*S-N*) and Strain Life (ε-*N*) Fatigue Data, ASTM Designation E 739, "1994 Annual Book of ASTM Standards", vol. 03.01, hal. 81-100, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.

[4] H. E. Davis, G. E. Troxell, dan G. F. W. Hauck, "The Testing of Engineering Materials", edisi ke-4, part 2, chap. 14, hal. 247-248, McGraw-Hill International Book Company, New York, 1982.

[5] Metals Engineering Design (Mechanical Properties by Thomas J. Dolan), "ASME Handbook", edisi ke-2, sec. 7.4, hal. 208, McGraw-Hill Book Company, New York, 1965; H. E. Davis, G. E. Troxell, dan G. F. W. Hauck, "op cit", hal. 259.

BAB IV

TENSILE DAN BAJA KARBON

BAB IV

TENSILE DAN BAJA KARBON

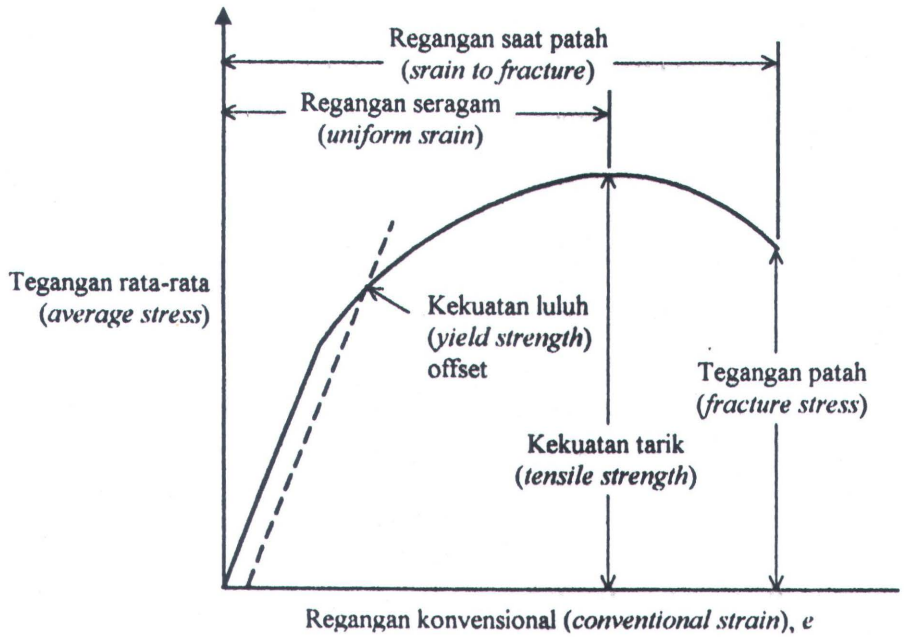
4.1. KEKUATAN TARIK (*TENSILE STRENGTH*)

Kekuatan tarik (*tensile strength*), atau kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength, UTS*), adalah beban maksimum dibagi luas penampang lintang awal benda uji atau spesimen.

$$\sigma_u = P_{maks} / A_0$$

Tegangan tarik adalah nilai yang paling sering dituliskan sebagai hasil suatu uji tarik; tetapi pada kenyataannya nilai tersebut kurang bersifat mendasar dalam kaitannya dengan kekuatan bahan. Untuk material yang liat, kekuatan tariknya harus dikaitkan dengan beban maksimum, dimana material dapat menahan beban sesumbu (*uniaxial*) untuk keadaan yang sangat terbatas. Akan ditunjukkan bahwa nilai tersebut kaitannya dengan kekuatan material, kecil sekali kegunaannya untuk tegangan yang lebih kompleks, yakni yang biasanya ditemui. Untuk beberapa lama, telah menjadi kebiasaan mendasarkan kekuatan struktur pada kekuatan tarik, dikurangi dengan faktor keamanan yang sesuai. Kecenderungan yang banyak ditemui adalah menggunakan pendekatan yang lebih rasional yakni mendasarkan rancangan statis material liat pada kekuatan luluhnya (*yield strength*). Akan tetapi, karena jauh lebih praktis menggunakan kekuatan tarik untuk menentukan kekuatan material maka metode ini lebih banyak dikenal, dan merupakan metode identifikasi material yang sangat

berguna, mirip dengan kegunaan komposisi kimia untuk mengenali logam atau material. Selanjutnya, karena kekuatan tarik mudah ditentukan dan merupakan sifat yang mudah dihasilkan kembali (*reproducible*). Kekuatan tersebut berguna untuk keperluan spesifikasi dan kontrol kualitas material. Korelasi empiris yang diperluas antara kekuatan tarik dan sifat-sifat material, misalnya kekerasan dan kekuatan lelah, sering dipergunakan. Untuk material getas, kekuatan tarik merupakan kriteria yang tepat untuk keperluan perancangan[1].



Gambar 4.1. Kurva Tegangan-Regangan (*Stress-Strain*) Rekayasa.

Kekuatan tarik yang dihasilkan dari pengujian spesimen diplotkan dalam kurva tegangan-regangan (*stress-strain*). Bentuk kurva yang umum dapat dilihat pada Gambar 4.1.

4.2. KURVA TEGANGAN-REGANGAN REKAYASA

Pengujian tarik rekayasa banyak dilakukan untuk melengkapi informasi rancangan dasar kekuatan suatu material dan sebagai data pendukung bagi spesifikasi material. Pada uji tarik, spesimen diberi beban gaya tarik sesumbu yang bertambah besar secara kontinu, bersamaan dengan itu dilakukan pengamatan mengenai perpanjangan yang dialami spesimen[2]. Kurva tegangan-regangan rekayasa (*engineering stress-strain curve*) dibuat dari pengukuran perpanjangan spesimen (Gambar 4.1).

Data yang diperoleh dari uji tarik pada umumnya digambarkan sebagai diagram tegangan-regangan. Gambar 4.1 memperlihatkan sebuah garis lengkung tegangan-regangan untuk logam seperti aluminium atau tembaga. Bagian awal linier garis lengkung merupakan daerah elastis dimana Hukum Hook ditaati. Titik dimana kurva mulai melengkung ialah batas elastis yang didefinisikan sebagai tegangan terbesar yang dapat ditahan oleh material tanpa mengalami regangan permanen apabila benda ditiadakan. Penentuan batas elastis cukup rumit, bukan percobaan rutin, dan tergantung dari kepekaan instrumen pengukur regangan. Itulah sebabnya batas elastis sering diganti dengan "batas proporsional" atau "batas utama" (*proportional limit*). Batas proporsional ialah tegangan dimana garis lengkung tegangan-regangan menyimpang dari kelinierannya. Kemiringan garis lengkung tegangan-regangan di daerah ini ialah modulus elastisitas.

Untuk keperluan rekayasa, batas perilaku elastis yang berguna adalah "kekuatan luluh" (*yield strength*). Kekuatan luluh didefinisikan sebagai tegangan yang akan menghasilkan deformasi permanen dalam jumlah kecil yang pada umumnya sama dengan regangan sebesar 0.002. Dalam Gambar 4.1 ditunjukkan titik regangan permanen ini, atau offset. Deformasi plastis mulai kalau batas elastis dilampaui. Kalau deformasi plastis spesimen bertambah besar, material menjadi lebih kuat (pengerasan-regang atau *strain hardening*), sehingga beban yang diperlukan untuk memanjangkan spesimen bertambah besar pada peregangan selanjutnya. Akhirnya beban mencapai suatu harga maksimum. Beban maksimum yang dibagi oleh luas asli spesimen ialah kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*). Untuk material ulet, garis tengah spesimen mulai mengecil dengan cepat melampaui beban maksimum, sehingga beban yang diperlukan untuk meneruskan deformasi turun sampai spesimen patah (*fracture*), dan tegangan akibat beban tersebut ialah tegangan patah (*fracture stress*). Karena tegangan rata-rata didasarkan pada luas asli spesimen, maka tegangan rata-rata pun turun dari beban maksimum sampai patah.

Bentuk dan besaran pada kurva tegangan-regangan suatu material tergantung pada komposisi, perilaku panas, deformasi plastis yang pernah dialami, laju regangan, suhu, dan keadaan tegangan yang menentukan selama pengujian. Parameter-parameter yang digunakan untuk menggambarkan kurva tegangan-regangan material adalah kekuatan tarik

(*tensile strength*), kekuatan luluh (*yield strength*) atau titik luluh (*yield point*), persen perpanjangan (*percent elongation*), dan pengurangan luas (*reduction of area*). Dua parameter pertama adalah parameter kekuatan, sedangkan dua yang terakhir menyatakan keliatan bahan.

4.3. KLASIFIKASI BAJA KARBON

Baja karbon adalah paduan antara besi (*iron*) dan karbon dengan sedikit silikon (Si), mangan (Mn), pospor (P), sulfur (S), dan tembaga (Cu). Sifat baja karbon sangat tergantung pada kadar karbon, karena itu baja ini dikelompokkan berdasarkan kadar karbonnya. Baja karbon rendah (*low carbon steel*) adalah baja dengan kadar karbon kurang dari 0.30 persen, baja karbon sedang (*medium carbon steel*) mengandung 0.30 sampai 0.45 persen karbon, dan baja karbon tinggi (*high carbon steel*) berisi karbon antara 0.45 sampai 1.75 persen karbon[3].

Baja karbon rendah yang juga disebut baja lunak (*mild steel*) banyak sekali digunakan untuk konstruksi umum. Baja karbon ini dibagi lagi dalam baja kil, baja semi-kil, dan baja rim, dimana penamaannya didasarkan atas persyaratan deoksidasi, cara pembekuan, dan distribusi rongga atau lubang halus didalam ingot.

Bila kadar karbon naik, kekuatan dan kekerasannya juga bertambah tinggi tetapi perpanjangannya menurun. Klasifikasi dari baja karbon dapat dilihat dalam Tabel 4.1.

Jenis dan Kelas	Kadar karbon (%)	Kekuatan luluh (Kg/mm^2)	Kekuatan tarik (Kg/mm^2)	Perpan-jangan (%)	Kekera-san Brinell	Penggunaan
*Baja karbon rendah:						
Baja lunak khusus	0.08	18-28	32-36	40-30	95-100	Pelat tipis
Baja sangat lunak	0.08-0.12	20-29	36-42	40-30	80-120	Batang, kawat
Baja lunak	0.12-0.20	22-30	38-48	36-24	100-130	Konstruksi -
Baja setengah lunak	0.20-0.30	24-36	44-55	32-22	112-145	umum
*Baja karbon sedang:						
Baja setengah keras	0.30-0.40	30-40	50-60	30-17	140-170	$Alat^2$ mesin
Baja keras	0.40-0.50	34-46	58-70	26-14	160-200	Perkakas
*Baja karbon tinggi:						
Baja keras	0.40-0.50	34-46	58-70	26-14	160-200	Perkakas
Baja sangat keras	0.50-0.80	36-47	65-100	20-11	180-235	Rel, pegas, & kawat piano

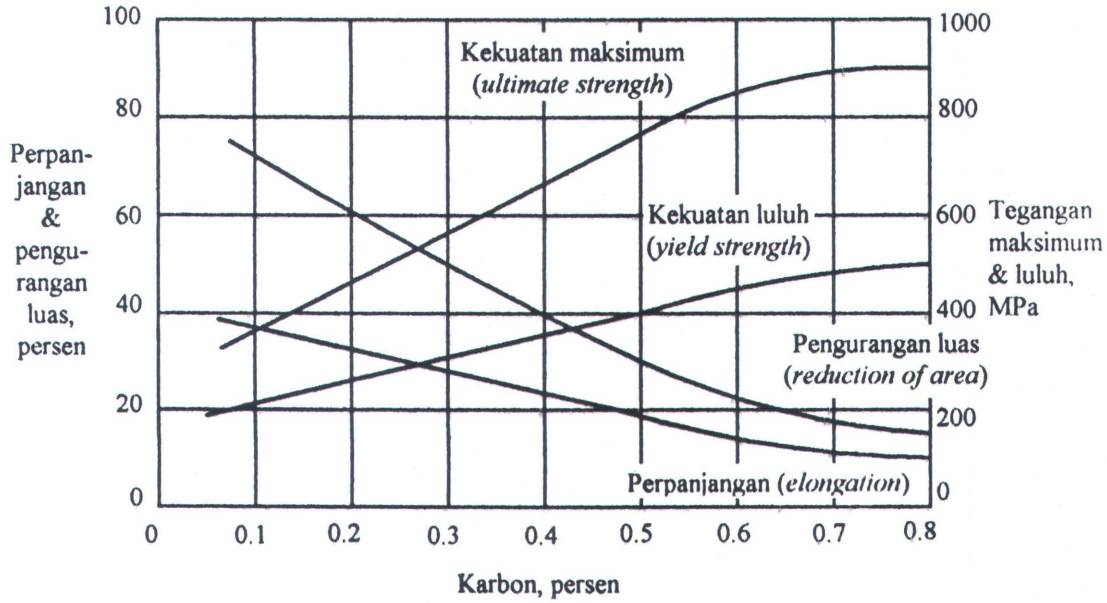
Tabel 4.1. Klasifikasi Baja Karbon.

4.4. SIFAT BAJA KARBON

Kualitas dan sifat mekanik baja ditentukan oleh (1) metode produksi atau pembuatan, (2) komposisi, (3) kerja mekanik atau mesin, dan (4) perlakuan panas (*heat-treatment*).

Kandungan karbon (*carbon content*) dipakai sebagai kendali atau kontrol dalam pemilihan dan mengatur sifat-sifat dari dua jenis baja yang disebut baja karbon murni (*plain carbon steel*) dan baja paduan (*alloy steel*). Kandungan karbon merupakan unsur paling penting yang mempengaruhi kekuatan (*strength*), kekerasan (*hardness*), dan keuletan (*ductility*) material atau logam. Dimulai dengan besi murni (*pure iron*) yang lunak dan ulet, penambahan karbon yang bertujuan untuk menormal-dinginkan baja, menaikkan kekerasan dan kekuatan serta menurunkan

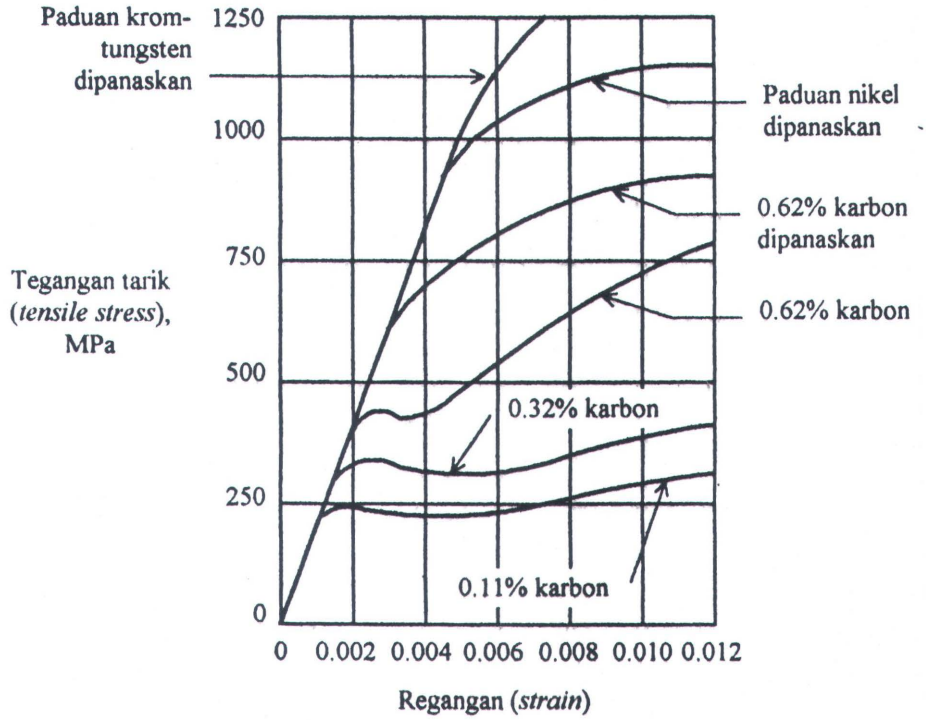
keuletan. Untuk setiap 0.10 persen penambahan karbon hingga tercapai komposisi "eutektoid" (0.84 persen karbon), batas proporsional yang timbul mendekati 40 MPa, kekuatan tarik (*tensile strength*) naik sekitar 70 MPa, dan perpanjangan (*elongation*) berkurang sekitar 5 persen, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. Di atas titik eutektoid selama penambahan karbon menghasilkan kenaikan kekerasan dan kekuatan, tetapi terjadi penurunan secara cepat terhadap sifat getas (*brittleness*).



Gambar 4.2. Pengaruh Karbon Pada Sifat Tarik Baja Karbon.

Titik luluh (*yield point*), seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3, dan kekuatan luluh yang diukur dengan metode offset, bertambah dengan kenaikan kandungan karbon. Tetapi hanya pada baja dengan kandungan karbon di bawah 0.40 terdapat perbedaan yang jelas pada titik luluh.

Karbon tidak terlihat berpengaruh pada kekakuan (*stiffness*) baja. Modulus elastisitas digunakan harga yang sama (200 GPa) untuk seluruh tingkat atau grade baja, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3, tetapi untuk besi tempa (*wrought iron*) sedikit lebih rendah (185 GPa).



Gambar 4.3. Diagram Tegangan-Regangan (*Stress-Strain Diagrams*) Untuk Bermacam Baja.

Secara umum, kualitas terbaik baja karbon tinggi atau baja paduan tidak pernah tercapai secara mudah dengan penambahan karbon baja. Kecuali dengan perlakuan panas (*heat-treatment*) sehingga diinginkan kualitas potensial tercapai. Proses pengerjaan panas (*hot-working*) membebaskan kondisi regangan dan membentuk struktur butiran yang baik, menghasilkan baja dengan kekuatan luluh dan kekuatan tarik yang

lebih tinggi serta cenderung lebih ulet dari sebelumnya. Pengerjaan dingin (*cold-working*) menghasilkan kekuatan luluh, kekuatan tarik, dan kekerasan yang lebih tinggi daripada pengerjaan panas, tetapi keplastisan (*plasticity*) dan kemampuan dibentuk (*formability*) menurun disebabkan oleh turunnya keuletan[4].

Berbagai standar seperti ASTM, menyebutkan satu persatu sifat mekanik minimum atau maksimum. Harga tersebut sama seperti keperluan kimia, umumnya berbeda dengan standar utama yang tergantung pada bentuk (profil, pelat, atau batang), ukuran atau ketebalan, dan tingkatan atau grade. Untuk mencapai harga yang tepat standar harus diperhatikan.

Jenis ASTM standar untuk baja struktur mengikuti; A 36 baja dasar untuk konstruksi dengan titik luluh sekitar 250 MPa; A 283 baja karbon untuk pelat yang kekuatan dan biayanya relatif rendah; A 441 baja paduan rendah kekuatan tinggi mengandung vanadium agar kuat dan mampu dilas (*weldability*) serta tembaga agar terlindung dari korosi; A 242 baja paduan rendah kekuatan tinggi yang anti cuaca dimana dapat melindungi sendiri tetapi pengelasannya sulit; A 514 jenis baja dengan titik luluh sampai 700 MPa digunakan untuk pelat dimana kekuatan tersebut tercapai dengan perlakuan panas.

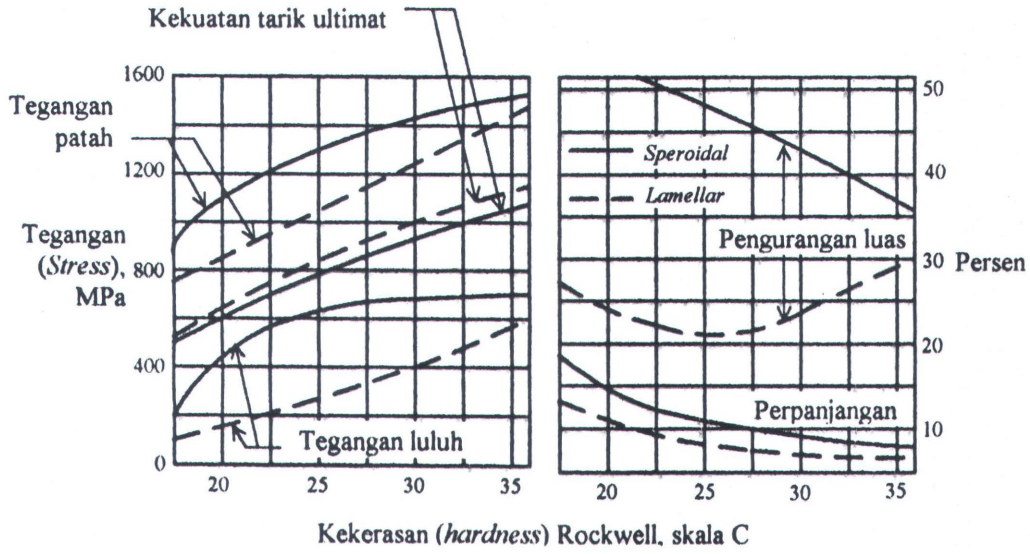
4.5. SIFAT TARIK BAJA

Sifat-sifat tarik baja yang dianil (*annealed*) dan dinormalkan (*normalized*), dikontrol oleh aliran dan karakteristik perpatahan ferit, serta

oleh besar, bentuk, dan distribusi sementit. Kekuatan ferit tergantung pada besarnya elemen paduan pada kelarutan padat dan ukuran butiran ferit. Kandungan karbon (*carbon content*) mempunyai pengaruh yang sangat besar, karena kandungan tersebut mengontrol jumlah sementit, baik sebagai perlit ataupun speroidit. Kekuatan bertambah besar dan keliatannya berkurang apabila kandungan karbonnya bertambah. Hal ini disebabkan pertambahan karbon akan memperbesar jumlah sementit pada struktur mikro. Baja yang dinormalkan akan mempunyai kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan baja yang dilunakkan, karena laju pendinginan yang lebih cepat yang digunakan pada proses penormalan menyebabkan transformasi ke perlit terjadi pada temperatur yang lebih rendah, sehingga dihasilkan perlit yang lebih halus. Perbedaan dalam sifat-sifat tarik yang disebabkan oleh pembentukkan partikel sementit ditunjukkan pada Gambar 4.4, dimana sifat-sifat tarik baja dari struktur bentuk bola (*speroidal*) diperbandingkan dengan struktur bentuk perlit (*lamellar*) untuk baja dengan kandungan karbon yang sama. Terdapat suatu hubungan empiris antara laju pendinginan dan komposisi untuk menentukkan sifat-sifat tarik baja dengan struktur perlit.

Salah satu cara terbaik untuk mempertinggi kekuatan baja yang dilunakkan adalah dengan cara pengerjaan dingin (*cold-working*). Kombinasi terbaik antara kekuatan dan keuletan diperoleh pada baja yang telah dicelup (*quenched*) untuk memperoleh struktur martensit seluruhnya dan kemudian ditemper (*tempered*). Kriteria terbaik untuk

memperbandingkan sifat tarik baja yang dicelup dan ditemper, adalah berdasar pada struktur celup yang 100% martensit. Akan tetapi, untuk memperoleh struktur yang seluruhnya martensit dalam banyak kasus, secara komersial tidak praktis. Karena pentingnya pencapaian struktur martensit sempurna, maka sangat dibutuhkan struktur baja yang mempunyai kemampukerasan yang memadai. "Kemampukerasan" (*hardenability*) adalah sifat baja yang menentukan kedalaman dan distribusi kekerasan yang dihasilkan oleh proses pencelupan.



Gambar 4.4. Sifat-sifat Tarik Perlit dan Speroidit Pada Baja Eutektoid.

Kemampukerasan harus dibedakan dengan "kekerasan" (*hardness*), yakni sifat material yang menyatakan ketahanan terhadap deformasi atau lekukan. Kekerasan berkaitan dengan kekuatan, sedangkan kemampukerasan berkaitan dengan karakteristik transformasi baja. Kemampukerasan dapat diperbesar dengan cara mengubah kinetika

transformasi yakni melalui penambahan elemen-elemen paduan, sedangkan kekerasan baja untuk suatu kinetika transformasi tertentu, terutama dikontrol oleh kandungan karbonnya[5].

[1] George E. Dieter, "Mechanical Metallurgy", edisi SI Metric, part 3, chap. 8, hal. 277-278, McGraw-Hill, Inc., London, 1988.

[2] H. E. Davis, G. E. Troxell, dan G. F. W. Hauck, "The Testing of Engineering Materials", edisi ke-4, part 1-3, McGraw-Hill International Book Company, New York, 1982; Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric], ASTM Designation E 8M, "1994 Annual Book of ASTM Standards", vol. 03.01, hal. 81-100, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.

[3] Harsono Wiryosumarto, dan Toshie Okumura, "Teknologi Pengelasan Logam", bab 4, hal. 89-90, Pradnya Paramita, Jakarta, 1985.

[4] H. E. Davis, G. E. Troxell, dan G. F. W. Hauck, "op cit", chap. 17, hal. 313-314.

[5] George E. Dieter, "op cit", hal. 316-319.

BAB V

ANALISA DAN PEMBAHASAN

BAB V

ANALISA DAN PEMBAHASAN

5.1. METODE

Berdasarkan penjelasan pada bab sebelumnya, disebutkan bahwa proses penguatan pada beberapa jenis material dapat menurunkan kekuatan *impact*, perlakuan metalurgi pada material menimbulkan kekuatan tarik (*tensile*) yang lebih tinggi, tetapi menurunkan kekuatan *impact* [Dieter, 1988 dan Dalton, 1995]. Dijelaskan pula bahwa terdapat hubungan antara batas lelah dengan sifat mekanik yang lain, dimana kekuatan tarik maksimum, elastisitas dan keuletan mempengaruhi kekuatan lelah (*fatigue*) material [Dolan, 1965; Davis dkk, 1982]. Hal tersebut di atas mendasari dilakukannya pendekatan korelasi antara kekuatan *impact* dan *fatigue* suatu material berdasarkan kekuatan tarik (*tensile*).

Mengacu pada Batasan Masalah yang telah dijelaskan pada Bab Pendahuluan, bahwa tidak terdapat data berpasangan (*paired*) antara harga *impact* dan *fatigue* disetiap data atau sertifikat material, dan harga *tensile* sebagai parameter bantu yang menghubungkan korelasi kekuatan *impact* dan *fatigue* material, maka masing-masing dapat ditulis dalam suatu fungsi berikut ini:

$$F = f_1 (T) \qquad \ldots(1)$$

$$I = f_2 (T) \quad \ldots(2)$$

dimana F, I, dan T berturut-turut adalah variabel *fatigue*, *impact*, dan *tensile*, yang selanjutnya dikenal sebagai fungsi sebenarnya dari data yang diamati.

Karena data (sampel) yang diambil adalah sekunder, seperti yang dijelaskan dalam Metodologi pada Bab Pendahuluan, maka tidak diperlukan uji kecukupan data. Dengan mengasumsikan bahwa data tersebut normal dan telah diuji, maka dapat mewakili observasi populasi yang ada sehingga dapat ditarik pernyataan korelasi yang induktif. Untuk keseragaman data digunakan satuan Mega-Pascal (MPa) untuk *fatigue* dan *tensile*, serta Joule (J) untuk *impact*; sedang untuk mengubah dari satuan lain digunakan faktor konversi, yang dapat dilihat pada Lampiran C.

Dengan menggunakan "Analisa Regresi Linier Sederhana (Bivariate)" dan metode "Kuadrat Terkecil Biasa (*Ordinary Least Squares*, OLS)", didapat model persamaan:

$$\hat{Y} = \alpha + \beta X \quad \ldots(3)$$

dengan fungsi sebenarnya dari data yang diamati, yang mengandung kesalahan atau residual:

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + e_i \quad \ldots(4)$$

dimana X adalah variabel bebas (*independent*) yang juga disebut variabel penduga atau penaksir. Y dan $\hat{Y}$ adalah variabel tak bebas (*dependent*) yang masing-masing merupakan respons dan taksiran (*estimate*) dari X. α dan β adalah parameter yang tak diketahui (besarnya) tetapi tetap (*fixed*),

dikenal sebagai koefisien regresi; α dan β juga secara berturut-turut dikenal sebagai konstanta (*intersep*) dan koefisien kemiringan (*slope*), dan i adalah bilangan asli. Sedangkan e merupakan kesalahan pengganggu (*error terms*) yang mengganggu hubungan linier sebenarnya, hal ini disebut variabel acak yang tak teramati (*unobservable random variables*) yang diasumsikan bebas (*independent*) dan terdistribusi normal dengan rata-rata nol dan varians yang tak diketahui (σ^2)[1].

Dari persamaan (1) & (2) berdasarkan model (3) & (4), disusun fungsi penduga atau penaksir (*estimator*) *fatigue* dan *impact*, serta fungsi sebenarnya berturut-turut sebagai berikut:

$$\hat{F} = a_0 + b_0 T \quad \ldots(4)$$

$$\hat{I} = a_1 + b_1 T \quad \ldots(5)$$

$$F_i = a_0 + b_0 T_i + e \quad \ldots(6)$$

$$I_i = a_1 + b_1 T_i + e \quad \ldots(7)$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan koefisien regresi linier sederhana dengan metode kuadrat terkecil biasa dari rumus dan tabel berdasarkan prinsip-prinsip analisa statistik[2].

5.2. INTERPRETASI

Dari sekian banyak program aplikasi komputer digunakan SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*) untuk menganalisa data secara statistik. Program ini di bawah sistem operasi Windows yang menawarkan banyak kemudahan dalam pengoperasiannya (*user friendly*),

dan fleksibilitas yang dimilikinya menyebabkan berbagai problem analisa data diluar ilmu sosial juga dapat diolah dengan baik, termasuk permasalahan rekayasa teknik atau engineering[3].

Berikut ini adalah interpretasi dari hasil analisa statistik dan perhitungan regresi melalui *running-out* program SPSS yang terdapat pada Lampiran B.

5.2.1. Korelasi *Tensile* dengan *Fatigue*

Taksiran model yang dapat dibuat dari *tensile* dan *fatigue* berdasarkan 20 data (N) yang dikumpulkan (lihat Lampiran A) adalah:

$$\hat{F} = -10.181 + 0.475\,T \qquad \ldots(8)$$

Nilai a_0 pada model tersebut memberikan arti bila harga T sama dengan 0 (nol) maka diharapkan harga $\hat{F}$ akan sama dengan -10.181, sedangkan nilai b_0 dapat diterangkan jika harga T naik satu satuan (1 unit) maka diharapkan harga $\hat{F}$ akan naik sebesar 0.475 kali.

Ukuran keeratan atau derajat hubungan linier antara dua variabel yaitu variabel bebas (*independent*) dan variabel tak bebas (*dependent*) dapat diterangkan melalui koefisien korelasi Pearson (R), dimana koefisien ini mempunyai harga antara -1 dan 1 ($-1 < r < 1$). Pada model ini koefisien korelasi adalah 0.972 menunjukkan keeratan hubungan linier antara variabel bebas T dan variabel tak bebas F cukup tinggi, dan tanda positif menunjukkan arah hubungan T dan F berkorelasi positif, dimana semakin besar T maka F semakin besar dan begitu sebaliknya[4].

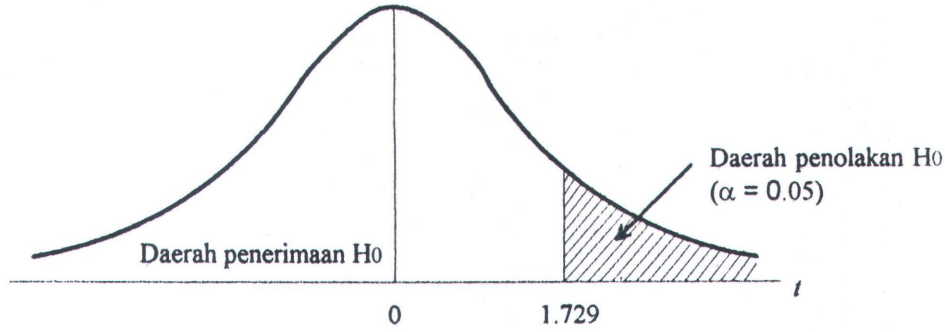
Ukuran kebaikan suai (*goodness of fit*) garis regresi yang dicocokkan terhadap sekumpulan data, untuk mengetahui sebaik mana garis regresi mencocokkan data dikenal sebagai koefisien determinasi (R^2). Harga R^2 adalah $0 < R^2 < 1$. Dari model tersebut didapat koefisien determinasi sebesar 0.944, yang artinya bahwa dari data yang dianalisa maka sumbangan atau proporsi T terhadap variasi (naik-turunnya) F adalah sebesar 94.4%, dan berarti pula keragaman data yang dapat masuk dalam model adalah sebesar 94.4%. Sedangkan sisanya sebesar 5.6% disebabkan faktor lain yang tidak tertangkap oleh model.

Selanjutnya dibuat hipotesa null ($H_0 : \beta = 0$), dan hipotesa alternatif ($H_1 : \beta > 0$). Kemudian diuji hipotesa tersebut, dimana pada hipotesa null (nilai $\beta = 0$) yang berarti nilai dari β tersebut tidak dapat dipakai sebagai penduga atau penaksir yang berarti. Sedangkan untuk pengujian hipotesa alternatif (nilai $\beta > 0$), artinya nilai β dapat dipakai sebagai penduga yang berarti dengan nilai positif atau negatif. Pengujian hipotesa tersebut digunakan tingkat keberartian untuk uji satu sisi/ekor (*level of significant for one-tailed test*) sebesar $\alpha = 5\%$ (0.05) dengan derajat kebebasan (*degree of freedom*) sebesar df = n-2. Dalam pengujian tersebut nilai *t* observasi (*t* hitung) dibandingkan dengan nilai *t* tabel (Tabel Distribusi *t* Student), yang dapat dilihat pada Lampiran C. Secara ringkas uji *t* (*t test*) model T dan F di atas dapat ditulis:

$H_0 : \beta = 0$; df = 18

$H_1 : \beta > 0$ ($b_o = 0.475$) ; $\alpha = 5\%$ (0.05)

t observasi (t hitung) = 17.476 ; t tabel : t (0.05)(18) = 1.734



Gambar 5.1. Kurva Distribusi *t* Student.

Dengan *t* observasi > *t* tabel, maka H_o ditolak atau dengan kata lain H_1 diterima yang menyatakan $\beta > 0$ (*significantly different from zero*). Hal ini berarti bahwa nilai $b_o = 0.475$ dapat dipakai sebagai koefisien penduga atau penaksir dari persamaan regresi yang sangat berarti (*significant*), dengan nilai positif.

Berikutnya menghitung *F* observasi yang kemudian hasilnya dibandingkan dengan *F* tabel (Tabel Distribusi *F*), yang dapat dilihat pada Lampiran C. Uji *F* (*F test*) ini sering disebut Analisa Varians (*Analysis of Variance*, ANOVA), yang berarti analisa sumber-sumber variasi yang diukur dengan varians. Jumlah variasi dari variabel tak bebas (*dependent*) terdiri dari dua sumber, yaitu ESS (*Explained Sum of Squares*) yang berasal dari regresi, merupakan sumbangan yang disebabkan oleh variabel bebas (*independent*); dan RSS (*Residual Sum of Squares*) yang

berasal dari kesalahan penggangu atau residual. ESS adalah jumlah kuadrat yang dapat diterangkan, maksud ialah bahwa sumber itu jelas yaitu pengaruh linier (*linear effect*) dari variabel bebas. RSS adalah jumlah kuadrat yang tak dapat diterangkan (*unexplained sum of square*) oleh karena sumber variasi memang tidak begitu jelas, sebab kesalahan pengganggu (e) meliputi faktor-faktor yang mempengaruhi variabel tak bebas akan tetapi tidak dimasukkan dalam persamaan regresi linier. Adapun rumus dari *F* observasi adalah:

F observasi = (t observasi)^2 ; F tabel = (t tabel)^2

Dengan hipotesa null ($H_0 : \beta = 0$) yang berarti variabel bebas tidak mempunyai pengaruh linier (*linear influence*) terhadap variabel tak bebas, dengan demikian variasi (naik-turunnya) variabel tak bebas hanya dapat diterangkan oleh kesalahan pengganggu (e). Untuk hipotesa alternatif ($H_1 : \beta > 0$), artinya sebagian variasi dari variabel tak bebas merupakan sumbangan dari variabel bebas dan mempunyai pengaruh linier, serta nilai β diharapkan positif atau negatif. Uji *F* untuk model T dan F di atas didapat:

$H_0 : \beta = 0$; df = 1 dan (n - 1) = 19

$H_1 : \beta > 0$ ($b_0 = 0.475$) ; $\alpha = 5\%$ (0.05)

F observasi = 305.426 ; F tabel = 4.38

Dengan *F* observasi > *F* tabel, maka H_0 ditolak atau dengan tingkat keberartian (*significant levels*) sebesar 5%, yang berarti bahwa sebagian

variasi (naik-turunnya) dari F merupakan sumbangan dari T dan mempunyai pengaruh linier dengan nilai b_0 positif.

5.2.2. Korelasi *Tensile* dengan *Impact*

Analog dengan interpretasi sebelumnya, taksiran model yang dapat dibuat dari *tensile* dan *impact* berdasarkan 45 data (N) yang dikumpulkan (lihat Lampiran A) adalah:

$$\hat{I} = 74.618 - 0.0598\ T \qquad \ldots(9)$$

Nilai a_1 pada model tersebut memberikan arti bila harga T sama dengan 0 (nol) maka diharapkan harga $\hat{I}$ akan sama dengan 74.618, sedangkan nilai b_1 dapat diterangkan jika harga T naik satu satuan (1 unit) maka diharapkan harga $\hat{I}$ akan naik sebesar -0.0598 kali, yang berarti $\hat{I}$ akan turun.

Koefisien determinasi sebesar 0.265, yang artinya bahwa dari data yang dianalisa maka sumbangan atau proporsi T terhadap variasi (naik-turunnya) I cukup rendah dibanding korelasi sebelumnya, berarti pula keragaman data yang dapat masuk dalam model hanya sebesar 26.5%. Nilai yang kecil ini dapat juga berarti cukup banyak data yang ada tidak masuk ke dalam model.

Hal demikian akan lebih baik jika dilanjutkan dengan melihat koefisien korelasi antara T dan I, dimana koefisien korelasi Pearson (R) yang terjadi bertanda negatif yakni sebesar -0.515. Tanda negatif menunjukkan arah hubungan T dan I berkorelasi negatif, dimana semakin

besar T maka I semakin rendah dan begitu sebaliknya, semakin kecil T maka I akan semakin naik.

Nilai *t* observasi (*t* hitung) pada uji *t* student adalah -3.941, terlihat berharga negatif. Dan secara langsung dapat dinyatakan bahwa *t* observasi < *t* tabel, maka H_0 diterima berarti bahwa b_1 sebagai koefisien penduga atau penaksir dari persamaan regresi secara statistik tidak penting (*statistically insignificant*).

Namun yang perlu diperhatikan bahwa pada uji serentak, model ini sudah signifikan, dimana uji *F* (*F test*)-nya didapat:

$H_0 : \beta_1 = 0$; df = 1 dan (n-1) = 44

$H_1 : \beta_1 < 0$ ($b_1 = -0.0598$) ; α = 5% (0.05)

F observasi = 15.531 ; 4.00 < *F* tabel < 4.08

Dengan *F* observasi > *F* tabel, maka H_0 ditolak atau dengan tingkat keberartian (*significant levels*) sebesar 5%, yang berarti bahwa sebagian variasi (naik-turunnya) dari I merupakan sumbangan dari T dan mempunyai pengaruh linier dengan nilai b_1 negatif. Dalam hal ini, koefisien b_1 masuk dalam model, tetapi variansinya tidak minimum.

5.3. VERIFIKASI

Sesuai Metodologi pada Bab Pendahuluan, untuk memeriksa serta mencocokan hasil analisa korelasi yang telah didapat, maka dilakukan pengujian material. Pengujian *impact* beberapa jenis baja karbon (SS 400, A 36, SA 285 GR. C, dan SA 516 GR.70) dengan standar ASTM dan

pengujian *fatigue* dari hasil penelitian Ir. Samudro, M.Eng. (Ilmuwan dan Praktisi), yang dapat dilihat pada Lampiran A.

Hal yang sama dilakukan, yaitu menghitung koefisien regresi linier sederhana dengan metode kuadrat terkecil biasa dari rumus dan tabel berdasarkan prinsip-prinsip analisa statistik. Dengan menggunakan program SPSS, dan menginterpretasikan hasil analisa yang diperoleh sebagai verifikasi atas hasil analisa sebelumnya, selanjutnya diamati apakah hasil analisa tersebut memenuhi kriteria yang diinginkan, sehingga memperkuat kesimpulan yang telah diperoleh sebelumnya.

5.3.1. Verifikasi *Tensile* dengan *Fatigue*

Taksiran model yang dapat dibuat dari *tensile* dan *fatigue* berdasarkan 20 data sebelumnya ditambah 11 data sebagai verifikasi (lihat Lampiran A) menjadi 31 data (N) adalah:

$$\hat{F}_v = 4.571 + 0.471\ T \qquad \ldots(10)$$

Nilai a_0 dan b_0 pada model tersebut sama dengan 4.571 dan 0.471.

Dengan koefisien korelasi Pearson (R) adalah 0.957, menunjukkan keeratan hubungan linier antara variabel bebas T dan variabel tak bebas F_v cukup tinggi dan berkorelasi positif, dimana semakin besar T maka F_v semakin besar dan begitu sebaliknya.

Koefisien determinasi sebesar 0.916, yang artinya bahwa dari data yang dianalisa maka sumbangan atau proporsi T terhadap variasi (naik-turunnya) F_v adalah sebesar 91.6%, dan berarti pula keragaman data yang

dapat masuk dalam model adalah sebesar 91.6%. Sedangkan sisanya sebesar 8.4% disebabkan faktor lain yang tidak tertangkap oleh model.

Uji *t* model T dan F_v di atas dapat ditulis:

$H_0 : \beta = 0$; df = 29

$H_1 : \beta > 0$ ($b_0 = 0.471$) ; α = 5% (0.05)

t observasi (*t* hitung) = 17.756 ; *t* tabel : *t* (0.05)(29) = 1.699

Dengan *t* observasi > *t* tabel, maka H_0 ditolak dan H_1 diterima yang berarti nilai $b_0 = 0.471$ dapat dipakai sebagai koefisien penduga atau penaksir dari persamaan regresi yang sangat berarti (*significant*), dengan nilai positif.

Uji *F* untuk model T dan F_v di atas didapat:

$H_0 : \beta = 0$; df = 1 dan (n - 1) = 30

$H_1 : \beta > 0$ ($b_0 = 0.471$) ; α = 5% (0.05)

F observasi = 315.271 ; *F* tabel = 4.17

Dengan *F* observasi > *F* tabel, maka H_0 ditolak, dengan tingkat keberartian (*significant levels*) sebesar 5%, yang berarti bahwa sebagian variasi (naik-turunnya) dari F_v merupakan sumbangan dari T dan mempunyai pengaruh linier dengan nilai b_0 positif.

Jadi model T dan F sebelum dan sesudah verifikasi, sebagai fungsi korelasi *tensile* dan *fatigue* adalah konsisten[5], yang berarti meningkatnya ukuran sampel atau jumlah data (N) mengarah pada nilai sebenarnya dengan varians minimum.

5.3.2. Verifikasi *Tensile* dengan *Impact*

Analog dengan interpretasi sebelumnya, taksiran model yang dapat dibuat dari *tensile* dan *impact* berdasarkan 45 data sebelumnya ditambah 4 data sebagai verifikasi (lihat Lampiran A) menjadi 49 data (N) adalah:

$$\hat{I}_v = 77.451 - 0.0638\,T \qquad \ldots(11)$$

Nilai a_1 dan b_1 pada model tersebut sama dengan 77.451 dan -0.0638.

Dengan koefisien determinasi sebesar 0.325, yang artinya bahwa dari data yang dianalisa maka sumbangan atau proporsi T terhadap variasi (naik-turunnya) I_v cukup rendah, berarti pula keragaman data yang dapat masuk dalam model hanya sebesar 32.5%. Nilai yang kecil ini dapat juga berarti cukup banyak data yang ada tidak masuk ke dalam model.

Dan koefisien korelasi Pearson (R) yang terjadi bertanda negatif yakni sebesar -0.570. Tanda negatif menunjukkan arah hubungan T dan I_v berkorelasi negatif, dimana semakin besar T maka I_v semakin rendah dan begitu sebaliknya, semakin kecil T maka I_v akan semakin naik.

Nilai *t* observasi (*t* hitung) pada uji *t* student adalah -4.756, terlihat berharga negatif. Dan secara langsung dapat dinyatakan bahwa *t* observasi < *t* tabel, maka H_0 diterima berarti bahwa b_1 sebagai koefisien penduga atau penaksir dari persamaan regresi secara statistik tidak penting (*statistically insignificant*).

Tetapi pada uji serentak model ini sudah signifikan, dimana uji *F* (*F test*)-nya didapat:

$H_0 : \beta = 0$; df = 1 dan (n-1) = 48

$H_1 : \beta < 0$ ($b_1 = -0.0638$) ; $\alpha = 5\%$ (0.05)

F observasi = 22.616 ; $4.00 < F$ tabel < 4.08

Dengan F observasi > F tabel, maka H_0 ditolak, dengan tingkat keberartian (*significant levels*) sebesar 5%, yang berarti bahwa sebagian variasi (naik-turunnya) dari I_v merupakan sumbangan dari T dan mempunyai pengaruh linier dengan nilai b_1 negatif, dengan kata lain koefisien b_1 masuk dalam model.

Sehingga dalam hal ini, model T dan I sebelum dan sesudah verifikasi, sebagai fungsi korelasi *tensile* dan *impact* adalah berarti (*significant*) tetapi tidak efisien[6]. Arti dari tidak efisien adalah variansinya tidak minimum; dengan meningkatnya ukuran sampel atau jumlah data (N) mengarah pada nilai sebenarnya, tetapi variansinya semakin lebar atau dengan kata lain variansinya tidak lagi minimum.

5.4. DIAGRAM SKEMATIK

Akhirnya untuk mempermudah penggunaan hasil analisa regresi untuk kasus-kasus yang lain, maka dibuat grafik persamaan regresi dalam bentuk diagram skematik korelasi *tensile* dengan *fatigue*, *tensile* dengan *impact*, serta tumpang-tindih (*Overlay*) keduanya, beserta standard deviasi, dan selang keyakinan (*confidence interval*) untuk rata-rata (*mean*) dan tiap-tiap (*individual*) respons (variabel estimasi), yang dapat dilihat pada Lampiran B. Dimana selang keyakinan memberikan sekumpulan hipotesis yang layak mengenai nilai parameter yang tidak diketahui. Dan

yang dimaksud dengan kasus-kasus lain tersebut, adalah bila dalam menentukan kekuatan *impact* dan *fatigue* suatu material yang sejenis tetapi dengan *tensile* yang berlainan dan masih berada dalam interval tertentu[7].

5.5. KORELASI *IMPACT* DENGAN *FATIGUE*

Dari model prediksi dan diagram skematik yang menunjukkan hubungan *tensile* dengan *impact* serta *tensile* dengan *fatigue* sebelum dan sesudah verifikasi, dapat dirumuskan korelasi *impact* dengan *fatigue* berdasarkan konsep matematis dari persamaan-persamaan sebelumnya, sebagai berikut:

$$F = f_1 (T)$$

$$I = f_2 (T)$$

$$T = f_2^{-1} (I) \qquad ...(12)$$

$$F = f_1 (f_2^{-1} (I)) \qquad ...(13)$$

menjadi:

$$\hat{F} = -10.181 + 0.475\,T$$

$$\hat{I} = 74.618 - 0.0598\,T$$

$$T = 1247.793 - 16.722\,\hat{I} \qquad ...(14)$$

$$\hat{F} = 582.521 - 7.943\,\hat{I} \qquad ...(15)$$

dan:

$$\hat{F}_v = 4.571 + 0.471\,T$$

$$\hat{I}_v = 77.451 - 0.0638\,T$$

$$T = 1213.966 - 15.674\,\hat{I}_v \quad \ldots(16)$$

$$\hat{F}_v = 576.349 - 7.382\,\hat{I}_v \quad \ldots(17)$$

Dengan memperhatikan persamaan matematis (15) & (17) dan diagram tumpang-tindih (*overlay*) sebelum dan sesudah verifikasi (lihat Lampiran B); berdasarkan harga *tensile*-nya, semakin rendah kekuatan *impact* suatu material maka cenderung kekuatan *fatigue* material tersebut semakin tinggi.

[1] Gouri K. Bhattacharyya, dan Richard A. Johnson, "Statistics Principles and Methods", edisi ke-3, bab 11, hal. 459-504, John Wiley & Sons, New York, 1996.

[2] Norman Draper, dan Harry Smith, "Analisis Regresi Terapan", edisi ke-2, bab 1-6, hal. 1-362, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1992.

[3] Lembaga Pendidikan Komputer Wahana, "Dasar-dasar Analisis Statistik dengan SPSS 6.0 for Windows", edisi ke-1, cetakan ke-1, Lembaga Pendidikan Komputer Wahana Semarang & Andi Yogyakarta, 1996.

[4] Gouri K. Bhattacharyya, dan Richard A. Johnson, "op cit", bab 3, hal. 99-103.

[5] Damodar Gujarati, dan Sumarno Zain, "Ekonometrika Dasar", lampiran A, hal. 369-370, Erlangga, Jakarta, 1988.

[6] Damodar Gujarati, dan Sumarno Zain, "op cit", lampiran A, hal. 367-368.

[7] Damodar Gujarati, dan Sumarno Zain, "op cit", bagian 1, bab 5, hal. 71-86.

BAB VI

PENUTUP

BAB VI

PENUTUP

6.1. KESIMPULAN

Dari hasil analisa dan verifikasi mengenai korelasi kekuatan *impact* dan *fatigue* suatu material dengan parameter harga *tensile*, didapat kesimpulan sebagai berikut:

- *Tensile* dan *fatigue* berkorelasi positif, dengan koefisien korelasi di atas 0.90; menunjukkan keeratan hubungan antara *tensile* dengan kekuatan *fatigue* cukup tinggi. Berarti semakin besar harga *tensile* maka kekuatan *fatigue* material semakin tinggi begitu sebaliknya, dan kekuatan *fatigue* sensitif terhadap *tensile*.
- Model T dan F sebagai fungsi korelasi *tensile* dengan kekuatan *fatigue* adalah konsisten, yang berarti meningkatnya ukuran sampel atau jumlah data mengarah pada nilai sebenarnya dengan varians minimum.
- *Tensile* dan *impact* berkorelasi negatif, dengan koefisien korelasi sekitar 0.50-0.60; menunjukkan hubungan antara *tensile* dengan kekuatan *impact* tidak cukup erat. Dengan semakin besar harga *tensile* maka kekuatan *impact* material semakin rendah begitu sebaliknya, dan kesensitifan kekuatan *impact* terhadap *tensile* cukup lemah.
- Model T dan I sebagai fungsi korelasi *tensile* dengan kekuatan *impact* adalah berarti (*significant*) tetapi tidak efisien, yang berarti meningkatnya ukuran sampel atau jumlah data mengarah pada nilai

sebenarnya, tetapi variansinya semakin lebar atau dengan kata lain variansinya tidak lagi minimum.

- Fungsi prediksi matematis dan diagram tumpang-tindih (*overlay*), untuk dua atau lebih material dengan harga *tensile* yang berbeda dapat ditarik kesimpulan, bahwa material dengan *impact* yang lebih rendah cenderung memiliki kekuatan *fatigue* yang lebih tinggi.

6.2. SARAN

Dari analisa korelasi yang dilakukan dan uraian pada bab-bab sebelumnya, dapat dirumuskan rekomendasi atas hasil yang diperoleh dan saran untuk analisa selanjutnya sebagai berikut:

- Uji *impact* kurang peka dalam membedakan harga, karena terdapat material dengan kekuatan *impact* yang berlainan tetapi harga *tensile*-nya sama.
- Keeratan hubungan antara *tensile* dan kekuatan *impact* cukup rendah, karena besar level tegangan pada uji *impact* tidak diberikan. Sehingga kesukaran utama yang dihadapi selama ini ialah; bahwa hasil uji *impact* kurang mungkin dimanfaatkan dalam perancangan, karena sukar untuk menghubungkan data kekuatan *impact* dengan service performans material.
- Pengujian *impact* dengan batang uji Charpy sebaiknya digunakan, mengingat alat uji tersebut sangat umum dijumpai dibanding alat uji *impact* batang Izod.

- Diperlukan pengujian dinamis secara simultan-bersama, agar didapat data berpasangan (*paired*) antara kekuatan *impact* dan *fatigue*, sehingga analisa korelasi keduanya berdasarkan prinsip-prinsip statistik dapat langsung dilakukan tanpa menggunakan parameter lain.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

1. Annual Book of ASTM Standards 1994, vol. 03.01, ASTM Designation E 8M, **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]**, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.
2. Annual Book of ASTM Standards 1994, vol. 03.01, ASTM Designation E 23, **Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials**, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.
3. Annual Book of ASTM Standards 1994, vol. 03.01, ASTM Designation E 739, **Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (*S-N*) and Strain Life (ε-*N*) Fatigue Data**, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994.
4. ASME Handbook, edisi ke-2, **Metals Engineering Design**, McGraw-Hill Book Company, New York, 1965.
5. Benham, P. P; Crawford, R. J, **Mechanics of Engineering Materials**, John Wiley & Sons, New York, 1987.
6. Bhattacharyya, Gouri K; Johnsons, Richard A, **Statistics Principles and Methods**, edisi ke-3, John Wiley & Sons, New York, 1996.
7. Bunshah, R. F, **Measurement of Mechanical Properties**, Techniques of Metals Research, volume V, part 1 & 2, John Wiley & Sons, New York, 1971.

8. Conover, W. J, **Practical Nonparametric Statistics**, edisi ke-2, John Wiley & Sons, New York, 1980.
9. Considine, Douglas M; Considine, Glenn D, **Van Nostrand's Scientific Encyclopedia**, edisi ke-7, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
10. Dalton, William K, **The Technologi of Metallurgy**, Macmillan Publishing Company, New York, 1995.
11. Davis, Harmer E; Troxell, George Earl; Hauck, George F. W, **The Testing of Engineering Materials**, edisi ke-4, McGraw-Hill International Book Company, New York, 1982.
12. DeGarmo, E. Paul; Black, J. Temple; Kohser, Ronald A, **Materials and Process in Manufacturing**, edisi ke-7, Macmillan Publishing Company, New York, 1988.
13. Dieter, George E, **Mechanical Metallurgy**, edisi SI Metric, McGraw-Hill Book Company, London, 1988.
14. Dowling, Norman E, **Mechanical Behavior of Materials**, Prentice-Hall International, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
15. Drapper, Norman; Smith, Harry, **Analisis Regresi Terapan**, edisi ke-2, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1992.
16. Gujarati, Damodar; Zain, Sumarno, **Ekonometrika Dasar**, Erlangga, Jakarta, 1988.
17. Lapedes, Daniel N, **McGraw-Hill Dictionary of Physics and mathematics**, McGraw-Hill International Book Company, New York, 1978.

18. Lembaga Pendidikan Komputer Wahana, **Dasar-dasar Analisis Statistik dengan SPSS 6.0 for Windows**, edisi ke-1, cetakan ke-1, Lembaga Pendidikan Komputer Wahana Semarang & Andi Yogyakarta, 1996.

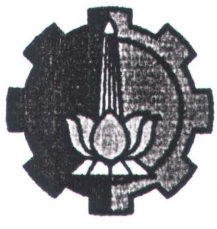
19. Samudro, **Konsep Pengkajian Peningkatan Service Performance Material Baja**, Proseding Ilmiah 40 Th. of Annual Meeting of The Japan Society of Material Science, Kyoto, June, 1991.

20. Siegel, Sidney, **Statistik Non Parametrik untuk Ilmu-ilmu Sosial**, PT. Gramedia Pusaka Utama, Jakarta, 1994.

21. Smithells, Colin James, **Smithells Metals Reference Book**, edisi ke-6, Butterworth & Co (Publishers) Ltd, London, 1983.

22. Wiryosumarto, Harsono; Okumura, Toshie, **Teknologi Pengelasan Logam**, Pradnya Paramita, Jakarta, 1985.

LAMPIRAN



lampiran A

Smithells Metals Reference Book

Sixth Edition

Editor
Eric A Brandes *BSc, ARCS, CEng, FIM*
In association with Fulmer Research Institute Ltd

Butterworths
London Boston Singapore Sydney Wellington Durban Toronto

22.9 Steels

Table 22.44 FORGED OR ROLLED STEELS—ROOM TEMPERATURE LONGITUDINAL MECHANICAL PROPERTIES

Material	British or other standard	Composition % C	Mn	Ni	Cr	Other elements	Condition	Limiting ruling section mm	in	Properties (minima unless otherwise stated) UTS MPa (tonf in^{-2})	Yield stress MPa (tonf in^{-2})	Elong. (gl 5.65$\sqrt{S_o}$) %	Izod J (ft lbf)	Remarks
1. *Carbon steels with up to 1.7% Mn content, including free cutting steels* (BS 970:Part 1:1972, DIN 1651:1970)														
0.20C Steel	BS 070M20 (En3)	0.16	0.50	—	—	P, S	Normalized	152	6	430 (28)	215 (14)	22	—	General
		0.24	0.90	—	—	0.050 max		254	10	400 (26)	200 (13)	20	—	constructional
							Cold drawn	13	½	530 (34)	385 (25)	12	—	steel suitable for
								76	3	430 (28)	340 (22)	14		welding.
							Hardened and tempered	19	¾	540/690 (35/45)	355 (23)	20	41‡ (30)	
0.26C Steel	BS 070M26	0.22	0.50	—	—	P, S	Normalized	64	2½	490 (32)	245 (16)	20	—	Medium strength
		0.30	0.90	—	—	0.050 max		254	10	430 (28)	215 (14)	20	—	engineering steel
							Cold drawn	13	½	570 (37)	430 (28)	11	—	
								76	3	490 (32)	370 (24)	13	—	
							Hardened	13	½	620/770 (40/50)	415 (27)	16	34‡ (25)	
							and tempered	29	1½	540/690 (35/45)	355 (23)	20	41‡ (30)	
0.30C Steel	BS 080M30 (En5)	0.26	0.60	—	—	P, S	Normalized	152	6	490 (32)	245 (16)	20	—	General
		0.34	1.00	—	—	0.050 max		254	10	460 (30)	230 (15)	19	—	engineering steels
							Cold drawn	13	½	600 (39)	450 (29)	10	—	widely used in the
								76	3	530 (34)	385 (25)	12	—	bright drawn
							Hardened	19	¾	620/770 (40/50)	420 (27)	16	34‡ (25)	condition
							and tempered	64	2½	540/690 (35/45)	340 (22)	18	34‡ (25)	
0.36C Steel	BS 080M36	0.32	0.60	—	—	P, S	Normalized	64	2½	540 (35)	280 (18)	16	27‡ (20)	
		0.40	1.00	—	—	0.050 max		254	10	490 (32)	245 (16)	18	—	
							Cold drawn	13	½	620 (40)	480 (31)	9	—	
								76	3	540 (35)	400 (26)	11	—	
							Hardened	13	½	690/850 (45/55)	465 (30)	16	34‡ (25)	
							and tempered	29	1½	620/770 (40/50)	400 (26)	16	34‡ (25)	

0.40 C Steel	BS 080M40 (En8)	0.36 0.44	0.60 1.00	—	—	P, S 0.050 max	Normalized	152 254	6 10	540 (35) 510 (33)	280 (18) 245 (16)	16 17	20‡ (15) —	Nuts and bolts, forgings and general engineering parts
							Cold drawn	13 76	½ 3	650 (42) 570 (37)	510 (33) 430 (28)	8 10	— —	
							Hardened and tempered	19 64	½ 2½	690/850 (45/55) 620/770 (40/50)	465 (30) 385 (25)	16 16	34‡ (25) 34‡ (25)	
0.46 C Steel	BS 080M46	0.42 0.50	0.60 1.00	—	—	P, S 0.050 max	Normalized	64 254	2½ 10	620 (40) 540 (35)	310 (20) 280 (18)	14 15	— —	Nuts and bolts, forgings and general engineering parts
							Cold drawn	13 76	½ 3	690 (45) 620 (40)	555 (36) 480 (31)	7 9	— —	
							Hardened and tempered	13 102	½ 4	770/930 (50/60) 620/770 (40/50)	525 (34) 370 (24)	14 16	— —	
0.50 C Steel	BS 080M50 (En43A)	0.45 0.55	0.60 1.00	—	—	P, S 0.050 max	Normalized	152 254	6 10	620 (40) 570 (37)	310 (20) 280 (18)	14 14	— —	Gears and machined parts for flame or induction hardening
							Cold drawn	13 76	½ 3	730 (47) 650 (42)	585 (38) 510 (33)	8 10	— —	
							Hardened and tempered	13 63	½ 2½	850/1 000 (55/65) 690/850 (45/55)	570 (37) 430 (28)	12 14	— —	
0.55 C Steel	BS070M55	0.50 0.60	0.50 0.90	—	—	P, S 0.050 max	Normalized	64 254	2½ 10	700 (45) 600 (39)	355 (23) 310 (20)	12 13	— —	General machine parts requiring higher wear resistance
							Cold drawn	13 76	½ 3	790 (51) 710 (46)	620 (40) 570 (37)	7 9	— —	
							Hardened and tempered	19 102	½ 4	850/1 000 (55/65) 690/850 (45/55)	570 (37) 415 (27)	12 14	— —	
0.19 C-1.2 Mn Steel	BS 120M19	0.15 0.23	1.00 1.40	—	—	P, S 0.050 max	Normalized	102 254	4 10	490 (32) 460 (30)	295 (19) 260 (17)	20 19	34‡ (25) —	Armature shafts High tensile bolts. Lifting gear chains. Automotive forgings
							Cold drawn	13 76	½ 3	600 (39) 530 (34)	450 (29) 385 (25)	11 12	— 34‡ (25)	
							Hardened and tempered	19 102	½ 4	690/850 (45/55) 540/690 (35/45)	510 (33) 355 (23)	16 18	34‡ (25)‡ 47‡ (35)‡	

‡ Grain controlled steel

Table 22.44 FORGED OR ROLLED STEELS—ROOM TEMPERATURE LONGITUDINAL MECHANICAL PROPERTIES—*continued*

Material	British or other standard	Composition % C	Mn	Ni	Cr	Other elements	Condition	Limiting ruling section mm	in	Properties (minima unless otherwise stated) UTS MPa (tonf in^{-2})	Yield stress MPa (tonf in^{-2})	Elong. (gl 5.65$\sqrt{S_o}$) %	Izod J (ft lbf)	Remarks
0.19 C–1.5 Mn Steel	BS 150M19 (En14A)	0.15/0.23	1.30/1.70	—	—	P, S 0.050 max	Normalized	152	6	540 (35)	325 (21)	18	41‡ (30)	Armature shafts. High tensile bolts. Lifting gear chains. Automotive forgings
								254	10	510 (33)	295 (19)	17	—	
							Hardened and tempered	29	1¼	690/850 (45/55)	510 (33)	16	41‡ (30)	
								152	6	540/690 (35/45)	340 (22)	18	54‡ (40)	
0.28 C–1.2 Mn Steel	BS 120M28	0.24/0.32	1.00/1.40	—	—	P, S 0.050 max	Normalized	152	6	540 (35)	325 (21)	16	34‡ (25)	
								254	10	530 (34)	310 (20)	17	—	
							Cold drawn	13	½	650 (42)	510 (33)	8	—	
								76	3	570 (37)	430 (28)	10	—	
							Hardened and tempered	29	1¼	690/850 (45/55)	510 (33)	16	34‡ (25)	
								102	4	620/770 (40/50)	415 (27)	16	41‡ (30)	
0.28 C–1.5 Mn Steel	BS 150M28 (En14B)	0.24/0.32	1.30/1.70	—	—	P, S 0.050 max	Normalized	152	6	590 (38)	355 (23)	16	34‡ (25)	
								254	10	560 (36)	325 (21)	16	—	
							Hardened and tempered	13	½	770/930 (50/60)	570 (37)	16	34‡ (25)	
								152	6	620/770 (40/50)	400 (26)	16	47‡ (35)	
0.36 C–1.2 Mn Steel	BS 120M36 (En15B)	0.32/0.40	1.00/1.40	—	—	P, S 0.050 mm	Normalized	152	6	590 (38)	355 (23)	15	—	General engineering steel
								254	10	570 (37)	340 (22)	16	—	
							Cold drawn	13	½	690 (45)	555 (36)	7	—	
								76	3	620 (40)	480 (31)	9	—	
							Hardened and tempered	19	¾	770/930 (50/60)	570 (37)	14	34‡ (25)	
								102	4	620/770 (40/50)	415 (27)	18	41‡ (30)	
0.36 C–1.5 Mn Steel	BS 150M36 (En15)	0.32/0.40	1.30/1.70	—	—	P, S 0.050 max	Normalized	152	6	620 (40)	385 (25)	14	—	
								254	10	600 (39)	355 (23)	15	—	
							Hardened and tempered	13	½	850/1000 (55/65)	635 (41)	12	34‡ (25)	
								152	6	620/770 (40/50)	400 (26)	18	47‡ (35)	

Low C Free cutting steel	BS 220M07 (En1A)	0.15 max	0.90 1.30	— —	— —	S	0.20 0.30	Cold drawn	13 76	¼ 3	460 (30) 360 (23)	Not given Not given	7 10	— —		Free cutting mild steels to be machined in high speed automatic lathes
								Hot rolled	102	4	360 (23)	215 (14)	22			
Low C Free cutting steel	BS 230M07	0.15 max	0.90 1.30	— —	— —	S	0.25 0.35	Cold drawn	13 76	¼ 3	460 (30) 360 (23)	Not given Not given	7 10	— —		Free cutting mild steels to be machined in high speed automatic lathes
								Hot rolled	102	4	360 (23)	215 (14)	22	—		
Low C Free cutting steel	BS 240M07 (En1B)	0.15 max	1.10 1.50	— —	— —	S	0.30 0.60	Cold drawn	13 76	¼ 3	450 (29) 360 (23)	Not given 7 Not given	10	—		Free cutting mild steels to be machined in high speed automatic lathes
								Hot rolled	64	2½	360 (23)	215 (14)	20	—		
Low C Free cutting steels containing lead	DIN 9SMnPb28	0.14 max	0.90 1.30	— —	— —	S Pb	0.24 – 0.32 0.15 0.30	Cold drawn	16 64 102	¼ 2½ 4	510/690 (33/45) 415/665 (27/43) 385/635 (25/41)	415 (27) 310 (20) 245 (16)	7 9 10	— — —		Free cutting mild steels to be machined in high speed automatic lathes
0.28 C Free cutting steel	BS 216M28	0.24 0.32	1.10 1.50	— —	— —	S	0.12 – 0.20	Cold drawn	13 76	¼ 3	570 (37) 490 (32)	430 (28) 370 (24)	10 12	— —		Free cutting medium strength engineering steels for machine parts and engine components, etc.
								Hardened and tempered	19 64	¼ 2½	620/770 (40/50) 540/690 (35/45)	430 (28) 355 (23)	18 20	34‡ (25) 34‡ (25)		
0.36 C Free cutting steel	BS 212M36 (En8M)	0.32 0.40	1.00 1.40	— —	— —	S	0.12 – 0.20	Cold drawn	13 76	¼ 3	620 (40) 540 (35)	480 (31) 400 (26)	7 9	— —		Free cutting medium strength engineering steels for machine parts and engine components, etc.
								Hardened and tempered	13 102	¼ 4	690/850 (45/55) 540/690 (35/45)	495 (32) 340 (22)	16 20	54‡ (40) 34‡ (25)		

‡Grain controlled steel

Table 22.44 FORGED OR ROLLED STEELS—ROOM TEMPERATURE LONGITUDINAL MECHANICAL PROPERTIES—*continued*

Material	*British or other standard*	*Composition %* C	Mn	Ni	Cr	*Other elements*	*Condition*	*Limiting ruling section* mm	in	*Properties (minima unless otherwise stated)* *UTS* MPa (tonf in^{-2})	*Yield stress* MPa (tonf in^{-2})	*Elong.* (g|5.65$\sqrt{S_o}$) %	*Izod* J (ft lbf)	*Remarks*
0.36 C Free cutting steels higher Mn	BS 216M36 (En 15AM)	0.32	1.30	—	—	S 0.12-0.20 P 0.060 Si 0.25 max	Cold worked	16	$\frac{3}{4}$	650(42)	510(33)	7	—	Free cutting medium strength engineering steels for machine parts and engine components, etc.
								76	3	570(37)	415(27)	9	—	
		0.40	1.70	—	—		Hardened and tempered	102	4	540(35/45)	340(22)	20	34‡(25)	
								29	$1\frac{1}{8}$	690/850(45/55)	480(31)	16	34‡(25)	
0.36 C Free cutting steels	BS 225M36	0.32	1.00	—	—	S 0.20-0.30 P 0.060 Si 0.25 max	Cold worked	16	$\frac{3}{4}$	620(40)	480(31)	7	—	Free cutting medium strength engineering steels
		0.40	1.40	—	—			76	3	540(35)	430(28)	9	—	
							Hardened and tempered	64	$2\frac{1}{2}$	620/770(40/50)	400(26)	18	34‡(25)	
								29	$1\frac{1}{8}$	690/850(45/55)	480(31)	16	34‡(25)	
0.44 C Free cutting steels	BS 212M44 (En 8M)	0.40	1.00	—	—	S 0.12-0.20 P 0.060 Si 0.25 max	Hardened and tempered	102	4	620/770(40/50)	400(26)	18	34‡(25)	Free cutting medium strength engineering steels
		0.48	1.40	—	—			13	$\frac{1}{2}$	770/930(50/60)	540(35)	14	27‡(20)	
0.44 C Free cutting steel	BS 225M44	0.40	1.30	—	—	S 0.20-0.30 P 0.060 Si 0.25 max	Hardened and tempered	13	$\frac{1}{2}$	850/1000(55/65)	600(39)	12	27‡(20)	Free cutting medium strength engineering steels for machine parts and engine components, etc.
		0.48	1.70	—	—			100	4	690/850(45/55)	450(29)	16	34‡(25)	

Table 22.46 TYPICAL FATIGUE STRENGTH OF STEELS ON SMOOTH SPECIMENS AT ROOM AND HIGHER TEMPERATURES

Material	*British or other standards*	*Typical composition %* C	Mn	Ni	Cr	*Other elements*	*Condition*	*Fatigue limit for 10^7 cycles of stress at temperatures indicated*, MPa (tonf in^{-2}) RT	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	650°C	*Remarks*
1. Forged or rolled steels tested in longitudinal direction Carbon steels with up to 1.5% Mn content																
Armco Iron	—	0.02	0.03	—	—	—	As rolled	±185 (±12)	±170 (±11)	±178 (±11.5)	±232 (±15)	±178 (±11.5)	±116 (±7.5)	—	—	—
0.20C Steel	BS070 M20 (En3)	0.20	0.70	—	—	—	Normalized	±193 (±12.5)	±193 (±12.5)	±193 (±12.5)	±247 (±16)	±232 (±15)	±154 (±10)	—	—	—
0.25C Steel	BS070 M26 (En4)	0.26	0.70	—	—	—	Normalized	±201 (±13)	±193 (±12.5)	±193 (±12.5)	±247 (±16)	±263 (±17)	±185 (±12)	—	—	—
0.30C Steel	BS080 M30 (En5)	0.30	0.80	—	—	—	Normalized	±232 (±15)	—	—	—	—	—	—	—	—
0.40C Steel	BS080 M40 (En8)	0.40	0.80	—	—	—	Hardened and tempered	±278 (±18)	—	—	—	—	—	—	—	—
0.55C Steel	BS070 M55 (En9)	0.55	0.65	—	—	—	Hardened and tempered	±293 (±19)	—	—	—	—	—	—	—	—
CMn Steel	BS150 M19 (En14A)	0.28	1.50	—	—	—	Normalized	±278 (±18)	—	—	—	—	—	—	—	—
Low alloy weldable steel																
½Mo Steel	—	0.14	0.43	—	—	Mo 0.50	Normalized	±317 (±20.5)	—	—	±402 (±26)	±371 (±24)	±278 (±18)	—	—	—
Low alloy direct hardening steel																
2NiCrMo Steel	—	0.27	Not given	2.0	0.90	Mo 0.40	Hardened and tempered	±432 (±28)	±432 (±28)	±432 (±28)	±440 (±28.5)	±432 (±28)	±247 (±16)	—	—	—
2¼CrMoVW Steel	—	0.23	0.30	—	2.70	Mo 0.50 V 0.70 W 0.50	Hardened and tempered	±440 (±28.5)	—	—	—	—	±324 (±21)	±247 (±16)	—	4×10^7 cycles

Table 22.45 TYPICAL HOT TENSILE PROPERTIES OF FORGED OR ROLLED STEELS IN THE LONGITUDINAL DIRECTION

		Typical composition %						Tensile properties				
Material	British or other standards	C	Mn	Ni	Cr	Other elements	Condition	Temperature °C	UTS MPa (tonf in^{-2})	Yield stress MPa (tonf in^{-2})	Elong. (gl $5.65\sqrt{S_0}$) %	RA %
1. *Carbon steels*												
Armco Iron	—	0.02	0.03	—	—	—	Normalized	RT	340 (22)	185 (12)	39	69
								200	448 (29)	185 (12)	23	54
								400	309 (20)	Not given	15	67
0.15C Steel	BS 040A12 (En2B)	0.13	0.50	—	—	—	Normalized	RT	417 (27)	247 (16)	33	Not given
								200	463 (30)	232 (15)	23	Not given
								400	386 (25)	193 (12.5)	33	Not given
								500	309 (20)	Not given	33	Not given
0.20C Steel	BS 070M20 (En3)	0.20	0.70	—	—	—	Normalized	RT	448 (29)	263 (17)	30	62
								200	463 (30)	224 (14.5)	24	54
								400	371 (24)	185 (12)	31	67
0.25C Steel	BS 070M26 (En4)	0.26	0.70	—	—	—	Normalized	RT	479 (31)	247 (16)	30	Not given
								200	510 (33)	232 (15)	22	Not given
								400	448 (29)	201 (13)	27	Not given
								500	340 (22)	185 (12)	28	Not given
0.35C Steel	BS 080M36	0.36	0.80	—	—	—	Normalized	RT	602 (39)	309 (20)	26	Not given
								200	633 (41)	309 (20)	17	Not given
								400	587 (38)	216 (14)	25	Not given
								500	432 (28)	Not given	28	Not given
0.40C Steel	BS 080M40 (En8)	0.40	0.80	—	—	—	Normalized	RT	602 (39)	340 (22)	29	53
								250	633 (41)	293 (19)	19	41
								450	479 (31)	Not given	31	59

Table 22.48 MECHANICAL PROPERTIES OF FORGED OR ROLLED STEELS AT SUBZERO TEMPERATURES IN THE LONGITUDINAL DIRECTION

		Typical composition %							*Typical properties*					
													Impact	
Material	*British or other standards*	C	Mn	Ni	Cr	*Other elements*	*Conditions*	*Temperature °C*	*UTS* MPa (tonf in^{-2})	*Yield stress* MPa (tonf in^{-2})	*Elong.* (gl $5.65\sqrt{S_o}$) %	*RA* %	*Test spec.*	J (ft lbf)
1. *Carbon steels*														
Armco iron	—	0.02	0.03	—	—	—	Not given	RT	309 (20)	Not given	Not given	73	Izod	106 (78)
								−75	432 (28)	293 (19)	33	72	Izod	5.5 (4)
								−120	525 (34)	463 (30)	15	68	—	—
0.1C Steel	BS 040A10 (En2A)	0.10	0.45	—	—	—	As rolled	RT	463 (30)	340 (22)	27	72	Charpy	80 (59)
								−30	—	—	—	—	Charpy	60 (44)
								−45	—	—	—	—	Charpy	8 (6)
								−160	649 (42)	556 (36)	24	62	—	—
0.15C Steel	BS 040A12 (En2B)	0.13	0.50	—	—	—	Normalized	RT	463 (30)	355 (23)	28	67	Charpy	163 (120)*
								−65	—	—	—	—	Charpy	9.0 (6.5)*
								−160	710 (46)	571 (37)	30	58	—	—
0.20C Steel	BS 070M20 (En3)	0.20	0.70	—	—	—	Normalized	RT	430 (28)	215 (14)	21	65	Charpy	99 (73)*
								−20	—	—	—	—	Charpy	13.5 (10)*
								−80	—	—	—	—	Charpy	2.7 (2)*
								−160	726 (47)	587 (38)	Not given	56	—	—
0.25C Steel	BS 070M26 (En4)	0.26	0.70	—	—	—	Normalized	RT	494 (32)	247 (16)	20	Not given	—	—
							Cold drawn	RT	571 (37)	432 (28)	11	Not given	Izod	27 (20)
								−40	757 (49)	Not given	11	Not given	Izod	3.4 (2.5)
0.35C Steel	BS 080M36	0.36	0.80	—	—	—	Normalized	RT	541 (35)	278 (18)	27	62	Charpy	110 (81)*
								−55	—	—	—	—	Charpy	30 (22)*
								−80	—	—	—	—	Charpy	11 (8)*
								−100	741 (48)	571 (37)	28	57	—	—
0.40C Steel	BS 080M40 (En8)	0.40	0.80	—	—	—	Hardened and tempered	RT	772 (50)	463 (30)	22	Not given	—	—
								−185	1112 (72)	Not given	9	Not given	—	—
0.45C Steel	BS 080M46	0.46	0.80	—	—	—	Normalized	RT	618 (40)	309 (20)	15	Not given	Charpy	22 (16)*
								−80	896 (58)	Not given	14	Not given	Charpy	11 (8)*
							Hardened and tempered	RT	927 (60)	525 (34)	14	Not given	Charpy	68 (50)*
								−40	—	—	—	—	Charpy	36.5 (27)*
								−80	1050 (68)	Not given	12	Not given	Charpy	24.5 (18)*

THE TESTING OF ENGINEERING MATERIALS

Fourth Edition

Harmer E. Davis

Professor of Civil Engineering, Emeritus
University of California, Berkeley

George Earl Troxell

Professor of Civil Engineering, Emeritus
University of California, Berkeley

George F. W. Hauck

Associate Professor of Civil Engineering
University of Missouri—Columbia

INTERNATIONAL STUDENT EDITION

McGRAW-HILL INTERNATIONAL BOOK COMPANY

Auckland Bogotá Guatemala Hamburg Johannesburg Lisbon
London Madrid Mexico New Delhi Panama Paris
San Juan São Paulo Singapore Sydney Tokyo

Table 14.2 Fatigue limit and fatigue ratio of various metals†

Metal	Static tensile strength, MPa‡	Fatigue limit in reversed flexure, MPa‡	Fatigue ratio
Steel, 0.18% carbon, hot-rolled	432	213	0.49
Steel, 0.24% carbon, quenched and drawn	465	203	0.44
Steel, 0.32% carbon, hot-rolled	453	216	0.48
Steel, 0.38% carbon, quenched and drawn	631	231	0.37
Steel, 0.93% carbon, annealed	580	210	0.36
Steel, 1.02% carbon, quenched	1382	724	0.51
Nickel steel, SAE 2341, quenched	1944	772	0.40
Cast steel, 0.25% carbon, as cast	463	186	0.40
Copper, annealed	223	69	0.31
Copper, cold-rolled	359	110	0.31
70-30 brass, cold-rolled	505	121	0.24
Aluminum alloy 2024, T36	496	124	0.25
Magnesium alloy AZ63A	276	76	0.27

†Adapted from H. F. Moore and J. B. Kommers, *Fatigue of Metals*, McGraw-Hill, New York, 1927.

‡1 MPa = 145 psi.

Table 17.3 Mechanical properties of steel†

Material	Strength in tension, MPa‡		Compressive yield strength, MPa‡ (0.2% set)	Strength in torsional shear, MPa‡		Modulus of elasticity, GPa		Elongation in 50 mm, percent	Brinell hardness No.	Modulus of toughness, MJ/m^3 (MPa)‡	Fatigue limit, reversed bending, MPa‡
	Yield strength (0.2% set)	Ultimate		Yield strength (0.2% set)	Ultimate	Tension	Shear				
Wrought iron, 0.10% carbon	205	345	205	125	240	185	70	30	100	95	170
Steel, 0.20% carbon											
Hot-rolled	275	415	275	165	310	200	85	35	120	115	215
Cold-rolled	415	550	415	250	415	200	85	15	160	85	275
Annealed castings	240	415	240	145	310	200	85	25	130		
Steel, 0.40% carbon											
Hot-rolled	290	485	290	170	380	200	85	25	135		
Heat-treated for fine grain	415	620	415	250	515	200	85	25	190		
Annealed castings	240	450	240	145	380	200	85	15	130		
Steel, 0.60% carbon											
Hot-rolled	435	690	435	255	550	200	85	15	200	85	345
Heat-treated for fine grain	540	825	540	325	690	200	85	15	235	105	380
Steel, 0.80% carbon											
Hot-rolled	505	825	505	305	725	200	85	10	240		
Oil-quenched, not drawn	860	1240	860	515	1035	200	85	2	360		
Steel, 1.00% carbon											
Hot-rolled	570	930	570	345	795	200	85	10	260	75	415
Oil-quenched, not drawn	965	1515	965	580	1275	200	85	1	430	15	690
Nickel steel, 3.5% nickel, 0.40% carbon, max. hardness for machinability	1035	1170	1035	620	965	200	85	12	350	95	525
Silicomanganese steel, 1.95% Si, 0.70% Mn, spring tempered	895	1200	895	540	795	200	85	1	380	145	

Note: Most steels depend on heat-treatment as well as on composition to develop particular mechanical properties.

†Based on F. B. Seely, *Resistance of Materials*, Wiley, New York, 1947; and *Metals Handbook–1948*, American Society for Metals, Cleveland, Ohio, 1948.

‡1 MPa = 145 psi.

Mechanics of engineering materials

P. P. BENHAM

Professor Emeritus and formerly
Professor of Aeronautical Engineering,
The Queen's University of Belfast

R. J. CRAWFORD

Professor of Mechanical and Manufacturing Engineering
and Director of the School of Mechanical and Process Engineering,
The Queen's University of Belfast

Copublished in the United States with
John Wiley & Sons, Inc., New York

Material	Condition	Tensile strength (MN/m^2)	Reduction in area, (%)	Izod impact energy at room temperature (J)
0.1 C, 0.3 Mn steel	Annealed	377	65	54.2
0.21 C, 0.82 Mn steel	Annealed	505	58	40.6
0.5 C steel	Normalized	787	63	29.8
Ni–Cr–Mo steel	Quenched 840 °C, tempered 650 °C	895	64	114.0
	Quenched 840 °C, tempered 500 °C	1472	47	29.8
3.0 Ni, 1.0 Cr steel	Quenched 840 °C	1668	35	19.0
	Quenched and tempered 550 °C	865	60	93.5
Stainless steel (18–8)	Cold rolled	987	—	46.1

過飽和固溶炭素による鋼材の疲労強度改善

広島大学工学部　正○岩田兆正，正　藤本由起夫
SAMUDRO，郡　昌雄

1．緒　言

鋼構造物の大型化に伴って，高強度の鉄鋼材料を用いた軽量の構造物が設計されるようになった．しかしながら，引張強さや降伏点の高い鉄鋼材料でも疲労強度はそれほど高くなっていないため，動的荷重を受ける構造物では，疲労損傷は減少していない．そのため，疲労強度改善が重要な課題となっており，部材形状の改善，溶接ビートの止端処理など，応力集中を下げるための対策が設計，施工の際とられている．

これらの方法とは別に，鉄鋼材料そのものの疲労強度を改善する方法として，加工硬化，ひずみ時効および焼入れ時効[1]が知られているが，本研究では，これらの処理を併用したときに疲労強度に及ぼす効果が重畳して現われるか否かを検討した．

2．実験方法

本実験に用いた鋼材(板厚4.5mm)の化学成分，および機械的性質をTable 1 に示す．この供試材に，680℃で30分間加熱し，炉冷した焼なまし処理および 0℃の氷水中に急冷した溶体化処理を施し，その一部に圧延率11および33%で冷間圧延を行った．

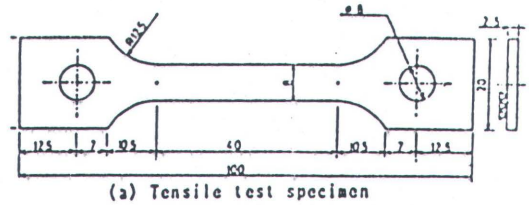
溶体化処理は，フェライト中に炭素を過飽和に固溶させてひずみ時効を促進するためと，後述する焼入れ時効の前処理のために行なったものである．また冷間圧延は，加工硬化と焼入れ時効の際に転位線上に微細な炭化物が析出することを期待して行なっている．

さらに，急冷圧延材の一部には70℃および100℃，20時間の焼入れ時効処理を施した．若者らの一人が行なった実験結果[1]によると，100℃ の時効材では，過飽和に固溶した炭素の大部分が炭化物粒子として析出してしまうが，70℃の時効材では，過飽和の固溶炭素の一部が炭化物粒子として析出するだけで，残りはフェライト中に固溶しているものと推察される．以上に述べた熱処理および冷間圧延を組み合わせたときの処理材の記号および処理の目的をまとめてTable 2 に示す．

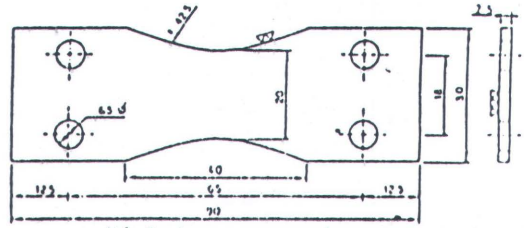
Table 2　Heat and mechanical treatments

Heat Treatment		Cold Rolling	
Cooling process	Pre-Aging Treatment	0 %	11 % & 33 %
Furnace Cooling	---	An	An-R (Work Hardening)
Rapid Cooling	---	Q (Strain Aging)	Q-R (Work Hardening and Strain Aging)
	100 °C	100Ag (Quench Aging)	Q-R-100Ag (Work Hardening and Quench Aging)
	70 °C	---	Q-R-70Ag (Work Hardening, Quench Aging and Strain Aging)

An: Annealing, Q: Quenching, R: Rolling, Ag: Aging



(a) Tensile test specimen



(b) Fatigue test specimen

Fig.1　Shapes and dimensions of specimens

各処理材からFig.1 に示す引張および疲労試験片を作成した．疲労試験は，4kg·mのシェンク式曲げ試験機を用い，完全両振り平面曲げ荷重で行った．なお溶体化処理材は時効の

Table 1　Chemical compositions and mechanical properties

Chemical composition %					Mechanical property			
C	Si	Mn	P	S	Vickers Hardness	Yield point Kgf/mm²	Tensile strength Kgf/mm²	Elongation %
0.13	<0.01	0.54	0.01	0.01	127	33.1	46.3	30.5

進行を防止するために各処理後冷凍庫に保存し，室温に戻した後，試験に供した．

3．実験結果

各処理材の疲労試験結果をS－N線図でFig. 2からFig. 5に，機械的性質および疲労限を一括してTable 3に示す．

Fig. 2 は，焼なまし材(An)，11%圧延材(An-11R)および33%圧延材(An-33R)のS－N線図を比較して示したものである．加工硬化によって，圧延材の疲労限は焼なまし材のそれに比べて増加している．11%圧延材では3.5kgf/mm²，33%圧延材では 8.5kgf/mm² の増加がみられ，当然のことながら圧延率が高いほど，疲労強度の向上が顕著である．

急冷材(Q)および急冷後にそれぞれ 11および33%の冷間圧延を行なったQ-11RおよびQ-33R材のS－N線図を，焼なまし材(An)と比較してFig. 3に示す．まず，An材と Q材とを比較すると，ひずみ時効を促進させたことによりQ材の疲労限は 6kgf/mm²上昇していることが分かる．つぎに，Q-R 材の疲労限は，An材より圧延率11%で11.5kgf/mm²，圧延率33%で14kgf/mm²ほど上昇している．この上昇分は，Fig. 3に示した圧延のみのAn-R材の上昇分より大きいことから，圧延による加工硬化に加えて，急冷により生じた過飽和の炭素がひずみ時効を促進したことが効いていると言える．

Fig. 4は急冷後，100℃で時効した Q-100Ag材および急冷，圧延および焼入れ時効を併用した Q-R-100Ag材のS－N線図をAn材のそれと比較して示したものである．Q-100Ag材の疲労限は，An材より若干高い程度であり，またFig. 3に示したQ材より低下している．これは100℃，2時間の時効処理によって過時効状態になっているためであり，またフェライト中には固溶炭素が少なく，疲労試験中のひずみ時効がほとんど起こらないためと推察される．これに対して Q-R-100Ag材は，ひずみ時効の促進効果による Q-R材と同等の疲労限を示していることから，100℃，2時間の焼入れ時効処理も冷間圧延と併用すれば有効となることが分かる．

急冷，圧延後の時効温度を70℃に下げたQ-R-70Ag材は，Fig. 5 に示すように，圧延率33%のとき 38kgf／mm²に達する高い疲労限を示している．これは An材の

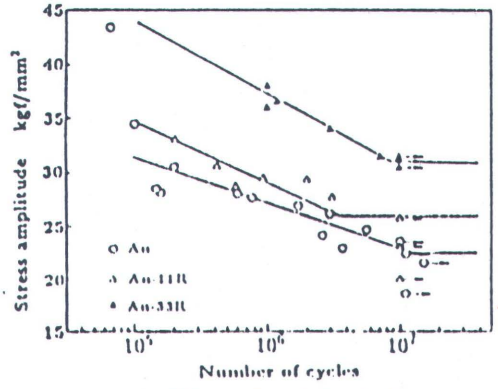


Fig. 2 Effect of work hardening

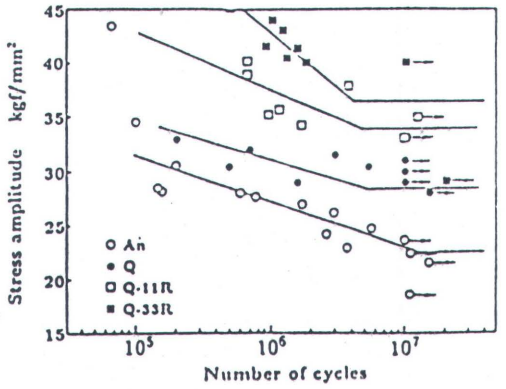


Fig. 3 Effect of work hardening and strain aging

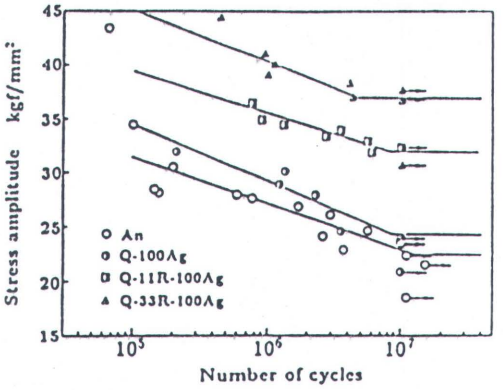


Fig. 4 Effect of work hardening and quench aging

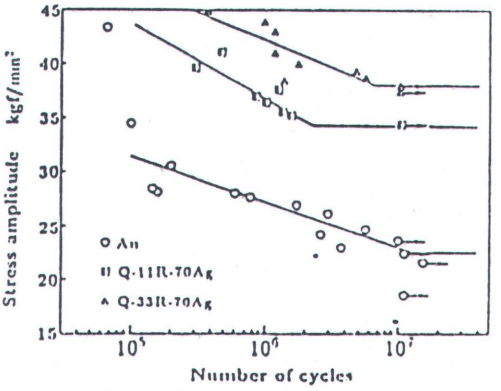


Fig. 5 Effect of work hardening, quench aging and strain hardening

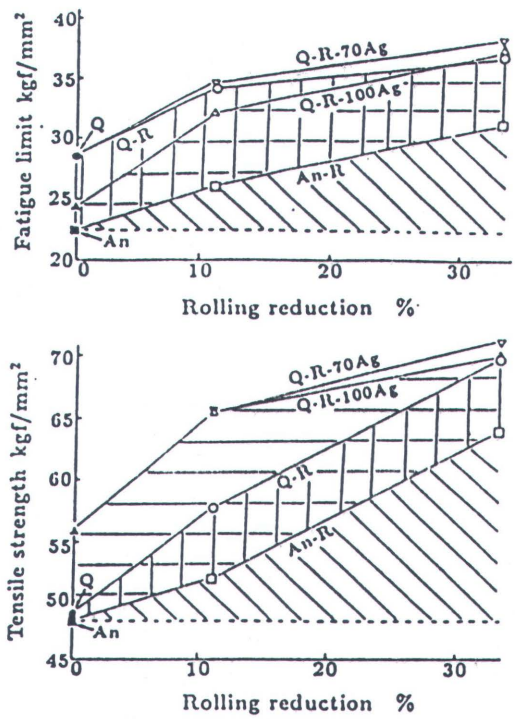


Fig. 6 Effect of various treatments on fatigue limit and tensile strength

1.7倍に相当しており，加工硬化，焼入れ時効およびひずみ時効の重畳効果によって最も高い疲労限が得られることが分かる．

4．考　察

各処理材について，疲労限および引張強さと，圧延率との関係を示すとFig. 6 のようになる．■印の焼なまし(An)材と比較して圧延(An-R)のみの効果をみると，圧延率が高いほど，加工硬化によって引張強さ，疲労限は共に上昇しているが，疲労限の上昇分は引張強さのそれの1/2 に過ぎない．これが加工硬化の効果となる．

■印の焼なまし(An)材と，●印の急冷(Q)材とを比較すると，すべり変形を起こしていない単に急冷しただけの引張強さはAn材のそれよりも若干大きくなっているにすぎないが，Q材の疲労限は，疲労試験中に生じるひずみ時効の効果によって6kgf/mm²程度上昇している．ひずみ時効促進の効果が疲労強度の改善に非常に有効であることがわかる．

急冷，圧延したQ-R材は，ひずみ時効促進の効果によって，引張強さが焼なまし圧延のみのAn-R材に比べ約8kgf/mm²上昇するが，疲労限にも引張強さと同程度の6～8 kgf/mm²の上昇が認められる．この疲労限の上昇分は，急冷のみの Q材で認められた疲労限の増加分にほぼ等しい．このことから，ひずみ時効を促進した効果は，急冷と圧延を併用した場合でも，圧延による加工硬化の上に加算的に現われることがわかる．さらに，ひずみ時効による疲労限の上昇が，引張強さの上昇分と同程度になっていることは，前述した加工硬化とは大きく異なる点で，注目に値する．

つぎに急冷，圧延後に100℃で時効処理を行っているQ-R-100Ag材は，この時効処理中に過剰な炭素がほとんど転位線上に微細な粒子として析出してしまっているので，疲労試験中のひずみ時効は期待できないが，疲労限は横線部の様に向上する．この増加分は縦線部で示したひずみ時効と同じぐらいである．

急冷，圧延後に70℃で時効処理を行ったQ-R-70Ag材の疲労限は，Q-R材やQ-R-100Ag材より高く，疲労強度改善の効果が最も大きいことがわかる．この効果は，過剰に含まれた炭素による焼入れ時効とひずみ時効の相乗効果によるものと考えられる．なお，この相乗効果は，両時効の効果が加算されたものではないが，焼入れ時効処理の温度と時間を変えることによって，両時効の割合が変化し，さらに大きくなる可能性がある．

Table 3 Mechanical properties and fatigue limits of specimens after various treatments

Type of specimen	Hardness H_v	Yield point kgf/mm²	Tensile strength kgf/mm²	Elongation %	Fatigue limit kgf/mm²
An	127	33.1	48.3	30.5	22.5
An-11R	173	43.0	51.7	10.4	26.0
An-33R	227	50.5	63.6	8.1	31.0
Q	146	33.7	49.1	20.0	28.5
Q-11R	171	42.5	57.6	8.3	34.0
Q-33R	255	53.8	69.3	10.6	36.5
Q-100Ag	152	38.1	56.6	21.6	24.5
Q-11R-100Ag	235	53.1	65.3	10.0	32.0
Q-33R-100Ag	266	57.0	69.5	11.5	37.0
Q-11R-70Ag	214	45.8	65.2	10.6	34.5
Q-33R-70Ag	253	57.2	70.9	8.9	38.0

An: Annealing, √ nching, Rlling, Ag: Aging

〔参考文献〕

1） 永井欣一，藤田春彦，岩田光正，竹中憲策：軟鋼の疲れ強さに及ぼす焼入れ時効の影響，溶接学会誌，第44巻(1975)第1号，P.58-65

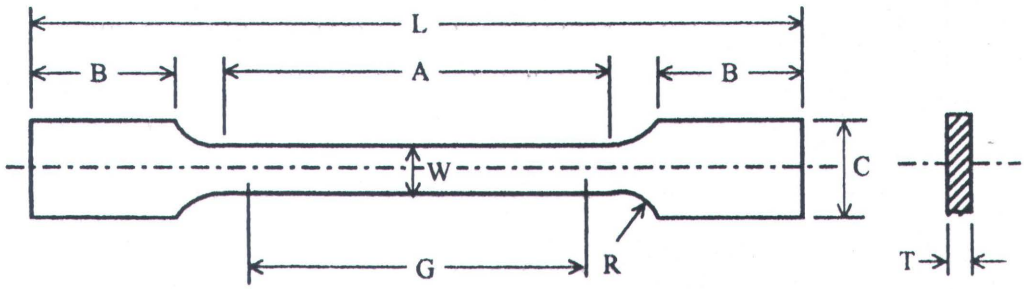
MATERIAL UJI

1. Hot Rolled Steel Plate, JIS G 3101 SS 400
2. Hot Rolled Steel Plate, ASTM A 36
3. Hot Rolled Steel Plate, ASME SA 285 Grade C
4. Hot Rolled Steel Plate, ASME SA 516 Grade 70

SPESIMEN

- **Uji Tarik (Tensile)**

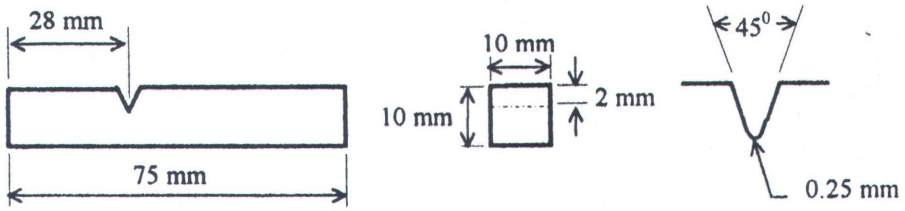
  Standar ASTM E 8M, tipe sheet dan subsize sesuai tebal material.



Keterangan Notasi	Sheet 12.5 mm	Subsize 6 mm
G - Panjang Gage	50.0 ± 0.1	25.0 ± 0.1
W - Lebar	12.5 ± 0.2	6.0 ± 0.1
T - Tebal	tebal material	tebal material
R - Radius, min.	12.5	6
L - Panjang seluruhnya, min.	200	100
A - Panjang bagian reduksi, min.	57	32
B - Panjang pegangan, min.	50	30
C - Lebar pegangan, perkiraan	20	10

- **Uji Impact**

  Standar ASTM E 23, jenis Izod.



HASIL PENGUJIAN

- **Tensile**

  Mesin uji tarik jenis Universal Testing Machine (MFL/UPD.20-1979) GTZ Germany, dikalibrasi tanggal 5-12-1996 s/d 5-12-1998.

1. JIS G 3101 SS 400

Notasi	Hasil
– Panjang gage mula-mula (L_0)	50 mm
– Lebar awal (W_0)	12.8 mm
– Tebal awal (T_0)	12.1 mm
– Luas area mula-mula (A_0)	154.88 mm^2
– Panjang gage akhir (L_1)	70.3 mm
– Lebar akhir (W_1)	7.7 mm
– Tebal akhir (T_1)	6.9 mm
– Luas area akhir (A_1)	53.13 mm^2
– Beban tarik maksimum (P_{maks})	66.2 kN
– Kuat tarik maksimum (UTS = P_{maks}/A_0)	427.43 MPa

2. ASTM A 36

Notasi	Hasil
– Panjang gage mula-mula (L_0)	50 mm
– Lebar awal (W_0)	12.8 mm
– Tebal awal (T_0)	10.1 mm
– Luas area mula-mula (A_0)	129.28 mm^2
– Panjang gage akhir (L_1)	69.8 mm
– Lebar akhir (W_1)	8.05 mm
– Tebal akhir (T_1)	5.5 mm
– Luas area akhir (A_1)	44.28 mm^2
– Beban tarik maksimum (P_{maks})	54.7 kN
– Kuat tarik maksimum (UTS = P_{maks}/A_0)	423.11 MPa

3. ASME SA 285 Grade C

Notasi	Hasil
– Panjang gage mula-mula (L_0)	25 mm
– Lebar awal (W_0)	6.4 mm
– Tebal awal (T_0)	22.0 mm
– Luas area mula-mula (A_0)	140.8 mm^2
– Panjang gage akhir (L_1)	37.4 mm
– Lebar akhir (W_1)	4.25 mm
– Tebal akhir (T_1)	14.45 mm
– Luas area akhir (A_1)	61.41 mm^2
– Beban tarik maksimum (P_{maks})	63.2 kN
– Kuat tarik maksimum (UTS = P_{maks}/A_0)	448.86 MPa

4. ASME SA 516 Grade 70

Notasi	Hasil
– Panjang gage mula-mula (L_0)	50 mm
– Lebar awal (W_0)	12.55 mm
– Tebal awal (T_0)	13.15 mm
– Luas area mula-mula (A_0)	165.03 mm^2
– Panjang gage akhir (L_1)	67.3 mm
– Lebar akhir (W_1)	7.4 mm
– Tebal akhir (T_1)	8.2 mm
– Luas area akhir (A_1)	60.68 mm^2
– Beban tarik maksimum (P_{maks})	94.1 kN
– Kuat tarik maksimum (UTS = P_{maks}/A_0)	570.2 MPa

- **Impact**

Mesin uji impact jenis Wolpert Machine (Werke GMBH) Walm & Kolb Stuttgart, dikalibrasi tanggal 7-12-1995 s/d 7-12-1998.

1. JIS G 3101 SS 400

Spesimen	Energy Absorbsi
1.1	54 J
1.2	54 J
1.3	52 J
Rata-rata	53.33 J

2. ASTM A 36

Spesimen	Energy Absorbsi
2.1	54 J
2.2	55 J
2.3	55 J
Rata-rata	54.67 J

3. ASME SA 285 Grade C

Spesimen	Energy Absorbsi
3.1	52 J
3.2	52 J
3.3	51 J
Rata-rata	51.67 J

4. ASME SA 516 Grade 70

Spesimen	Energy Absorbsi
4.1	47 J
4.2	44 J
4.3	45 J
Rata-rata	45.33 J

4. ASME SA516
GR.70
3. ASME SA285
GR.C

2. ASTM A36
1. JIS G3101 SS400

検査証明書
INSPECTION CERTIFICATE

NKK 日本鋼管株式会社 NKK CORPORATION

本社：〒100 東京都千代田区丸の内1丁目1番2号
Head Office: 1-1-2, MARUNOUCHI, CHIYODA-KU, TOKYO 100 JAPAN

注文者 Purchaser: MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.
注文者注文番号 Purchaser's Order No.: 6500003
納入先 Consignee: MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.
Reference No.: KBH -6V3806J0
品名 Commodity: HOT ROLLED STEEL PLATE
規格 Specification: JIS G3101 SS400

証明書番号 Certificate No.: ASHEX-7987
日付 Date: 1997-01-29
船番 Ship's No.:
工事番号 Construction No.:
契約番号 Contract No.: A0XM474

Roll No. / Heat No.	Mark No.	Purchaser's Order No. / Size (MM) T X W X L	Quantity	Mass (CAL)	C x100	Si	Mn	P x1000	S	CR						Tensile Test T.P.	Y.P. N/MM2	T.S.	EL %			
1H09705 27097	007	269857 12 X 1000 X 3000	1	283	14	22	50	26	5	5						TC	279	430	30		G	
		TOTAL	1	283KGS																		
VISUAL & DIMENSIONS : GOOD																						

(注) 注1 Roll No. 圧延番号 Indication of Plate Roll Number
(Notes) 1st-5th: 最初の2 letter & the 1st 3 figures: mother Plate Number
7th-8th: the last 2 figures: divided Plate Number
注2 CG: Degassed

注4 Position: T: Top F: Flange B: Bottom W: Web
Direction: L: Longitudinal C: Transverse Z: Through-thickness

Size of Impact Test Specimen 1: 10x10mm 2: 7.5x10mm 3: 2/3x10mm 4: 5x10mm 5: 1/3x10mm 6: 2.5x10mm 7: Thicknessx10mm
Unit of Impact Test Property
Energy: K: kgf.m C: kgf.m/cm² J: Joule. U: J/cm² F: ft.lbf
Fracture: S: Sheer B: Brittle
Lateral Expansion: M: mm I: mil
注6 BT: Bend Test
UST: Ultrasonic Examination
G: Good

注5 Gauge Length
A: 200mm(#) D: 50mm(#)
E: 5mm(#) H: 8"(#)
J: 2"(#) K: 50(#)
M: 5.65√A(#) P: 5.65√A(#)
R: 40(#) S: 80mm(#)
U: 100mm(#) Y: 2"(#)

上記製品は仕様書規定の規格に合格していることを証明いたします。
(OMF43000)
N7051

WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL DESCRIBED HEREIN HAS BEEN TESTED AND INSPECTED WITH SATISFACTORY RESULTS IN ACCORDANCE WITH THE REQUIREMENTS OF THE ABOVE SPECIFICATION.

京浜製鉄所：〒210 神奈川県川崎市川崎区南渡田町1番1号 KEIHIN WORKS: 1-1, MINAMIWATARIDA-CHO, KAWASAKI 210 JAPAN

京浜製鉄所品質保証室長
Manager of Quality Assurance Sec.
KEIHIN WORKS

CONTRACT NO : 6133-DH121 (FE1 FE127041)
SHIPPER : FUKUSUKE KIKO CO.,LTD.
BUYER : P.T. PAL
NAME OF ARTICLE: HOT ROLLED STEEL PLATE, ASTM A36

KAWASAKI STEEL CORPORATION MIZUSHIMA WORKS
〒712 [illegible]
1, MIZUSHIMA KAWASAKI DORI, KURASHIKI, JAPAN
DATE : JANUARY 30 ,1996

07

炉鋼番 HEAT-NO	製品番号 PLATE-NO	製品寸法 DIMENSIONS mm	枚数 巻数 本数 QUANTITY	質量 MASS kg	[illegible]	引張試験 TENSILE TEST 降伏点 Y.P. or Y.S. KSI	引張強さ TENSILE STRENGTH KSI	伸び ELONGATION %	降伏比 Y.R. %	曲げ試験 BEND TEST	衝撃試験 IMPACT TEST	化学成分 CHEMICAL COMPOSITION C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	NB	[illegible]
						36.0	58.0 80.0	18				25	40		40	50								
6-1783	AC186 E	10X1524X4000	1	479	TC	41.9	65.8	29				17	20	74	15	4	2	2	3	2	2		1	
	AC182 D	13X1524X3600	1	560																				
	AC182 C	13X1524X4300	1	668																				
4-3490	AR329 A	13X1524X6096	1	948	TC	49.0	68.4	26				12	14	120	17	5	2	2	3	1	1		1	
5-2936	AB136 D, E	13X1524X6096	2	1896	TC	42.9	66.1	29				16	10	87	23	4	2	2	3	2	3		1	
6-1833	AJ284 G	16X1000X3000	1	377	TC	41.5	63.5	28				17	10	67	19	6	1	2	3	1	1		1	
6-1783	AB433 A, B	19X3500X10700	2	11176	TC	41.9	65.8	29				17	20	74	15	4	2	2	3	2	2		1	
6-1742	AA179 I	19X1524X5200	1	1182	TC	39.7	63.5	30				16	10	85	16	4	2	2	3	2	2		1	
	AA179 H	19X1524X3700	1	841																				

上記鋼材は規定の検査を行ない これに合格したことを証明する。

WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL DESCRIBED HEREIN HAS BEEN SATISFACTORILY TESTED IN ACCORDANCE WITH THE SPECIFICATION.

S. Yoshimura
MANAGER OF INSPECTION SECTION

(Notes) [1] Location, Orientation 位置, 方向 T—Top of 上 B—Bottom 底部 L—Longitudinal 圧延方向 C—Transverse 圧延方向に直角 [2] AI, AT, HR, FI, ZP—X1000 B, H—X10000 AT—Total AI [3]—X100 [4]—X1000
The other * R=5.65 S. R.T.—Room Temp. 常温 HB—Brinell Hardness ブリネル硬さ HRB, HRC—Rockwell Hardness ロックウェル硬さ HV—Vicker's Hardness ビッカース硬さ G—Good A—Austenite Grain Size No. 結晶粒度番号 PAGE : 689
Q.T.—Quenching Temp. 焼入温度(℃) T.T.—Tempering Temp. 焼戻し温度(℃) N.T.—Normalizing Temp. 焼準温度(℃) SR—Stress-Relieved 応力除去焼なまし RA—Reduction of Area 絞り(%) NB—Reduction

検査証明書
INSPECTION CERTIFICATE

川崎製鉄株式会社 水島製鉄所
KAWASAKI STEEL CORPORATION MIZUSHIMA WORKS
〒712 倉敷市水島川崎通1丁目
1, MIZUSHIMA KAWASAKI DORI, KURASHIKI, JAPAN

証明書番号 CERTIFICATE NO : EFP-01108 - 2/3
契約番号 CONTRACT NO : 6132-D7907 (FE1 FE126231)
積出者 SHIPPER : FUKUSUKE KIKO CO.,LTD
買主 BUYER : P.T. PAL
品名 NAME OF ARTICLE: HOT ROLLED STEEL PLATE, ASME SA285 GR.C

日付 DATE : FEBRUARY 8 ,1996

鋼番 HEAT-NO	製品番号 PLATE-NO	製品寸法 DIMENSIONS mm	数量 QUANTITY	質量 MASS kg		YS 0.2% KSI	TS KSI	EL %			C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000	Cu ×100	Ni ×100	Cr ×100	Mo ×1000	V ×1000	Al	Nb		A	G
					JO	30.0	55.0	23																	
					*1		75.0				28		90	35	40	40	40	30	120	30		20		100	32
6-1789	AC112 B	8X3000X6000	1	1130	TC	44.7	65.3	31			13	20	75	22	4	1	2	3	1	2		1		6	3
	AC112 A	8X3000X10000	1	1884																					
5-2948	AC312 G	9X1800X8500	1	1081	TC	40.2	63.7	27			15	10	79	13	3	1	2	3	2	2		1		6	3
6-1789	AC3561W	9X3000X7000	1	1484	TC	41.5	63.5	29			13	20	75	22	4	1	2	3	1	2		1		6	3
6-1615	AE058 C	10X1800X8000	1	1130	TC	44.7	66.6	26			14	15	85	16	4	2	2	3	3	3		1		7	3
5-2936	AB138 C	13X1800X6000	1	1102	TC	41.9	66.3	28			16	10	87	23	4	2	2	3	2	3		1		7	3
6-1742	AA030 H	16X1500X6000	1	1130	TC	41.0	64.2	31			16	10	85	16	4	2	2	3	[illegible]	[illegible]		[illegible]		[illegible]	3
5-2936	AB196 B	16X3000X10000	1	3768	TC	43.2	64.7	27			16	10	87	23	4	2	2	3	[illegible]	[illegible]		[illegible]		[illegible]	3
6-1782	AB389 C	22X1000X3000	1	518	TC	40.3	64.7	31			16	20	84	14	4	2	2	2	3	1		1		6	2

A. I. REVIEWED 6/20/96 BANAT

REVIEWED / WITNESSED GEDE PRANOWA 20/6/96

WITNESSED REVIEWED 20/6/96

ACCEPTED: CONFORM TO ASME SEC II 2ND EDITION 1992 + ADD. 1994.
REVIEW BY QA
DATE 3/18/96

上記製品は規定の検査を行ない これに合格したことを証明する。

WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL DESCRIBED HEREIN HAS BEEN SATISFACTORILY TESTED IN ACCORDANCE WITH THE SPECIFICATION.

MANAGER OF INSPECTION SECTION

PAGE : 11

AA85238F03 8193 009R66V141A42

検査証明書
INSPECTION CERTIFICATE

川崎製鉄株式会社
水島製鉄所
KAWASAKI STEEL CORPORATION MIZUSHIMA WORKS
〒712 倉敷市水島川崎通1丁目
1, MIZUSHIMA KAWASAKI DORI, KURASHIKI, JAPAN

証明書番号 CERTIFICATE NO : EFP-01109 - 2/4
契約番号 CONTRACT NO : 6132-D7909 (FE1 FE126231)
提高社 SHIPPER : FUKUSUKE KIKO CO.,LTD
需要家 BUYER : P.T. PAL
品名 NAME OF ARTICLE: HOT ROLLED STEEL PLATE, ASME SA516 GR.70

日付 DATE : FEBRUARY 8 ,1996

鋼塊番号 HEAT-NO	製品番号 PLATE-NO	製品寸法 DIMENSIONS mm	枚数 巻数 本数 QUANTITY	質量 MASS kg	Cooling	引張試験 TENSILE TEST 降伏点 Y.P. or T.S. YS02% KSI	引張強さ TENSILE STRENGTH KSI	伸び ELONGATION %	降伏比 Y.R. %	曲げ試験 BEND TEST 180°	衝撃試験 IMPACT TEST 10×	化学成分 CHEMICAL COMPOSITION C ×100	Si ×100	Mn ×1000	P ×1000	S ×1000	Cu ×100	Ni ×100	Cr ×100	Mo ×1000	V ×1000	Al ×100	NB ×100	炭素当量 Ceq ×100	*A	*G
						38.0	70.0 / 90.0	17					15	85								15				
												23	40	120	35	35	40	40	30	120	30		20	43	100	32
												*SPEC.		(CHECK) 79												
												23		130			43	43	34	130	40			45		
4-2993	A2159 B	13X1500X6000	1	918	TC	65.7	81.8	22				17	28	114	12	3	13	15	2	5	3	22	14	38	30	3
												(CHECK) 18	29	115	11	3	13	15	2	4	3			40		
6-1656	A6168 D, (E)	13X1500X6000	2	1836	TC	60.5	79.0	24				18	28	112	12	3	2	2	4	2	3	25	15	38	8	4
												(CHECK) 17	28	111	12	3	2	1	2	1	2			36		
→	A6166 (F) - J AA-AD	13X1500X6000	14	12852	TC	61.6	78.8	24																		
4-2993	A2169 A	13X1800X6000	1	1102	TC	65.7	81.8	22				17	28	114	12	3	13	15	2	5	3	22	14	38	30	3
												(CHECK) 18	29	115	11	3	13	15	2	4	3			40		
→	A2215 A	15X1800X6000	1	1272	TC	60.5	77.7	28																		

ACCEPTED TO FORM TO ASME SECT. II A EDITION 1992 + ADD 1994.

REVIEWED / VERIFIED / WITNESSED
NYS SAMPURA 26/6/96
GEDE PRAMONA

A. I.
REV/WIT/VER
6/20/96
C. BANATE

WITNESSED
REVIEWED
DATE : 26/6/96

上記鋼材は規定の検査を行ない これに合格したことを証明する。

WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL DESCRIBED HEREIN HAS BEEN SATISFACTORILY TESTED IN ACCORDANCE WITH THE SPECIFICATION.

RECEIVED BY QA
DATE 8/10/96

MANAGER OF INSPECTION SECTION

Notes: [1] Location, Orientation 位置, 方向 T—Top 頭部 B—Bottom 底部 L—Longitudinal 圧延方向 C—Transverse 圧延方向に直角 [2] Al, Af, Mn, Ti, Zr— X1000 B, N— X10000 Al—Total Al [3]—X100 [4]—X1000
The other: *R=S, ES, S, R.T.—Room Temp. 室温 HB—Brinell Hardness ブリネル硬さ HRB, HRC—Rockwell Hardness ロックウェル硬さ HV—Vicker's Hardness ビッカース硬さ G—Good A—Austenite Grain Size No. 結晶粒度番号 R.T.—Quenching Temp. 焼入温度(℃) T.T.—Tempering Temp. 焼戻し温度(℃) N.T.—Normalizing Temp. 焼ならし温度(℃) SR—Stress-Relieved 応力除去焼なまし RA—Reduction of Area ばり(%) RED—Reduction

頁 PAGE: 29 (10)

AA85238F05 B193 FQAQ09R66V141A42

lampiran B

C:\Program Files\SPSS\TA-Tabel.sav

.	mat.f	. ten.f	fat
1	Armco Iron, 0.02%C, as rolled	340	185
2	Wrought Iron, 0.10%C, not given	345	170
3	0.18%C, hot rolled	432	213
4	0.20%C, normalized	430	193
5	0.20%C, hot-rolled	415	215
6	0.20%C, cold-rolled	550	275
7	0.24%C, quenched & drawn	465	203
8	0.25%C, normalized	479	201
9	0.30%C, normalized	490	232
10	0.32%C, hot-rolled	453	216
11	0.38%C, quenched & drawn	631	231
12	0.40%C, hardened and tempered	772	278
13	0.55%C, hardened and tempered	690	293
14	0.60%C, hot-rolled	690	345
15	0.60%C, heat-treated for fine grain	825	380
16	0.93%C, annealed	580	210
17	1.00%C, hot-rolled	930	415
18	1.00%C, oil-quenched, not drawn	1515	690
19	1.02%C, quenched	1382	724
20	0.19%C, 1.5%Mn, normalized	540	278

Descriptive Statistics

	N	Range	Minimum	Maximum	Sum	Mean		Std.	Variance
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Statistic
Ten.F	20	1175	340	1515	12954	647.70	70.83	316.77	100345.4
Fat	20	554	170	724	5947	297.35	34.61	154.77	23955.082
Valid N (listwise)	20								

Model Summary[b]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.972[a]	.944	.941	37.51

a. Predictors: (Constant), Ten.F

b. Dependent Variable: Fat

ANOVA[b]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	429815.8	1	429815.8	305.426	.000[a]
	Residual	25330.779	18	1407.266		
	Total	455146.6	19			

a. Predictors: (Constant), Ten.F

b. Dependent Variable: Fat

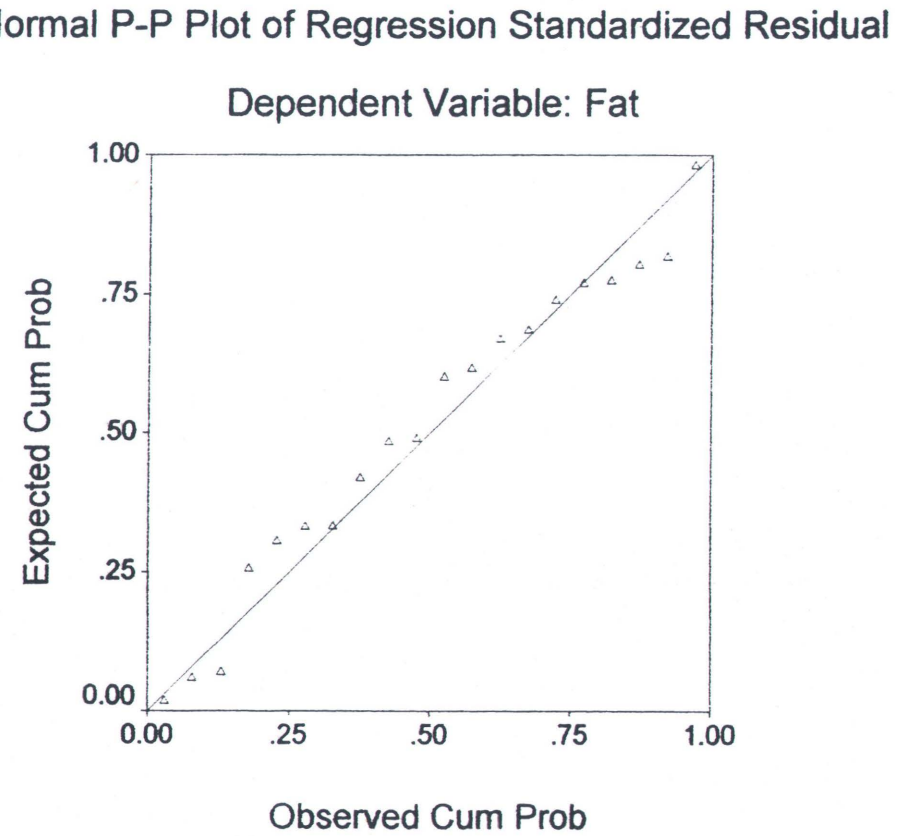
Correlations

		Fat	Ten.F
Pearson Correlation	Fat	1.000	.972
	Ten.F	.972	1.000
Sig. (1-tailed)	Fat	.	.000
	Ten.F	.000	.
N	Fat	20	20
	Ten.F	20	20

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	-10.181	19.494		-.522	.608	-51.137	30.774
	Ten.F	.475	.027	.972	17.476	.000	.418	.532

a. Dependent Variable: Fat


Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual
Dependent Variable: Fat
Expected Cum Prob
Observed Cum Prob
0.00
.25
.50
.75
1.00

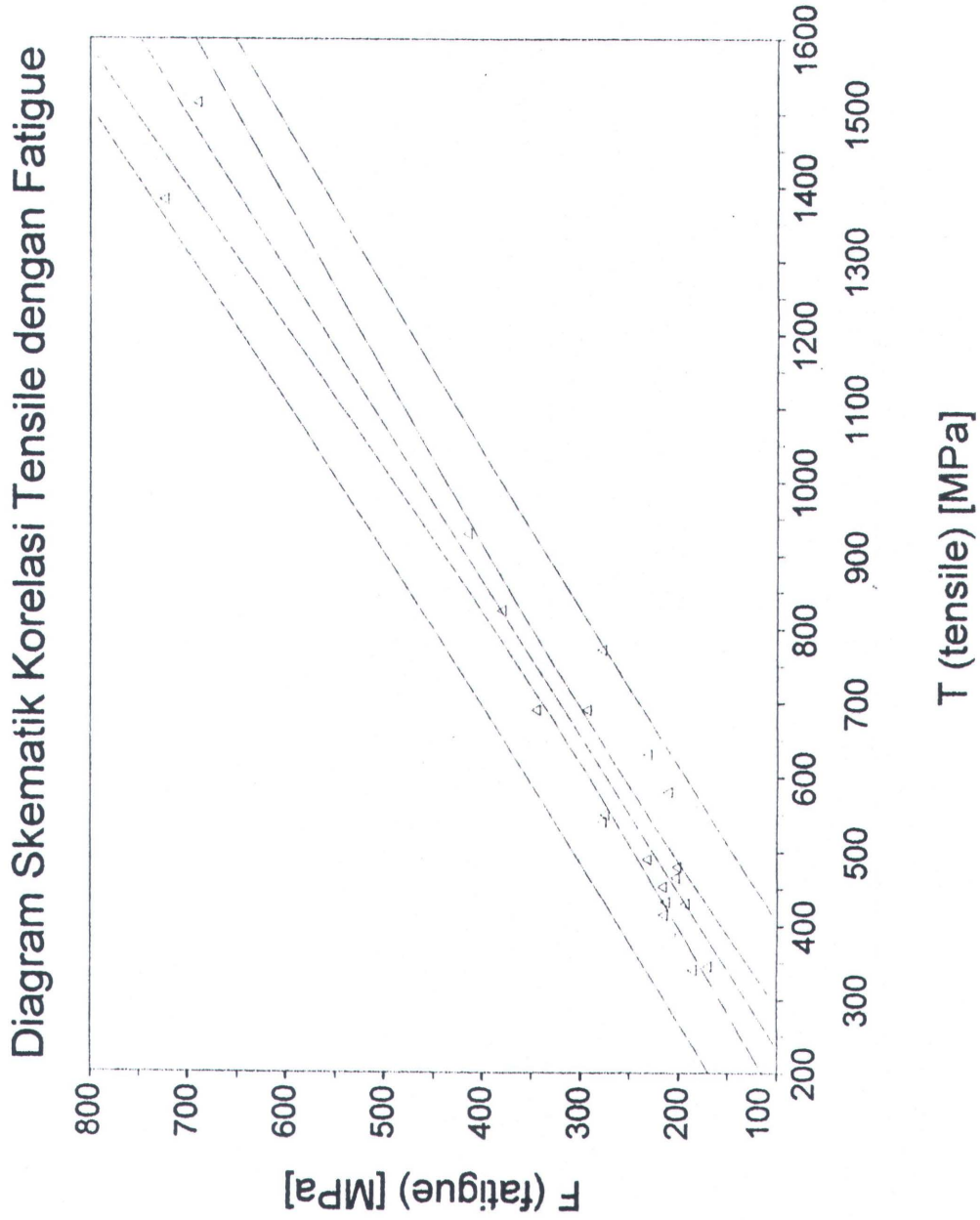


Diagram Skematik Korelasi Tensile dengan Fatigue
F (fatigue) [MPa]
800
700
600
500
400
300
200
100
T (tensile) [MPa]
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
1100
1200
1300
1400
1500
1600

C:\Program Files\SPSS\TA-Tabel.sav

	mat.i	ten.i	imp
1	Armco Iron, 0.02%C, not given	309	106
2	0.20%C, hardened and tempered	540	41
3	0.25%C, cold drawn	571	27
4	0.26%C, hardened and tempered	620	34
5	0.26%C, hardened and tempered	540	41
6	0.30%C, hardened and tempered	620	34
7	0.30%C, hardened and tempered	540	34
8	0.36%C, normalized	540	27
9	0.36%C, hardened and tempered	690	34
10	0.36%C, hardened and tempered	620	34
11	0.40%C, normalized	540	20
12	0.40%C, hardened and tempered	690	34
13	0.40%C, hardened and tempered	620	34
14	0.50%C, normalized	787	30
15	0.10%C, 0.3%Mn, annealed	377	54
16	0.19%C, 1.2%Mn, normalized	490	34
17	0.19%C, 1.2%Mn, cold drawn	530	34
18	0.19%C, 1.2%Mn, hardened and tempered	690	34
19	0.19%C, 1.2%Mn, hardened and tempered	540	47
20	0.19%C, 1.5%Mn, normalized	540	41
21	0.19%C, 1.5%Mn, hardened and tempered	690	41
22	0.19%C, 1.5%Mn, hardened and tempered	540	54
23	0.21%C, 0.82%Mn, annealed	505	41
24	0.28%C, 1.2%Mn, normalized	540	34
25	0.28%C, 1.2%Mn, hardened and tempered	690	34
26	0.28%C, 1.2%Mn, hardened and tempered	620	41
27	0.28%C, 1.5%Mn, normalized	590	34
28	0.28%C, 1.5%Mn, hardened and tempered	770	34
29	0.28%C, 1.5%Mn, hardened and tempered	620	47
30	0.36%C, 1.2%Mn, hardened and tempered	770	34

C:\Program Files\SPSS\TA-Tabel.sav

	mat.i	ten.i	imp
31	0.36%C, 1.2%Mn, hardened and tempered	620	41
32	0.36%C, 1.5%Mn, hardened and tempered	850	34
33	0.36%C, 1.5%Mn, hardened and tempered	620	47
34	0.28%C free cutting, hardened and tempered	620	34
35	0.28%C free cutting, hardened and tempered	540	34
36	0.36%C free cutting, hardened and tempered	690	54
37	0.36%C free cutting, hardened and tempered	540	34
38	0.36%C free cutting, higher Mn, hardened and tempered	540	34
39	0.36%C free cutting, higher Mn, hardened and tempered	690	34
40	0.36%C free cutting, hardened and tempered	620	34
41	0.36%C free cutting, hardened and tempered	690	34
42	0.44%C free cutting, hardened and tempered	620	34
43	0.44%C free cutting, hardened and tempered	770	27
44	0.44%C free cutting, hardened and tempered	850	27
45	0.44%C free cutting, hardened and tempered	690	34

Descriptive Statistics

	N	Range	Minimum	Maximum	Sum	Mean		Std.	Variance
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Statistic
Ten.I	45	541	309	850	27679	615.09	16.18	108.53	11779.537
Imp	45	86	20	106	1704	37.86	1.88	12.59	158.557
Valid N (listwise)	45								

Model Summary[b]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.515[a]	.265	.248	10.92

a. Predictors: (Constant), Ten.I

b. Dependent Variable: Imp

ANOVA[b]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	1851.202	1	1851.202	15.531	.000[a]
	Residual	5125.328	43	119.194		
	Total	6976.530	44			

a. Predictors: (Constant), Ten.I

b. Dependent Variable: Imp

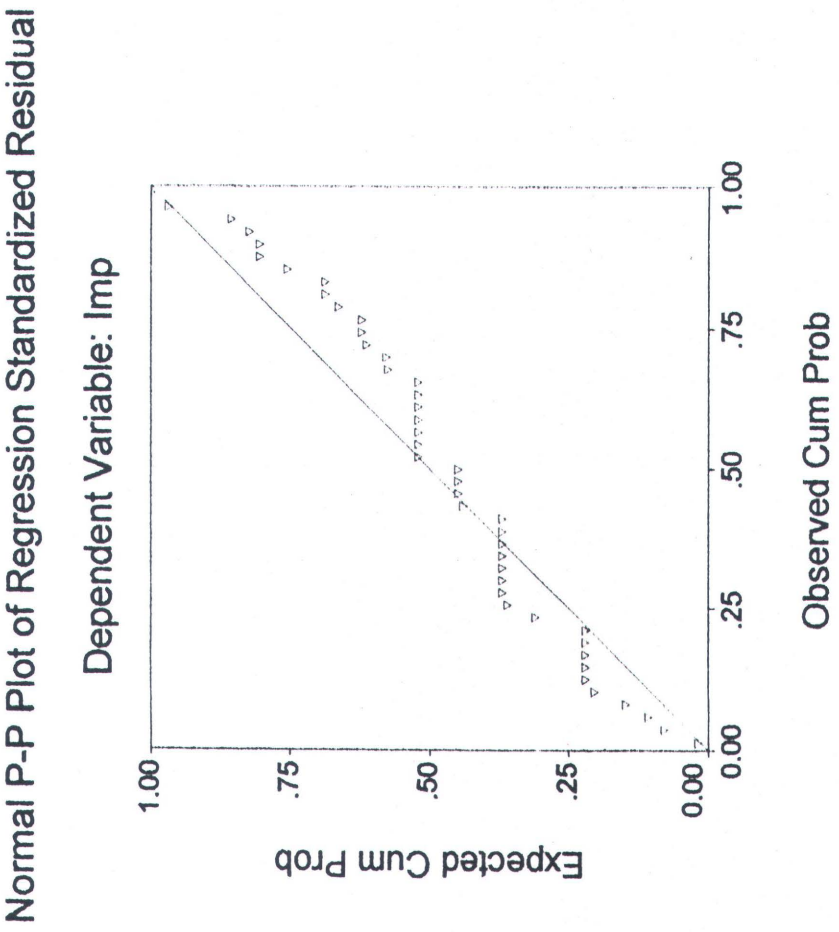
Correlations

		Imp	Ten.I
Pearson Correlation	Imp	1.000	-.515
	Ten.I	-.515	1.000
Sig. (1-tailed)	Imp	.	.000
	Ten.I	.000	.
N	Imp	45	45
	Ten.I	45	45

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	74.618	9.469		7.881	.000	55.522	93.713
	Ten.I	-5.98E-02	.015	-.515	-3.941	.000	-.090	-.029

a. Dependent Variable: Imp


Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual
Dependent Variable: Imp
Expected Cum Prob
Observed Cum Prob
0.00
.25
.50
.75
1.00

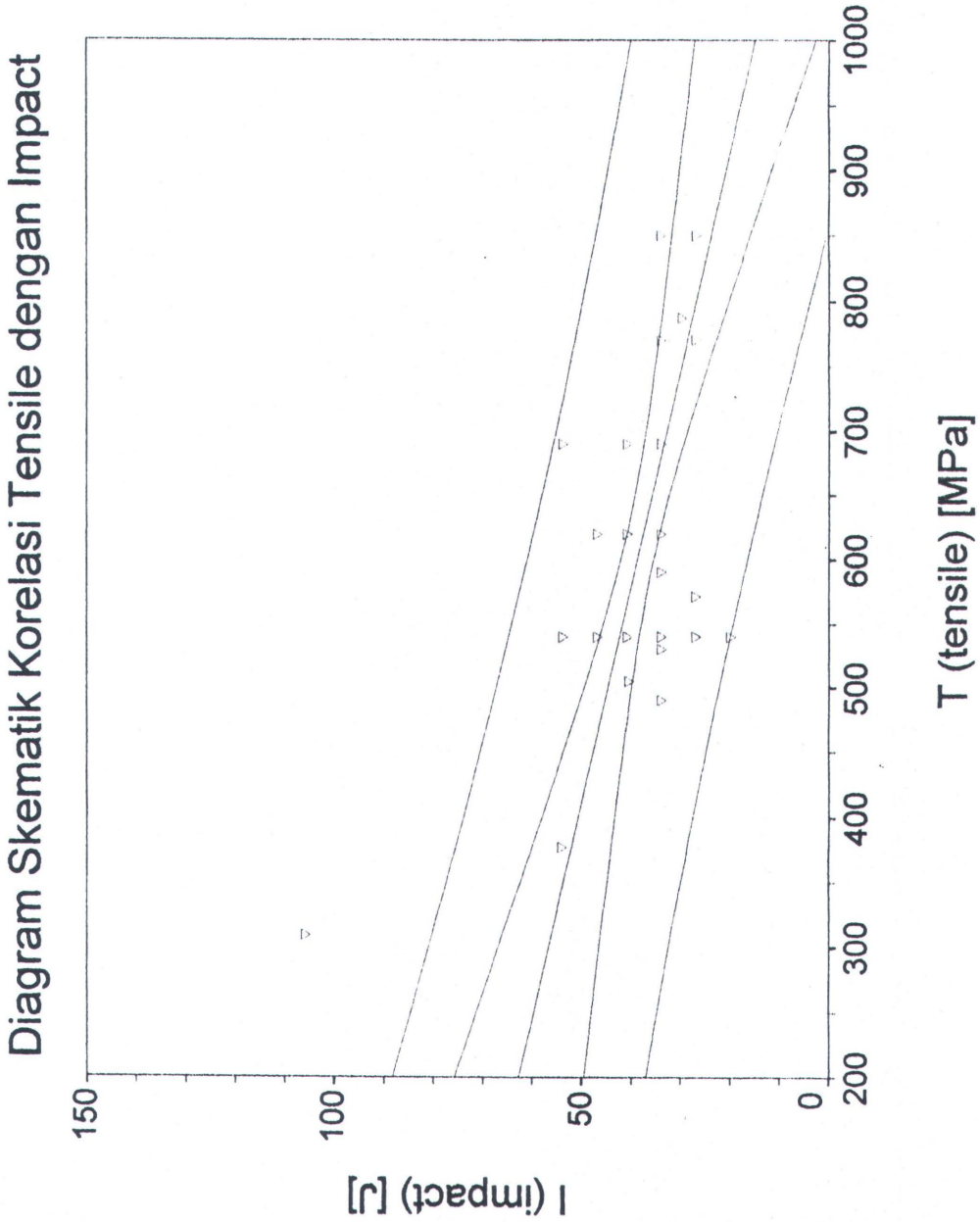
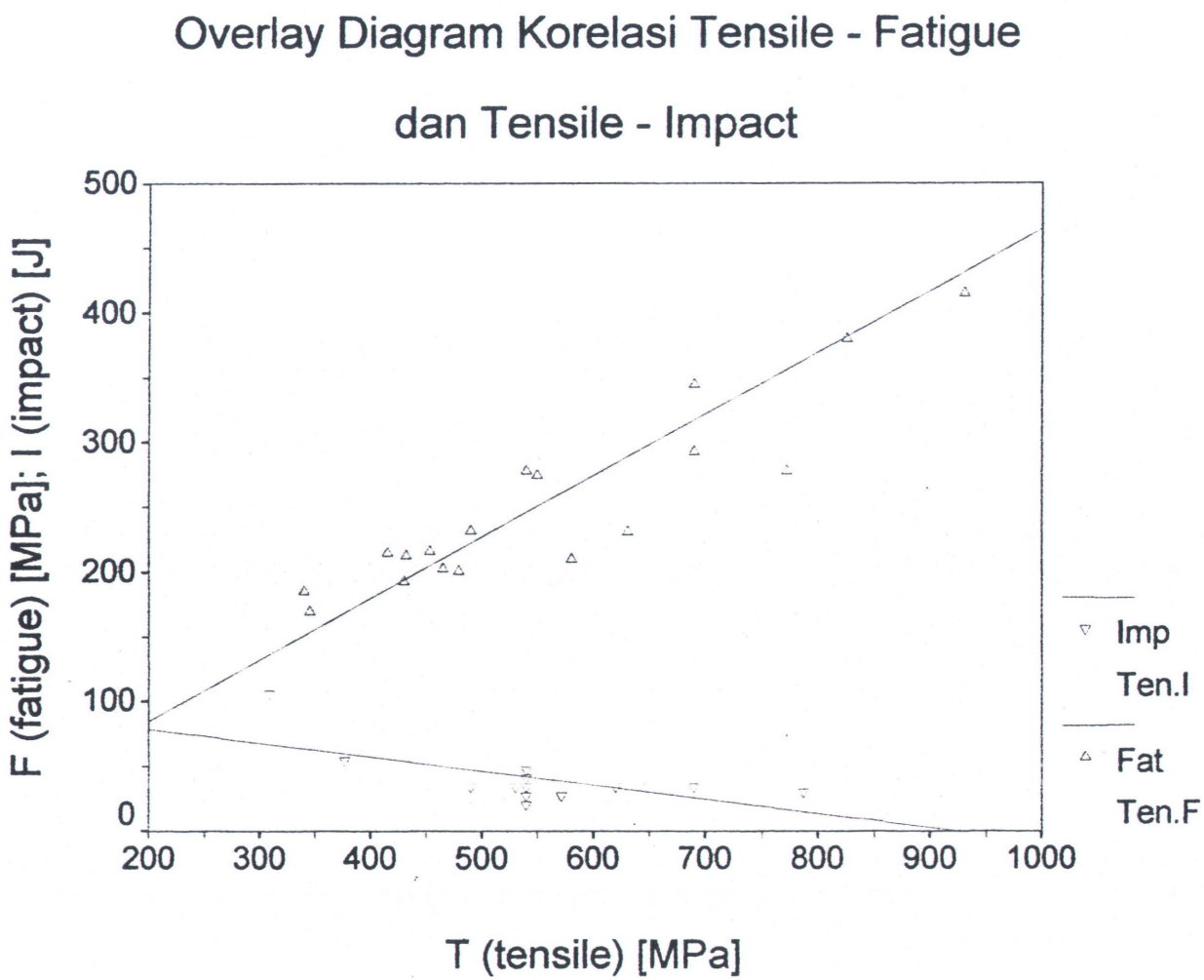


Diagram Skematik Korelasi Tensile dengan Impact
I (impact) [J]
150
100
50
0
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
T (tensile) [MPa]


Overlay Diagram Korelasi Tensile - Fatigue
dan Tensile - Impact
F (fatigue) [MPa]; I (impact) [J]
500
400
300
200
100
0
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
T (tensile) [MPa]
Imp
Ten.I
Fat
Ten.F

C:\Program Files\SPSS\TA-Tabel.sav

	mat.f.v	ten.f.v	fat.v
1	Armco iron, 0.02%C, as rolled	340	185
2	Wrought iron, 0.10%C, not given	345	170
3	0.18%C, hot rolled	432	213
4	0.20%C, normalized	430	193
5	0.20%C, hot-rolled	415	215
6	0.20%C, cold-rolled	550	275
7	0.24%C, quenched & drawn	465	203
8	0.25%C, normalized	479	201
9	0.30%C, normalized	490	232
10	0.32%C, hot-rolled	453	216
11	0.38%C, quenched & drawn	631	231
12	0.40%C, hardened and tempered	772	278
13	0.55%C, hardened and tempered	690	293
14	0.60%C, hot-rolled	690	345
15	0.60%C, heat-treated for fine grain	825	380
16	0.93%C, annealed	580	210
17	1.00%C, hot-rolled	930	415
18	1.00%C, oil-quenched, not drawn	1515	690
19	1.02%C, quenched	1382	724
20	0.19%C, 1.5%Mn, normalized	540	278
21	An	474	221
22	An-11R	507	255
23	An-33R	624	304
24	Q	482	279
25	Q-11R	565	333
26	Q-33R	680	358
27	Q-100Ag	555	240
28	Q-11R-100Ag	640	314
29	Q-33R-100Ag	682	363
30	Q-11R-70Ag	639	338

C:\Program Files\SPSS\TA-Tabel.sav

	mat.f.v	ten.f.v	fat.v
31	Q-33R-70Ag	695	373

Descriptive Statistics

	N	Range	Minimum	Maximum	Sum	Mean		Std.	Variance
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Statistic
Ten.F.v	31	1175	340	1515	19497	628.94	46.30	257.79	66455.262
Fat.v	31	554	170	724	9325	300.81	22.79	126.88	16099.361
Valid N (listwise)	31								

Model Summary[b]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.957[a]	.916	.913	37.46

a. Predictors: (Constant), Ten.F.v

b. Dependent Variable: Fat.v

ANOVA[b]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	442296.5	1	442296.5	315.271	.000[a]
	Residual	40684.347	29	1402.909		
	Total	482980.8	30			

a. Predictors: (Constant), Ten.F.v

b. Dependent Variable: Fat.v

Correlations

		Fat.v	Ten.F.v
Pearson Correlation	Fat.v	1.000	.957
	Ten.F.v	.957	1.000
Sig. (1-tailed)	Fat.v	.	.000
	Ten.F.v	.000	.
N	Fat.v	31	31
	Ten.F.v	31	31

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	4.571	17.989		.254	.801	-32.221	41.362
	Ten.F.v	.471	.027	.957	17.756	.000	.417	.525

a. Dependent Variable: Fat.v

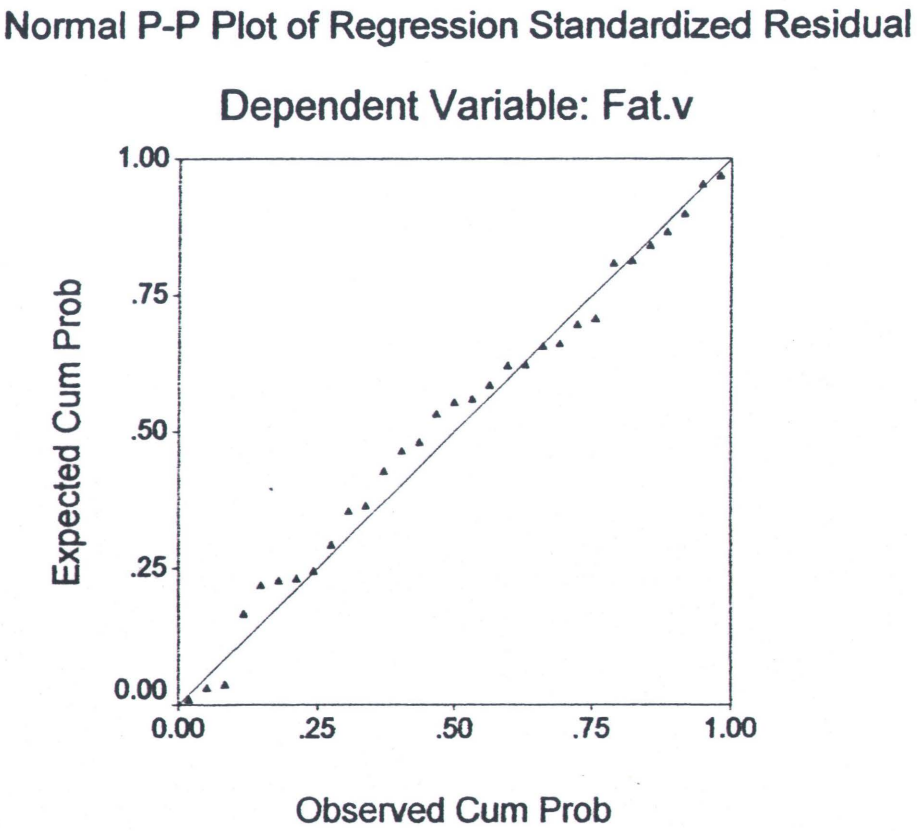
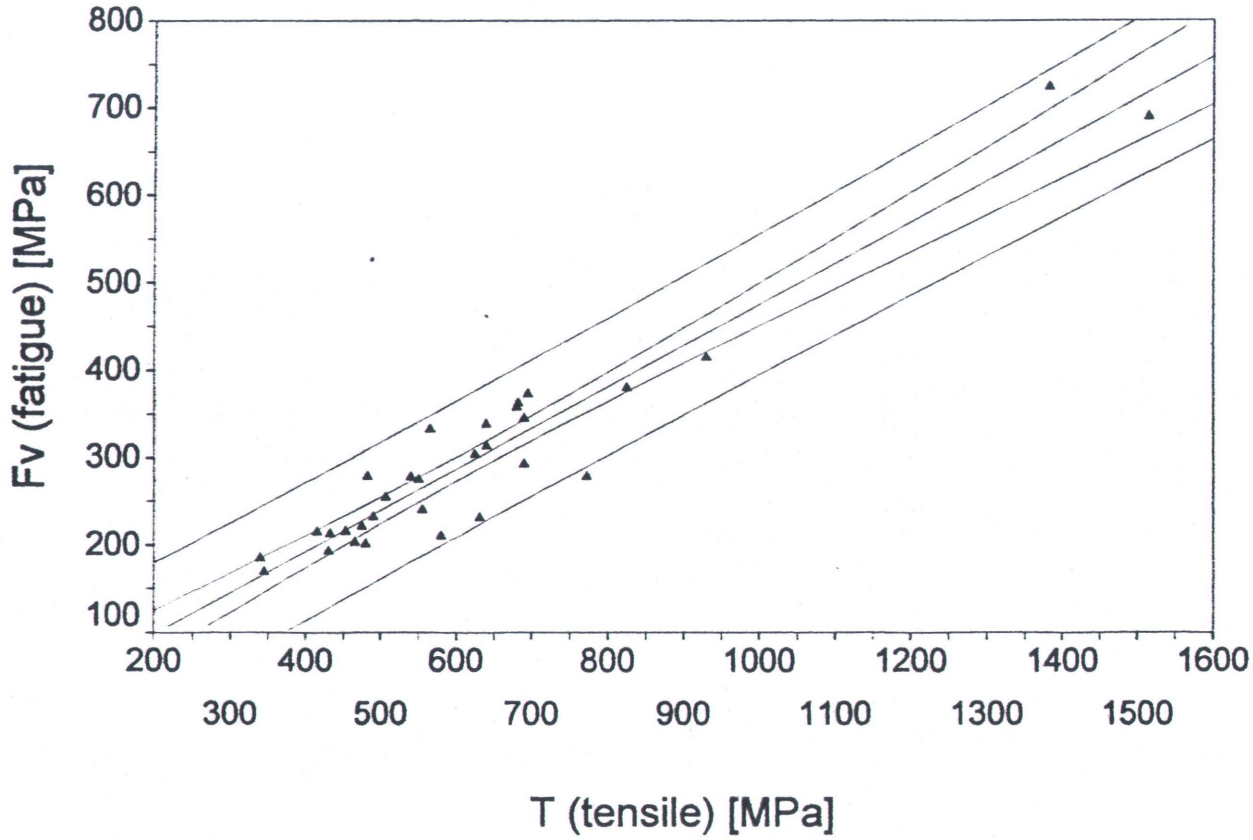

Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual
Dependent Variable: Fat.v
Expected Cum Prob
Observed Cum Prob
0.00
.25
.50
.75
1.00

Diagram Skematik Korelasi Tensile dengan Fatigue

Setelah Verifikasi



C:\Program Files\SPSS\TA-Tabel.sav

	mat.i.v	ten.i.v	imp.v
1	Armco Iron, 0.02%C, not given	309	106
2	0.20%C, hardened and tempered	540	41
3	0.25%C, cold drawn	571	27
4	0.26%C, hardened and tempered	620	34
5	0.26%C, hardened and tempered	540	41
6	0.30%C, hardened and tempered	620	34
7	0.30%C, hardened and tempered	540	34
8	0.36%C, normalized	540	27
9	0.36%C, hardened and tempered	690	34
10	0.36%C, hardened and tempered	620	34
11	0.40%C, normalized	540	20
12	0.40%C, hardened and tempered	690	34
13	0.40%C, hardened and tempered	620	34
14	0.50%C, normalized	787	30
15	0.10%C, 0.3%Mn, annealed	377	54
16	0.19%C, 1.2%Mn, normalized	490	34
17	0.19%C, 1.2%Mn, cold drawn	530	34
18	0.19%C, 1.2%Mn, hardened and tempered	690	34
19	0.19%C, 1.2%Mn, hardened and tempered	540	47
20	0.19%C, 1.5%Mn, normalized	540	41
21	0.19%C, 1.5%Mn, hardened and tempered	690	41
22	0.19%C, 1.5%Mn, hardened and tempered	540	54
23	0.21%C, 0.82%Mn, annealed	505	41
24	0.28%C, 1.2%Mn, normalized	540	34
25	0.28%C, 1.2%Mn, hardened and tempered	690	34
26	0.28%C, 1.2%Mn, hardened and tempered	620	41
27	0.28%C, 1.5%Mn, normalized	590	34
28	0.28%C, 1.5%Mn, hardened and tempered	770	34
29	0.28%C, 1.5%Mn, hardened and tempered	620	47
30	0.36%C, 1.2%Mn, hardened and tempered	770	34

C:\Program Files\SPSS\TA-Tabel.sav

	mat.i.v	ten.i.v	imp.v
31	0.36%C, 1.2%Mn, hardened and tempered	620	41
32	0.36%C, 1.5%Mn, hardened and tempered	850	34
33	0.36%C, 1.5%Mn, hardened and tempered	620	47
34	0.28%C free cutting, hardened and tempered	620	34
35	0.28%C free cutting, hardened and tempered	540	34
36	0.36%C free cutting, hardened and tempered	690	54
37	0.36%C free cutting, hardened and tempered	540	34
38	0.36%C free cutting, higher Mn, hardened and tempered	540	34
39	0.36%C free cutting, higher Mn, hardened and tempered	690	34
40	0.36%C free cutting, hardened and tempered	620	34
41	0.36%C free cutting, hardened and tempered	690	34
42	0.44%C free cutting, hardened and tempered	620	34
43	0.44%C free cutting, hardened and tempered	770	27
44	0.44%C free cutting, hardened and tempered	850	27
45	0.44%C free cutting, hardened and tempered	690	34
46	JIS G3101 SS400	427	53
47	ASTM A36	423	55
48	ASME SA285 GR.C	449	52
49	ASME SA516 GR.70	570	45

Descriptive Statistics

	N	Range	Minimum	Maximum	Sum	Mean		Std.	Variance
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Statistic
Ten.l.v	49	541	309	850	29548	603.02	16.14	113.01	12772.020
Imp.v	49	86	20	106	1909	38.95	1.81	12.66	160.253
Valid N (listwise)	49								

Model Summary[b]

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.570[a]	.325	.311	10.51

a. Predictors: (Constant), Ten.l.v

b. Dependent Variable: Imp.v

ANOVA[b]

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	2498.949	1	2498.949	22.616	.000[a]
	Residual	5193.173	47	110.493		
	Total	7692.122	48			

a. Predictors: (Constant), Ten.l.v

b. Dependent Variable: Imp.v

Correlations

		Imp.v	Ten.l.v
Pearson Correlation	Imp.v	1.000	-.570
	Ten.l.v	-.570	1.000
Sig. (1-tailed)	Imp.v	.	.000
	Ten.l.v	.000	.
N	Imp.v	49	49
	Ten.l.v	49	49

Coefficients[a]

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95% Confidence Interval for B	
		B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound
1	(Constant)	77.451	8.234		9.407	.000	60.887	94.015
	Ten.l.v	-6.38E-02	.013	-.570	-4.756	.000	-.091	-.037

a. Dependent Variable: Imp.v

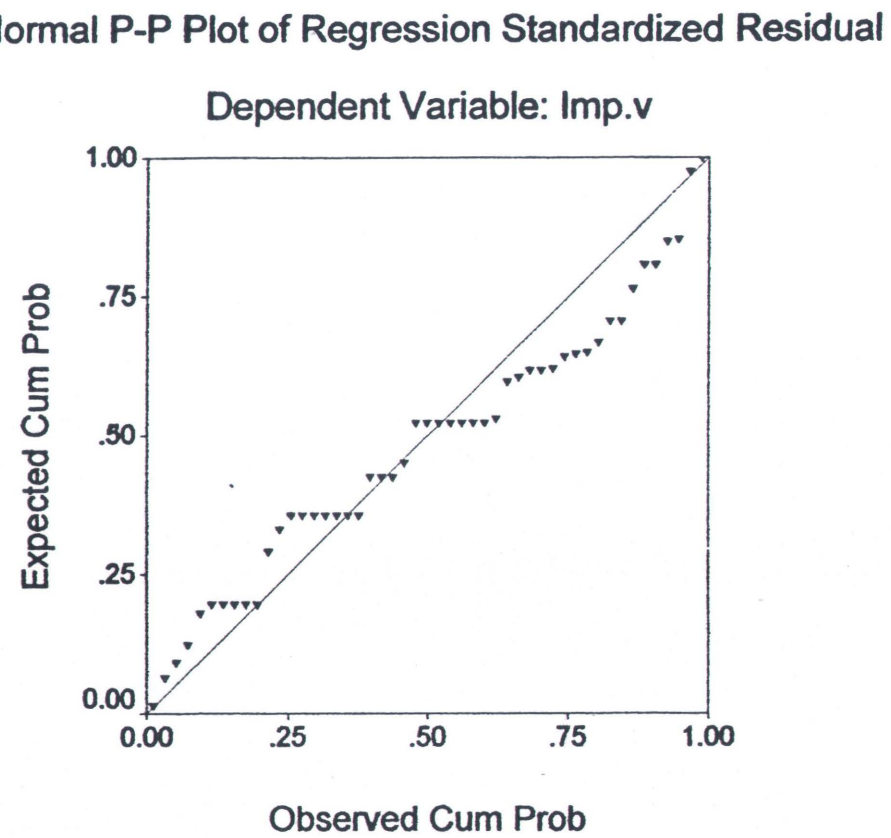
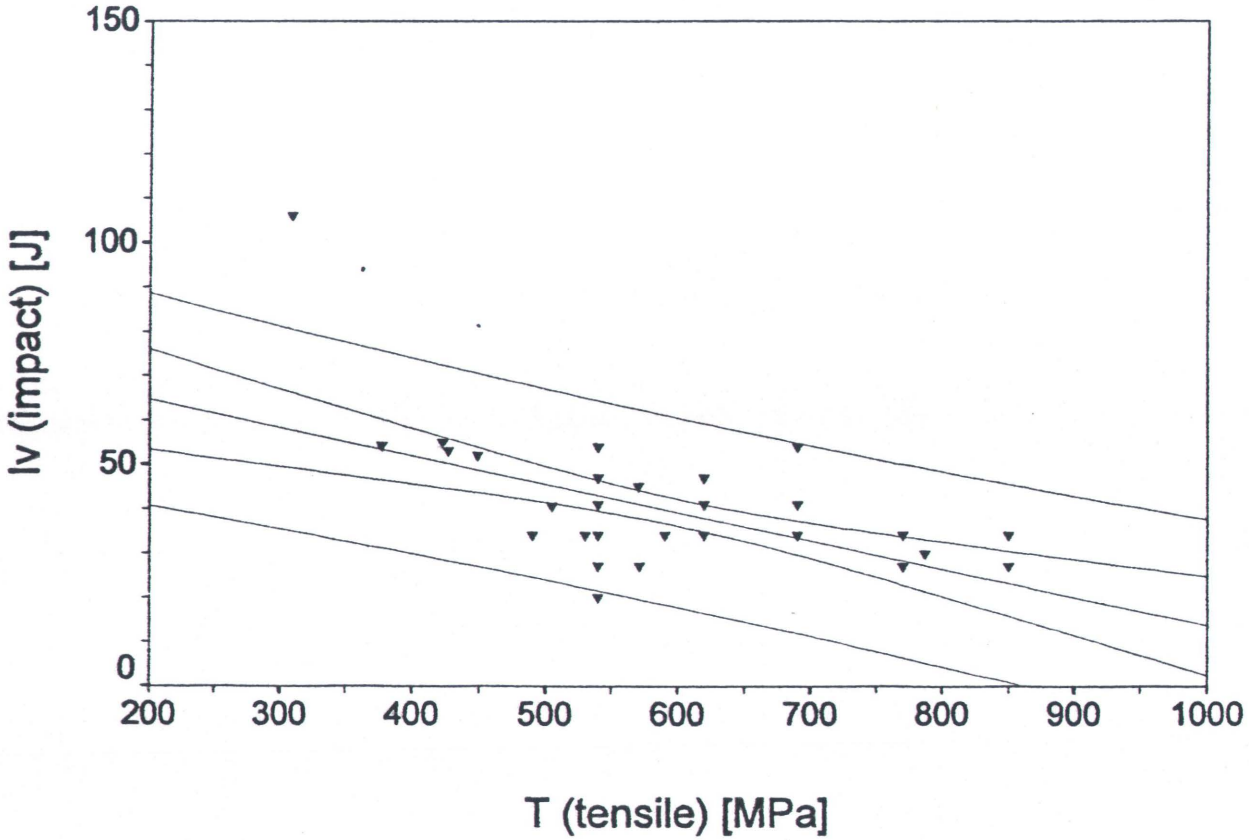
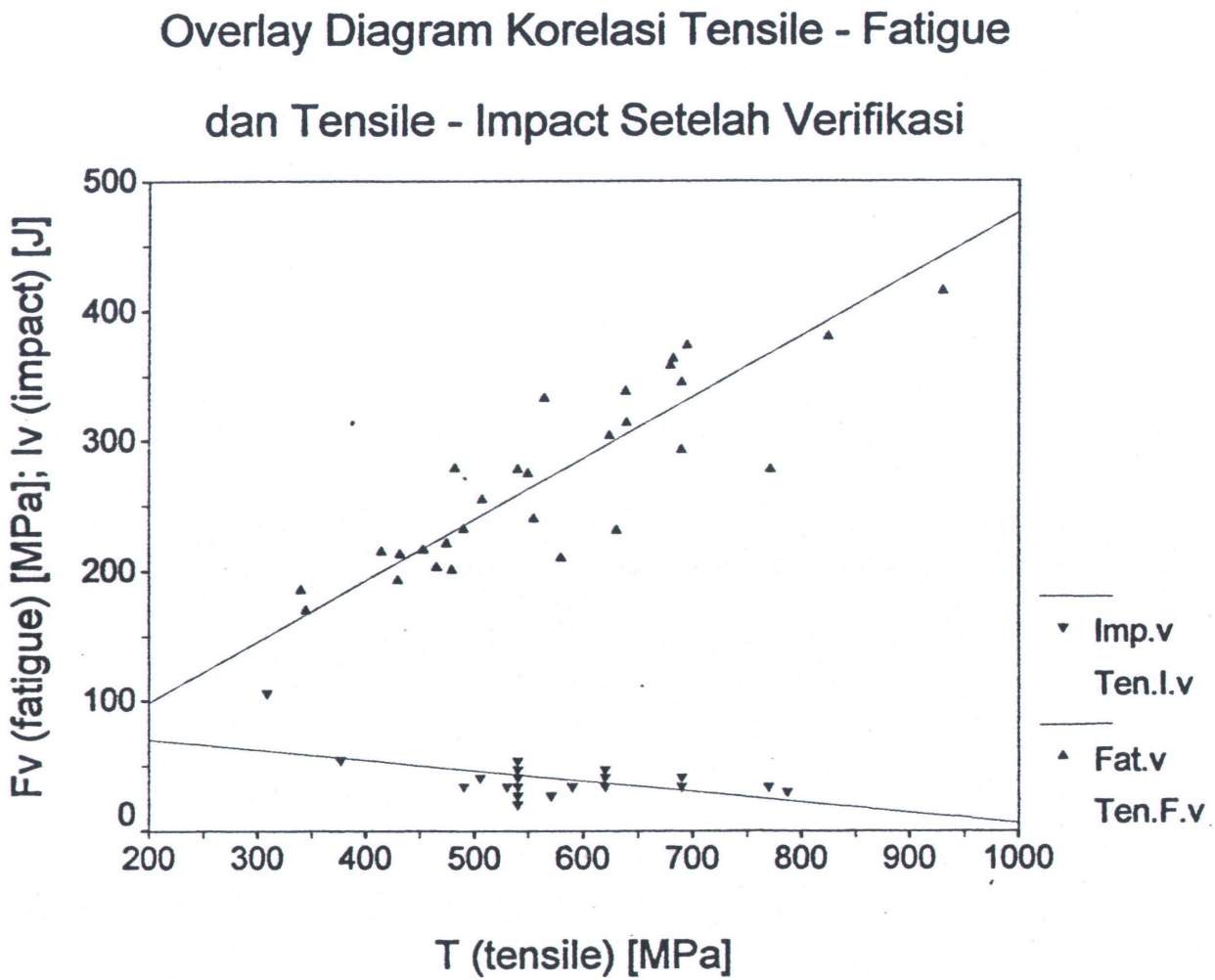

Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual
Dependent Variable: Imp.v
Expected Cum Prob
Observed Cum Prob
0.00
.25
.50
.75
1.00

Diagram Skematik Korelasi Tensile dengan Impact

Setelah Verifikasi




Overlay Diagram Korelasi Tensile - Fatigue
dan Tensile - Impact Setelah Verifikasi
Fv (fatigue) [MPa]; Iv (impact) [J]
500
400
300
200
100
0
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
T (tensile) [MPa]
Imp.v
Ten.I.v
Fat.v
Ten.F.v

Nonparametric Correlations

			Ten.F	Fat	Ten.F.v	Fat.v	Ten.I	Imp	Ten.I.v	Imp.v
Kendall's tau_b	Correlation Coefficient	Ten.F	1.000	.751**	1.000**	.751**	.144	-.086	.144	-.086
		Fat	.751**	1.000	.751**	1.000**	.224	.049	.224	.049
		Ten.F.v	1.000**	.751**	1.000	.735**	.177	.010	.177	.010
		Fat.v	.751**	1.000**	.735**	1.000	.210	.145	.210	.145
		Ten.I	.144	.224	.177	.210	1.000	-.275*	1.000**	-.275*
		Imp	-.086	.049	.010	.145	-.275*	1.000	-.275*	1.000**
		Ten.I.v	.144	.224	.177	.210	1.000**	-.275*	1.000	-.374**
		Imp.v	-.086	.049	.010	.145	-.275*	1.000**	-.374**	1.000
	Sig. (2-tailed)	Ten.F	.	.000	.000	.000	.403	.625	.403	.625
		Fat	.000	.	.000	.000	.192	.780	.192	.780
		Ten.F.v	.000	.000	.	.000	.186	.942	.186	.942
		Fat.v	.000	.000	.000	.	.118	.291	.118	.291
		Ten.I	.403	.192	.186	.118	.	.024	.000	.024
		Imp	.625	.780	.942	.291	.024	.	.024	.000
		Ten.I.v	.403	.192	.186	.118	.000	.024	.	.001
		Imp.v	.625	.780	.942	.291	.024	.000	.001	.
	N	Ten.F	20	20	20	20	20	20	20	20
		Fat	20	20	20	20	20	20	20	20
		Ten.F.v	20	20	31	31	31	31	31	31
		Fat.v	20	20	31	31	31	31	31	31
		Ten.I	20	20	31	31	45	45	45	45
		Imp	20	20	31	31	45	45	45	45
		Ten.I.v	20	20	31	31	45	45	49	49
		Imp.v	20	20	31	31	45	45	49	49

Nonparametric Correlations

			Ten.F	Fat	Ten.F.v	Fat.v	Ten.I	Imp	Ten.I.v	Imp.v
Spearman's rho	Correlation Coefficient	Ten.F	1.000	.899**	1.000**	.899**	.168	-.097	.168	-.097
		Fat	.899**	1.000	.899**	1.000**	.256	.062	.256	.062
		Ten.F.v	1.000**	.899**	1.000	.888**	.219	.009	.219	.009
		Fat.v	.899**	1.000**	.888**	1.000	.263	.184	.263	.184
		Ten.I	.168	.256	.219	.263	1.000	-.327*	1.000**	-.327*
		Imp	-.097	.062	.009	.184	-.327*	1.000	-.327*	1.000**
		Ten.I.v	.168	.256	.219	.263	1.000**	-.327*	1.000	-.446**
		Imp.v	-.097	.062	.009	.184	-.327*	1.000**	-.446**	1.000
	Sig. (2-tailed)	Ten.F	.	.000	.000	.000	.479	.684	.479	.684
		Fat	.000	.	.000	.000	.276	.794	.276	.794
		Ten.F.v	.000	.000	.	.000	.238	.961	.238	.961
		Fat.v	.000	.000	.000	.	.154	.321	.154	.321
		Ten.I	.479	.276	.238	.154	.	.029	.000	.029
		Imp	.684	.794	.961	.321	.029	.	.029	.000
		Ten.I.v	.479	.276	.238	.154	.000	.029	.	.001
		Imp.v	.684	.794	.961	.321	.029	.000	.001	.
	N	Ten.F	20	20	20	20	20	20	20	20
		Fat	20	20	20	20	20	20	20	20
		Ten.F.v	20	20	31	31	31	31	31	31
		Fat.v	20	20	31	31	31	31	31	31
		Ten.I	20	20	31	31	45	45	45	45
		Imp	20	20	31	31	45	45	45	45
		Ten.I.v	20	20	31	31	45	45	49	49
		Imp.v	20	20	31	31	45	45	49	49

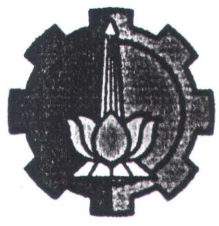
**. Correlation is significant at the .01 level (2-tailed).

*. Correlation is significant at the .05 level (2-tailed).

Parametric Correlations

		Ten.F	Fat	Ten.F.v	Fat.v	Ten.I	Imp	Ten.I.v	Imp.v
Pearson Correlation	Ten.F	1.000	.972**	1.000**	.972**	.207	-.103	.207	-.103
	Fat	.972**	1.000	.972**	1.000**	.171	-.009	.171	-.009
	Ten.F.v	1.000**	.972**	1.000	.957**	.158	-.099	.158	-.099
	Fat.v	.972**	1.000**	.957**	1.000	.172	-.010	.172	-.010
	Ten.I	.207	.171	.158	.172	1.000	-.515**	1.000**	-.515**
	Imp	-.103	-.009	-.099	-.010	-.515**	1.000	-.515**	1.000**
	Ten.I.v	.207	.171	.158	.172	1.000**	-.515**	1.000	-.570**
	Imp.v	-.103	-.009	-.099	-.010	-.515**	1.000**	-.570**	1.000
Sig. (2-tailed)	Ten.F	.	.000	.000	.000	.381	.666	.381	.666
	Fat	.000	.	.000	.000	.472	.969	.472	.969
	Ten.F.v	.000	.000	.	.000	.397	.595	.397	.595
	Fat.v	.000	.000	.000	.	.354	.957	.354	.957
	Ten.I	.381	.472	.397	.354	.	.000	.000	.000
	Imp	.666	.969	.595	.957	.000	.	.000	.000
	Ten.I.v	.381	.472	.397	.354	.000	.000	.	.000
	Imp.v	.666	.969	.595	.957	.000	.000	.000	.
N	Ten.F	20	20	20	20	20	20	20	20
	Fat	20	20	20	20	20	20	20	20
	Ten.F.v	20	20	31	31	31	31	31	31
	Fat.v	20	20	31	31	31	31	31	31
	Ten.I	20	20	31	31	45	45	45	45
	Imp	20	20	31	31	45	45	45	45
	Ten.I.v	20	20	31	31	45	45	49	49
	Imp.v	20	20	31	31	45	45	49	49

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).



lampiran C

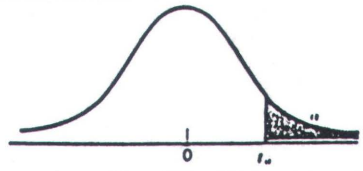
B.1 CONVERSION FACTORS

To convert	from		to		multiply by†
Quantity:	*Non-SI unit*	=	*SI unit*	×	*Conversion factor*
Acceleration	ft/s^2		m/s^2		3.048 000 E - 01
Area	in^2		mm^2		6.451 600 E + 02
	ft^2		m^2		9.290 304 E - 02
Corrosion rate					
mass per area per time	$oz/ft^2/year$		$g/(m^2 \cdot year)$		3.051 517 E + 02
thickness per unit time	mil/year		μm/year		2.540 000 E + 01
Creep rate	in/in/h		m/(m · s)		2.777 778 E - 04
Density	lbm/in^3		kg/m^3		2.767 990 E + 04
(mass per unit volume)	lbm/ft^3		kg/m^3		1.601 846 E + 01
Energy	Btu		kJ		1.055 056 E + 00
(including heat, work,	in-lbf		J		1.129 848 E - 01
etc.)	ft-lbf		J		1.355 818 E + 00
Force	pdl		N		1.382 550 E - 01
	lbf		N		4.448 222 E + 00
	kgf		N		9.806 650 E + 00
Fracture toughness	$ksi\sqrt{in}$		$MPa \cdot m^{1/2}$		1.098 843 E + 00
Hardness	kgf/mm^2		MPa		9.806 650 E + 00
	kgf		N		9.806 650 E + 00
Linear measure	angstrom, A		nm		1.000 000 E - 01
(including width,	microinch		μm		2.540 000 E - 02
diameter, height,	mil		μm		2.540 000 E + 01
length, mesh size,	in		mm		2.540 000 E + 01
etc.)	ft		m		3.048 000 E - 01
Mass	oz (avdp)		g		2.834 952 E + 01
	lbm (avdp)		kg		4.535 924 E - 01
	slug		kg		1.459 388 E + 01

To convert	from	to	multiply by†
Quantity:	*Non-SI unit*	*SI unit*	*Conversion factor*
Modulus of elasticity	lbf/in²	GPa	6.894 757 E - 06
Moment of force, including bending moment, torque	lbf-in	N · m/rad	1.129 848 E - 01
	lbf-ft	N · m/rad	1.355 818 E + 00
Moment of inertia of area	in⁴	mm⁴	4.162 314 E + 05
Momentum, linear	lbm-ft/s	kg · m/s	1.382 550 E - 01
Momentum, angular	lbm ft²/s	kg · m²/(rad · s)	4.214 011 E - 02
Power	Btu/min	kW	1.758 426 E - 02
	ft-lbf/min	W	2.259 697 E - 02
	hp (550 ft-lbf/s)	kW	7.456 999 E - 01
	hp (electric)	kW	7.460 000 E - 01
Section modulus	in³	mm³	1.638 706 E + 04
Specific area	ft²/lbm	m²/kg	2.048 160 E - 01
Stress	lbf/in²	MPa	6.894 757 E - 03
	ksi	MPa	6.894 757 E + 00
Temperature	°F	°C	(5/9)(°F - 32)
	°C	K	(°C + 273.15)
	°F	K	(5/9)(°F + 459.67)
Temperature interval	°F	°C or K	5/9
Thermal expansion, linear coefficient	in/in/°F	K⁻¹	1.800 000 E + 00
Velocity, linear	in/s	mm/s	2.540 000 E + 01
	ft/s	m/s	3.048 000 E - 01
	in/min	mm/s	4.233 333 E - 01
	ft/min	m/s	5.080 000 E - 03
Velocity, angular	rev/min	rad/s	1.047 198 E - 01
Viscosity, dynamic	lbf-s/in²	Pa · s	6.894 757 E + 03
	P (poise)	Pa · s	1.000 000 E - 01
Viscosity, kinematic	in²/s	mm²/s	6.451 600 E + 02
	St (stokes)	m²/s	1.000 000 E - 04
Volume	in³	mm³	1.638 706 E + 04
	ft³	m³	2.831 685 E - 02
	yd³	m³	7.645 549 E - 01
	gal (fluid)	dm³, L	3.785 412 E + 00
Water-cement ratio	gal/ft³-sack	(mass ratio)	8.861 702 E - 02

†The non-SI unit equals the SI unit times the conversion factor; e.g., 1.0 ft/s² = 0.3048 m/s².

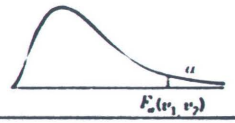
TABLE 4 Percentage Points of t Distributions



d.f. \ α	.25	.10	.05	.025	.01	.00833	.00625	.005
1	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	38.190	50.923	63.657
2	.816	1.886	2.920	4.303	6.965	7.649	8.860	9.925
3	.765	1.638	2.353	3.182	4.541	4.857	5.392	5.841
4	.741	1.533	2.132	2.776	3.747	3.961	4.315	4.604
5	.727	1.476	2.015	2.571	3.365	3.534	3.810	4.032
6	.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.287	3.521	3.707
7	.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.128	3.335	3.499
8	.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.016	3.206	3.355
9	.703	1.383	1.833	2.262	2.821	2.933	3.111	3.250
10	.700	1.372	1.812	2.228	2.764	2.870	3.038	3.169
11	.697	1.363	1.796	2.201	2.718	2.820	2.981	3.106
12	.695	1.356	1.782	2.179	2.681	2.779	2.934	3.055
13	.694	1.350	1.771	2.160	2.650	2.746	2.896	3.012
14	.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.718	2.864	2.977
15	.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.694	2.837	2.947
16	.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.673	2.813	2.921
17	.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.655	2.793	2.898
18	.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.639	2.775	2.878
19	.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.625	2.759	2.861
20	.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.613	2.744	2.845
21	.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.601	2.732	2.831
22	.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.591	2.720	2.819
23	.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.582	2.710	2.807
24	.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.574	2.700	2.797
25	.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.566	2.692	2.787
26	.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.559	2.684	2.779
27	.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.552	2.676	2.771
28	.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.546	2.669	2.763
29	.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.541	2.663	2.756
30	.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.536	2.657	2.750
40	.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.499	2.616	2.704
60	.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.463	2.575	2.660
120	.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.428	2.536	2.617
∞	.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.394	2.498	2.576

TABLE 6 *(Continued)* Percentage Points of $F(\nu_1, \nu_2)$ Distributions

$\alpha = .05$



ν_2 \ ν_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30	40	60
1	161.5	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	246.0	248.0	249.3	250.1	251.1	252.2
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.46	19.46	19.47	19.48
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.63	8.62	8.59	8.57
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.52	4.50	4.46	4.43
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.83	3.81	3.77	3.74
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.40	3.38	3.34	3.30
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.11	3.08	3.04	3.01
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.89	2.86	2.83	2.79
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.73	2.70	2.66	2.62
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.60	2.57	2.53	2.49
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.50	2.47	2.43	2.38
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.41	2.38	2.34	2.30
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.34	2.31	2.27	2.22
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.28	2.25	2.20	2.16
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.23	2.19	2.15	2.11
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.18	2.15	2.10	2.06
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.14	2.11	2.06	2.02
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.07	2.04	1.99	1.95
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.02	1.98	1.94	1.89
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.00	1.96	1.91	1.86
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.97	1.94	1.89	1.84
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.94	1.90	1.85	1.80
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.92	1.88	1.84	1.79
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.89	1.85	1.81	1.75
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.88	1.84	1.79	1.74
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.78	1.74	1.69	1.64
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.69	1.65	1.59	1.53
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.60	1.55	1.50	1.43
∞	3.84	3.00	2.61	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.51	1.46	1.39	1.32

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN ITS
JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN

DAFTAR KEMAJUAN TUGAS AKHIR (NA 1701)

Nama mahasiswa : Harman Prasongko
N.R.P. : 4193100030
Tugas diberikan : Semester Genap 1996 / 1997
Tanggal mulai tugas : 14 Maret 1997
Tanggal selesai tugas : 26 Juli 1997
Dosen Pembimbing : 1. Ir. Soewefy, M.Eng
2. .....

Tanggal	Uraian Kemajuan Tugas	Tanda Tangan
31/3/97	Konsultasi awal T.A.	
14/4/97	Masalah data sekunder Impact, Fatigue & Tensile.	
24/4/97	Informasi yang didapat dari Ir. Ahmad Djuhairi, M.Eng (Div. GE - PT. PAL)	
1/5/97	Menghubungi Ir. Samudro, M.Eng (Pl. kelautan - BPPT)	
12/5/97	Konsultasi data yang telah dikumpulkan.	
26/5/97	Petunjuk analisa korelasi dengan regresi linier, dan kuadrat terkecil.	
5/6/97	Studi statistik & SPSS dari jurusan statistik FMIPA - ITS.	
12/6/97	Pemilihan metode analisa statistik (langkah2 yang ditempuh)	

Tanggal	Uraian Kemajuan Tugas	Tanda Tangan
20/6/97	Konsep dasar yang menyatakan hubungan fatigue, impact dan tensile.	
10/6/97	Konsultasi hasil sementara yg diperoleh, fatigue - tensile berkorelasi positip dan Impact - tensile berkorelasi negatip	
10/7/97	Dilakukan verifikasi untuk memperkuat analisa, dengan pengujian.	
28/7/97	T.A. diperpanjang (75 %)	
29/8/97	Pemilihan material sebagai verifikasi	
26/9/97	Pengujian tensile & Impact di Lab. Konstruksi.	
29/9/97	Analisa statistik & korelasi	
3/10/97	Konsultasi pijakan mekanik yang didapat dari Ir. Daniel M. Rosyid, PhD.	
7/10/97	T.A. diuji (95 %)	

Catatan :

1. Formulir ini harus dibawa pada saat konsultasi
2. Konsultasi dilaksanakan minimal seminggu sekali.
3. Formulir ini harus dikumpulkan kembali pada

Surabaya, ...-Oktober-... 1997
Dosen Pembimbing,

Ir. Soewefy, M.Eng.