

TUGAS AKHIR

**STUDI KORELASI NILAI HASIL *HARDNESS TEST*
PADA SPESIMEN BAJA TERHADAP MUTU BAJA
AKTUAL
(*STUDY OF CORRELATION BETWEEN HARDNESS
TEST VALUES ON STEEL SPECIMENS AND THE
QUALITY OF ACTUAL STEEL*)**

**Diajukan kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



**SARAH GHINA FAIDA
20511272**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2026**

TUGAS AKHIR

**STUDI KORELASI NILAI HASIL *HARDNESS TEST*
PADA SPESIMEN BAJA TERHADAP MUTU BAJA
AKTUAL
(*STUDY OF CORRELATION BETWEEN HARDNESS
TEST VALUES ON STEEL SPECIMENS AND THE
QUALITY OF ACTUAL STEEL*)**

Disusun oleh



Telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil
Diuji pada tanggal
18 Februari 2026

Oleh Dewan Penguji:
Penguji I

Pembimbing

Astriana H, S.T., M.Eng
NIP : 165111301

Ir. Yunalia M, S.T., M.T., Ph.D.(Eng)..IPM
NIP : 095110101

Penguji II

Jafar, S.T..MURP., M.T
NIP : 205111302

Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil



Ir. Yunalia M, S.T., M.T., Ph.D.(Eng)..IPM
NIP : 095110101

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan tugas akhir yang saya susun sebagai syarat untuk penyelesaian program sarjana di program studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan laporan tugas akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila di kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian laporan tugas akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 11 Februari 2026

Yang membuat pernyataan


5BF13ANX323953923
Sarah Ghina Faida

20511272

KATA PENGANTAR

Penulis panjatkan rasa syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan berkat rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Studi Korelasi Nilai Hasil *Hardness Test* Pada Spesimen Baja Terhadap Mutu Baja Aktual”. Tugas Akhir ini disusun dan diajukan kepada Universitas Islam Indonesia untuk memenuhi persyaratan akademik dalam menyelesaikan studi tingkat strata satu di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini, penulis banyak mendapatkan keterbatasan, hambatan, kendala. Namun berkat saran, kritik, bimbingan, serta dorongan semangat dari berbagai pihak, Alhamdulillah Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Berkaitan dengan ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT yang selalu ada dalam setiap langkah, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Ibu Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D.(Eng)., IPM selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
3. Ibu Astriana Hardawati, S.T., M.Eng selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang telah memberikan banyak arahan, bimbingan, dan dukungan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
4. Bapak Malik Mushthofa, S.T., M.Eng selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang telah memberikan banyak arahan, bimbingan, dan dukungan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
5. Ibu Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D.(Eng)., IPM dan Bapak Jafar, S.T., MURP., M.T. selaku Dosen Penguji yang telah memberikan bimbingan serta masukan kepada penulis.

6. Keluarga penulis, Mama (Ibu Suratmi Widyowati), Papa (Bapak Marwoto), dan kakak-kakaku semua Mba Mita, Mas Ryan, Ahda yang selalu berdoa, mendukung, serta selalu memberi kepercayaan penuh kepada penulis.
7. Saudara penulis, Tante Rati, Om Agus, Mba Urfa, Mba Faza dan Faid yang selalu memberi semangat dan dukungan berupa bimbingan dan motivasi, juga dukungan moral dan material yang sangat berarti bagi penulis dalam menyelesaikan studi ini.
8. Teman-teman penulis, Abin, Maji, Mba Adel, Eci, Mahay serta seluruh teman yang tidak bisa disebutkan satu per satu, yang selalu memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis.
9. Pak Hari, Pak Ndaru, Mas Win serta semua yang membantu saat pengujian di laboratorium yang selalu membantu dan memberikan dukungan kepada penulis.

Selanjutnya, penulis berharap agar Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi berbagai pihak yang membacanya.

Yogyakarta, 11 Februari 2026

Sarah Ghina Faida

2051127

DAFTAR ISI

JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xiii
ABSTRAK	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Manfaat Penelitian	7
1.5 Batasan Penelitian	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Tinjauan Umum	9
2.2 Penelitian Terdahulu	9
2.3 Perbandingan Penelitian	15
BAB III LANDASAN TEORI	19
3.1 Baja	19
3.2 Klasifikasi Baja	46
3.3 Sifat Mekanik Baja	49
3.3.1 Modulus Elastisitas	49
3.3.2 Tegangan	51
3.3.3 Regangan	52
3.3.4 Hubungan Tegangan-Regangan	54
3.3.5 <i>Tensile Strength</i>	55

3.3.6	Daktalitas	57
3.4	Kelebihan dan Kelemahan Baja Sebagai Material Konstruksi	57
3.5	Uji Kuat Tarik	59
3.5.1	Skema Uji Tarik	60
3.5.2	Komponen Uji Tarik	61
3.6	Kekerasan	63
3.7	Uji Kekerasan Leeb (<i>Leeb Hardness Tester</i>)	64
3.8	<i>Hardness Vickers</i>	68
3.9	<i>Thickness (Ultrasonic Thickness Gauge SW-6510S)</i>	70
3.10	Signifikansi Model Regresi	74
BAB IV METODE PENELITIAN		85
4.1	Umum	85
4.2	Lokasi Penelitian	86
4.3	Bahan yang digunakan	86
4.4	Alat	88
4.5	Benda Uji	94
4.6	Pelaksanaan Penelitian	96
4.6.1	Persiapan Penelitian	96
4.6.2	Pengujian	97
4.6.3	Olah Data	100
4.6.4	Analisis Data	101
4.7	Hasil dan Pembahasan	102
4.8	Kesimpulan dan Saran	103
4.9	Diagram Alur Penelitian	103
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN		105
5.1	Uji Kekerasan Baja	105
5.1.1	<i>Hardness Leeb</i>	105
5.1.2	<i>Hardness Vickers</i>	114
5.2	Pengukuran Ketebalan	121
5.3	Uji Tarik baja	126
5.3.1	Pengukuran Nilai Uji Kuat Tarik pada Spesimen Profil Baja	126
5.4	Analisis Korelasi	139

5.4.1.	Analisis Matriks Korelasi Antar Variabel	139
5.4.2.	Analisis Regresi Linier antara Kekerasan Leeb dan Kuat Tarik Maksimum	143
5.4.3.	Analisis Regresi Nonlinier antara Kekerasan Leeb dan Kuat Tarik Maksimum	147
5.4.4.	Analisis Regresi Multivariat	153
5.4.5.	Perbandingan dan Evaluasi Kinerja Model Regresi	160
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		165
6.1	Kesimpulan	165
6.2	Saran	166
DAFTAR PUSTAKA		168
LAMPIRAN		172

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang	16
Tabel 3. 1 Modulus Elastisitas	51
Tabel 3. 2 Tebal dan Berat Minimum Benda Uji	64
Tabel 3. 1 Modulus Elastisitas	51
Tabel 3. 2 Tebal dan Berat Minimum Benda Uji	64
Tabel 3. 3 Interpretasi koefisien relasi dari R^2	82
Tabel 5. 1 Jumlah Luasan pada Setiap Profil	105
Tabel 5. 2 Rekapitulasi hasil Pengujian <i>Leeb hardness</i> Daerah <i>Web</i>	110
Tabel 5. 3 Rekapitulasi hasil Pengujian <i>Leeb hardness</i> Daerah <i>Flange</i>	112
Tabel 5. 4 Rekapitulasi hasil Pengujian <i>Vickers hardness</i> Daerah <i>Web</i>	117
Tabel 5. 5 Rekapitulasi hasil Pengujian <i>Vickers hardness</i> Daerah <i>Flange</i>	119
Tabel 5. 6 Rekapitulasi Hasil Pengukuran <i>Thickness</i> Daerah <i>Web</i>	122
Tabel 5. 7 Rekapitulasi hasil Pengukuran <i>Thickness</i> Daerah <i>Flange</i>	123
Tabel 5. 8 Data Uji Tarik <i>Web</i>	128
Tabel 5. 9 Data Uji Tarik <i>Flange</i>	128
Tabel 5. 10 Rekapitulasi Nilai Kuat Tarik <i>Web</i>	135
Tabel 5. 11 Rekapitulasi Nilai Kuat Tarik <i>Flange</i>	137
Tabel 5. 12 Tabel Korelasi	140
Tabel 5. 13 Hasil Uji Signifikansi t-Statistik Model Regresi Linier HL terhadap F_u	144
Tabel 5. 14 Hasil Uji Signifikansi f-Statistik Model Regresi Linier HL terhadap F_u	145
Tabel 5. 15 Nilai R^2 dan RMSE Model Regresi Linier HL terhadap F_u	146
Tabel 5. 16 Perbandingan Kualitas Model Regresi Non-linier	152
Tabel 5. 17 Tabel Uji Signifikansi t-statistik dan p-value	156
Tabel 5. 18 Hasil uji F-statistik dan kualitas model	158
Tabel 5. 19 Perbandingan Kualitas Model Regresi	161

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Hasil Penelitian Bembenek, dkk (2021)	10
Gambar 2. 2 Hasil Penelitian Syasko dan Nikzov (2021)	12
Gambar 2. 3 Hasil Modifikasi <i>Leeb Hardness Tester</i> Penelitian Umanskii, dkk (2022)	13
Gambar 2. 4 Hasil Penelitian Umanskii, dkk (2022)	14
Gambar 3. 1 Kurva Tegangan Regangan pada Uji Tarik Baja	49
Gambar 3. 2 Benda kerja bertambah panjang ΔL ketika diberi beban P	53
Gambar 3. 3 Contoh Kurva Hasil Uji Tarik	55
Gambar 3. 4 Alat Uji Tarik Universal	60
Gambar 3. 5 Skema Uji Tarik	61
Gambar 3. 6 Komponen Mesin Uji Tarik	61
Gambar 3. 7 Perangkat Tumbukan D	64
Gambar 3. 8 Prinsip dari standar pengujian <i>hardness leeb</i>	66
Gambar 3. 9 Distribusi pembacaan hasil	66
Gambar 3. 10 Prinsip Uji Keras dengan Vickers	69
Gambar 3. 11 Komponen <i>Ultrasonic Thickness Gauge</i>	72
Gambar 4. 1 Benda Uji Profil Baja	86
Gambar 4. 2 Benda Uji Setelah Pengamplasan dan Pembuatan Area	87
Gambar 4. 3 Benda Uji Sebelum Pemotongan	87
Gambar 4. 4 Benda Uji Setelah Pemotongan	87
Gambar 4. 5 Timbangan	88
Gambar 4. 6 Mistar Besi	88
Gambar 4. 7 Jangka Sorong	89
Gambar 4. 8 Pita Ukur	89
Gambar 4. 9 Gerinda Tangan	90
Gambar 4. 10 <i>Universal Testing Machine (UTM)</i>	90
Gambar 4. 11 Grip (<i>Specimen Holder</i>)	91
Gambar 4. 12 Sarung Tangan	91

Gambar 4. 13 Kertas Milimeter Blok (<i>Graph Paper</i>)	92
Gambar 4. 14 Alat Tulis	92
Gambar 4. 15 <i>Leeb Hardness Tester</i>	93
Gambar 4. 16 Klem C	93
Gambar 4. 17 <i>Ultrasonic Thickness Gauge SW-6510S</i>	94
Gambar 4. 18 Dimensi Luasan Uji Kekerasan	94
Gambar 4. 19 Model dan Ukuran yang ditentukan pada ASTM E8	95
Gambar 4. 20 Dimensi Benda Uji Spesimen Besar	96
Gambar 4. 21 Dimensi Benda Uji Spesimen Kecil	96
Gambar 5. 1 IWF 150 X 75	106
Gambar 5. 2 IWF 150 X 75 <i>Web</i>	106
Gambar 5. 3 IWF 150 X 75 <i>Flange</i> Permukaan 1	106
Gambar 5. 4 IWF 150 X 75 <i>Flange</i> Permukaan 2	106
Gambar 5. 5 Uji <i>Hardness Leeb</i> dengan perangkat lunak HL PRO versi 1.02	107
Gambar 5. 6 <i>Hardness Unit Setting</i>	115
Gambar 5. 7 <i>Correlation Heatmap</i>	140
Gambar 5. 8 Regresi Linier HL dan Fu	143
Gambar 5. 9 Grafik Regresi Kuadratik	149
Gambar 5. 10 Grafik Regresi Eksponensial	150
Gambar 5. 11 Grafik Regresi Logaritmik	151
Gambar 5. 12 Grafik Regresi Power	152
Gambar 5. 13 Regresi Multivariat	155

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Benda Uji	173
Lampiran 2 Data Uji Tarik	176
Lampiran 3 Data Uji Tarik Daerah <i>Web</i>	177
Lampiran 4 Grafik Uji Tarik Baja	178

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

A	= Luas penampang
A0	= Luas penampang awal
A1	= Luas akhir
ASTM	= <i>American Society for Testing and Materials</i>
b	= Koefisien regresi
BJ	= Klasifikasi baja
C	= Karbon
cm	= Sentimeter
Cr	= Kromium
Cu	= Tembaga
d ¹	= Panjang diagonal indentasi
D	= Diagonal
e	= Bilangan eksponensial
E	= Modulus elastisitas
F	= Nilai F-statistik
Fe	= Besi
Fu	= Tegangan maksimum
Fy	= Tegangan leleh
G	= Berat
H	= Ketebalan
HBS	= Kekerasan brinell
HL	= Kekerasan leeb
HRC	= Kekerasan rockwell C
HV	= Kekerasan vickers
ISO	= <i>International Organization for Standardization</i>

IWF	= <i>I Wide Flange</i>
k	= Jumlah variable bebas
kg	= Kilogram
Kgf	= <i>Kilogram - force</i>
L	= Panjang
L0	= Panjang awal
L1	= Panjang akhir
lb	= Pound
mm	= Milimeter
Mn	= Mangan
MPa	= Megapascal
N	= Gaya normal
n	= Jumlah sampel
n-2	= Derajat bebas
NDT	= <i>Non-Destructive Test</i>
Ni	= Nikel
P	= Fosfor
p	= Peluang
P0	= Beban awal
Pu	= Beban maksimum
Py	= Beban leleh
r	= Jari-jari
R ²	= Koefisien determinasi
RMSE	= Besar rata-rata kesalahan
s	= Standar Deviasi
S	= Sulfur
SE(b)	= Standar <i>Error</i> Koefisien b
Si	= Silikon

SNI	= Standar Nasional Indonesia
SSE	= Variasi acak
SSR	= Variasi data yang dijelaskan model
t	= Nilai t-statistik
T	= Tebal
T0	= Tebal awal
TS	= Tensile strength
U	= Standar Ketidakpastian Pengukuran
UNP	= <i>U-Profile Normal</i>
UTM	= <i>Universal Testing Machine</i>
v	= Kecepatan Rambat Gelombang
W	= Beban
\bar{X}	= Nilai rata-rata
x	= Variable bebas
Xi	= Data ke-i
y	= Variable terikat
α	= Konstanta
$\alpha(\text{sig})$	= Tingkat signifikansi
ε	= Regangan
ε_i	= Galat Error
σ	= Tegangan
ΣF	= Jumlah gaya
τ	= Tegangan geser
ΔL	= Pertambahan panjang
ΔX	= Perpindahan

ABSTRAK

Beton dan baja merupakan elemen struktural utama dalam konstruksi bangunan, di mana baja berperan dalam menahan gaya tarik. Seiring bertambahnya usia dan perubahan fungsi bangunan, evaluasi struktur eksisting diperlukan untuk memastikan keamanan dan kelayakan. Salah satu metode evaluasi yang efisien adalah pengujian tidak merusak (*non-destructive test*), khususnya pengujian kekerasan pada material baja. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara kuat tarik dengan parameter kekerasan berbasis NDT.

Penelitian ini menggunakan pendekatan statistik berdasarkan data hasil pengujian laboratorium yang meliputi pengujian kekerasan Leeb, kekerasan Vickers, pengukuran tebal material, dan uji tarik untuk memperoleh nilai F_u aktual. Seluruh proses analisis data dilakukan menggunakan perangkat lunak Matlab. Metode analisis yang digunakan meliputi uji signifikansi statistik dan kelayakan model dengan analisis koefisien regresi yaitu korelasi Pearson, regresi linier sederhana, regresi nonlinier, serta regresi linier multivariat.

Hasil analisis uji t dan uji F menunjukkan bahwa parameter kekerasan berpengaruh signifikan secara statistik terhadap kuat tarik maksimum. Model regresi nonlinier kuadratik menunjukkan peningkatan kinerja dengan nilai R^2 sebesar 0,245 dan RMSE sebesar 20,73. Regresi nonlinier kuadratik dipilih sebagai model terbaik pada penelitian ini, meskipun kemampuan prediktifnya masih tergolong rendah.

Kata kunci : Baja, *non-destructive test*, pengujian kekerasan, kuat tarik maksimum, pemodelan regresi.

ABSTRACT

Concrete and steel are the main structural elements in building construction, where steel plays a role in withstanding tensile forces. As buildings age and change function, evaluation of existing structures is necessary to ensure safety and suitability. One efficient evaluation method is non-destructive testing, particularly testing the hardness of steel materials. This study aims to analyze the relationship between tensile strength and NDT-based hardness parameters.

This study uses a statistical approach based on laboratory test data including Leeb hardness testing, Vickers hardness testing, material thickness measurements, and tensile testing to obtain actual F_u values. The entire data analysis process was performed using Matlab software. The analysis methods used included statistical significance tests and model feasibility analysis using regression coefficients, namely Pearson's correlation, simple linear regression, nonlinear regression, and multivariate linear regression.

The results of the t-test and F-test analysis show that the hardness parameter has a statistically significant effect on maximum tensile strength. The quadratic nonlinear regression model shows improved performance with an R^2 value of 0.245 and an RMSE of 20.73. Quadratic nonlinear regression was chosen as the best model in this study, even though its predictive ability is still relatively low

Keywords: *Steel, non-destructive testing, hardness testing, maximum tensile strength, regression modeling.*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton dan baja merupakan material struktural utama yang penting dan banyak digunakan dalam konstruksi bangunan. Beton memiliki keunggulan berupa kekuatan tekan yang tinggi, namun relatif lemah terhadap gaya tarik dikarenakan sifat beton yang getas. Sebaliknya, baja mempunyai kemampuan menahan gaya tarik yang sangat baik. Oleh karena itu, kombinasi beton dan baja menjadi elemen yang sangat penting dalam sistem struktur bangunan.

Refani dkk. (2015) menjelaskan bahwa bangunan juga memiliki masa pakai yang terbatas yaitu mencapai umur 50 tahun dan kemudian akan berpotensi mengalami perubahan fungsi seiring waktu. Dalam praktiknya, bangunan yang telah digunakan selama beberapa dekade dapat mengalami perubahan fungsi, seperti dari bangunan industri menjadi bangunan komersial atau seperti dari bangunan parkir menjadi gudang. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi bangunan.

Evaluasi bangunan merupakan suatu proses menganalisis dan mengevaluasi berbagai aspek kinerja struktur suatu bangunan, meliputi keamanan, kekuatan, dan kinerja bangunan secara keseluruhan. Tujuan evaluasi bangunan adalah untuk memastikan bahwa bangunan tersebut masih memenuhi persyaratan teknis dan keamanan yang berlaku, serta untuk menentukan apakah suatu bangunan dibutuhkan untuk dilakukan perbaikan atau rehabilitasi (Simbolon, 2021). Maka dari itu diperlukan metode untuk melaksanakan evaluasi bangunan.

Terdapat dua metode pengujian yang umum digunakan dalam evaluasi bangunan atau struktur yaitu pengujian yang merusak (*destructive test*) serta pengujian yang tidak merusak (*non-destructive test*). Metode *non-destructive test*, metode ini tidak merusak komponen bangunan serta lebih efisien dalam hal biaya dan waktu (Wirotama, 2018). Terdapat salah satu metode untuk material struktur

baja yaitu metode pengujian *non-destructive test* (NDT) yang berupa uji kekerasan (*hardness tester*).

Caprili dkk. (2023) menjelaskan bahwa kekerasan adalah ukuran ketahanan suatu material terhadap deformasi plastik lokal yang disebabkan oleh benturan (dinamis) atau gaya yang diberikan (statis). Kekerasan sebenarnya bukanlah sifat mekanik suatu material, melainkan parameter tidak langsung yang dapat digunakan untuk memperkirakan sifat mekanik lainnya, dengan hasil yang dipengaruhi oleh kondisi dan metode pengujian. Metode pengujian *Leeb Hardness Tester* merupakan metode yang paling sering digunakan karena dimensinya yang ringkas dan biaya pengujian yang relatif rendah. Pengujian ini dilakukan dengan mengukur perbandingan kecepatan tumbukan dan kecepatan pantulan sebuah peluru berujung karbon yang ditembakkan ke permukaan material menggunakan pegas. Sebagian energi tumbukan akan diserap oleh deformasi plastis, sedangkan sisanya dipantulkan kembali secara elastis. Nilai *Hardness Leeb* (HL) merupakan rasio antara kecepatan tumbukan dan kecepatan pantulan yang dikalikan dengan 1000.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui korelasi dengan mengembangkan model regresi berbasis NDT (*non-destructive test*) menggunakan beberapa parameter seperti *Leeb Hardness*, *Vickers hardness* dan *Thickness* untuk memprediksi kekuatan tarik (F_u) baja struktural secara akurat.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian, maka diperoleh beberapa rumusan masalah sebagai berikut.

1. Bagaimana hasil pengujian kekerasan logam dengan menggunakan metode NDT dengan instrumen *leeb hardness tester*?
2. Bagaimana hubungan (korelasi) antara kuat tarik baja dengan nilai hasil pengujian kekerasan leeb, vickers dan parameter tebal ?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dipaparkan tersebut, maka penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut.

1. Mengetahui hasil pengujian kekerasan logam dengan menggunakan metode NDT dengan instrumen *leeb hardness tester*.
2. Mengetahui hubungan (korelasi) antara kuat tarik baja dengan nilai hasil pengujian kekerasan leeb, vickers dan parameter tebal.

1.4 Manfaat Penelitian

Berikut merupakan manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini diharapkan dapat menambah pengetahuan dan pemahaman dalam pengoperasian alat *ultrasonic thickness gauge* serta *leeb hardness tester* dalam pengujian *leeb* dan *vickers*.
2. Penelitian ini dapat membantu meningkatkan pemahaman tentang pengujian *non-destructive*, meningkatkan pengembangan teknologi baru dan meningkatkan kualitas besi dan baja di masa depan.
3. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan acuan korelasi nilai hasil uji kekerasan terhadap mutu baja aktual, khususnya dalam pekerjaan pemeriksaan kelayakan suatu bangunan dengan berbagai kondisi sesuai dengan syarat yang telah ditentukan.
4. Penelitian ini memiliki potensi untuk mengidentifikasi masalah pada struktur baja, sehingga memungkinkan dilakukannya tindakan perbaikan sebelum kerusakan mencapai tingkat yang lebih parah.

1.5 Batasan Penelitian

Penulisan pada penelitian diperlukan batasan penelitian supaya tujuan penulisan dapat tercapai dan dipahami. Berikut batasan penelitian yang terdapat dalam penelitian ini.

1. Material baja menggunakan Baja struktural Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia.
2. Baja yang digunakan sebagai benda uji adalah baja WF dan UNP (*web* dan *flange*) tipe *hot rolled*.

3. Instrumen yang digunakan adalah *leeb hardness tester* dan *ultrasonic thickness gauge*.
4. Benda uji berupa spesimen yang tidak diaplikasikan pada struktur.
5. Pedoman yang digunakan yaitu ASTM E8, ASTM E140, ISO 16859, SNI 8461 (2017), *Manual Usher SW-6230* dan *Manual Usher SW-6510S*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Tinjauan literatur pada penelitian terdahulu dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh informasi yang relevan dan berkaitan dengan topik penelitian yang akan dilaksanakan. Melalui tinjauan literatur, penulis dapat melakukan perbandingan atau komparasi terhadap objek penelitian yang telah dikaji sebelumnya, sehingga penelitian yang dilakukan tidak mengulang kajian serupa dan memiliki kebaruan ilmiah.

2.2 Penelitian Terdahulu

Peneliti mencantumkan hasil penelitian sebelumnya yang memiliki topik yang relevan dan dapat digunakan sebagai referensi atau pembanding dalam penelitian yang akan dilakukan oleh peneliti. Berikut ini beberapa penelitian terdahulu yang dapat digunakan sebagai referensi pada penelitian ini.

1. *Analysis Of The Influence Of Surface Roughness Of Various Types Of Wood On The Results Of Their Hardness Measured By The Leeb Method*

Bembenek, dkk. (2021) melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengukur kekerasan enam jenis kayu yang berbeda menggunakan *Leeb Rebound Hardness Tester* (LRHT) dinamis. Spesimen yang digunakan yaitu kayu spesies Eropa (ek, pinus, dan beech) dan kayu keras eksotik (eboni, rosewood, dan boxwood). Metode pengujian dilakukan dengan membandingkan pendekatan statis dan destruktif menggunakan skala janka dengan metode dinamis dan non-destruktif menggunakan *hardness leeb*, serta menganalisis pengaruh kualitas permukaan terhadap hasil pengujian dinamis *hardness leeb*.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai rata-rata *hardness Leeb E* yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan nilai kekerasan berdasarkan skala Janka. Penyimpangan standar relatif terbesar ditemukan pada kayu pinus dan rosewood, masing-masing sebesar 9,88% dan 9,12%. Perbedaan antara hasil pengujian skala

Janka dan nilai rata-rata *hardness Leeb* juga paling signifikan terjadi pada kedua jenis kayu tersebut. Pada pengujian *hardness Leeb*, kayu pinus menempati urutan sebagai kayu terkeras kedua, sedangkan berdasarkan skala Janka, kayu pinus justru merupakan jenis kayu paling lunak. Sementara itu, rosewood yang seharusnya menjadi kayu terkeras kedua menurut skala Janka, dalam hasil pengujian *hardness Leeb E* justru tergolong sebagai kayu ketiga paling lunak.

Perbedaan nilai kekerasan antara spesimen terkeras, yaitu ebony, dan kayu pinus pada pengujian *hardness Leeb E* tercatat sebesar 16,6%, sedangkan pada skala Janka perbedaan tersebut jauh lebih besar, yakni mencapai 82,3%. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai *hardness Leeb* sangat dipengaruhi oleh tingkat kekasaran permukaan, terutama pada jenis kayu dengan struktur yang lebih lunak. Perbedaan hasil pengujian semakin meningkat seiring dengan bertambahnya tingkat kekasaran permukaan. Berdasarkan temuan tersebut, penelitian ini menyimpulkan bahwa metode *hardness Leeb* kurang direkomendasikan untuk pengujian kekerasan kayu karena sensitivitasnya yang tinggi terhadap kondisi permukaan serta rendahnya korelasi dengan metode kekerasan Janka. Hasil penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.1 sebagai berikut.

Type of the wood	Min. Leeb E	Max Leeb E	Avg Leeb E (+ std dev.)	Janka [N]
Ebony	383.9	492.9	469.88 (30.21)	13 700
Boxwood	270	384.7	349.05 (29.87)	8 050
Rosewood	290.6	411.3	366.13 (33.38)	12 410
Beechwood	318.2	397.1	363.17 (25.64)	6 460
Oakwood	330.6	440.1	389.95 (31.89)	4 980
Pinewood	290.6	411.3	391.92 (38.72)	2 420

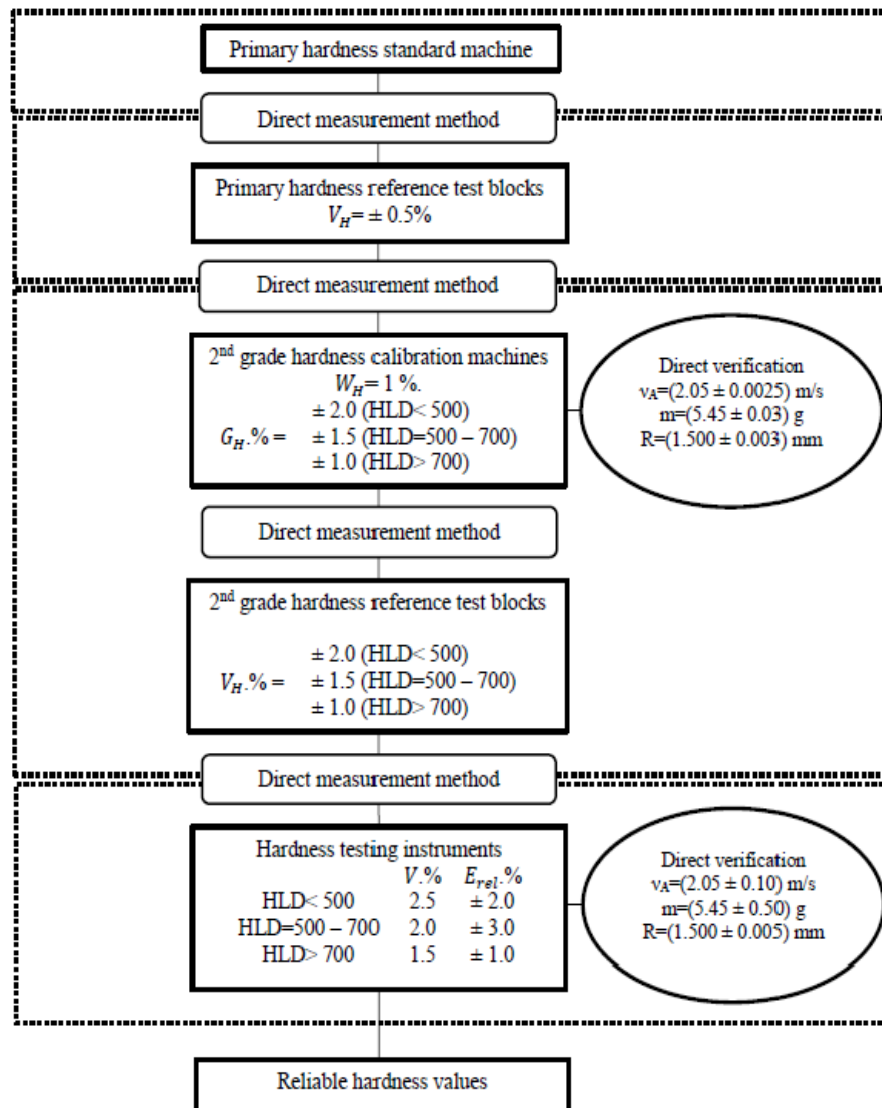
Gambar 2. 1 Hasil Penelitian Bembenek, dkk (2021)

2. *Research And Development Of Metrological Assurance Elements For Leeb Hardness Measurements*

Syasko dan Nikazov (2021) melaksanakan penelitian yang menitikberatkan pada pengembangan sistem jaminan metrologi (*metrological assurance*) dalam pengukuran kekerasan menggunakan metode *hardness Leeb*. Penelitian ini didorong oleh kebutuhan akan hasil pengujian *hardness Leeb* yang memiliki konsistensi tinggi, ketertelusuran pengukuran, serta dapat dibandingkan secara internasional. Ruang lingkup penelitian mencakup sistem pengukuran *hardness*

Leeb, mesin kalibrasi referensi, dan blok standar *hardness Leeb*. Metodologi penelitian dilakukan melalui kajian terhadap prinsip kerja pengujian *hardness Leeb*, penyusunan hierarki kalibrasi, serta perancangan komponen jaminan metrologi yang mengacu pada ketentuan standar ISO 16859.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan sistem kalibrasi berjenjang yang dirancang mampu meningkatkan reliabilitas dan tingkat keterulangan hasil pengujian *hardness Leeb*. Selain itu, mesin kalibrasi dan blok referensi yang dikembangkan telah memenuhi batas toleransi yang ditetapkan dalam standar internasional. Berdasarkan temuan tersebut, penelitian ini menyimpulkan bahwa implementasi sistem jaminan metrologi yang tepat memiliki peranan penting dalam menjamin keabsahan dan keandalan hasil pengukuran *hardness Leeb*, terutama untuk keperluan industri dan penelitian material. Hasil penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut ini.



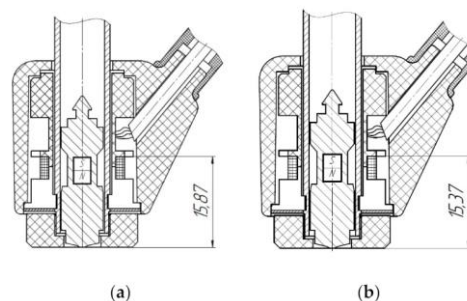
Gambar 2. 2 Hasil Penelitian Syasko dan Nikazov (2021)

3. *Modification Of The Leeb Impact Device For Measuring Hardness By The Dynamic Instrumented Indentation Method*

Umanskii, dkk. (2022) melakukan penelitian terkait pengembangan metode pengujian hardness Leeb dengan memanfaatkan pendekatan *dynamic instrumented indentation*. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kapabilitas metode *hardness Leeb* yang pada umumnya hanya menghasilkan nilai kekerasan dinamis, agar mampu memberikan informasi sifat mekanik material yang lebih komprehensif. Untuk mencapai tujuan tersebut, perangkat tumbukan pada alat uji *hardness Leeb* dimodifikasi dengan menerapkan metode *dynamic instrumented*

indentation (DII). Prinsip utama metode DII adalah menangkap sinyal gaya gerak listrik (*electromotive force* / EMF) yang dihasilkan oleh perangkat tumbukan, kemudian mengonversinya menjadi sinyal kecepatan. Selanjutnya, data tersebut digunakan untuk menentukan hubungan antara gaya yang diberikan dan deformasi yang terjadi selama proses indentasi. Dalam penelitian ini, proses kalibrasi perangkat tumbukan serta penentuan faktor konversi dari sinyal EMF menjadi kecepatan dilakukan menggunakan beberapa pendekatan kalibrasi yang berbeda.

Modifikasi perangkat tumbukan *hardness Leeb* untuk penerapan metode DII dilakukan dengan mengubah posisi kumparan induksi relatif terhadap magnet. Pengujian menggunakan *hardness Leeb* tipe D. Untuk memastikan bahwa metode yang dikembangkan dapat diterapkan pada berbagai jenis material, percobaan dilakukan pada tiga jenis bahan, yaitu aluminium, kuningan, dan baja, dengan nilai kekerasan yang mengacu pada skala Vickers. Perubahan posisi kumparan induksi terhadap magnet merupakan aspek utama dalam modifikasi perangkat tumbukan *hardness Leeb* tersebut. Hasil modifikasi dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut ini.



Gambar 2. 3 Hasil Modifikasi *Leeb Hardness Tester* Penelitian Umanskii, dkk (2022)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa modifikasi *hardness Leeb tester* yang dilakukan memungkinkan penentuan parameter mekanik tambahan secara non-destruktif, seperti kekerasan kontak, modulus elastisitas, dan tegangan luluh. Dengan demikian, metode yang dikembangkan mampu memperluas fungsi *hardness Leeb*, tidak hanya sebagai alat pengukuran kekerasan, tetapi juga sebagai instrumen untuk karakterisasi sifat mekanik material. Penelitian ini menyimpulkan bahwa modifikasi alat uji *hardness Leeb* dapat meningkatkan nilai guna metode

tersebut dalam evaluasi sifat mekanik material secara portabel dan non-destruktif. Visualisasi hasil modifikasi alat ditunjukkan pada Gambar 2.3, sedangkan ringkasan hasil penelitian disajikan pada Gambar 2.4 berikut ini.

Test Piece	HV	Maximal Load P_{max} , H	Maximal Depth, μm	Residual Depth, μm	Dissipated Energy, mJ	Elastic Energy, mJ	Contact Pressure P_{max}/S_{res} , MPa
Al	30	247	87	81	10.8	0.7	320
Cu	78	330	57	50	10.1	1.4	689
Fe-C	206	485	38	28	8.7	2.8	1824

Gambar 2. 4 Hasil Penelitian Umanskii, dkk (2022)

4. *Adoption of ASTM A956-06 Leeb Hardness Testing Standard to Rock Engineering Applications*

Ghorbani dkk. (2023) melakukan penelitian terkait penerapan metode pengujian *hardness Leeb* berdasarkan standar ASTM A956-06 dalam bidang rekayasa batuan. Penelitian ini bertujuan untuk menilai kelayakan *metode hardness Leeb*, yang pada awalnya dikembangkan untuk material logam, agar dapat diaplikasikan secara andal pada berbagai jenis batuan, serta untuk menganalisis faktor-faktor yang berpengaruh terhadap hasil pengujian. Spesimen yang digunakan terdiri atas 33 jenis batuan dengan variasi litologi, dimensi spesimen, kondisi permukaan, dan temperatur pengujian. Pengujian dilakukan menggunakan alat *Hardness Leeb type D* dengan mempertimbangkan pengaruh ketebalan dan volume spesimen, tingkat kekasaran permukaan, suhu pengujian, serta karakteristik fisik batuan, seperti densitas dan porositas.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai *hardness Leeb* dipengaruhi secara signifikan oleh ukuran spesimen, temperatur pengujian, dan sifat fisik batuan. Nilai kekerasan cenderung stabil pada spesimen dengan ketebalan minimum sekitar 5 cm atau volume mendekati 500 cm³. Selain itu, peningkatan temperatur pengujian menyebabkan kecenderungan penurunan nilai *hardness Leeb*, meskipun penurunan tersebut tidak terjadi secara signifikan. Berdasarkan hasil tersebut, penelitian ini menyimpulkan bahwa metode pengujian *hardness Leeb* dapat diterapkan secara andal pada material batuan, asalkan pelaksanaannya memenuhi batasan ukuran spesimen dan kondisi pengujian yang direkomendasikan dalam standar ASTM A956-06.

5. Analisis Komparatif Metode Pengujian Kekerasan Rockwell dan Vickers pada *Heat-Treated High-Speed Steel* (Baja Kecepatan Tinggi yang Diolah Panas)

Widiantoro dan Fauzi (2024) melakukan penelitian yang membahas perbandingan metode pengujian kekerasan Rockwell dan Vickers pada baja kecepatan tinggi (*High Speed Steel / HSS*) yang telah mengalami proses perlakuan panas. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu tempering terhadap nilai kekerasan material, sekaligus membandingkan kemampuan kedua metode pengujian dalam menggambarkan perubahan sifat mekanik akibat perlakuan panas. Spesimen yang digunakan berupa baja kecepatan tinggi berbentuk silinder dengan beberapa kondisi tempering, yaitu kondisi *as-hardened* pada suhu ruang ($\pm 25^{\circ}\text{C}$), tempering pada suhu 200°C , serta tempering pada suhu 400°C . Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Vickers dengan indenter piramida berlian dan beban 30 kgf, serta metode Rockwell skala C dengan indenter kerucut berlian dan beban utama hingga 150 kgf. Setiap pengujian dilakukan secara berulang untuk memperoleh nilai kekerasan rata-rata yang representatif.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kenaikan suhu tempering berbanding terbalik dengan nilai kekerasan baja kecepatan tinggi pada kedua metode pengujian. Kondisi *as-hardened* menghasilkan nilai kekerasan tertinggi, sedangkan tempering pada suhu 400°C menyebabkan penurunan kekerasan yang paling signifikan. Selain itu, metode Vickers dinilai memiliki tingkat sensitivitas yang lebih tinggi dalam mendeteksi perubahan kekerasan akibat variasi suhu tempering dibandingkan dengan metode Rockwell. Berdasarkan hasil tersebut, penelitian ini menyimpulkan bahwa metode Rockwell dan Vickers sama-sama efektif dalam mengevaluasi pengaruh perlakuan panas pada baja kecepatan tinggi, serta menegaskan pentingnya pengendalian suhu tempering dalam menentukan karakteristik mekanik material.

2.3 Perbandingan Penelitian

Perbandingan perbedaan penelitian terdahulu dengan penelitian yang akan dilakukan dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Peneliti	Bembenek, dkk. (2021)	Syasko dan Nikazov (2021)	Umanskii, dkk. (2022)	Ghorbani, dkk. (2023)	Widiantoro dan Fauzi (2024)	Penulis (2026)
Judul	<i>Analysis Of The Influence Of Surface Roughness Of Various Types Of Wood On The Results Of Their Hardness Measured By The Leeb Method.</i>	<i>Research And Development Of Metrological Assurance Elements For Leeb Hardness Measurements.</i>	<i>Modification Of The Leeb Impact Device For Measuring Hardness By The Dynamic Instrumented Indentation Method.</i>	<i>Adoption of ASTM A956-06 Leeb Hardness Testing Standard to Rock Engineering Applications.</i>	Analisis Komparatif Metode Pengujian Kekerasan Rockwell dan Vickers pada <i>hed High-Speed Steel</i> (Baja Kecepatan Tinggi yang Diolah Panas).	Studi Korelasi Nilai <i>Hardness Test</i> pada Spesimen Baja terhadap Mutu Baja Aktual.
Tujuan	Menganalisis pengaruh kekasaran permukaan terhadap nilai kekerasan kayu yang diukur menggunakan metode <i>hardness leeb</i> serta membandingkannya dengan skala kekerasan Janka.	Mengembangkan sistem jaminan metrologi untuk pengujian <i>hardness leeb</i> agar hasil pengukuran memiliki keterlacakan, konsistensi, dan keandalan sesuai standar internasional.	Modifikasi perangkat tumbukan dari pengujian <i>hardness leeb</i> untuk menerapkan metode pantulan terinstrumentasi dinamis.	Meneliti penerapan uji kekerasan <i>Leeb</i> berdasarkan ASTM A956-06 pada material batuan serta mengkaji faktor-faktor yang memengaruhi hasil pengujian.	Membandingkan hasil pengujian kekerasan <i>Rockwell</i> dan <i>Vickers</i> pada baja kecepatan tinggi serta menganalisis pengaruh variasi suhu tempering terhadap nilai kekerasan material.	Menentukan hubungan kuantitatif antara <i>Leeb Hardness</i> , <i>Vickers Hardness</i> , dan ketebalan spesimen terhadap nilai kuat tarik (Fu) baja

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Peneliti	Bembenek, dkk. (2021)	Syasko dan Nikazov (2021)	Umanskii, dkk. (2022)	Ghorbani, dkk. (2023)	Widiantoro dan Fauzi (2024)	Penulis (2026)
Benda uji	6 jenis kayu berbeda yaitu spesies Eropa (ek, pinus, dan beech) dan kayu keras eksotik (eboni, rosewood, dan boxwood).	Baja 100CrMn6 (untuk blok referensi yang lebih lunak) dalam bentuk lembaran logam dengan ketebalan tertentu.	3 bahan: aluminium, kuningan dan baja.	33 sampel batu dengan berbagai tingkat kekerasan dan asal geologi yang berbeda.	Baja kecepatan tinggi (HSS) berbentuk spesimen bulat dengan kondisi <i>as-hardened</i> ($\pm 25^{\circ}\text{C}$), tempering 200°C , dan tempering 400°C .	Baja struktural WF dan UNP (<i>web</i> dan <i>flange</i>) Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia.
Metode	Dengan pendekatan statis dan destruktif pada skala Janka dibandingkan dengan metode dinamis dan non-destruktif <i>hardness leeb</i> , kemudian apakah kualitas permukaan mempengaruhi hasil uji dinamis <i>Leeb</i> .	Analisis teoritis prinsip uji <i>Leeb</i> , perancangan hierarki kalibrasi, pembuatan <i>prototipe</i> CRM tingkat kedua, serta pengujian kesesuaian karakteristik metrologi dengan standar ISO 16859.	Metode DII terdiri dari perubahan posisi kumparan induksi terhadap magnet.	Pengujian <i>hardness leeb</i> dengan variasi ukuran spesimen, suhu, dan kondisi permukaan, disertai analisis statistik sifat fisik batuan.	Metode eksperimen laboratorium menggunakan pengujian kekerasan <i>Rockwell</i> skala C (HRC) dan <i>Vickers</i> (HV) dengan variasi suhu tempering.	Eksperimen laboratorium dengan pengambilan data multiparameter, analisis regresi, dan evaluasi korelasi statistik

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Peneliti	Bembenek, dkk. (2021)	Syasko dan Nikazov (2021)	Umanskii, dkk. (2022)	Ghorbani, dkk. (2023)	Widiantoro dan Fauzi (2024)	Penulis (2026)
Hasil	Hasil penelitian ini menunjukkan nilai <i>hardness leeb</i> sangat dipengaruhi oleh kekasaran permukaan, terutama pada kayu Eropa. Ditemukan perbedaan signifikan antara hasil <i>hardness leeb</i> dan Janka, khususnya pada kayu lunak seperti pinus. Metode <i>hardness leeb</i> kurang direkomendasikan untuk estimasi kekerasan kayu karena hasilnya sangat sensitif terhadap kondisi permukaan dan tidak memiliki korelasi yang kuat dengan skala kekerasan Janka.	Hasil penelitian ini menunjukkan struktur hierarki kalibrasi empat tingkat untuk skala <i>hardness leeb</i> serta <i>prototipe</i> CRM dan blok referensi yang memenuhi batas deviasi maksimum standar internasional. Sistem jaminan metrologi yang dikembangkan mampu meningkatkan keandalan dan keseragaman hasil pengujian <i>hardness leeb</i> , sehingga aman digunakan untuk evaluasi sifat mekanik material di industri.	Hasil penelitian menunjukkan metode ini memungkinkan perhitungan kekerasan kontak, modulus elastisitas, dan tegangan luluh secara portabel. <i>hardness leeb</i> yang dimodifikasi dapat digunakan sebagai metode uji non-destruktif yang lebih komprehensif dibandingkan metode <i>hardness leeb</i> konvensional.	Hasil penelitian menunjukkan nilai <i>hardness leeb</i> dipengaruhi oleh ukuran spesimen, suhu, porositas, dan densitas; hasil stabil diperoleh pada ketebalan minimum 5 cm. Uji <i>hardness leeb</i> dapat diterapkan secara andal pada batuan apabila mengikuti batasan pengujian sesuai standar ASTM A956-06.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu tempering menyebabkan penurunan nilai kekerasan. Kondisi <i>as-hardened</i> menghasilkan kekerasan tertinggi, sedangkan tempering 400°C menunjukkan penurunan kekerasan paling signifikan.	Diperoleh hubungan korelasi yang signifikan antara nilai kekerasan NDT dan kuat tarik baja struktural. Pemanfaatan metode NDT untuk estimasi mutu baja aktual pada bangunan eksisting tanpa pengujian destruktif

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Baja

Baja merupakan material paduan yang tersusun dari unsur besi (Fe) dan karbon (C) dengan penambahan unsur paduan lain. Baja banyak dimanfaatkan sebagai produk akhir, antara lain pada komponen otomotif, transformator listrik, serta digunakan dalam berbagai proses manufaktur seperti pembuatan lembaran logam, proses ekstrusi, dan proses lainnya. Penggunaan baja semakin meningkat seiring dengan perkembangan industri otomotif dan kebutuhan masyarakat terhadap kendaraan bermotor, komponen mesin, serta konstruksi. Pemilihan baja sebagai material utama didasarkan pada sifat mekaniknya, karena logam dengan tingkat kekerasan yang sangat tinggi akan menyulitkan proses pembentukan (Mashudi, 2016).

Sifat mekanik suatu baja dipengaruhi oleh komposisi unsur paduan yang terkandung di dalamnya. Unsur-unsur tersebut membentuk struktur mikro baja, sehingga perubahan komposisi akan menyebabkan perubahan struktur mikro yang selanjutnya berdampak pada sifat mekaniknya. Selain melalui perubahan komposisi, struktur mikro baja juga dapat dimodifikasi melalui proses perlakuan panas dengan mengatur laju pendinginan. Baja memiliki kemampuan pengerasan (*hardenability*) dalam rentang yang luas, sehingga sifat mekaniknya dapat disesuaikan dengan kebutuhan penggunaan material tersebut.

Baja karbon rendah merupakan paduan logam yang tersusun dari besi (Fe) dengan kandungan unsur karbon (C) serta unsur paduan lainnya seperti silikon (Si), nikel (Ni), mangan (Mn), fosfor (P), sulfur (S), dan unsur-unsur lain. Salah satu tujuan utama dalam pengembangan material ini adalah untuk memastikan struktur dan sifat material berada pada kondisi optimum sehingga daya tahan yang dihasilkan dapat mencapai nilai maksimum.

Menurut Indarto (2009) pengaruh unsur paduan pada bahan baja karbon adalah sebagai berikut :

1. Unsur *Carbon* (C)

Karbon merupakan unsur utama yang berperan dalam meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja. Kandungan karbon dalam baja umumnya berada pada kisaran 0,1% hingga 1,7%, sementara kadar unsur paduan lainnya dibatasi sesuai dengan fungsi dan aplikasi baja tersebut. Keberadaan unsur paduan dalam baja bertujuan untuk meningkatkan respons material terhadap perlakuan panas sehingga diperoleh sifat-sifat tertentu. Meskipun karbon dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja, kandungan karbon yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penurunan ketangguhan material.

2. Unsur Mangan (Mn)

Seluruh jenis baja mengandung unsur mangan karena perannya yang sangat penting dalam proses pembuatan baja. Kandungan mangan sekitar 0,6% umumnya tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat maupun struktur baja, sehingga pada kadar rendah mangan tidak berdampak besar terhadap karakteristik material. Penambahan mangan dalam baja dapat meningkatkan kekuatan tarik tanpa menyebabkan penurunan regangan yang berarti, sehingga baja yang mengandung mangan memiliki kombinasi sifat kuat dan ulet. Selain itu, mangan berperan dalam mencegah terjadinya *hot shortness* atau kegetasan pada temperatur tinggi, khususnya selama proses pengerolan panas.

3. Unsur *Phosphor* (P)

Unsur ini dapat menyebabkan terjadinya retak dingin (*cold shortness*) pada baja, yaitu kondisi getas pada temperatur rendah, sehingga baja kurang sesuai untuk aplikasi yang menerima beban kejut pada suhu rendah. Namun demikian, unsur tersebut juga memiliki efek positif berupa peningkatan fluiditas yang memudahkan proses pengerolan panas. Kandungan fosfor dalam baja umumnya dibatasi hingga kurang dari 0,05%.

4. Unsur Sulfur (S)

Sulfur dapat menyebabkan baja mengalami kegetasan pada temperatur tinggi, sehingga berdampak merugikan pada penggunaan baja dalam kondisi suhu tinggi. Selain itu, keberadaan sulfur juga dapat menyulitkan proses

pengerjaan material, seperti pengerolan panas maupun proses manufaktur lainnya. Oleh karena itu, kandungan sulfur dalam baja harus dijaga serendah mungkin, umumnya di bawah 0,05%.

5. Unsur Silikon (Si)

Silikon merupakan salah satu unsur paduan yang terdapat pada hampir seluruh jenis baja dengan kandungan di atas 0,4%, yang berperan dalam meningkatkan tegangan tarik serta menurunkan laju pendinginan kritis.

6. Unsur Nikel (Ni)

Nikel memiliki pengaruh yang serupa dengan mangan, yaitu meningkatkan kekuatan tarik serta memperbaiki keuletan dan ketahanan terhadap suhu tinggi. Pada baja paduan dengan kandungan nikel sekitar 25%, material tersebut memiliki ketahanan yang baik terhadap korosi. Sifat tahan korosi ini terjadi karena nikel berfungsi sebagai lapisan pelindung yang menghambat terjadinya reaksi korosif pada permukaan baja.

7. Unsur Kromium (Cr)

Kromium merupakan unsur paduan yang berperan dalam menurunkan laju pendinginan kritis baja, di mana penambahan kromium sekitar 1,5% sudah mampu meningkatkan kekerasan melalui pendinginan dalam media minyak. Kehadiran kromium dalam baja dapat menghasilkan struktur mikro yang lebih halus serta meningkatkan kemampuan pengerasan karena kromium dapat bereaksi dengan karbon membentuk karbida. Selain itu, kromium juga berkontribusi dalam meningkatkan kekuatan tarik dan keuletan baja, serta berfungsi membentuk lapisan pasif yang melindungi baja dari korosi dan meningkatkan ketahanan terhadap suhu tinggi.

3.2 Klasifikasi Baja

Menurut *ASM Handbook Volume 1* halaman 329 (1993), baja dapat dikelompokkan berdasarkan komposisi kimianya, khususnya kandungan karbon dan unsur paduan yang ditambahkan. Klasifikasi baja berdasarkan komposisi kimia tersebut meliputi beberapa jenis sebagai berikut:

1. Baja Karbon

Baja karbon merupakan paduan yang tersusun dari besi dan karbon dengan kandungan unsur lain dalam jumlah kecil, seperti silikon (Si), mangan (Mn), fosfor (P), sulfur (S), dan tembaga (Cu). Karakteristik baja karbon sangat dipengaruhi oleh kadar karbonnya, di mana peningkatan kadar karbon akan diikuti oleh peningkatan kekuatan dan kekerasan material. Oleh karena itu, baja karbon diklasifikasikan berdasarkan kandungan karbonnya (Wiryosumarto, 2004).

a. Baja Karbon Rendah

Baja karbon rendah merupakan baja dengan kandungan karbon kurang dari 0,3%. Jenis baja ini sering dikenal sebagai baja ringan (*mild steel*) atau baja perkakas. Salah satu jenis baja karbon rendah yang paling umum digunakan adalah *cold rolled steel* dengan kadar karbon antara 0,08% hingga 0,30%, yang banyak dimanfaatkan sebagai material bodi kendaraan.

b. Baja Karbon Sedang

Baja karbon sedang merupakan jenis baja dengan kandungan karbon berkisar antara 0,30% hingga 0,60%. Baja ini memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan baja karbon rendah serta menunjukkan respons yang baik terhadap perlakuan panas. Namun, baja karbon sedang relatif lebih sulit dibentuk melalui proses pemesinan dan pengelasan. Selain itu, baja jenis ini dapat dikeraskan secara efektif melalui proses *quenching*. Baja karbon sedang banyak digunakan pada komponen seperti poros, rel kereta api, roda gigi, pegas, baut, serta berbagai komponen mesin lain yang memerlukan kekuatan tinggi.

c. Baja Karbon Tinggi

Baja karbon tinggi merupakan jenis baja dengan kandungan karbon tertinggi dibandingkan baja karbon lainnya, yaitu berkisar antara 0,60% hingga 1,7%. Baja ini memiliki ketahanan panas dan tingkat kekerasan yang tinggi, namun keuletannya relatif rendah. Selain itu, baja karbon tinggi memiliki kekuatan tarik paling besar dan banyak dimanfaatkan

sebagai material perkakas (*tools*). Aplikasi baja karbon tinggi antara lain digunakan dalam pembuatan kawat baja dan kabel baja.

2. Baja Paduan

Menurut Amanto (1999), baja paduan adalah baja yang mengandung satu atau lebih unsur paduan, seperti nikel, mangan, molibdenum, kromium, vanadium, dan wolfram, yang ditambahkan untuk memperoleh sifat mekanik tertentu, antara lain kekuatan, kekerasan, dan keuletan. Kombinasi berbagai unsur paduan tersebut menghasilkan karakteristik khusus pada baja. Sebagai contoh, penambahan nikel dan kromium dapat menghasilkan baja dengan sifat keras sekaligus ulet. Berdasarkan kandungan unsur paduannya, baja paduan dikelompokkan menjadi tiga jenis, yaitu:

a. Baja paduan rendah (*Low Alloy Steel*)

Baja paduan rendah merupakan jenis baja paduan dengan kandungan unsur paduan kurang dari 2,5% berat, seperti kromium (Cr), mangan (Mn), sulfur (S), silikon (Si), fosfor (P), dan unsur lainnya. Baja ini memiliki kadar karbon yang setara dengan baja karbon, namun ditambahkan sejumlah kecil unsur paduan. Penambahan unsur tersebut bertujuan untuk meningkatkan kekuatan material tanpa mengurangi keuletan, serta memperbaiki ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue*), korosi, keausan, dan temperatur tinggi. Baja paduan rendah banyak digunakan pada struktur kapal, jembatan, roda kereta api, ketel uap, tangki gas, pipa gas, dan aplikasi sejenis lainnya.

b. Baja paduan menengah (*Medium Alloy Steel*)

Baja paduan menengah merupakan jenis baja paduan yang memiliki kandungan unsur paduan berkisar antara 2,5% hingga 10% berat, seperti kromium (Cr), mangan (Mn), sulfur (S), silikon (Si), fosfor (P), dan unsur lainnya.

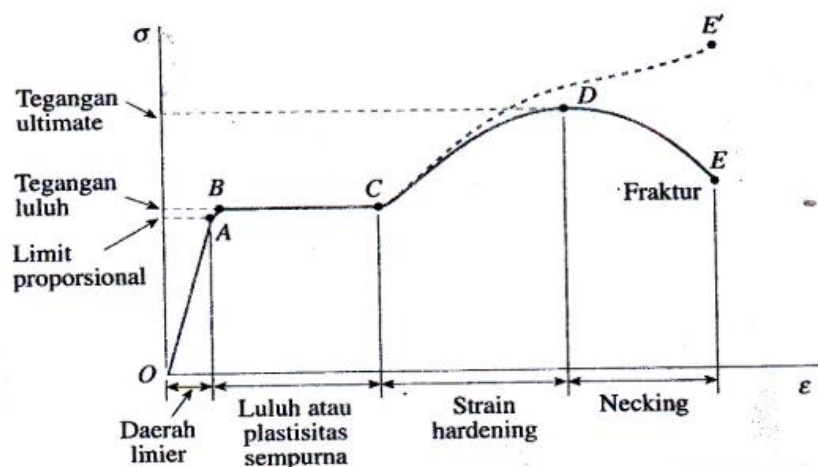
c. Baja paduan tinggi (*High Alloy Steel*)

Baja paduan tinggi merupakan jenis baja paduan yang mengandung unsur paduan lebih dari 10% berat, seperti kromium (Cr), mangan (Mn), sulfur (S), silikon (Si), fosfor (P), dan unsur lainnya. Contoh baja

paduan tinggi meliputi baja tahan karat, baja perkakas, dan baja mangan. Material ini banyak diaplikasikan pada berbagai komponen, antara lain perkakas, bantalan (*bearing*), bejana tekan, baja pegas, alat potong (*cutting tools*), serta *frog* pada rel kereta api.

3.3 Sifat Mekanik Baja

Metode pengujian yang paling tepat untuk memperoleh sifat mekanik material baja adalah melalui pengujian tarik pada benda uji baja. Hal ini dikarenakan pengujian tekan tidak mampu memberikan hasil yang akurat akibat kemungkinan terjadinya tekuk pada benda uji, yang dapat menyebabkan ketidakstabilan selama pengujian. Hasil pengujian tarik pada baja umumnya disajikan dalam bentuk kurva hubungan antara tegangan dan regangan, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1. Berdasarkan kurva tersebut, hubungan antara tegangan dan regangan bersifat linier hingga mencapai batas proporsional, dan apabila beban dilepaskan, material masih dapat kembali ke bentuk semula. Rentang linier hingga batas elastis ini dikenal sebagai daerah elastis baja. Kurva tegangan-regangan hasil uji tarik baja ditampilkan pada Gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3. 1 Kurva Tegangan Regangan pada Uji Tarik Baja
(Sumber: Mulyati, 2013)

3.3.1 Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas merupakan nilai kemiringan pada kurva tegangan–regangan di daerah elastis. Nilai modulus elastisitas yang tinggi menunjukkan

kemampuan material untuk menahan tegangan atau beban yang besar dengan perubahan regangan yang relatif kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa baja mampu menahan gaya tekan yang cukup besar akibat pembebanan tanpa mengalami deformasi yang signifikan. Secara umum, modulus elastisitas digunakan sebagai parameter untuk menggambarkan sifat elastis material, yang dinyatakan sebagai perbandingan antara tegangan yang diberikan dengan perubahan bentuk per satuan panjang akibat tegangan tersebut.

Sifat elastis suatu material berkaitan erat dengan tingkat kekakuannya dalam menahan beban. Modulus elastisitas didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan yang diberikan dengan perubahan bentuk per satuan panjang. Semakin besar nilai modulus elastisitas, maka lendutan yang terjadi akan semakin kecil. Selama gaya yang bekerja pada material elastis tidak melebihi batas elastisnya, perbandingan antara tegangan dan regangan akan tetap konstan. Konstanta ini dikenal sebagai modulus elastis atau modulus Young (E). Dengan demikian, modulus elastisitas atau modulus Young merupakan rasio antara tegangan dan regangan yang dialami oleh suatu material. Berdasarkan Hukum Hooke, hubungan tersebut dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3-1)$$

$$\sigma = P/A \quad (3-2)$$

$$\varepsilon = \Delta L/L \quad (3-3)$$

Sehingga dari persamaan (3-1), (3-2), dan (3-3) dapat dicari nilai modulus elastisitas dengan persamaan:

$$E = \frac{P \cdot L}{A \cdot \Delta L} \quad (3-4)$$

Di mana :

σ = Tegangan aksial (N/mm^2)

ε = Regangan aksial P

- L = Panjang struktur mula-mula (mm)
 E = Modulus elastisitas (N/mm^2)
 A = Luas penampang batang (mm^2)
 ΔL = Pertambahan panjang struktur (mm)

Beberapa nilai Modulus elastisitas untuk beberapa jenis bahan ditunjukkan pada tabel 3.1 berikut ini.

Tabel 3. 1 Modulus Elastisitas

Zat	Modulus Elastisitas (N/m^2)
Besi	100×10^9
Baja	200×10^9

(Sumber: <https://fisikakontekstuals.wordpress.com>)

3.3.2 Tegangan

Tegangan merupakan besaran yang menyatakan intensitas gaya (F), yaitu respons internal material terhadap gaya yang bekerja per satuan luas penampang (A). Apabila tegangan yang terjadi terdistribusi secara merata pada luas penampang dan bernilai konstan, maka hubungan tersebut dapat dinyatakan melalui persamaan (3-2). Berdasarkan jenisnya, tegangan atau *stress* dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Tegangan Normal

Tegangan normal adalah tegangan yang bekerja pada bidang penampang yang tegak lurus terhadap arah gaya. Nilai tegangan normal yang dimaksud merupakan tegangan rata-rata yang bekerja pada seluruh titik di penampang A, bukan tegangan pada satu titik tertentu. Secara umum, tegangan yang terjadi pada setiap titik tidak selalu sama dengan nilai tegangan rata-rata. Namun, dalam praktik analisis, tegangan tersebut sering dianggap terdistribusi secara seragam, kecuali pada daerah yang mengalami beban terpusat atau konsentrasi tegangan.

2. Tegangan Tarik

Tegangan tarik merupakan tegangan yang timbul akibat adanya gaya tarik, di mana arah gaya bekerja tegak lurus dan menjauhi permukaan penampang material.

3. Tegangan tekan

Tegangan tekan merupakan tegangan yang timbul akibat adanya beban tekan, di mana arah gaya bekerja tegak lurus dan menuju permukaan penampang. Pada suatu benda dalam keadaan statis, apabila dilakukan pemotongan imajiner, kondisi kesetimbangan tetap terpenuhi dengan resultan gaya sama dengan nol ($\Sigma F = 0$).

4. Tegangan Geser

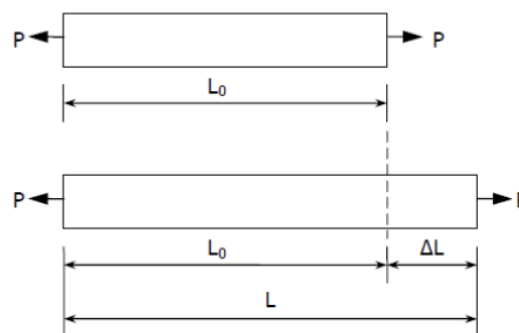
Tegangan geser merupakan tegangan yang timbul akibat gaya yang bekerja sejajar dengan permukaan penampang atau bersifat tangensial. Luas penampang A merupakan area yang menahan beban P , sehingga tegangan yang terjadi pada penampang tersebut disebut sebagai tegangan geser (τ). Apabila hanya terdapat satu bidang geser, kondisi ini disebut sebagai geser tunggal, sedangkan apabila terdapat dua bidang geser, maka disebut sebagai geser ganda.

3.3.3 Regangan

Regangan (*strain*) merupakan perubahan dimensi suatu benda akibat gaya yang bekerja dalam kondisi setimbang, dibandingkan dengan ukuran awalnya. Apabila suatu batang mengalami gaya tarik, regangan yang terjadi disebut regangan tarik (*tensile strain*), yang ditandai dengan bertambahnya panjang elemen. Sebaliknya, jika batang mengalami gaya tekan, regangan yang terjadi disebut regangan tekan (*compressive strain*) dan menyebabkan pemendekan. Regangan tarik dinyatakan bernilai positif, sedangkan regangan tekan bernilai negatif. Regangan ini disebut regangan normal karena berkaitan langsung dengan tegangan normal (Gere & Timoshenko, 2000). Selain itu, regangan juga dapat diartikan sebagai tingkat deformasi material.

Penambahan beban pada material yang telah mencapai kekuatan maksimum tidak lagi efektif karena pada kondisi tersebut material telah mengalami deformasi menyeluruh. Apabila pembebanan tetap dilanjutkan, regangan akan terus meningkat dan material tampak mengalami peningkatan kekuatan akibat fenomena perkuatan regangan (*strain hardening*), hingga akhirnya material mengalami patah pada titik kekuatan patah.

Deformasi terjadi ketika suatu material menerima gaya atau memberikan reaksi terhadap gaya yang bekerja. Selama proses deformasi, material menyerap energi akibat adanya gaya yang bekerja sepanjang perubahan bentuk yang terjadi. Setiap gaya, sekecil apa pun, dapat menyebabkan perubahan bentuk dan dimensi pada suatu benda. Perubahan dimensi secara fisik tersebut dikenal sebagai deformasi. Secara umum, deformasi dibedakan menjadi dua jenis, yaitu deformasi elastis dan deformasi plastis. Deformasi elastis merupakan perubahan bentuk yang bersifat sementara, di mana material dapat kembali ke ukuran semula setelah beban dilepaskan. Sebaliknya, deformasi plastis adalah perubahan bentuk yang bersifat permanen meskipun beban telah dihilangkan (Fitria, W., 2018). Ilustrasi pertambahan panjang ΔL akibat pemberian beban P ditunjukkan pada Gambar 3.2 berikut ini.



Gambar 3. 2 Benda kerja bertambah panjang ΔL ketika diberi beban P
(Sumber: Fitria, W 2018)

Pemberian beban akan menyebabkan benda uji mengalami deformasi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.2. Perbandingan antara perubahan panjang yang terjadi dengan panjang awal benda uji disebut sebagai regangan. Semakin besar tegangan yang bekerja pada suatu benda, semakin besar pula regangan yang dihasilkan, yang berarti pertambahan panjang ΔX juga semakin meningkat.

Apabila suatu batang mengalami pembebanan tarik, regangan yang terjadi disebut regangan tarik (*tensile strain*), yang ditandai dengan bertambahnya panjang elemen. Sebaliknya, pada kondisi pembebanan tekan, regangan yang timbul disebut regangan tekan (*compressive strain*) dan menyebabkan pemendekan batang.

Regangan tarik dinyatakan bernilai positif, sedangkan regangan tekan bernilai negatif. Regangan (ϵ) ini dikategorikan sebagai regangan normal karena berhubungan langsung dengan tegangan normal (Gere & Timoshenko, 2000).

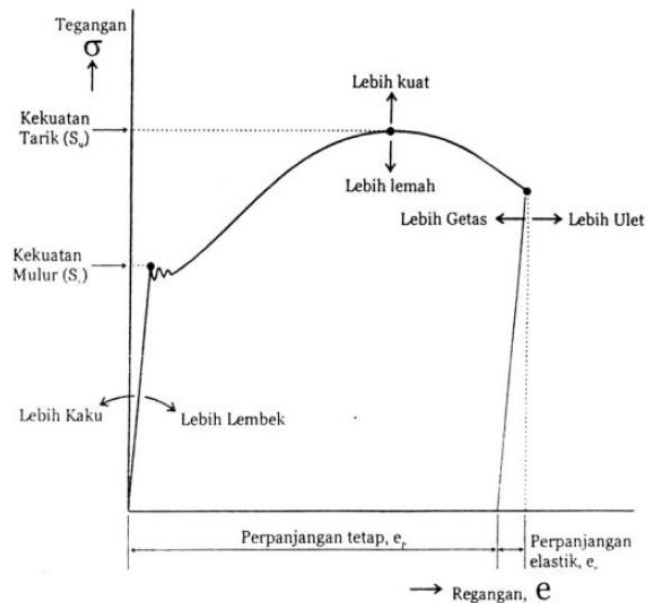
Adapun yang harus diperhatikan pada saat menetapkan regangan yaitu:

1. Pada baja lunak, sebelum terjadi patah, umumnya terjadi pengerutan yang signifikan berupa penyempitan luas penampang.
2. Regangan maksimum terjadi pada lokasi terjadinya patah, sedangkan regangan pada kedua ujung benda uji relatif paling kecil.

3.3.4 Hubungan Tegangan-Regangan

Seiring dengan pemberian beban aksial yang ditingkatkan secara bertahap, perubahan panjang relatif terhadap panjang awal diukur pada setiap kenaikan beban hingga spesimen baja mengalami kerusakan atau patah (*fracture*). Dengan mengetahui luas penampang awal spesimen, nilai tegangan normal (σ) pada setiap tingkat beban aksial dapat dihitung menggunakan hubungan antara beban aksial P (dalam satuan Newton) dan luas penampang awal A . Selanjutnya, pasangan nilai tegangan normal (σ) dan regangan normal (ϵ) dari hasil pengujian dapat diplot dengan menjadikan regangan sebagai sumbu absis dan tegangan sebagai sumbu ordinat, sehingga diperoleh diagram atau kurva tegangan–regangan. Bentuk kurva tegangan–regangan tersebut bervariasi tergantung pada jenis material yang diuji.

Grafik hubungan tegangan–regangan yang dihasilkan dari pengujian umumnya telah mampu menggambarkan karakteristik kekuatan dan kekakuan suatu material. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.3, semakin curam kemiringan bagian linier kurva atau semakin mendekati sumbu Y, menunjukkan bahwa regangan yang terjadi relatif kecil meskipun beban yang diberikan semakin besar. Hal ini menandakan bahwa material tersebut memiliki tingkat kekakuan yang lebih tinggi. Selain itu, semakin tinggi nilai puncak kurva yang menunjukkan tegangan putus (F_u), maka semakin besar pula kekuatan material yang diuji. Contoh kurva hasil uji tarik ditampilkan pada Gambar 3.3 berikut ini.



Gambar 3. 3 Contoh Kurva Hasil Uji Tarik
(Sumber: Haris Budiman 2016)

3.3.5 Tensile Strength

Pada kondisi tanpa adanya gaya luar, molekul-molekul penyusun suatu bahan padat beresilasi di sekitar posisi keseimbangannya. Keadaan ini merupakan kondisi dengan energi minimum bagi molekul, sehingga ketika molekul mengalami perpindahan dari posisi keseimbangan tersebut, akan timbul kecenderungan untuk kembali ke posisi semula. Secara konseptual, tegangan (*stress*) merupakan ukuran dari gaya-gaya yang bekerja antar molekul. Apabila material tidak mengalami percepatan, maka gaya antar molekul berada dalam keadaan setimbang dengan gaya luar yang bekerja pada material. Oleh karena itu, besarnya tegangan dapat ditentukan melalui pengukuran gaya eksternal yang diberikan pada benda. Tegangan pada suatu material didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya luar yang bekerja dengan luas penampang spesimen material.

Apabila suatu benda dikenai tegangan, maka benda tersebut akan mengalami deformasi yang selanjutnya menghasilkan regangan. Regangan didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan panjang yang terjadi dengan panjang awal benda. Dengan melakukan pengujian pada sampel material pada berbagai tingkat tegangan dan mengukur regangan yang dihasilkan, dapat diperoleh grafik hubungan

antara tegangan dan regangan. Kurva tegangan–regangan tersebut digunakan untuk menentukan karakteristik mekanik dari material yang diuji.

Kekuatan tarik atau tegangan maksimum (*ultimate tensile strength*) merupakan nilai tegangan tertinggi yang mampu ditahan oleh suatu material ketika dikenai beban tarik sebelum mengalami patah. Besaran ini umumnya dinyatakan dengan simbol F_u . Dalam pengujian tarik juga dikenal istilah tegangan leleh (*yield strength*), yang dilambangkan dengan F_y , yaitu tegangan yang menyebabkan terjadinya deformasi plastis awal pada material. Tegangan leleh menandai batas awal suatu bahan atau logam mulai mengalami perubahan bentuk permanen. Nilai tegangan putus dan tegangan leleh tersebut dapat ditentukan menggunakan persamaan tertentu sebagai berikut :

$$F_y = P_y/A \quad (3-5)$$

$$F_u = P_u/A \quad (3-6)$$

Di mana:

1. P_y merupakan besar beban saat grafik mulai mengalami titik proporsional yang dinyatakan dalam Newton (N)
2. P_u merupakan besar beban saat benda uji mengalami putus atau dapat dilihat dari puncak tertinggi grafik hubungan beban dan pertambahan panjang yang dinyatakan dalam Newton (N)
3. A merupakan luasan penampang dari benda uji dengan satuan mm^2

Tegangan leleh dan tegangan putus memiliki peranan penting dalam menentukan karakteristik kekuatan dan kekakuan material yang diuji. Perbedaan mendasar antara keduanya terletak pada definisinya, di mana tegangan leleh merupakan tegangan minimum yang menyebabkan material mengalami deformasi permanen, sedangkan tegangan putus menunjukkan nilai tegangan maksimum yang dapat dicapai material. Informasi mengenai tegangan leleh dan tegangan putus pada baja digunakan untuk menilai mutu serta kualitas dari material baja yang diuji.

3.3.6 Daktilitas

Daktilitas merupakan sifat material yang memungkinkan terjadinya deformasi plastis yang besar akibat pembebanan tarik tanpa mengalami kerusakan atau patah. Tingkat daktilitas pada baja berpengaruh terhadap perilaku tegangan dan regangan yang dialami material tersebut. Baja dengan daktilitas tinggi mampu mengalami deformasi plastis besar sebelum patah, namun peningkatan kekuatan tarik tidak selalu diikuti peningkatan daktilitas. Keberadaan sifat daktil ini membuat struktur baja tidak mengalami kegagalan secara tiba-tiba ketika menerima beban yang melebihi kapasitasnya.

3.4 Kelebihan dan Kelemahan Baja Sebagai Material Konstruksi

Menurut Alfashinta, (2017) Baja sebagai material konstruksi memiliki kelebihan dan kelemahan, berikut keunggulan baja sebagai material konstruksi :

1. Kekuatan Tinggi (*High Strength*)

Baja struktural pada umumnya memiliki kekuatan tarik (*tensile strength*) berkisar antara 400 hingga 900 MPa. Rentang kekuatan ini menjadikan baja struktural sangat sesuai untuk diaplikasikan pada struktur dengan bentang panjang serta konstruksi yang berdiri di atas tanah lunak.

2. Keseragaman (*Uniformity*)

Sifat-sifat baja bersifat stabil dan tidak mengalami perubahan signifikan seiring berjalannya waktu. Selain itu, hampir seluruh bagian baja memiliki karakteristik yang seragam, sehingga kekuatannya dapat terjamin.

3. Elastisitas (*Elasticity*)

Baja menunjukkan perilaku yang mendekati asumsi perencanaan, karena masih mengikuti Hukum Hooke meskipun telah mengalami tegangan yang relatif tinggi. Nilai modulus elastisitas baja juga sama baik pada kondisi tarik maupun tekan.

4. Daktilitas (*Ductility*)

Daktilitas merupakan kemampuan suatu struktur atau komponennya untuk mengalami deformasi inelastik berulang di luar batas leleh awal, sambil tetap mempertahankan kapasitas daya dukung beban yang cukup besar.

Keberadaan sifat daktil ini memberikan keuntungan terhadap kinerja struktural, karena ketika baja menerima beban yang melampaui kekuatannya, material tidak langsung mengalami kegagalan, melainkan terlebih dahulu mengalami regangan hingga mencapai batas daktilitasnya. Selain itu, pada pembebanan siklik, daktilitas yang tinggi memungkinkan baja menyerap energi dalam jumlah besar.

5. Kuat Patah / Rekah (*Fracture Toughness*)

Baja merupakan material yang memiliki tingkat keuletan tinggi sehingga mampu menahan pembebanan berulang. Komponen struktur baja yang mengalami deformasi besar tetap dapat memikul gaya yang cukup besar tanpa mengalami patah. Sifat keuletan ini sangat penting terutama pada kondisi adanya konsentrasi tegangan, meskipun nilai tegangan tersebut masih berada di bawah batas yang diizinkan. Pada material dengan keuletan rendah, kegagalan dapat terjadi pada tingkat tegangan yang relatif kecil dan bersifat getas atau terjadi secara tiba-tiba. Sebagai material konstruksi, baja memiliki berbagai keunggulan dan keterbatasan, salah satunya adalah kelemahan-kelemahan tertentu yang perlu diperhatikan dalam penggunaannya.

1. Biaya Perawatan (*Maintenance Cost*)

Baja dapat mengalami korosi akibat kontak dengan air dan udara, sehingga diperlukan pelapisan cat secara berkala untuk mencegah terjadinya karat.

2. Ketahanan Api (*Fire Resistance*)

Kekuatan baja dapat mengalami penurunan yang signifikan ketika berada pada kondisi temperatur tinggi.

3. Kelelahan (*Fatigue*)

Kegagalan akibat kelelahan pada baja tidak selalu diawali oleh terjadinya leleh atau deformasi yang besar, tetapi dapat disebabkan oleh pembebanan siklik atau beban berulang dalam jangka waktu yang panjang. Kondisi ini sering kali dipicu oleh adanya konsentrasi tegangan, misalnya akibat keberadaan lubang pada elemen baja.

4. Rekah Kerapuhan

Struktur baja dalam beberapa kasus dapat mengalami keruntuhan mendadak tanpa adanya tanda deformasi yang signifikan sebelumnya. Jenis kegagalan ini sangat berbahaya sehingga perlu dihindari. Berbeda dengan kegagalan akibat kelelahan, retak getas terjadi karena pengaruh beban statis.

3.5 Uji Kuat Tarik

Uji tarik merupakan salah satu metode pengujian material yang digunakan untuk mengetahui kemampuan maksimum tegangan dan regangan suatu material. Pengujian ini dilakukan dengan cara menarik material hingga mencapai kondisi tegangan dan regangan tertinggi, sampai akhirnya mengalami patah atau putus. Tujuan utama uji tarik adalah untuk mengetahui ketahanan material terhadap gaya tarik pada tingkat beban tertentu (Joseph R, 2004). Hasil pengujian akan berbeda bergantung pada jenis material yang diuji, karena setiap material memiliki karakteristik yang tidak sama. Sifat material tersebut dapat berupa elastis, elastis-plastis, plastis, hiperelastis, viskoelastis, maupun viskoplastis.

Pelaksanaan uji tarik pada spesimen berbentuk silinder atau lembaran yang telah disesuaikan dengan standar tertentu seperti ASTM, JIS, DIN, dan SNI, baik untuk material logam maupun non-logam, mampu memberikan informasi yang cukup lengkap mengenai perilaku material terhadap pembebanan mekanik. Informasi yang diperoleh meliputi batas proporsional (*proportional limit*), batas elastis (*elastic limit*), titik dan kekuatan luluh (*yield point* dan *yield strength*), kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*), kekuatan putus (*breaking strength*), keuletan (*ductility*), modulus elastisitas atau modulus Young, modulus kelentingan (*modulus of resilience*), modulus ketangguhan (*modulus of toughness*), serta kurva tegangan–regangan.

Krisnawan (2015) menyatakan bahwa uji tarik merupakan suatu metode untuk menentukan nilai kekuatan tarik dari sebuah material. Ketahanan spesimen saat dikenai gaya tarik mencerminkan kemampuan material dalam menahan beban tarik terhadap terjadinya deformasi atau perubahan bentuk. Dalam pelaksanaan uji

tarik, material mengalami beberapa tahapan, yaitu tahap elastis di mana material masih mampu kembali ke bentuk semula setelah mengalami perubahan, kemudian tahap plastis yang menyebabkan perubahan bentuk permanen. Tahap selanjutnya adalah kondisi ketika material mencapai kekuatan tarik maksimum atau batas tertinggi, yang pada baja lunak umumnya ditandai dengan terjadinya necking, dan tahap akhir adalah terjadinya patah pada material.

Sebelum uji tarik dilakukan, spesimen harus dipersiapkan sesuai dengan standar pengujian yang berlaku, yaitu mengacu pada pedoman ASTM E8. Adapun alat uji tarik universal yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut ini.

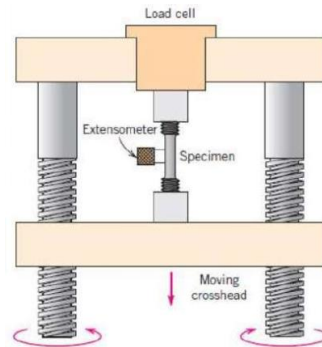


Gambar 3. 4 Alat Uji Tarik Universal
(Sumber: Testing Indonesia)

3.5.1 Skema Uji Tarik

Menurut Wibowo (2023), dalam pelaksanaan uji tarik spesimen dipasang pada mesin uji tarik dan dihubungkan dengan extensometer yang menggunakan strain gauge sebagai sensornya. *Extensometer* berfungsi untuk mengukur pertambahan panjang spesimen, sedangkan strain gauge berperan sebagai pendeteksi perubahan regangan. Pergerakan *crosshead* menyebabkan *load cell* ikut bergerak dan memberikan gaya tarik yang menimbulkan tegangan pada spesimen. Akibat tegangan tarik tersebut, spesimen mengalami pertambahan panjang. Perubahan panjang ini kemudian dideteksi oleh *strain gauge* yang terpasang pada spesimen dan diukur oleh *extensometer* yang terhubung dengannya. Data berupa perubahan panjang dan gaya yang bekerja pada spesimen selanjutnya dapat

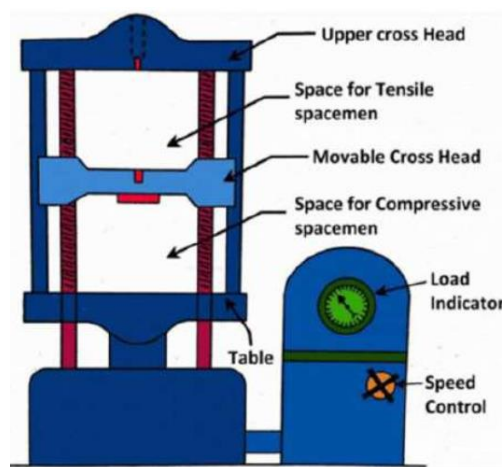
diperoleh dan diolah untuk analisis lebih lanjut. Skema pelaksanaan uji tarik ditampilkan pada Gambar 3.5 berikut ini.



Gambar 3. 5 Skema Uji Tarik
(Sumber: Wibowo 2023)

3.5.2 Komponen Uji Tarik

Perangkat pada mesin uji tarik terdiri atas beberapa komponen yang masing-masing memiliki fungsi tersendiri. Susunan komponen mesin uji tarik tersebut ditampilkan pada Gambar 3.6 berikut ini.



Gambar 3. 6 Komponen Mesin Uji Tarik
(Sumber: Wibowo 2023)

1. *Upper Cross Head*

Upper crosshead merupakan bagian atas dari mesin UTM yang dilengkapi dengan pencekam atau grip untuk menjepit dan menahan spesimen selama proses penarikan. Bagian ini dapat bergerak naik dan turun sesuai dengan kebutuhan pengujian.

2. Jarak Untuk Spesimen Uji Tarik

Jarak tersebut berfungsi sebagai ruang penempatan spesimen pada uji tarik, di mana panjangnya disesuaikan dengan ukuran material yang diuji. Walaupun standar atau kode pengujian telah menetapkan panjang minimum spesimen uji tarik, dalam praktiknya panjang spesimen yang digunakan dapat bervariasi.

3. *Movable cross head*

Movable crosshead merupakan bagian mesin yang dapat bergerak naik dan turun sesuai dengan panjang spesimen yang diuji. Pada bagian atas digunakan sebagai pencekam spesimen, sedangkan bagian bawah dimanfaatkan untuk menjepit *drill* ketika dilakukan pengujian *bending*.

4. *Table*

Meja ini berfungsi sebagai tempat penopang pada pengujian *bending*, sehingga harus dipastikan memiliki kekuatan yang memadai dan mampu menahan beban serta tekanan selama proses pengujian berlangsung.

5. *Load indicator*

Komponen ini berfungsi untuk mengetahui besarnya beban yang diberikan melalui *load indicator*. Jenis indikator beban yang digunakan beragam, ada yang sudah berbasis digital dan ada pula yang masih analog, tergantung pada spesifikasi mesin.

6. *Speed Control*

Speed control digunakan untuk mengatur kecepatan penurunan serta kecepatan saat pencekam diangkat.

7. Komputer

Mesin UTM generasi terbaru umumnya telah dilengkapi dengan satu set komputer beserta printer untuk mencetak hasil pengujian. Pada komputer tersebut telah terpasang perangkat lunak yang terhubung langsung dengan mesin UTM.

8. *Extensometer*

Extensometer berfungsi untuk mengukur perubahan panjang material selama proses uji tarik berlangsung.

9. Jangka Sorong

Jangka sorong digunakan sebagai alat bantu dalam melakukan pengukuran dimensi material.

3.6 Kekerasan

Menurut Chiumiento dkk. (2019), kekerasan merupakan parameter yang menunjukkan kemampuan permukaan logam dalam menahan terjadinya deformasi plastis permanen. Pengukuran kekerasan logam dilakukan menggunakan alat yang disebut penetrator, yang umumnya berbentuk bola, piramida, atau kerucut, dan ditekan ke permukaan logam. Ujung penetrator dibuat dari baja dengan tingkat kekerasan sangat tinggi atau dari karbida tungsten sehingga memiliki kekuatan yang lebih besar dibandingkan material yang diuji. Pengujian kekerasan standar dilakukan dengan memberikan gaya tertentu secara bertahap dan tegak lurus terhadap permukaan logam. Setelah penetrator menekan dan meninggalkan jejak pada permukaan, alat dilepaskan, kemudian nilai kekerasan ditentukan berdasarkan luas atau kedalaman bekas yang terbentuk, atau dapat langsung dibaca melalui mesin pengujian.

Menurut Ding dkk. (2017), kekerasan dan kekuatan merupakan dua indikator kinerja makroskopis yang penting pada material baja. Kekuatan tarik umumnya digunakan sebagai parameter utama dalam menilai kemampuan struktur atau komponen dalam menahan beban. Karena pengujian kekerasan baja relatif sederhana, cepat, serta tidak merusak struktur atau komponen, penyusunan model matematis dengan menggunakan parameter makroskopis seperti kekerasan dan kekuatan baja menjadi lebih mudah untuk mengevaluasi kekuatan material pada struktur baja yang sedang digunakan. Untuk memperoleh hubungan antara kekerasan dan kekuatan, dilakukan serangkaian eksperimen guna mengukur nilai kekerasan dan kekuatan tarik baja. Data hasil pengujian tersebut kemudian dibandingkan dan dianalisis, selanjutnya disusun model matematis yang sesuai dengan menggunakan metode regresi matematis.

3.7 Uji Kekerasan Leeb (*Leeb Hardness Tester*)

Pengujian kekerasan Leeb menggunakan sebuah perangkat tumbukan yang dilengkapi dengan bola dari karbida tungsten, silikon nitrida, atau ujung tumbukan berbahan berlian, serta kumparan induksi untuk mengukur kecepatan tumbukan. Selain itu, alat ini juga dilengkapi dengan cincin dudukan dan layar elektronik yang berfungsi menampilkan nilai kekerasan. Pada pengujian ini digunakan perangkat tumbukan tipe D. Bentuk perangkat tumbukan tipe D ditunjukkan pada Gambar 3.7 berikut ini.



Gambar 3. 7 Perangkat Tumbukan D
(Sumber: SNI 8461:2017)

Pengujian kekerasan Leeb dapat diterapkan pada material baja, baja cor, dan besi cor dengan berbagai bentuk serta ukuran. Dalam pemilihan perangkat tumbukan, ketebalan dan berat spesimen uji perlu diperhatikan. Spesimen yang memiliki berat atau ketebalan di bawah batas minimum memerlukan dudukan khusus untuk menahan tumbukan dari alat uji. Apabila dudukan dan sambungan tidak disediakan secara memadai, hasil pengujian yang diperoleh dapat lebih rendah dibandingkan nilai kekerasan sebenarnya. Ketentuan mengenai berat minimum spesimen uji ditampilkan pada Tabel 3.2 berikut ini.

Tabel 3. 2 Tebal dan Berat Minimum Benda Uji

Perangkat Tumbukan	Berat (min) atau	Ketebalan (min)
D, DC D+15, DL, S, E	15 lb (5 kg)	1/8 inci (3 mm)
G	40 lb (15 kg)	3/8 inci (10 mm)
C	4 lb (1,5 kg)	1/32 inci (1 mm)

(Sumber: SNI 8461:2017, 7.2)

Mengutip dari SNI 8461:2017, skema pengujian dan prinsip kerja pada alat *leeb hardness tester* dapat dilihat pada uraian sebagai berikut:

1. Perangkat tumbukan terlebih dahulu disambungkan ke perangkat indikator, kemudian alat pengujian dinyalakan.
2. Pada kondisi awal, perangkat tumbukan tidak bersentuhan dengan benda uji, kemudian dipegang dengan satu tangan sementara tangan lainnya menekan *charging tube* hingga terhubung.
3. *Charging tube* kemudian dilepaskan secara perlahan hingga kembali ke posisi semula.
4. *Impact body* dalam keadaan terkunci.
5. Perangkat tumbukan selanjutnya dikalibrasi untuk arah tumbukan vertikal yang tegak lurus terhadap permukaan horizontal.
6. Pada arah tumbukan selain vertikal, seperti sudut 45° terhadap bidang horizontal atau dari arah bawah, pengukuran nilai kekerasan dilakukan dengan menerapkan faktor penyesuaian.
7. Jarak antara dua titik tumbukan harus paling sedikit dua kali diameter yang diukur dari tepi ke tepi.
8. Jarak antara titik tumbukan dan tepi benda uji harus minimal tiga kali diameter yang diukur dari tepi ke tepi.
9. Tidak boleh ada titik tumbuk lebih dari sekali.
10. Setelah perangkat tumbukan ditempatkan pada permukaan uji, *impact body* ditekan secara perlahan melalui tombol pelepas.
11. Nilai kekerasan leeb dibaca pada indikator alat.
12. Nilai yang ditampilkan akan secara otomatis diperbarui dengan hasil pengujian tumbukan selanjutnya.

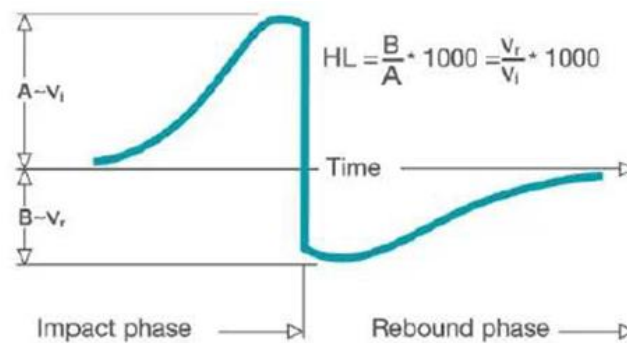
3.7.1 Angka Kekerasan Leeb

Nilai kekerasan Leeb merupakan besaran yang diperoleh dari perbandingan antara kecepatan pantul dan kecepatan tumbukan *impact body* berdiameter 3 mm atau 5 mm (sesuai dengan jenis perangkat tumbukan yang digunakan), yang terbuat

dari bola karbida tungsten, silikon nitrida, atau ujung berlian, kemudian dikalikan dengan faktor 1000.

$$L = \frac{\text{Kecepatan Pantul}}{\text{Kecepatan Tumbukan}} \times 1000 \quad (\text{SNI 8461:2017,3-7})$$

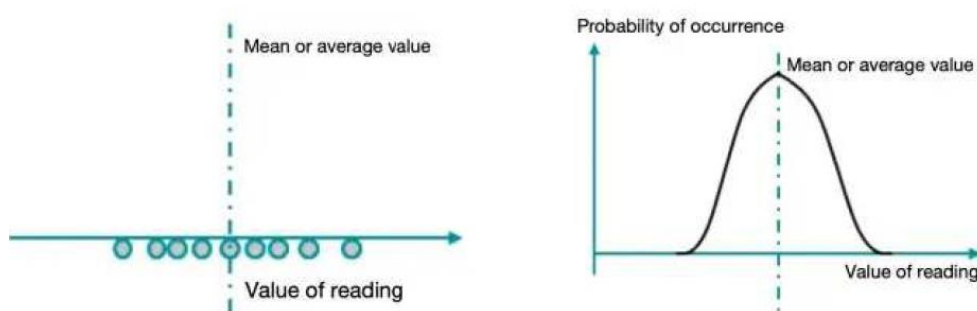
Nilai kekerasan Leeb dinyatakan dengan simbol HL yang disertai satu atau beberapa akhiran untuk menunjukkan jenis perangkat tumbukan yang digunakan. Prinsip standar pengujian kekerasan Leeb ditampilkan pada Gambar 3.8. berikut ini.



Gambar 3. 8 Prinsip dari standar pengujian *hardness leeb*
(Sumber: ISO 16895)

3.7.2 Hasil Kekerasan

Hasil pengujian kekerasan diperoleh dengan menghitung nilai rata-rata dari sepuluh kali pembacaan pada setiap titik tumbukan di area pengujian. Sebaran hasil pembacaan nilai kekerasan ditunjukkan pada Gambar 3.9 berikut ini.



Gambar 3. 9 Distribusi pembacaan hasil
(Sumber: ISO 16895)

Perlu diperhatikan bahwa pada jumlah pengukuran yang terbatas, nilai deviasi standar hanya dapat diperkirakan. Oleh karena itu, koreksi terhadap rangkaian pengukuran kecil dapat dilakukan dengan menggunakan distribusi Student (*Student's t-distribution*). Standar ketidakpastian pengukuran (u) selanjutnya dihitung dengan persamaan berikut:

$$U = \frac{f \ x \ s}{\sqrt{n}} \quad (\text{ISO 16859,3-8})$$

- u = Standar ketidakpastian pengukuran
- s = Standar deviasi
- n = Jumlah nilai yang diukur
- f = t-faktor

Nilai kekerasan rata-rata yang diperoleh dari perhitungan matematis berdasarkan standar pengujian diberi akhiran huruf untuk menunjukkan jenis perangkat yang digunakan.

3.7.3 Konversi Satuan Nilai Kuat Tarik

Menurut SNI 8461:2017, tidak terdapat hubungan korelasi langsung antara prinsip pengujian kekerasan Leeb dengan metode pengujian kekerasan lainnya maupun dengan uji tarik. Konversi nilai kekerasan yang dilakukan hanya bersifat perkiraan, sehingga sebaiknya dihindari kecuali pada kondisi khusus yang memiliki dasar estimasi yang dapat dipertanggungjawabkan dan didukung oleh pengujian tambahan untuk memperoleh nilai konversi yang lebih akurat. Konversi juga tidak diperbolehkan tanpa adanya kesepakatan khusus antara pihak yang menetapkan penggunaan metode pengujian dan pihak yang melaksanakan pengujian.

Perubahan nilai kekerasan terukur ke dalam skala lain tidak dapat dilakukan menggunakan persamaan matematis, sehingga diperlukan tabel konversi yang disusun secara empiris melalui serangkaian percobaan. Nilai empiris tersebut ditetapkan berdasarkan sejumlah besar pengukuran perbandingan, kemudian disusun dalam tabel konversi dan distandarisasi sesuai dengan ASTM E140 atau

ISO 16859 yang relevan. Apabila nilai kekerasan hasil konversi berasal dari pengujian Leeb, maka jenis perangkat tumbukan yang digunakan harus dicantumkan dalam tanda kurung, misalnya HBS (HLD), persamaan dapat dilihat berikut ini :

A10.1.1 From Leeb D hardness to Rockwell C hardness:

$$\begin{aligned} \text{HRC} = & - 2.2872\text{E}+02 + 1.0137\text{E}+00(\text{HLD}) - 1.5593\text{E}-03(\text{HLD})^2 \\ & + 1.225\text{E}-06(\text{HLD})^3 - 3.7227\text{E}-10(\text{HLD})^4 \end{aligned} \quad (\text{A10.1}) \quad (3-9)$$

A10.1.2 From Leeb D hardness to Brinell hardness (10- mm diameter steel ball, 3000-kgf force):

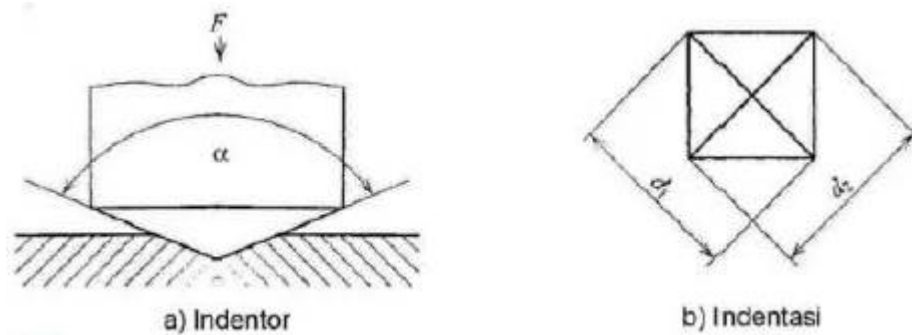
$$\begin{aligned} \text{HBS}(10/3000) = & 2.7862\text{E}+02 - 2.3014\text{E}+00(\text{HLD}) \\ & + 7.8978\text{E}-03(\text{HLD})^2 - 9.5946\text{E}-06(\text{HLD})^3 \\ & + 5.0641\text{E}-09(\text{HLD})^4 \end{aligned} \quad (\text{A10.2}) \quad (3-10)$$

A10.1.3 From Leeb D hardness to Vickers hardness:

$$\begin{aligned} \text{HV}10 = & 2.9085\text{E}+02 - 2.4113\text{E}+00(\text{HLD}) + 8.2399\text{E}-03(\text{HLD})^2 \\ & - 1.0056\text{E}-05(\text{HLD})^3 + 5.3754\text{E}-09(\text{HLD})^4 \end{aligned} \quad (\text{A10.3}) \quad (3-11)$$

3.8 *Hardness Vickers*

Pengujian kekerasan menggunakan metode Vickers bertujuan untuk menentukan tingkat kekerasan suatu material. Uji kekerasan Vickers memanfaatkan indenter berbentuk piramida intan yang menyerupai sangkar. Sudut antara dua permukaan piramida intan yang saling berhadapan adalah sebesar 136°. Nilai sudut tersebut dipilih karena mendekati rasio perbandingan antara diameter lekukan dan diameter bola penekan pada pengujian kekerasan Brinell (Dieter, 1988). Prinsip pengujian kekerasan dengan metode Vickers ditunjukkan pada Gambar 3.10 berikut ini.



Gambar 3. 10 Prinsip Uji Keras dengan Vickers
(Sumber: SNI 8390: 2017)

Di mana:

F = Beban Uji (N)

a = Sudut Indentor (136°)

$d^1 d^2$ = Panjang Diagonal Indentasi (mm)

Beban yang digunakan pada pengujian kekerasan Vickers relatif lebih kecil dibandingkan dengan metode Rockwell dan Brinell, yaitu berkisar antara 1 hingga 1000 gram. Nilai kekerasan Vickers (HV) didefinisikan sebagai perbandingan antara beban uji (F) dengan luas permukaan bekas penekanan indenter yang ditentukan dari panjang diagonal jejak (A), kemudian dikalikan dengan nilai sin ($136^{\circ}/2$). Persamaan untuk menghitung nilai kekerasan menggunakan metode Vickers adalah sebagai berikut:

$$HV = \frac{F}{A} \times \sin \frac{136^{\circ}}{2} \quad (3-12)$$

$$HV = \frac{F \cdot \sin \frac{136^{\circ}}{2}}{\frac{d^2}{2}} \quad (3-13)$$

$$HV = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (3-14)$$

Di mana :

HV = Angka kekerasan vickers

F = Beban (kgf)

D = Diagonal (mm)

Karena jejak yang dihasilkan dari penekanan indentor piramida memiliki keserupaan secara geometris dan tidak menimbulkan permasalahan dalam pengukurannya, nilai HV pada dasarnya tidak dipengaruhi oleh besar beban. Kondisi ini umumnya berlaku, kecuali pada penggunaan beban yang sangat kecil. Beban yang lazim digunakan dalam pengujian Vickers berkisar antara 1 hingga 120 kg, bergantung pada tingkat kekerasan logam yang diuji. Adapun beberapa hal yang menjadi keterbatasan atau kendala dalam penerapan metode Vickers adalah sebagai berikut.

1. Uji ini tidak dapat digunakan untuk pengujian rutin karena pengujian ini sangat lamban.
2. Memerlukan persiapan permukaan benda uji.
3. Terdapat pengaruh kesalahan manusia yang besar pada panjang diagonalnya.

3.9 Thickness (Ultrasonic Thickness Gauge SW-6510S)

Instrumen ini merupakan perangkat pengukur ketebalan berbasis ultrasonik yang memanfaatkan teknologi mikroprosesor berkecepatan tinggi dengan konsumsi daya yang efisien. Dengan menerapkan prinsip pengukuran ultrasonik, alat ini dapat menentukan ketebalan logam maupun material lainnya serta menghitung kecepatan rambat gelombang ultrasonik di dalam material tersebut. Instrumen ini digunakan untuk memantau ketebalan pipa dan bejana tekan pada peralatan produksi, terutama dalam mendeteksi penipisan material akibat korosi selama masa operasi. Selain itu, alat ini juga mampu mengukur ketebalan pelat dan berbagai komponen hasil proses manufaktur. Penggunaannya diterapkan di berbagai sektor industri, seperti perminyakan, kimia, metalurgi, perkapalan, penerbangan, dan kedirgantaraan.

Pengukuran ketebalan dengan alat ukur ultrasonik dilakukan berdasarkan prinsip perambatan gelombang ultrasonik yang dihasilkan oleh probe. Gelombang tersebut dipancarkan melalui media penghubung (*couplant*) menuju permukaan benda uji. Sebagian gelombang kemudian dipantulkan oleh permukaan bagian bawah benda uji dan diterima kembali oleh probe. Dengan memanfaatkan informasi

waktu tempuh gelombang ultrasonik serta kecepatan rambat gelombang di dalam material, alat ini menghitung waktu rambat pergi-pulang gelombang ultrasonik untuk selanjutnya menentukan ketebalan material. Nilai hasil pengukuran ditampilkan secara langsung pada layar instrumen. Persamaan pengukuran ketebalan ultrasonik ditunjukkan sebagai berikut.

$$H = \frac{v \times t}{2} \quad (3-15)$$

Di mana :

H = Ketebalan material

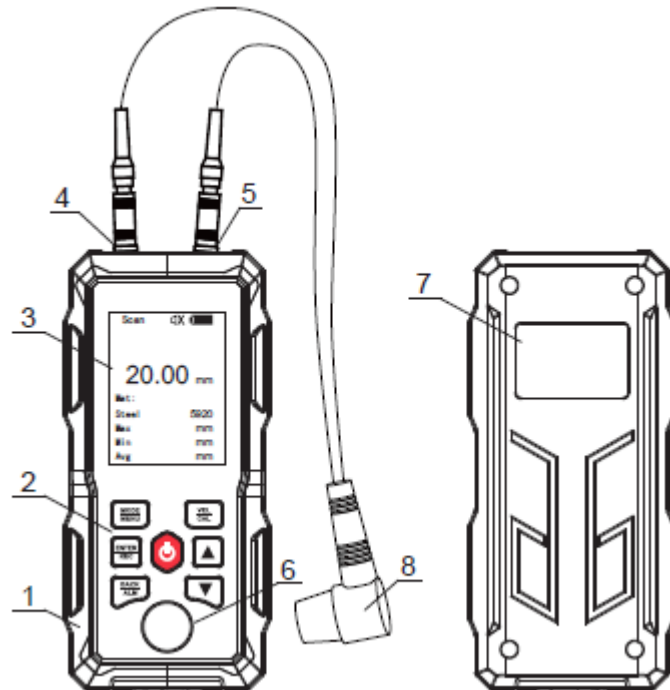
v = kecepatan rambat gelombang ultrasonic dalam material

t = waktu rambat gelombang *ultrasonic* pada benda uji

Persamaan tersebut menyatakan bahwa gelombang ultrasonik merambat bolak-balik satu kali dari permukaan atas ke permukaan bawah benda uji.

3.9.1 Komponen *Ultrasonic Thickness Gauge* (SW-6510S)

Perangkat pada alat *Ultrasonic Thickness Gauge* terdiri dari beberapa komponen yang masing-masing memiliki fungsi tersendiri. Susunan komponen *Ultrasonic Thickness Gauge* ditampilkan pada Gambar 3.11 berikut ini.



Gambar 3. 11 *Komponen Ultrasonic Thickness Gauge*
(Sumber: *manual usher SW-6510S*)

1. *Housing* (Casing Alat)
Bagian ini merupakan bodi utama alat yang berfungsi melindungi komponen internal dari benturan, debu, serta pengaruh lingkungan lainnya. Selain itu, housing juga dirancang sebagai pegangan yang ergonomis untuk memudahkan proses pengukuran.
2. *Buttons* (Tombol Operasi)
Bagian ini berfungsi untuk mengendalikan pengoperasian alat, seperti menyalakan dan mematikan perangkat, memilih mode pengukuran, mengatur parameter material, melakukan kalibrasi, serta menavigasi menu yang ditampilkan pada layar.
3. *Display* (Layar Tampilan)
Bagian ini digunakan untuk menampilkan nilai hasil pengukuran ketebalan, satuan yang digunakan, kecepatan rambat gelombang ultrasonik, kondisi baterai, serta berbagai informasi pengaturan perangkat lainnya.
4. *Transmitter Socket* (Soket Pemancar)

Bagian ini digunakan untuk menampilkan nilai hasil pengukuran ketebalan, satuan yang digunakan, kecepatan rambat gelombang ultrasonik, kondisi baterai, serta berbagai informasi pengaturan perangkat lainnya.

5. *Receiver Socket* (Soket Penerima)

Berfungsi sebagai penghubung sinyal penerima yang menangkap gelombang ultrasonik pantulan dari probe, kemudian meneruskannya untuk diproses oleh unit utama alat.

6. *Thickness Calibration Block* (Blok Kalibrasi Ketebalan)

Komponen ini berfungsi sebagai referensi dalam proses kalibrasi alat. Blok tersebut memiliki ketebalan standar tertentu yang digunakan untuk menjamin ketelitian dan keandalan hasil pengukuran sebelum pengujian dilaksanakan.

7. *Nameplate* (Pelat Identitas)

Bagian ini memuat informasi identitas perangkat, meliputi nama pabrikan, tipe atau model alat (SW-6510S), nomor seri, serta spesifikasi dasar yang dibutuhkan untuk keperluan dokumentasi dan penelusuran alat.

8. *Ultrasonic Thickness Probe* (Probe Ketebalan Ultrasonik)

Probe merupakan sensor utama yang berfungsi memancarkan sekaligus menerima gelombang ultrasonik. Dalam penggunaannya, probe diletakkan pada permukaan benda uji dengan bantuan couplant guna memastikan proses transmisi gelombang berlangsung secara optimal.

3.9.2 Prosedur Pengukuran Ketebalan Ultrasonik

Pengukuran ketebalan material dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan alat *Usher Ultrasonic Thickness Gauge SW-6510S*. Proses pengukuran mencakup beberapa tahap, yaitu persiapan benda uji, pemasangan probe, kalibrasi perangkat, penentuan kecepatan rambat gelombang ultrasonik, serta pelaksanaan pengukuran ketebalan benda uji. Berdasarkan *manual Usher SW-6510S*, tahapan-tahapan tersebut dijelaskan sebagai berikut.

1. *Persiapan benda uji*

Benda uji disiapkan dengan memastikan bahwa permukaan yang akan dilakukan pengukuran berada dalam keadaan bersih.

2. Pemasangan probe dan pengaktifan alat
Probe dipasang pada instrumen, kemudian alat dinyalakan
3. Kalibrasi instrumen
Instrumen perlu dikalibrasi terlebih dahulu guna memastikan ketelitian hasil pengukuran.
4. Penentuan kecepatan rambat secara *invers*
Jika kecepatan rambat gelombang suara pada benda uji belum diketahui secara pasti, maka nilai tersebut harus ditentukan terlebih dahulu dengan menggunakan metode pengukuran *invers* agar diperoleh kecepatan rambat yang sesuai dengan material benda uji.
5. Pengukuran ketebalan benda uji
Pengukuran ketebalan dilakukan dengan memanfaatkan nilai kecepatan rambat suara yang diperoleh dari hasil pengukuran *invers* pada benda uji dengan material yang sama.

3.10 Signifikansi Model Regresi

Dalam analisis regresi linier, pengujian hipotesis dilakukan untuk mengetahui apakah hubungan yang terbentuk antara variabel bebas dan variabel terikat benar-benar terjadi secara statistik atau hanya muncul akibat kebetulan data. Pengujian ini melibatkan perumusan hipotesis nol (H_0), hipotesis alternatif (H_1), serta penggunaan parameter statistik berupa nilai t-statistik, F-statistik, dan p-value.

1. Hipotesis Nol (H_0) dan Hipotesis Alternatif (H_1)
Hipotesis nol (H_0) merupakan pernyataan awal yang menyatakan tidak adanya hubungan atau pengaruh antara variabel yang dianalisis. Dalam analisis regresi H_0 menyatakan bahwa variabel bebas tidak berpengaruh secara statistik terhadap variabel terikat.

$$H_0 : b = 0 \quad (3-16)$$

Variabel bebas adalah variabel yang nilainya dianggap memengaruhi atau menjelaskan perubahan variabel lain. Variabel bebas adalah nilai kekerasan

Leeb (HL). Variabel terikat adalah variabel yang nilainya dipengaruhi atau dijelaskan oleh variabel bebas, dalam penelitian ini variabel terikat adalah kuat tarik maksimum (Fu). Maka dari itu dalam penelitian ini, H_0 menyatakan bahwa kekerasan Leeb (HL) tidak berpengaruh terhadap kuat tarik maksimum (Fu).

Sebaliknya, hipotesis alternatif (H_1) adalah kebalikan dari hipotesis nol menyatakan (H_0). Di mana H_1 menyatakan bahwa terdapat hubungan atau pengaruh antar variabel yang diuji yaitu variabel bebas dan variabel terikat.

$$H_1 : b \neq 0 \quad (3-17)$$

Dalam penelitian ini H_1 menyatakan bahwa kekerasan Leeb (HL) berpengaruh terhadap kuat tarik maksimum (Fu).

Perumusan dari H_0 dan H_1 didapatkan dengan pengujian statistik yaitu berupa t-statistik dan F-statistik. Maka dari itu, tujuan utama dari pengujian statistik adalah untuk menentukan apakah hipotesis nol dapat ditolak berdasarkan data hasil pengujian.

2. Tingkat Signifikansi dan p-value

Tingkat signifikansi (α) adalah batas toleransi kesalahan dalam menolak hipotesis nol. Nilai ini menyatakan probabilitas melakukan kesalahan tipe I, yaitu menolak H_0 padahal H_0 benar.

$$\alpha = 0,05$$

Pengujian hipotesis dilakukan dengan menggunakan tingkat signifikansi (α) sebesar 0,05 atau 5%, yang merupakan nilai yang umum digunakan dalam penelitian teknik.

Menurut Elfrianto dkk. (2025) Nilai α biasanya ditentukan sebelum pengumpulan data/ eksperimen. Sehingga memberi acuan yang jelas untuk

mengambil keputusan. Pemilihan nilai (α) biasanya tergantung pada konteks studi dan konsekuensi dari kesalahan tipe 1 dan tipe II

a. Kesalahan Tipe I (α)

Kesalahan menolak H_0 yang sebenarnya benar (*false positive*). Dengan menetapkan level signifikansi 0,05. Peneliti menerima peluang 5% bahwa ia akan membuat kesalahan tipe I

b. Kesalahan Tipe II (β)

Kesalahan menerima H_0 yang sebenarnya salah (*false negative*).

P-value merupakan ukuran probabilitas yang digunakan untuk menilai apakah hasil yang diperoleh konsisten dengan H_0 . Dengan kata lain, p-value menggambarkan seberapa besar kemungkinan hubungan yang terlihat terjadi hanya karena faktor kebetulan.

Kriteria pengambilan keputusan statistik adalah sebagai berikut:

$$p\text{-value} \leq \alpha \quad (3-18)$$

Jika $p\text{-value} \leq 0,05$, maka hipotesis nol ditolak dan hubungan dinyatakan signifikan secara statistik.

$$p\text{-value} > \alpha \quad (3-19)$$

Jika $p\text{-value} > 0,05$, maka hipotesis nol tidak dapat ditolak dan hubungan tidak signifikan atau hanya suatu kebetulan data saja.

P-value didapatkan dari distribusi statistik yaitu uji statistik t dan f yang kemudian akan dilihat bagaimana peluangnya.

3. Uji t (t-statistik)

Menurut Kuner dkk. (2005) nilai t-statistik digunakan untuk menilai apakah koefisien regresi yang diperoleh benar-benar bermakna secara statistik atau hanya muncul akibat variasi acak dalam data pengujian. Koefisien regresi

menunjukkan seberapa besar perubahan variabel terikat akibat perubahan satu satuan variabel bebas. Namun, karena data hasil pengujian selalu mengandung variasi dan ketidakpastian, nilai koefisien tersebut perlu dibandingkan dengan tingkat variasi data yang ada.

Nilai t-statistik menyatakan perbandingan antara besarnya koefisien regresi dengan besarnya kesalahan (variasi) dalam estimasi koefisien tersebut. Dengan kata lain, t-statistik menunjukkan apakah nilai koefisien yang diperoleh cukup besar dibandingkan “noise” data, sehingga dapat dianggap berbeda dari nol secara nyata. Berikut persamaan t-statistik

$$t = \frac{b}{SE(b)} \quad (3-20)$$

Di mana :

t = nilai t- statistik

b = koefisien regresi b

SE(b) = standar *error* koef b

Nilai t yang besar menunjukkan bahwa koefisien regresi jauh dari nol dan pengaruh variabel bebas (HL) terhadap variabel terikat (Fu) relatif konsisten di seluruh data, bukan sekadar akibat fluktuasi atau ketidakaturan pengukuran. Sebaliknya, nilai t yang kecil menunjukkan bahwa perubahan yang diamati masih sebanding dengan variasi acak data, sehingga pengaruh variabel bebas belum dapat dinyatakan signifikan. Oleh karena itu, nilai t-statistik menjadi dasar dalam pengambilan keputusan pengujian hipotesis, yaitu untuk menentukan apakah hipotesis nol yang menyatakan bahwa koefisien regresi sama dengan nol dapat ditolak atau tidak. Berikut persamaan untuk mendapatkan t-statistik dan p- value.

a. Model regresi

$$F_{ui} = \alpha + b H_{Li} + \epsilon_i \quad (3-21)$$

Di mana :

F_{ui}	= Nilai kuat tarik ke-i
H_{Li}	= Nilai <i>hardness leeb</i> ke-i
α	= Konstanta
b	= Koefisien regresi
ε_i	= Galat (<i>error</i>)

b (Koefisien regresi b)

$$b = \frac{\Sigma(H_{Li} - \bar{H}_L)(F_{ui} - \bar{F}_u)}{\Sigma(H_{Li} - \bar{H}_L)^2} \quad (3-22)$$

Di mana :

\bar{H}_L	= Rata-rata nilai <i>hardness</i>
\bar{F}_u	= Rata-rata nilai kuat tarik

b. Seb (Standar *error* koefisien b)

$$SE(b) = \sqrt{\frac{\Sigma(F_{ui} - \hat{F}_{ui})^2}{(n-2)\Sigma(H_{Li} - \bar{H}_L)^2}} \quad (3-24)$$

Di mana :

\hat{F}_{ui}	= Nilai F_u prediksi regresi
$n-2$	= Derajat bebas regresi sederhana

c. t-statistik

$$t = \frac{b}{SE(b)} \quad (3-25)$$

Di mana :

t	= nilai t- statik
b	= koefisien regresi b
$SE(b)$	= standar <i>error</i> koef b

d. p-value

$$p = 2 \times P (T_{(n-2)} \geq |t|) \quad (3-26)$$

Di mana :

P = Peluang

T = Distribusi t-student

df/(n-2) = Derajat bebas

t = t-statistik

4. Uji F (F-statistik)

Selain uji t, penelitian ini juga menggunakan uji F untuk menilai kelayakan model regresi secara keseluruhan. Uji F digunakan untuk menjawab pertanyaan sederhana, yaitu apakah model regresi yang dibuat memang layak digunakan atau tidak. Uji F membandingkan dua kondisi, yaitu model yang menggunakan variabel bebas (variasi F_u yang bisa dijelaskan HL) dan model tanpa variabel bebas (variasi F_u yang tidak bisa dijelaskan *noise*/acak). Persamaan/ rasio perbandingan dapat dilihat sebagai berikut.

$$F = \frac{SSR/k}{SSE/(n-k-1)} \quad F = \frac{\text{variasi yang dijelaskan model}}{\text{variasi acak}} \quad (3-27)$$

Di mana :

F = Angka uji/ F-stat

SSR = Bagian F_u yang dijelaskan HL

SSE = Noise

n = Jumlah data

k = Jumlah variabel bebas

Berbeda dengan uji t yang menguji pengaruh masing-masing variabel secara parsial, uji F mengevaluasi kemampuan model regresi dalam menjelaskan variabel terikat secara simultan tanpa berfokus pada satu koefisien tertentu.

Melalui uji ini, dapat dinilai apakah model regresi hubungan antara HL dan Fu secara umum layak dan masuk akal untuk digunakan dalam analisis. Apabila nilai F-statistik menghasilkan p-value yang lebih kecil dibandingkan tingkat signifikansi yang ditetapkan, maka hipotesis nol yang menyatakan bahwa model tidak memiliki daya jelaskan ditolak, sehingga dapat disimpulkan bahwa model regresi secara keseluruhan signifikan dan bukan merupakan hasil kebetulan semata. Berikut persamaan untuk mendapatkan t-statistik dan p-value.

a. Regresi linier

$$F_{ui} = \alpha + b H_{Li} + \varepsilon_i \quad (3-28)$$

Di mana :

- F_{ui} = Nilai kuat tarik ke-i
 H_{Li} = Nilai hardness leeb ke-i
 b = Koefisien regresi
 α = Konstanta
 ε_i = Galat (*error*)

b. SST (Total variasi Fu)

$$SST = \sum (F_{ui} - \bar{F}_u)^2 \quad (3-29)$$

Di mana :

- F_{ui} = Data Fu ke-i
 \bar{F}_u = Rata-rata Fu

c. SSR (Variasi Fu yang dijelaskan HL)

$$SSR = \sum (\hat{F}_{ui} - \bar{F}_u)^2 \quad (3-30)$$

Di mana :

- \hat{F}_{ui} = Nilai Fu prediksi regresi

d. SSE (*Noise*)

$$SSE = \sum (F_{ui} - \hat{F}_{ui})^2 \quad (3-31)$$

Di mana :

\hat{F}_{ui} = Nilai F_u prediksi regresi

e. F-statistik

$$F = \frac{SSR/k}{SSE/(n-k-1)} \quad (3-32)$$

Di mana :

F = Angka uji/ F-stat

SSR = Bagian F_u yang dijelaskan HL

SSE = Noise

n = Jumlah data

k = Jumlah variabel bebas

f. p-value

$$p = P (F_{(k, n - k - 1)} \geq F_{hitung}) \quad (3-33)$$

Di mana :

P = Peluang

$F_{(k, n - k - 1)}$ = Distribusi F

F_{hitung} = Nilai F data

5. Koefisien Determinasi (R^2) dan *Root Mean Square Error* (RMSE)

Koefisien determinasi (R^2) merupakan salah satu parameter utama dalam evaluasi kualitas model regresi linier. Menurut Montgomery dkk. (2012) Nilai R^2 menunjukkan proporsi variasi variabel terikat yang dapat dijelaskan oleh variabel bebas yang digunakan dalam model. Secara matematis, R^2

didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah kuadrat regresi (*Sum of Squares Regression*, SSR) terhadap jumlah kuadrat total (*Sum of Squares Total*, SST). Dengan demikian, nilai R^2 berada pada rentang 0 hingga 1, di mana nilai yang semakin mendekati 1 menunjukkan kemampuan model yang semakin baik dalam menjelaskan variasi data. Persamaan R^2 dapat dilihat berikut ini.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \qquad R^2 = \frac{\text{dapat dijelaskan HL}}{\text{total variasi Fu}} \qquad (3-34)$$

Di mana :

SSR = Variasi Fu yang dapat dijelaskan HL

SST = Total variasi Fu

Adapun interpretasi koefisien relasi dari R^2 menurut Sugiyono (2007) terlihat pada Tabel 3.3 berikut ini.

Tabel 3. 3 interpretasi koefisien relasi dari R^2

No	Koefisien Korelasi	Hubungan antar Variabel
1	0,00-0,19	Sangat Rendah
2	0,20-0,39	Rendah
3	0,40-0,59	Sedang
4	0,60-0,79	Kuat
5	0,80-1,00	Sangat Kuat

(Sumber: Sugiyono 2007)

Root Mean Square Error (RMSE) merupakan ukuran kesalahan prediksi yang umum digunakan dalam analisis regresi. RMSE menggambarkan besar rata-rata deviasi antara nilai hasil pengujian aktual dengan nilai hasil prediksi model regresi. Secara matematis, RMSE dihitung sebagai akar kuadrat dari rata-rata kuadrat selisih antara nilai aktual dan nilai prediksi. Karena dihitung langsung dari selisih nilai variabel terikat, satuan RMSE selalu sama dengan satuan variabel terikat yang dianalisis. Persamaan RMSE dapat dilihat berikut ini.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum(F_{ui} - \hat{F}_{ui})^2}{n}} \quad (3-35)$$

Di mana :

F_{ui} = Nilai F_u asli

\hat{F}_{ui} = Nilai F_u prediksi

Nilai R^2 menunjukkan proporsi variasi variabel terikat yang dapat dijelaskan oleh variabel bebas, sedangkan RMSE menunjukkan besarnya kesalahan prediksi model terhadap data aktual. Model yang baik ditandai dengan nilai R^2 yang relatif tinggi dan nilai RMSE yang rendah, yang menunjukkan bahwa model tidak hanya mampu menjelaskan variasi data, tetapi juga memiliki tingkat kesalahan prediksi yang kecil

BAB IV METODE PENELITIAN

4.1 Umum

Berdasarkan Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI), metode penelitian didefinisikan sebagai suatu cara atau pendekatan yang digunakan untuk menemukan kebenaran serta memahami prinsip-prinsip yang berkaitan dengan fenomena alam, sosial, maupun kemanusiaan sesuai dengan disiplin ilmu yang relevan. Metode penelitian berfungsi sebagai sarana untuk memperoleh data yang bersifat ilmiah dan untuk menjawab permasalahan yang menjadi objek kajian. Dalam penelitian ini, data yang digunakan dikelompokkan menjadi dua jenis berdasarkan sumber perolehannya, yaitu sebagai berikut.

1. Data primer

Data primer merupakan data yang diperoleh secara langsung melalui proses pengujian dan pengamatan yang dilakukan oleh peneliti, baik di laboratorium maupun di lapangan. Data ini dihasilkan dari observasi langsung terhadap objek penelitian.

2. Data sekunder

Data sekunder adalah data pendukung yang diperoleh dari studi pustaka, seperti buku, jurnal, dan referensi ilmiah lainnya yang relevan dengan penelitian yang dilakukan.

Adapun tahapan penelitian yang akan dilaksanakan dalam penelitian ini meliputi :

1. penentuan lokasi penelitian,
2. penyiapan alat dan bahan benda uji,
3. pelaksanaan penelitian, dan
4. pengolahan serta penyajian hasil penelitian.

4.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia

4.3 Bahan yang digunakan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Profil baja IWF 200 x 100 x 5,8 x 8 (*web* dan *flange*)
2. Profil baja IWF 150 x 75 x 5 x 7 (*web* dan *flange*)
3. Profil baja UNP 100 x 50 x 5 x 5,75 (*web* dan *flange*)

Bahan yang digunakan dalam penelitian memiliki total jumlah 3 buah sampel profil yaitu 1 buah profil baja IWF 200 x 100 panjang 50 cm, 1 buah profil baja IWF 150 x 75 panjang 50 cm dan 1 buah profil baja UNP 100 x 50 panjang 50 cm. Benda uji dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut ini.

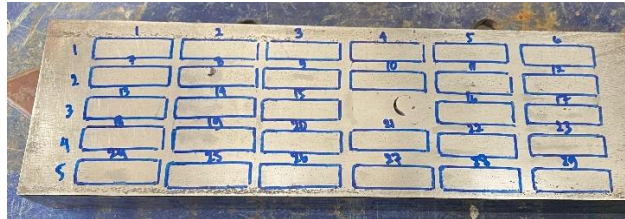


Gambar 4. 1 Benda Uji Profil Baja

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Sebelum dilakukan pengujian, benda uji dipersiapkan dengan melakukan pengamplasan dan penghalusan pada permukaan yang akan diuji. Tahapan ini bertujuan untuk menghilangkan kotoran, karat, serta ketidakteraturan permukaan yang dapat mempengaruhi akurasi hasil pengukuran. Setelah permukaan dinyatakan rata dan bersih, pada setiap benda uji ditentukan dan dibuat area pengujian dengan luasan sebesar 1 inci². Luasan area pengujian ditetapkan dalam

SNI 8461:2017 untuk pelaksanaan pengujian kekerasan menggunakan metode Leeb. Persiapan permukaan dan penentuan area uji ini dilakukan untuk memastikan kontak yang optimal antara probe dan permukaan benda uji sehingga diperoleh hasil pengukuran yang akurat dan konsisten. Benda uji setelah pengamplasan dan pembuatan area luas uji dapat dilihat pada Gambar 4.2 berikut ini.



Gambar 4. 2 Benda Uji Setelah Pengamplasan dan Pembuatan Luasan
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Setelah dilakukan pengujian kekerasan menggunakan metode Leeb, benda uji selanjutnya dipotong dan dibentuk menjadi spesimen uji tarik. Spesimen uji tarik tersebut dibuat sesuai dengan ketentuan dan dimensi yang ditetapkan dan sesuai dengan standar ASTM E8 untuk pengujian tarik material logam. Benda uji dapat dilihat pada Gambar 4.3 sampai Gambar 4.4 berikut ini.



Gambar 4. 3 Benda Uji Sebelum Pemotongan
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)



Gambar 4. 4 Benda Uji Setelah Pemotongan
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

4.4 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain sebagai berikut.

1. Timbangan

Timbangan digunakan untuk menentukan massa atau berat suatu benda secara akurat. Dalam penelitian ini, timbangan berperan penting untuk mengetahui massa profil baja yang digunakan sebagai benda uji. Ketelitian alat ini sangat diperlukan guna mendukung keakuratan data pengujian. Timbangan ditunjukkan pada Gambar 4.5 berikut ini.



Gambar 4. 5 Timbangan
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

2. Mistar besi

Mistar besi digunakan sebagai alat ukur linier sederhana untuk mengukur panjang awal material baja sebelum proses pemotongan. Selain itu, alat ini dimanfaatkan untuk membuat garis bantu pada permukaan material sebagai panduan pemotongan agar sesuai dengan dimensi yang direncanakan. Meskipun memiliki ketelitian terbatas, yaitu sekitar 0,5–1 mm, mistar besi cukup efektif untuk pengukuran awal sebelum dilakukan pengukuran presisi. Mistar besi ditunjukkan pada Gambar 4.6 berikut ini.



Gambar 4. 6 Mistar Besi
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

3. Jangka Sorong

Jangka sorong berfungsi untuk mengukur dimensi benda uji dengan tingkat ketelitian tinggi, seperti ketebalan pelat, lebar gauge length, dan diameter spesimen uji tarik baja. Alat ini digunakan untuk memastikan dimensi spesimen memenuhi ketentuan standar ASTM E8, dengan tingkat ketelitian hingga 0,02 mm. Jangka sorong juga digunakan setelah proses pemotongan guna memastikan ukuran akhir spesimen masih berada dalam batas toleransi yang diperkenankan. Jangka sorong ditunjukkan pada Gambar 4.7 berikut ini.



Gambar 4. 7 Jangka Sorong
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

4. Pita Ukur (meteran)

Pita ukur digunakan untuk mengukur panjang material induk, seperti batang atau profil baja, sebelum dipotong menjadi spesimen uji. Alat ini lebih praktis digunakan pada material dengan panjang yang melebihi kapasitas mistar besi atau jangka sorong. Walaupun ketelitiannya lebih rendah dibandingkan jangka sorong, pita ukur sangat membantu dalam penentuan jumlah spesimen yang dapat diperoleh dari satu batang baja serta dalam proses penandaan awal. Pita ukur ditunjukkan pada Gambar 4.8 berikut ini.



Gambar 4. 8 Pita Ukur
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

5. Gerinda Tangan

Gerinda tangan digunakan untuk proses pemotongan serta spesimen baja agar sesuai dengan dimensi standar pengujian tarik. Alat ini memungkinkan pemotongan material secara cepat serta meratakan bagian tepi spesimen yang masih kasar akibat proses pemotongan. Dalam pembuatan benda uji sesuai ASTM E8, gerinda tangan berperan penting untuk menghilangkan tonjolan atau ketidakteraturan yang dapat memengaruhi hasil pengujian, meskipun hasil akhir tetap perlu diverifikasi menggunakan alat ukur presisi. Gerinda tangan ditunjukkan pada Gambar 4.9 berikut ini.



Gambar 4. 9 Gerinda Tangan
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

6. *Universal Testing Machine (UTM)*

Universal Testing Machine (UTM) merupakan mesin pengujian yang digunakan untuk menentukan sifat mekanik material, khususnya kuat tarik dan kuat tekan. Dalam penelitian ini, UTM digunakan untuk melaksanakan pengujian tarik pada profil baja guna memperoleh parameter mekanik material. UTM ditunjukkan pada Gambar 4.10 berikut ini.



Gambar 4. 10 *Universal Testing Machine (UTM)*
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

7. *Grip (Specimen Holder)*

Grip atau *specimen holder* merupakan komponen UTM yang berfungsi menjepit kedua ujung spesimen agar tertahan dengan kuat selama proses pembebanan. Grip dirancang untuk menyalurkan gaya tarik secara merata sehingga deformasi yang terjadi mencerminkan sifat mekanik material secara akurat. Pemilihan grip yang sesuai sangat penting untuk mencegah terjadinya slip, penjepitan tidak merata, maupun kerusakan awal pada spesimen. Grip ditunjukkan pada Gambar 4.11 berikut ini.



Gambar 4. 11 Grip (*Specimen Holder*)
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

8. *Sarung Tangan*

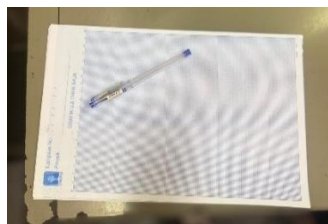
Sarung tangan digunakan sebagai alat pelindung diri selama penanganan spesimen dan pengoperasian peralatan pengujian. Penggunaan sarung tangan bertujuan untuk melindungi tangan dari risiko cedera akibat tepi tajam spesimen, percikan serpihan, maupun panas yang timbul selama proses pengujian. Dengan demikian, pemakaian sarung tangan mendukung penerapan keselamatan dan kesehatan kerja (K3) di laboratorium. Sarung tangan ditunjukkan pada Gambar 4.12 berikut ini.



Gambar 4. 12 Sarung Tangan
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

9. Kertas Milimeter Blok (*Graph Paper*)

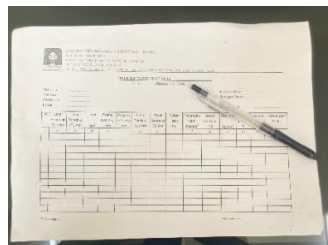
Kertas milimeter blok digunakan sebagai media pencatatan manual hasil uji tarik, khususnya untuk menggambarkan hubungan antara beban (*load*) dan pertambahan panjang (*elongation*) apabila mesin UTM belum dilengkapi sistem pencatatan digital. Kurva tegangan–regangan yang dihasilkan menjadi dasar analisis lebih lanjut dalam penentuan parameter mekanik material, seperti tegangan luluh, kekuatan tarik maksimum, dan regangan putus. Kertas milimeter blok ditunjukkan pada Gambar 4.13 berikut ini.



Gambar 4. 13 Kertas Milimeter Blok (*Graph Paper*)
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

10. Alat Tulis

Alat tulis digunakan untuk mencatat seluruh data hasil pengujian yang diperoleh selama penelitian, baik pada pengujian tarik maupun pengujian kekerasan. Data yang dicatat meliputi hasil pengukuran, kondisi pengujian, serta informasi pendukung lain yang diperlukan dalam proses analisis dan penyusunan laporan penelitian. Alat tulis ditunjukkan pada Gambar 4.14 berikut ini.



Gambar 4. 14 Alat Tulis
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

11. *Alat Leeb Hardness Tester D type impact (SW-6230)*

Leeb Hardness Tester tipe D digunakan untuk melakukan pengujian kekerasan material secara non-destruktif. Alat ini bekerja berdasarkan prinsip pantulan benda tumbuk (*impact body*) tipe D yang mengenai permukaan benda uji, kemudian dipantulkan kembali untuk menentukan nilai kekerasan material. Metode ini memungkinkan evaluasi kekerasan dilakukan tanpa menimbulkan deformasi atau kerusakan permanen pada spesimen. *Leeb Hardness Tester* ditunjukkan pada Gambar 4.15 berikut ini.



Gambar 4. 15 *Leeb Hardness Tester*
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

12. Klem C

Klem C digunakan untuk menjepit dan menahan benda uji agar berada dalam kondisi stabil selama pengujian kekerasan menggunakan metode Leeb. Penggunaan klem C bertujuan untuk mengurangi pergerakan, getaran, atau pergeseran spesimen selama pengujian berlangsung, sehingga hasil pengukuran kekerasan yang diperoleh menjadi lebih konsisten dan andal. Klem C ditunjukkan pada Gambar 4.16 berikut ini.



Gambar 4. 16 Klem C
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

13. Alat *Ultrasonic Thickness Gauge SW-6510S*.

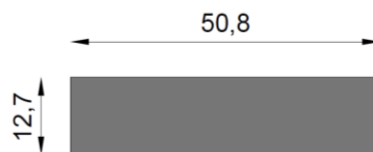
Ultrasonic Thickness Gauge SW-6510S digunakan untuk mengukur ketebalan material secara non-destruktif dengan memanfaatkan perambatan gelombang ultrasonik di dalam material. Alat ini berfungsi untuk memastikan ketebalan benda uji sebelum dan selama pengujian, sehingga data yang diperoleh mencerminkan kondisi aktual spesimen dan mendukung keakuratan hasil penelitian. *Ultrasonic Thickness Gauge* ditunjukkan pada Gambar 4.17 berikut ini.



Gambar 4. 17 *Ultrasonic Thickness Gauge SW-6510S*
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

4.5 Benda Uji

Benda uji berupa 3 buah sampel profil yaitu 1 buah profil baja IWF 200x100 panjang 50 cm, 1 buah profil baja IWF 150 x 75 panjang 50 cm dan 1 buah profil baja UNP 100 x 50 panjang 50 cm. Sesuai dengan SNI 8461:2017 untuk pengujian *hardness tester* diperlukan suatu luasan dengan luas kira-kira 1 inci² (645 mm²) di mana setiap luasan akan diambil 5 titik kekerasan sesuai *manual usher SW-6230*, Dimensi luasan uji kekerasan dapat dilihat pada Gambar 4.18 berikut ini.



Gambar 4. 18 Dimensi Luasan Uji Kekerasan
(Sumber: Dokumen Pribadi)

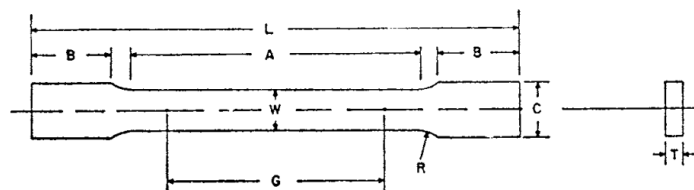
Ketebalan dan berat potongan benda uji harus dipertimbangkan pada saat memilih perangkat tumbukan yang digunakan. Pedoman SNI 8461:2017 merupakan ukuran yang disyaratkan sebagai berat dan ukuran minimum untuk memilih alat uji yang tepat. Potongan benda uji yang kurang dari bobot minimum atau ketebalan minimum membutuhkan dukungan untuk menahan tumbukan dari alat. Tebal dan berat minimum benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut ini.

Tabel 4. 1 Tebal dan Berat Minimum Benda Uji Tumbukan *Type D*

Perangkat Tumbukan	Berat (min) atau	Ketebalan (min)
D, DC D+15, DL, S, E	15 lb (5 kg)	1/8 inci (3 mm)
G	40 lb (15 kg)	3/8 inci (10 mm)
C	4 lb (1,5 kg)	1/32 inci (1 mm)

(Sumber: SNI 8461:2017, 7.2)

Untuk melakukan eksperimental yang valid, maka digunakan ukuran pengujian yang sudah di standarkan. Dalam hal ini pengujian mengikuti ketentuan model dan ukuran yang sudah ditetapkan oleh ASTM E-8 seperti yang terlihat pada Gambar 4.19 berikut ini.

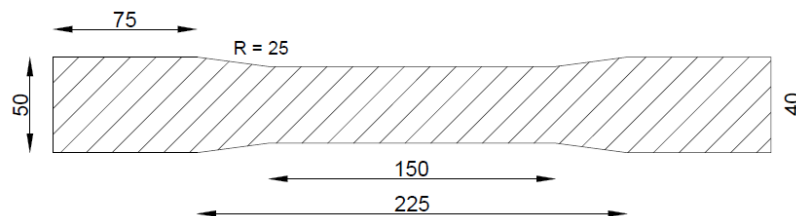


	Dimensions		
	Standard Specimens	Sheet-Type, 12.5 mm	Subsize Specimen
	Plate-Type, 40 mm [1.500 in.] Wide	[0.500 in.] Wide	6 mm [0.250 in.] Wide
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
G—Gauge length (Note 1 and Note 2)	200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	25.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.003]
W—Width (Note 3 and Note 4)	40.0 ± 2.0 [1.500 ± 0.125, -0.250]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]
T—Thickness (Note 5)		thickness of material 12.5 [0.500]	6 [0.250]
R—Radius of fillet, min (Note 6)	25 [1]	200 [8]	100 [4]
L—Overall length, min (Note 2, Note 7, and Note 8)	450 [18]	57 [2.25]	32 [1.25]
A—Length of reduced section, min	225 [9]	50 [2]	30 [1.25]
B—Length of grip section, min (Note 9)	75 [3]	20 [0.750]	10 [0.375]
C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	50 [2]		

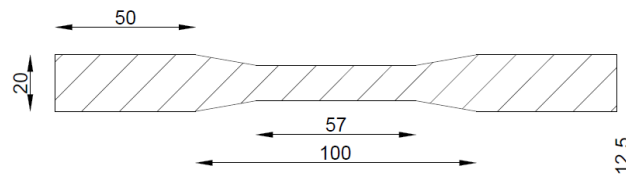
Gambar 4. 19 Model dan Ukuran yang ditetapkan dalam ASTM E8

(Sumber: ASTM E8)

Karena mengikuti dimensi ukuran yang sudah ditetapkan oleh ASTM E8, maka model ukuran dari benda uji mengikuti seperti yang terlihat pada Gambar 4.19 dengan spesifikasi ukuran real yang diukur penguji. Gambar Dimensi Benda Uji Spesimen dapat dilihat pada Gambar 4.20 dan Gambar 4.21 berikut ini.



Gambar 4. 20 Dimensi Benda Uji Spesimen Besar
(Sumber: Dokumen Pribadi)



Gambar 4. 21 Dimensi Benda Uji Spesimen Kecil
(Sumber: Dokumen Pribadi)

4.6 Pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan penelitian meliputi analisis data eksperimental, di mana dari data teknis pada benda uji didapatkan dari beberapa metode pengujian yaitu dengan metode uji tarik menggunakan *Universal Testing Machine*, metode dengan *Equotip Portable Leeb Hardness Tester* untuk mendapatkan nilai kekerasan sebagai *Non-Destructive Test* (NDT) serta *Ultrasonic Thickness Gauge* untuk mendapatkan nilai ketebalannya. Analisis antar variabel dilakukan untuk mendapatkan korelasi nilai kuat tarik yang berupa tegangan leleh dan tegangan putus dari *destructive test* dengan *hardness* dan *thickness* yang didapatkan menggunakan *non-destructive test*. Langkah-langkah penelitian ini guna mendapatkan data yang valid, berikut beberapa penjelasan langkah pengujian antara lain:

4.6.1 Persiapan Penelitian

Tahapan awal penelitian difokuskan pada kegiatan persiapan sebagai dasar untuk melanjutkan ke tahapan berikutnya. Pada tahap ini, peneliti melakukan studi

literatur, penyiapan bahan, serta penyiapan peralatan yang diperlukan. Seluruh kegiatan persiapan dilakukan secara optimal agar pelaksanaan penelitian dapat berlangsung dengan baik dan lancar. Studi literatur dilakukan dengan menelaah penelitian terdahulu yang relevan dalam bentuk buku maupun jurnal ilmiah, yang berfungsi sebagai referensi pendukung sekaligus sebagai landasan pengetahuan bagi peneliti dalam melaksanakan kegiatan eksperimen.

4.6.2 Pengujian

Dalam penelitian ini dilakukan 3 tahap pengujian yaitu uji *leeb hardness*, *thickness* dan uji tarik sebagai berikut ini.

1. Pengujian *leeb hardness tester*

Dalam pengujian *leeb hardness* terdapat beberapa tahap, diantaranya adalah sebagai berikut.

a. Metode Uji

Untuk pengujian kekerasan Leeb diawali dengan menghubungkan perangkat tumbukan (*impact body*) ke unit indikator, kemudian alat dihidupkan. Perangkat tumbukan dipegang menggunakan satu tangan tanpa menyentuh permukaan benda uji, sementara tangan lainnya digunakan untuk menekan *charging tube* hingga terhubung. Setelah itu, *charging tube* dibiarkan kembali ke posisi awal secara perlahan hingga *impact body* berada dalam kondisi terisi atau terkunci. Perangkat tumbukan kemudian ditempatkan pada permukaan benda uji, dan *impact body* dilepaskan secara perlahan dengan menekan tombol pelepas. Nilai kekerasan Leeb yang dihasilkan ditampilkan pada layar indikator alat.

b. Arah Tumbukan

Perangkat tumbukan dikalibrasi berdasarkan arah tumbukan vertikal, yaitu tegak lurus terhadap permukaan horizontal. Untuk arah tumbukan lainnya, seperti pada sudut 45° dari bidang horizontal atau pengujian dari arah bawah, diperlukan penyesuaian nilai kekerasan. Pada pengujian ini digunakan alat *Leeb hardness tester* yang secara otomatis memperhitungkan pengaruh arah tumbukan terhadap hasil pengukuran.

c. Jarak Titik Tumbukan

Jarak minimum antara dua pusat lekukan hasil tumbukan adalah 3 mm. Jarak antara pusat lekukan dan tepi benda uji tidak boleh kurang dari 5 mm, sesuai dengan user manual SW-6230. Setiap titik pengujian hanya diperbolehkan mengalami satu kali tumbukan.

d. Pembacaan Hasil

Nilai kekerasan Leeb dibaca secara langsung melalui layar elektronik pada unit indikator. Setiap nilai yang ditampilkan akan otomatis tergantikan oleh hasil tumbukan berikutnya.

e. Jumlah Tumbukan

Pengujian dilakukan pada luasan sekitar 1 inci² (645 mm²) sesuai dengan SNI 8461:2017, dengan jumlah lima kali tumbukan pada setiap area uji sebagaimana direkomendasikan dalam user manual SW-6230. Apabila material yang diuji dianggap tidak homogen, seperti pada besi cor, maka jumlah tumbukan ditingkatkan menjadi sepuluh kali.

2. Pengukuran *Thickness*

Dalam Pengukuran *Thickness* terdapat beberapa tahap, diantaranya adalah sebagai berikut.

a. Persiapan Benda Uji

Benda uji dipersiapkan dengan memastikan permukaan pengukuran berada dalam kondisi bersih, rata, serta bebas dari kotoran, karat, dan minyak yang dapat mengganggu perambatan gelombang ultrasonik. Perlakuan permukaan dilakukan sesuai dengan ketentuan pengujian ultrasonik untuk menjamin kontak yang baik antara probe dan permukaan benda uji

b. Pemasangan Probe dan Pengaktifan Alat

Probe ketebalan ultrasonik dipasang pada soket pemancar dan penerima pada unit utama instrumen. Setelah probe terpasang dengan benar, alat dinyalakan dan dibiarkan hingga sistem berada dalam kondisi siap digunakan.

c. Kalibrasi Instrumen

Sebelum pengukuran dilakukan, instrumen dikalibrasi untuk menjamin keakuratan hasil pengukuran. Kalibrasi dilakukan pada saat penggunaan awal

alat, setelah alat tidak digunakan dalam jangka waktu lama, ketika terjadi pergantian probe, perubahan suhu lingkungan yang signifikan, atau apabila hasil pengukuran menunjukkan penyimpangan. Kalibrasi dilakukan menggunakan blok kalibrasi standar yang disediakan oleh pabrikan. Setelah kalibrasi, alat secara otomatis mengatur jenis material sebagai baja dengan kecepatan rambat gelombang ultrasonik sebesar 5920 m/s. Tahapan kalibrasi meliputi:

1. Tombol [CAL] ditekan dan ditahan hingga alat masuk ke mode kalibrasi.
2. *Couplant* dioleskan secara merata pada permukaan blok kalibrasi, kemudian probe ditempelkan hingga kontak stabil tercapai.
3. Setelah nilai pengukuran stabil, tombol [ENTER] ditekan untuk menyimpan data kalibrasi.
4. Kalibrasi dinyatakan valid apabila nilai yang ditampilkan berada pada rentang $4,00 \pm 0,04$ mm. Apabila nilai berada di luar rentang tersebut, proses kalibrasi diulang.

d. Penentuan Kecepatan Rambat Gelombang Ultrasonik

Apabila kecepatan rambat gelombang ultrasonik material benda uji tidak diketahui secara pasti, maka dilakukan penentuan kecepatan rambat suara menggunakan metode *invers*. Prosedur penentuan kecepatan rambat gelombang ultrasonik dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Instrumen dikalibrasi sesuai dengan prosedur yang telah ditetapkan.
2. Ketebalan benda uji diukur menggunakan alat ukur mekanik, seperti jangka sorong atau mikrometer sekrup.
3. Ketebalan benda uji kemudian diukur menggunakan alat ukur ketebalan ultrasonik.
4. Nilai ketebalan pada instrumen disesuaikan menggunakan tombol ▲ / ▼ hingga sama dengan nilai hasil pengukuran alat ukur mekanik.
5. Tombol [ENTER] ditekan untuk menghitung dan menyimpan nilai kecepatan rambat gelombang ultrasonik material benda uji.

Nilai kecepatan rambat suara yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk pengukuran ketebalan pada benda uji dengan material yang sama.

e. Pengukuran Ketebalan Benda Uji

Pengukuran ketebalan dilakukan dengan mengoleskan *couplant* secukupnya pada permukaan benda uji, kemudian probe ditempelkan secara tegak lurus hingga diperoleh kontak yang stabil. Nilai ketebalan yang ditampilkan pada layar dicatat sebagai hasil pengukuran. Pengukuran dilakukan pada beberapa titik untuk memperoleh nilai ketebalan yang representatif.

3. Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan menggunakan benda uji tersendiri yang dipersiapkan sesuai dengan standar yang berlaku. Benda uji dipasang pada mesin uji tarik, kemudian diberikan gaya tarik yang meningkat secara bertahap hingga menyebabkan terjadinya pertambahan panjang pada spesimen. Benda uji yang digunakan berupa profil baja yang telah ditentukan dimensinya dan disesuaikan dengan ketentuan ASTM E8.

Selama pengujian tarik, data pertambahan panjang dicatat untuk menentukan nilai regangan, yang selanjutnya digunakan untuk menghitung tegangan material. Prosedur pengujian tarik menggunakan *Universal Testing Machine* meliputi:

- a. Penyiapan benda uji sesuai dengan standar ASTM E8.
- b. Pemasangan benda uji pada *test accessory* dengan memastikan grip menjepit spesimen secara kuat dan aman.
- c. Penguncian benda uji menggunakan *manual control*.
- d. Pengaturan batas beban (*limit load*) dan skala pengujian sesuai dengan data yang diinginkan.
- e. Pelaksanaan pengujian tarik serta pembacaan dan pencatatan nilai beban pada *load meter*.

4.6.3 Olah Data

Pada tahap pengolahan data, data mentah dari pengujian *leeb hardness tester* dan pengukuran *thickness* diolah berdasarkan kode dan landasan teori. Tujuan dari pengolahan data ini adalah untuk mendapatkan korelasi hubungan antar pengujian.

4.6.4 Analisis Data

Tahap analisis data dilakukan dengan membandingkan kelompok variabel tertentu untuk mengetahui nilai korelasi antar variabel-variabel. Dari korelasi tersebut kemudian akan ditarik kesimpulannya. Dari pengujian yang dilakukan didapat data yang terkait pengujian *hardness* menggunakan alat *leeb hardness tester* sebagai berikut :

1. Nilai kekerasan yang terjadi
2. Data statistik keseluruhan nilai kekerasan

Untuk pengukuran thickness dengan alat *Ultrasonic Thickness Gauge* data yang didapatkan sebagai berikut ini :

1. Nilai ketebalan dari tiap luasan

Sedangkan dari pengujian tarik akan didapatkan data-data sebagai berikut ini

1. Grafik Hubungan Pembebanan dan Perpanjangan yang terjadi
2. Nilai tegangan leleh dan teganga putus.

Langkah analisis data setelah semua data terkait sudah didapatkan, maka langkah selanjutnya untuk pengolahan data antara lain:

1. Pengolahan data uji kekerasan Leeb (HL)

Data kekerasan diperoleh dari pengujian menggunakan *Leeb Hardness Tester* tipe D. Pada setiap luasan uji dilakukan lima kali tumbukan, kemudian dihitung nilai rata-rata. Validasi data dilakukan dengan ketentuan selisih nilai pengukuran tidak melebihi ± 15 HL dari nilai rata-rata sesuai SNI 8461:2017 dan manual alat.

2. Konversi nilai kekerasan Leeb ke Vickers (HV)

Nilai kekerasan Leeb yang telah tervalidasi dikonversi ke dalam satuan Vickers menggunakan perangkat *Leeb Hardness Tester*.

3. Pengolahan data ketebalan material (T)

Ketebalan benda uji diukur menggunakan *Ultrasonic Thickness Gauge*. Nilai ketebalan digunakan sebagai salah satu variabel dalam analisis hubungan antar parameter mekanik.

4. Pengolahan data uji tarik
Data uji tarik diolah untuk memperoleh parameter mekanik berupa tegangan leleh (F_y), kuat tarik maksimum (F_u) sesuai standar ASTM E8.
5. Penyusunan rekapitulasi data
Seluruh data hasil pengujian kekerasan, ketebalan, dan uji tarik disusun dalam bentuk tabel untuk memudahkan analisis dan interpretasi.
6. Analisis korelasi antar variabel
Hubungan linier antara HL, HV, T, F_y , dan F_u dianalisis menggunakan koefisien korelasi Pearson karena seluruh data berupa variabel numerik kontinu.
7. Analisis regresi linier sederhana
Regresi linier sederhana dilakukan untuk mengetahui hubungan antara kekerasan Leeb (HL) dan kuat tarik maksimum (F_u).
8. Analisis regresi nonlinier
Regresi nonlinier dilakukan menggunakan beberapa model (kuadratik, eksponensial, logaritmik, dan power) untuk mendapatkan model hubungan terbaik antara HL dan F_u .
9. Analisis regresi multivariat
Regresi multivariat dilakukan dengan menggunakan HL, HV, dan T sebagai variabel bebas terhadap F_u sebagai variabel terikat.
10. Evaluasi dan pemilihan model terbaik
Model regresi dievaluasi dan dibandingkan berdasarkan nilai koefisien determinasi (R^2), RMSE, dan signifikansi statistik untuk menentukan model yang paling representatif.

4.7 Hasil dan Pembahasan

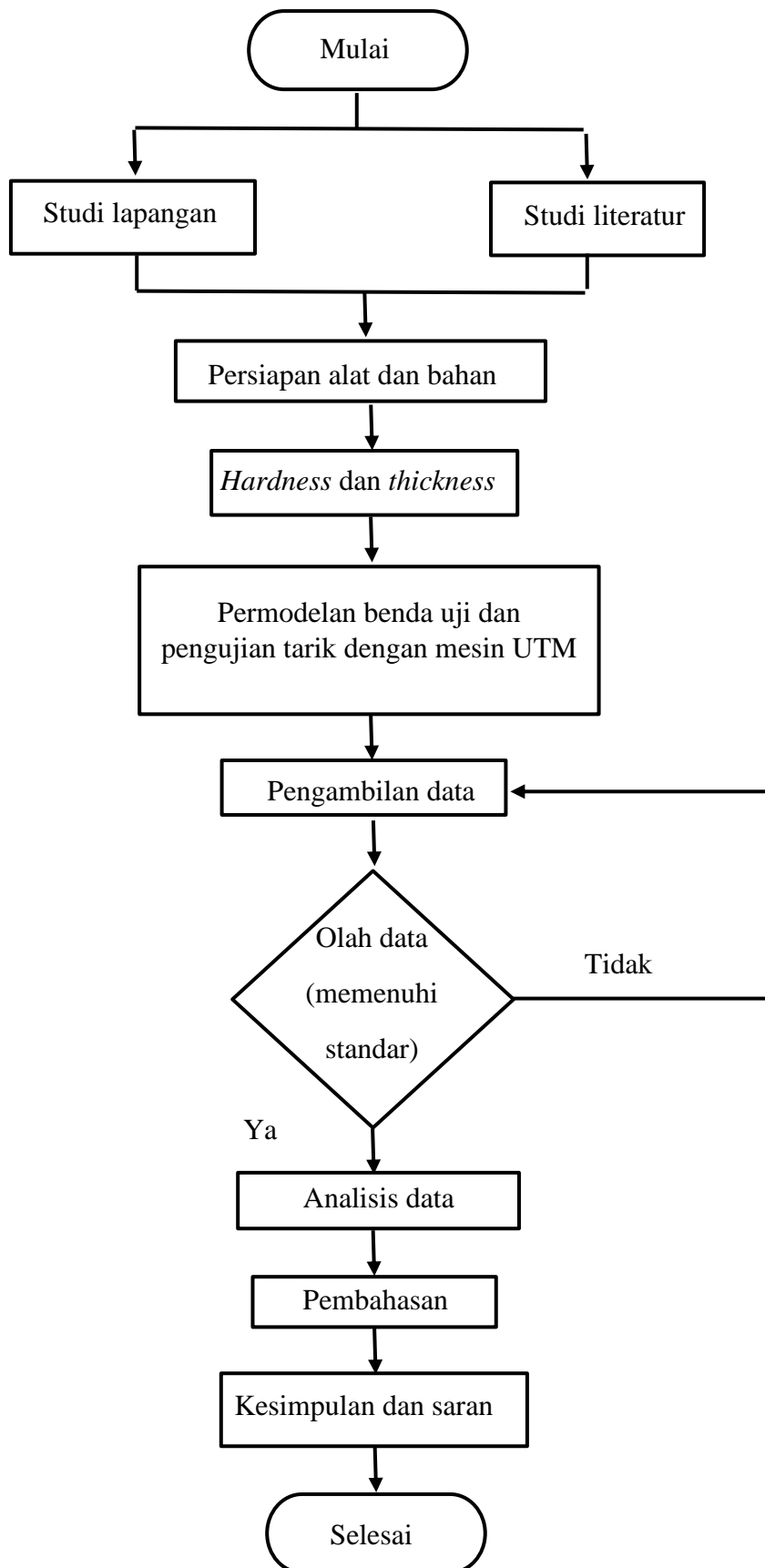
Pada bagian ini disajikan pembahasan hasil analisis data yang telah diperoleh. Pembahasan dilakukan untuk menjawab tujuan penelitian serta memberikan interpretasi terhadap perbedaan nilai variabel dan hubungan atau persamaan yang ditemukan berdasarkan hasil analisis data

4.8 Kesimpulan dan Saran

Bagian kesimpulan dan saran memuat rangkuman hasil penelitian yang disusun berdasarkan hasil analisis dan pembahasan dengan mengacu pada tujuan penelitian yang telah ditetapkan. Selanjutnya, saran disusun berdasarkan kesimpulan yang diperoleh sebagai rekomendasi untuk pengembangan dan penyempurnaan penelitian selanjutnya.

4.9 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.23 berikut.



BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Uji Kekerasan Baja

Pengujian kekerasan baja dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan material serta menggambarkan kemampuan material baja dalam menerima beban tanpa mengalami kerusakan. Pada penelitian ini digunakan tiga jenis profil baja sebagai benda uji, masing-masing dengan panjang 50 cm. Profil baja yang digunakan meliputi IWF $200 \times 100 \times 5,8 \times 8$, IWF $150 \times 75 \times 5 \times 7$, serta UNP $100 \times 50 \times 5 \times 5,75$. Pengujian dilakukan pada bagian *web* dan *flange* dari masing-masing profil.

Ukuran dan model spesimen uji tarik disesuaikan dengan ketentuan standar ASTM E8. Setelah dilakukan pengujian kekerasan dan pengukuran ketebalan, benda uji selanjutnya diproses menjadi spesimen uji tarik (*tensile test*). Pengujian kekerasan menghasilkan nilai kekerasan dalam satuan *Leeb Hardness* (HL) dan *Vickers Hardness* (HV) menggunakan alat *Leeb Hardness Tester*, sedangkan pengukuran ketebalan material (T) dilakukan menggunakan *Ultrasonic Thickness Gauge*. Selanjutnya, pengujian tarik dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) untuk memperoleh parameter mekanik berupa tegangan leleh (Fy) dan kuat tarik maksimum (Fu). Nilai-nilai yang diperoleh dari hasil pengujian, yaitu HL, HV, T, Fy, dan Fu, selanjutnya dianalisis untuk mengetahui hubungan dan korelasi antar parameter tersebut.

5.1.1 Hardness Leeb

Pada penelitian ini, pengujian kekerasan dilakukan pada beberapa luasan uji. Setiap luasan uji memiliki ukuran 1 inci², dan pada setiap luasan diambil lima titik pengujian sesuai dengan ketentuan dalam SNI 8461:2017. Jumlah luasan uji pada masing-masing profil baja disajikan pada Tabel 5.1 berikut ini.

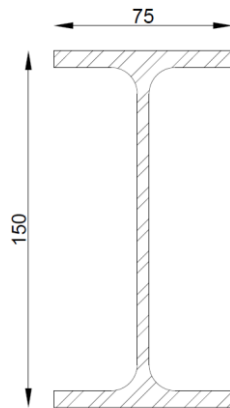
Tabel 5. 1 Jumlah Luasan pada Setiap Profil

No	Profil Baja	Bagian	Jumlah Luasan
1	IWF 200 x 100	<i>Web</i>	49
		<i>Flange</i>	64
2	IWF 150 x 75	<i>Web</i>	35
		<i>Flange</i>	48
3	UNP 100 X 50	<i>Web</i>	29
		<i>Flange</i>	24

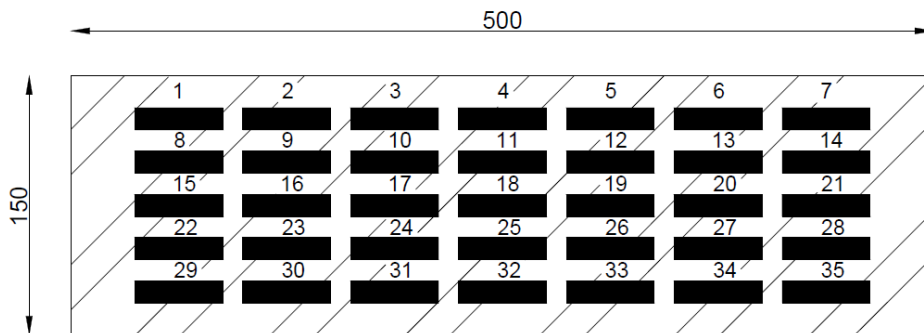
Pengujian kekerasan dilakukan pada setiap sampel baja pada bagian *web* dan *flange*. Pada bagian *web*, pengujian dilakukan pada satu permukaan, sedangkan pada bagian *flange* pengujian dilakukan pada dua permukaan. Perbedaan jumlah permukaan pengujian ini disebabkan oleh luas permukaan *flange* yang lebih kecil dibandingkan dengan *web*, sehingga diperlukan dua sisi pengujian untuk memperoleh hasil yang representatif.

Jumlah luasan uji pada setiap permukaan profil berbeda-beda, bergantung pada luas permukaan profil baja tersebut. Pada setiap luasan uji dilakukan sebanyak 20 titik tumbukan awal, kemudian dipilih lima titik pengujian yang memenuhi ketentuan syarat minimum sesuai dengan SNI 8461:2017. Lima nilai kekerasan tersebut selanjutnya dirata-ratakan untuk memperoleh nilai kekerasan yang representatif bagi masing-masing sampel.

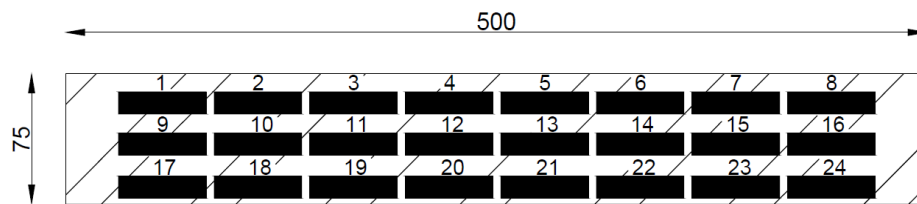
Pengujian kekerasan dilakukan pada spesimen profil baja bagian *web* dan *flange* pada luasan uji yang telah ditentukan dengan luas sebesar 1 inci². Contoh persebaran luasan uji dan titik-titik pengujian kekerasan pada profil baja IWF 150 x 75 ditunjukkan pada Gambar 5.1 sampai Gambar 5.4 berikut ini.



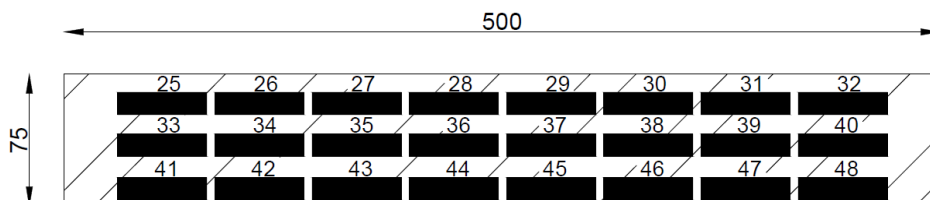
Gambar 5. 1 IWF 150 X 75
(Sumber: Dokumen Pribadi)



Gambar 5. 2 IWF 150 X 75 Web
(Sumber: Dokumen Pribadi)



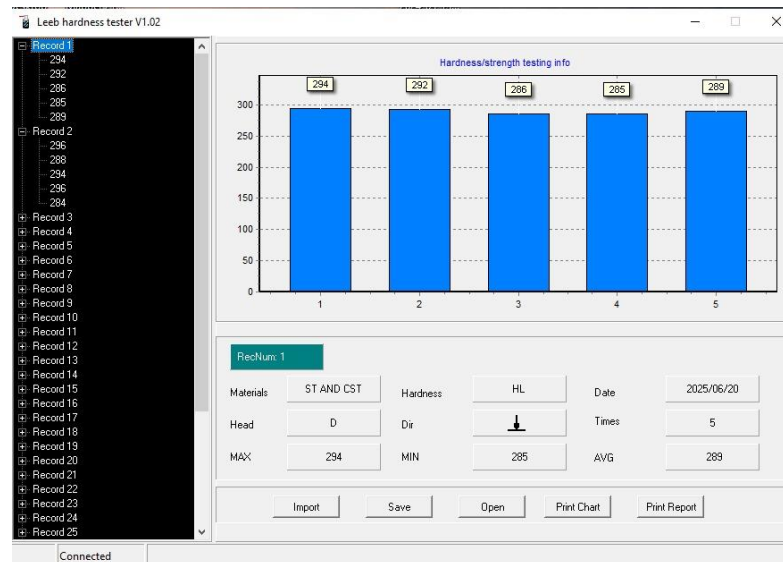
Gambar 5. 3 IWF 150 X 75 Flange Permukaan 1
(Sumber: Dokumen Pribadi)



Gambar 5. 4 IWF 150 X 75 Flange Permukaan 2
(Sumber: Dokumen Pribadi)

Dalam penelitian ini, pengujian kekerasan Leeb dilakukan menggunakan alat *Usher SW-6230* dengan tipe *impact device D*. Alat ini terhubung dengan perangkat lunak *HL PRO* versi 1.02 untuk pencatatan dan analisis data secara digital. Metode ini dipilih karena kemampuannya dalam memberikan hasil yang cepat, akurat, dan tidak merusak permukaan sampel secara signifikan. Sampel yang diuji memiliki kekerasan rata-rata yang dicatat dalam satuan HL (*Hardness Leeb*), yang kemudian dapat dikonversi ke dalam nilai kekerasan lain seperti Vickers (HV), Brinell (HB), atau Rockwell (HRC) sesuai dengan standar yang relevan.

Data yang disajikan pada grafik dan tabel selanjutnya menunjukkan hasil pengujian kekerasan yang dilakukan pada sampel penelitian. Mengacu pada manual alat, setiap titik pengujian diambil sebanyak lima kali penekanan pada titik yang berbeda untuk mendapatkan data yang representatif dan mengurangi potensi kesalahan pengukuran. Hasil ini akan menjadi dasar untuk analisis lebih lanjut mengenai sifat mekanik material yang diteliti. Hasil Uji *Hardness Leeb* dengan perangkat lunak *HL PRO* versi 1.02 dapat dilihat pada Gambar 5.5 berikut ini.



Gambar 5. 5 Uji *Hardness Leeb* dengan perangkat lunak HL PRO versi 1.02

Selanjutnya, nilai pengujian pada suatu titik dinyatakan valid apabila seluruh hasil uji berada dalam rentang ± 15 HL dari nilai rata-rata titik tersebut. Apabila syarat tersebut terpenuhi, maka titik pengujian dikategorikan “valid” dan

nilai rata-ratanya digunakan sebagai acuan. Setelah itu, nilai rata-rata tiap titik digunakan untuk memperoleh nilai rata-rata pada setiap luasan, kemudian dirata-ratakan kembali untuk mendapatkan nilai kekerasan rata-rata pada satu sampel. Prosedur ini diterapkan secara konsisten pada seluruh spesimen, baik pada bagian *web* maupun *flange* dari profil IWF dan UNP. Berikut persamaan validasi data uji kekerasan (HL)

1. Nilai rata-rata tiap luasan

$$\bar{X}_{\text{Luasan}} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (5-1)$$

Di mana,

\bar{X} = Nilai rata-rata tiap luasan

X_i = Nilai pengujian ke- i

n = Jumlah titik tumbukan

2. Batas validasi

$$X_{\text{bawah}} = \bar{X} - 15 \quad X_{\text{atas}} = \bar{X} + 15 \quad (5-2)$$

Di mana,

X_{bawah} = Batas nilai bawah

X_{atas} = Batas nilai atas

3. Nilai rata-rata per sampel

$$\bar{X}_{\text{Sampel}} = \frac{\sum_{j=1}^p \bar{X}_{\text{luasan},j}}{p} \quad (5-3)$$

Di mana,

\bar{X}_{Sampel} = Nilai rata-rata kekerasan pada 1 sampel

$\bar{X}_{\text{luasan},j}$ = Nilai luasan ke- j

p = Jumlah luasan pada 1 sampel

Sehingga dari persamaan di atas dapat dihitung rata-rata dan validasi nilai uji *hardness leeb* sebagai berikut.

1. Validasi sampel IWF 200 x 100

a. *Web* luasan 1

$$\bar{X}_1 = \frac{393+390+397+398+398}{5} = \frac{1976}{5} = 395 \text{ HL}$$

Batas validasi ± 15 HL

$$\text{Bawah} = 395 - 15 = 380 \text{ HL}$$

$$\text{Atas} = 395 + 15 = 410 \text{ HL}$$

$$380 \leq 393,390,397,398,398 \leq 410$$

b. *Flange* luasan 1

$$\bar{X}_1 = \frac{318+322+318+328+324}{5} = \frac{1610}{5} = 322 \text{ HL}$$

Batas validasi ± 15 HL

$$\text{Bawah} = 322 - 15 = 307 \text{ HL}$$

$$\text{Atas} = 322 + 15 = 337 \text{ HL}$$

$$307 \leq 318,322,318,328,324 \leq 337$$

2. Validasi IWF 150 x 75

a. *Web* luasan 1

$$\bar{X}_1 = \frac{411+421+418+419+419}{5} = \frac{2088}{5} = 418 \text{ HL}$$

Batas validasi ± 15 HL

$$\text{Bawah} = 418 - 15 = 403 \text{ HL}$$

$$\text{Atas} = 418 + 15 = 433 \text{ HL}$$

$$403 \leq 411,421,418,419,419 \leq 433$$

b. *Flange* luasan 1

$$\bar{X}_1 = \frac{356+351+348+344+350}{5} = \frac{1749}{5} = 350 \text{ HL}$$

Batas validasi ± 15 HL

$$\text{Bawah} = 350 - 15 = 335 \text{ HL}$$

$$\begin{aligned} \text{Atas} &= 350 + 15 = 365 \text{ HL} \\ 335 &\leq 356, 351, 348, 344, 350 \leq 365 \end{aligned}$$

3. Validasi sampel UNP 100 x 50

a. *Web* luasan 1

$$\bar{X}_1 = \frac{423+424+425+419+418}{5} = \frac{2109}{5} = 422 \text{ HL}$$

Batas validasi ± 15 HL

$$\text{Bawah} = 422 - 15 = 407 \text{ HL}$$

$$\text{Atas} = 422 + 15 = 437 \text{ HL}$$

$$407 \leq 423, 424, 425, 419, 418 \leq 437$$

b. *Flange* luasan 1

$$\bar{X}_{P1} = \frac{370+363+372+367+361}{5} = \frac{1833}{5} = 367 \text{ HL}$$

Batas validasi ± 15 HL

$$\text{Bawah} = 367 - 15 = 352 \text{ HL}$$

$$\text{Atas} = 367 + 15 = 382 \text{ HL}$$

$$352 \leq 370, 363, 372, 367, 361 \leq 382$$

Rekapitulasi hasil pengujian kekerasan pada spesimen baja setelah proses validasi ditampilkan pada Tabel 5.2 sampai Tabel 5.3 berikut ini.

Tabel 5. 2 Rekapitulasi hasil Pengujian *Leeb hardness* Daerah *Web*

WEB						
IWF 200 x 100			IWF 250 x 75		UNP 100 x 50	
No	Luasan	HL Rata-Rata	Luasan	HL Rata-Rata	Luasan	HL Rata-Rata
1	1	395	1	418	1	422
2	2	397	2	434	2	432
3	3	395	3	417	3	430
4	4	399	4	418	4	433
5	5	388	5	423	5	434
6	6	387	6	420	6	427
7	7	376	7	416	7	305
8	8	304	8	323	8	303

Lanjutan Tabel 5.2 Rekapitulasi hasil Pengujian *Leeb hardness* Daerah *Web*

WEB						
IWF 200 x 100			IWF 250 x 75		UNP 100 x 50	
No	Luasan	HL Rata-Rata	Luasan	HL Rata-Rata	Luasan	HL Rata-Rata
9	9	306	9	324	9	304
10	10	305	10	321	10	310
11	11	302	11	323	11	304
12	12	305	12	322	12	297
13	13	309	13	320	13	284
14	14	306	14	325	14	282
15	15	306	15	320	15	293
16	16	312	16	316	16	296
17	17	305	17	321	17	294
18	18	312	18	320	18	298
19	19	309	19	317	19	292
20	20	313	20	312	20	294
21	21	313	21	320	21	312
22	22	315	22	322	22	288
23	23	312	23	316	23	284
24	24	312	24	314	24	439
25	25	321	25	321	25	446
26	26	317	26	314	26	443
27	27	314	27	318	27	435
28	28	317	28	319	28	445
29	29	318	29	395	29	441
30	30	313	30	356	-	-
31	31	314	31	355	-	-
32	32	315	32	354	-	-
33	33	315	33	353	-	-
34	34	315	34	363	-	-
35	35	314	35	336	-	-
36	36	312	-	-	-	-
37	37	311	-	-	-	-
38	38	310	-	-	-	-
39	39	310	-	-	-	-
40	40	312	-	-	-	-
41	41	312	-	-	-	-
42	42	311	-	-	-	-
43	43	328	-	-	-	-
44	44	322	-	-	-	-

Lanjutan Tabel 5.2 Rekapitulasi hasil Pengujian *Leeb hardness* Daerah *Web*

WEB						
IWF 200 x 100			IWF 250 x 75		UNP 100 x 50	
No	Luasan	HL Rata-Rata	Luasan	HL Rata-Rata	Luasan	HL Rata-Rata
45	45	302	-	-	-	-
46	46	310	-	-	-	-
47	47	306	-	-	-	-
48	48	303	-	-	-	-
49	49	325	-	-	-	-

Tabel 5. 3 Rekapitulasi hasil Pengujian *Leeb hardness* Daerah *Flange*

FLANGE						
IWF 200 x 100			IWF 250 x 75		UNP 100 x 50	
No	Luasan	HL Rata-Rata	Luasan	HL Rata-Rata	Luasan	HL Rata-Rata
1	1	322	1	350	1	367
2	2	332	2	345	2	367
3	3	348	3	338	3	365
4	4	337	4	323	4	361
5	5	331	5	320	5	363
6	6	338	6	325	6	357
7	7	339	7	336	7	331
8	8	337	8	355	8	362
9	9	377	9	416	9	325
10	10	376	10	416	10	316
11	11	376	11	415	11	329
12	12	373	12	412	12	339
13	13	371	13	415	13	370
14	14	375	14	417	14	369
15	15	377	15	413	15	371
16	16	378	16	415	16	371
17	17	382	17	359	17	374
18	18	371	18	359	18	386
19	19	376	19	365	19	354
20	20	372	20	397	20	351
21	21	376	21	376	21	349
22	22	374	22	367	22	333
23	23	375	23	366	23	342
24	24	376	24	387	24	346

**Lanjutan Tabel 5.3 Rekapitulasi hasil Pengujian *Leeb hardness* Daerah
*Flange***

FLANGE						
IWF 200 x 100			IWF 250 x 75		UNP 100 x 50	
No	Luasan	HL Rata-Rata	Luasan	HL Rata-Rata	Luasan	HL Rata-Rata
25	25	327	25	322	-	-
26	26	333	26	357	-	-
27	27	351	27	330	-	-
28	28	334	28	330	-	-
29	29	334	29	310	-	-
30	30	330	30	330	-	-
31	31	332	31	322	-	-
32	32	336	32	331	-	-
33	33	335	33	421	-	-
34	34	325	34	418	-	-
35	35	335	35	418	-	-
36	36	335	36	418	-	-
37	37	320	37	421	-	-
38	38	340	38	425	-	-
39	39	334	39	418	-	-
40	40	333	40	418	-	-
41	41	375	41	354	-	-
42	42	376	42	359	-	-
43	43	374	43	363	-	-
44	44	375	44	374	-	-
45	45	371	45	367	-	-
46	46	373	46	373	-	-
47	47	375	47	373	-	-
48	48	378	48	377	-	-
49	49	376	-	-	-	-
50	50	379	-	-	-	-
51	51	376	-	-	-	-
52	52	379	-	-	-	-
53	53	377	-	-	-	-
54	54	377	-	-	-	-
55	55	376	-	-	-	-
56	56	382	-	-	-	-
57	57	321	-	-	-	-
58	58	335	-	-	-	-
59	59	338	-	-	-	-
60	60	335	-	-	-	-

Lanjutan Tabel 5.3 Rekapitulasi hasil Pengujian *Leeb hardness* Daerah *Flange*

<i>FLANGE</i>						
IWF 200 x 100			IWF 250 x 75		UNP 100 x 50	
No	Luasan	HL Rata-Rata	Luasan	HL Rata-Rata	Luasan	HL Rata-Rata
61	61	340	-	-	-	-
62	62	342	-	-	-	-
63	63	343	-	-	-	-
64	64	347	-	-	-	-

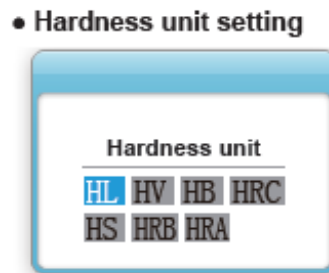
Pengujian kekerasan material pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode *hardness Leeb* (HL) dengan total 249 luasan uji, di mana seluruh titik pengujian berhasil terbaca tanpa kegagalan pembacaan alat. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi permukaan spesimen dan parameter pengujian telah memenuhi persyaratan metode *hardness Leeb* sesuai standar yang berlaku. Jumlah titik pengujian pada setiap profil disesuaikan dengan luas permukaan efektif masing-masing profil baja. Profil IWF 200 × 100 memiliki jumlah data terbanyak karena luas permukaannya lebih besar, sedangkan profil UNP 100 × 50 memiliki jumlah data paling sedikit akibat keterbatasan luas permukaan. Pendekatan ini dilakukan untuk menjaga keterwakilan data kekerasan pada setiap profil.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh nilai kekerasan Leeb berada dalam rentang nilai minimum dan maksimum yang telah ditetapkan, yang mengindikasikan konsistensi kualitas mekanik dan homogenitas material pada seluruh profil yang diuji. Selain itu, nilai kekerasan cenderung lebih tinggi pada daerah yang berdekatan dengan sambungan dibandingkan daerah lainnya, yang dapat dikaitkan dengan pengaruh kondisi mekanik lokal. Secara keseluruhan, hasil pengujian *hardness Leeb* menunjukkan bahwa seluruh profil baja memenuhi kriteria kekerasan yang disyaratkan serta menampilkan distribusi nilai kekerasan yang logis dan dapat dijelaskan secara ilmiah.

5.1.2 *Hardness Vickers*

Dalam penelitian ini, pengujian kekerasan Vickers dilakukan menggunakan alat Usher SW-6230 *Leeb Hardness Tester* dengan tipe *impact device D*. Pengujian

ini pada dasarnya menggunakan prinsip pengukuran yang sama dengan pengujian kekerasan Leeb, namun dengan pengaturan satuan kekerasan pada alat diubah ke satuan Vickers (HV) melalui menu *hardness unit setting*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.6 berikut ini.



Gambar 5. 6 Hardness Unit Setting

Metode pengujian dipilih karena mampu memberikan hasil pengukuran yang cepat, praktis, serta tidak menyebabkan kerusakan yang signifikan pada permukaan spesimen. Nilai kekerasan yang diperoleh dinyatakan dalam satuan Vickers (HV). Prosedur pengujian dilakukan dengan cara yang sama seperti pada pengujian kekerasan Leeb. Pada setiap titik pengujian dilakukan sebanyak dua puluh kali penekanan pada lokasi yang berbeda kemudian diambil lima penekanan sesuai standar untuk memperoleh data yang representatif serta mengurangi potensi kesalahan pengukuran.

Mengacu pada manual alat, hasil pengujian kekerasan Vickers dinyatakan valid apabila seluruh nilai pengukuran pada satu titik berada dalam rentang yang diperbolehkan terhadap nilai rata-ratanya. Apabila kriteria validitas terpenuhi, maka nilai rata-rata pada titik tersebut digunakan sebagai nilai kekerasan titik pengujian. Selanjutnya, nilai rata-rata dari setiap titik digunakan untuk memperoleh nilai rata-rata pada setiap luasan pengujian, yang kemudian dirata-ratakan kembali untuk mendapatkan nilai kekerasan Vickers rata-rata pada satu spesimen. Berikut perhitungan validasi data uji kekerasan (HV)

1. Validasi sampel IWF 200 x 100

a. *Web* luasan 1

$$\bar{X}_1 = \frac{131+131+129+130+131}{5} = \frac{652}{5} = 130 \text{ HV}$$

Batas validasi $\pm 15 \text{ HL}$

$$\begin{aligned}\text{Bawah} &= 130 - 15 = 115 \text{ HV} \\ \text{Atas} &= 130 + 15 = 145 \text{ HV} \\ 115 &\leq 131, 131, 129, 130, 131 \leq 145\end{aligned}$$

b. *Flange* luasan 1

$$\bar{X}_1 = \frac{112+101+101+101+100}{5} = \frac{515}{5} = 103 \text{ HV}$$

Batas validasi ± 15 HL

$$\begin{aligned}\text{Bawah} &= 103 - 15 = 88 \text{ HV} \\ \text{Atas} &= 103 + 15 = 118 \text{ HV} \\ 88 &\leq 131, 131, 129, 130, 131 \leq 118\end{aligned}$$

2. Validasi IWF 150 x 75

a. *Web* luasan 1

$$\bar{X}_1 = \frac{138+133+138+138+141}{5} = \frac{688}{5} = 138 \text{ HV}$$

Batas validasi ± 15 HL

$$\begin{aligned}\text{Bawah} &= 138 - 15 = 123 \text{ HV} \\ \text{Atas} &= 138 + 15 = 153 \text{ HV} \\ 123 &\leq 131, 131, 129, 130, 131 \leq 153\end{aligned}$$

b. *Flange* luasan 1

$$\bar{X}_1 = \frac{124+125+121+125+123}{5} = \frac{618}{5} = 124 \text{ HV}$$

Batas validasi ± 15 HV

$$\begin{aligned}\text{Bawah} &= 124 - 15 = 109 \text{ HV} \\ \text{Atas} &= 124 + 15 = 139 \text{ HV} \\ 109 &\leq 131, 131, 129, 130, 131 \leq 139\end{aligned}$$

3. Validasi sampel UNP 100 x 50

a. *Web* luasan 1

$$\bar{X}_1 = \frac{154+151+151+158+148}{5} = \frac{762}{5} = 152 \text{ HV}$$

Batas validasi ± 15 HV

Bawah = $152 - 15 = 137$ HV

Atas = $152 + 15 = 167$ HV

$137 \leq 131, 131, 129, 130, 131 \leq 167$

b. *Flange* luasan 1

$$\bar{X}_1 = \frac{125+125+129+125+129}{5} = \frac{633}{5} = 127 \text{ HV}$$

Batas validasi ± 15 HV

Bawah = $127 - 15 = 112$ HV

Atas = $127 + 15 = 142$ HV

$112 \leq 131, 131, 129, 130, 131 \leq 142$

Prosedur ini diterapkan secara konsisten pada seluruh spesimen penelitian, baik pada bagian *web* maupun *flange* dari profil IWF dan UNP. Rekapitulasi hasil pengujian kekerasan Vickers ditunjukkan pada Tabel 5.4 sampai 5.5 berikut ini.

Tabel 5. 4 Rekapitulasi hasil Pengujian *Vickers hardness* Daerah *Web*

WEB						
IWF 200 X 100			IWF 150 X 75		UNP 100 X 50	
No	Luasan	HV Rata-Rata	Luasan	HV Rata-Rata	Luasan	HV Rata-Rata
1	1	130	1	138	1	152
2	2	131	2	146	2	156
3	3	117	3	129	3	151
4	4	118	4	138	4	156
5	5	108	5	151	5	147
6	6	101	6	138	6	144
7	7	98	7	146	7	149
8	8	86	8	90	8	-
9	9	87	9	90	9	-
10	10	87	10	89	10	-
11	11	87	11	89	11	-
12	12	87	12	90	12	-
13	13	87	13	88	13	-
14	14	87	14	89	14	-

Lanjutan Tabel 5. 4 Rekapitulasi hasil Pengujian *Vickers hardness* Daerah *Web*

WEB						
IWF 200 X 100			IWF 150 X 75		UNP 100 X 50	
No	Luasan	HV Rata-Rata	Luasan	HV Rata-Rata	Luasan	HV Rata-Rata
15	15	88	15	87	15	-
16	16	90	16	87	16	-
17	17	87	17	87	17	-
18	18	89	18	87	18	-
19	19	87	19	85	19	-
20	20	87	20	86	20	-
21	21	88	21	87	21	-
22	22	89	22	87	22	-
23	23	88	23	87	23	-
24	24	88	24	88	24	149
25	25	89	25	88	25	152
26	26	88	26	89	26	157
27	27	87	27	87	27	158
28	28	89	28	89	28	154
29	29	89	29	117	29	157
30	30	89	30	124	-	-
31	31	89	31	125	-	-
32	32	88	32	124	-	-
33	33	87	33	123	-	-
34	34	87	34	118	-	-
35	35	89	35	121	-	-
36	36	87	-	-	-	-
37	37	85	-	-	-	-
38	38	85	-	-	-	-
39	39	85	-	-	-	-
40	40	86	-	-	-	-
41	41	87	-	-	-	-
42	42	87	-	-	-	-
43	43	111	-	-	-	-
44	44	113	-	-	-	-
45	45	93	-	-	-	-
46	46	92	-	-	-	-
47	47	94	-	-	-	-
48	48	91	-	-	-	-
49	49	118	-	-	-	-

Tabel 5. 5 Rekapitulasi hasil Pengujian *Vickers hardness* Daerah *Flange*

<i>FLANGE</i>						
IWF 200 X 100			IWF 150 X 75		UNP 100 X 50	
No	Luasan	HV Rata-Rata	Luasan	HV Rata-Rata	Luasan	HV Rata-Rata
1	1	103	1	124	1	127
2	2	104	2	117	2	125
3	3	104	3	120	3	123
4	4	105	4	116	4	125
5	5	103	5	113	5	118
6	6	105	6	117	6	119
7	7	106	7	117	7	98
8	8	103	8	125	8	102
9	9	116	9	142	9	104
10	10	118	10	139	10	98
11	11	117	11	138	11	102
12	12	118	12	142	12	106
13	13	118	13	138	13	119
14	14	118	14	137	14	122
15	15	119	15	139	15	132
16	16	119	16	141	16	132
17	17	119	17	126	17	127
18	18	117	18	125	18	129
19	19	115	19	127	19	109
20	20	117	20	130	20	104
21	21	120	21	132	21	104
22	22	120	22	132	22	107
23	23	117	23	125	23	106
24	24	123	24	131	24	110
25	25	98	25	118	-	-
26	26	101	26	116	-	-
27	27	104	27	121	-	-
28	28	102	28	121	-	-
29	29	101	29	108	-	-
30	30	100	30	111	-	-
31	31	101	31	114	-	-
32	32	103	32	116	-	-
33	33	99	33	146	-	-
34	34	102	34	140	-	-
35	35	102	35	144	-	-
36	36	102	36	144	-	-

Lanjutan Tabel 5.5 Rekapitulasi hasil Pengujian *Vickers hardness* Daerah *Flange*

<i>FLANGE</i>						
IWF 200 X 100			IWF 150 X 75		UNP 100 X 50	
No	Luasan	HV Rata-Rata	Luasan	HV Rata-Rata	Luasan	HV Rata-Rata
37	37	101	37	143	-	-
38	38	100	38	146	-	-
39	39	101	39	144	-	-
40	40	101	40	147	-	-
41	41	118	41	126	-	-
42	42	122	42	125	-	-
43	43	119	43	123	-	-
44	44	118	44	129	-	-
45	45	121	45	127	-	-
46	46	118	46	130	-	-
47	47	119	47	129	-	-
48	48	119	48	129	-	-
49	49	119	-	-	-	-
50	50	118	-	-	-	-
51	51	120	-	-	-	-
52	52	120	-	-	-	-
53	53	120	-	-	-	-
54	54	119	-	-	-	-
55	55	119	-	-	-	-
56	56	119	-	-	-	-
57	57	97	-	-	-	-
58	58	102	-	-	-	-
59	59	103	-	-	-	-
60	60	102	-	-	-	-
61	61	103	-	-	-	-
62	62	103	-	-	-	-
63	63	103	-	-	-	-
64	64	103	-	-	-	-

Dari total luasan uji yang direncanakan, hanya 233 luasan uji yang berhasil diperoleh nilainya. Sebagian data tidak terbaca karena nilai kekerasan berada di bawah batas minimum pembacaan alat *hardness leeb tester*, yaitu 83-976 HV, sehingga alat tidak dapat menampilkan nilai kekerasan. Kondisi ini terutama terjadi

pada profil UNP 100×50 , khususnya pada luasan 8–23 di daerah web, di mana nilai *Hardness Vickers* tidak tercatat. Hal ini menunjukkan bahwa area tersebut memiliki kekerasan yang relatif lebih rendah, yang dipengaruhi oleh karakteristik geometrik *web* dan tingkat deformasi plastis yang lebih kecil dibandingkan bagian *flange* atau daerah dekat sambungan.

Untuk data *Hardness Vickers* yang berhasil terbaca, distribusi nilai kekerasan menunjukkan pola yang konsisten dengan hasil *hardness Leeb*, yaitu nilai kekerasan cenderung lebih tinggi pada daerah yang berdekatan dengan pertemuan. Peningkatan ini berkaitan perubahan mikrostruktur, tegangan sisa, dan kemungkinan terjadinya *strain hardening*. Dengan demikian, keterbatasan jumlah data *Hardness Vickers* bukan disebabkan oleh kesalahan pengujian, melainkan akibat batasan rentang pembacaan alat dan variasi sifat mekanik lokal material, sementara secara umum hasil pengujian tetap menunjukkan konsistensi dan dapat dijelaskan secara ilmiah.

5.2 Pengukuran Ketebalan

Pengukuran ketebalan material pada penelitian ini dilakukan menggunakan *Ultrasonic Thickness Gauge SW-6510S*. Metode ultrasonik dipilih karena mampu mengukur ketebalan material secara non-destruktif, cepat, dan akurat tanpa perlu merusak atau memotong spesimen. Prinsip kerja alat ini didasarkan pada perambatan gelombang ultrasonik yang dipancarkan melalui permukaan material dan dipantulkan kembali dari sisi berlawanan, kemudian waktu tempuh gelombang tersebut dikonversi secara otomatis menjadi nilai ketebalan.

Pada pelaksanaan pengujian, alat *Ultrasonic Thickness Gauge SW-6510S* ditempatkan pada permukaan spesimen yang telah dibersihkan dan diberi *couplant* untuk memastikan transmisi gelombang ultrasonik berlangsung dengan baik. Nilai ketebalan material diperoleh secara langsung dari layar alat dalam satuan milimeter (mm), sehingga tidak diperlukan perhitungan manual dalam proses pengolahan data. Hal ini meminimalkan potensi kesalahan akibat perhitungan serta meningkatkan konsistensi hasil pengukuran.

Pengukuran ketebalan dilakukan pada beberapa titik yang telah ditentukan yaitu pada luasan yang sama dengan uji hardness pada masing-masing spesimen untuk memperoleh gambaran ketebalan yang representatif. Pengambilan data pada lebih dari satu titik bertujuan untuk mengidentifikasi kemungkinan variasi ketebalan yang dapat terjadi akibat proses fabrikasi, penggunaan material, maupun kondisi permukaan. Seluruh nilai hasil pengukuran dicatat dan digunakan sebagai dasar dalam analisis kondisi geometrik spesimen yang diteliti. Rekapitulasi hasil pengukuran *thickness* ditunjukkan pada Tabel 5.6 sampai 5.7 berikut ini.

Tabel 5. 6 Rekapitulasi Hasil Pengukuran *Thickness* Daerah Web

WEB						
IWF 200 X 100			IWF 150 X 75		UNP 100 X 50	
No	Luasan	T Rata-Rata	Luasan	T Rata-Rata	Luasan	T Rata-Rata
1	1	5.2	1	4.71	1	4.74
2	2	5.24	2	4.7	2	4.73
3	3	5.23	3	4.69	3	4.7
4	4	5.19	4	4.67	4	4.76
5	5	5.16	5	4.65	5	4.7
6	6	5.21	6	4.63	6	4.67
7	7	5.15	7	4.63	7	4.55
8	8	5.14	8	4.67	8	4.57
9	9	5.16	9	4.72	9	4.63
10	10	5.16	10	4.68	10	4.67
11	11	5.14	11	4.68	11	4.61
12	12	5.13	12	4.68	12	4.64
13	13	5.12	13	4.63	13	4.57
14	14	5.2	14	4.69	14	4.5
15	15	5.13	15	4.68	15	4.55
16	16	5.17	16	4.64	16	4.65
17	17	5.11	17	4.71	17	4.65
18	18	5.12	18	4.66	18	4.5
19	19	5.14	19	4.65	19	4.49
20	20	5.13	20	4.68	20	4.51
21	21	5.17	21	4.72	21	4.49
22	22	5.22	22	4.73	22	4.58
23	23	4.18	23	4.74	23	4.62
24	24	5.16	24	4.69	24	4.5

Lanjutan Tabel 5.6 Rekapitulasi Hasil Pengukuran *Thickness Web*

WEB						
IWF 200 X 100			IWF 150 X 75		UNP 100 X 50	
No	Luasan	T Rata-Rata	Luasan	T Rata-Rata	Luasan	T Rata-Rata
25	25	5.13	25	4.73	25	4.6
26	26	5.11	26	4.72	26	4.61
27	27	5.14	27	4.73	27	4.62
28	28	5.18	28	4.63	28	4.67
29	29	5.16	29	4.68	29	4.64
30	30	5.12	30	4.74	-	-
31	31	5.17	31	4.71	-	-
32	32	5.16	32	4.7	-	-
33	33	5.15	33	4.7	-	-
34	34	5.14	34	4.75	-	-
35	35	5.14	35	4.7	-	-
36	36	5.17	-	-	-	-
37	37	5.14	-	-	-	-
38	38	5.12	-	-	-	-
39	39	5.16	-	-	-	-
40	40	5.17	-	-	-	-
41	41	5.18	-	-	-	-
42	42	5.12	-	-	-	-
43	43	5.14	-	-	-	-
44	44	5.13	-	-	-	-
45	45	5.11	-	-	-	-
46	46	5.14	-	-	-	-
47	47	5.14	-	-	-	-
48	48	5.15	-	-	-	-
49	49	5.16	-	-	-	-

Tabel 5. 7 Rekapitulasi hasil Pengukuran *Thickness Daerah Flange*

FLANGE						
IWF 200 X 100			IWF 150 X 75		UNP 100 X 50	
No	Luasan	T Rata-Rata	Luasan	T Rata-Rata	Luasan	T Rata-Rata
1	1	7.49	1	7.18	1	7.79
2	2	7.49	2	7.01	2	7.65
3	3	7.45	3	7.16	3	7.7
4	4	7.47	4	7.03	4	7.62

Lanjutan Tabel 5.7 Rekapitulasi hasil Pengukuran *Thickness Flange*

<i>FLANGE</i>						
IWF 200 X 100			IWF 150 X 75		UNP 100 X 50	
No	Luasan	T Rata-Rata	Luasan	T Rata-Rata	Luasan	T Rata-Rata
5	5	7.49	5	7.06	5	7.55
6	6	7.48	6	7.03	6	7.75
7	7	7.58	7	7.1	7	6.48
8	8	7.5	8	7.08	8	6.48
9	9	7.49	9	-	9	6.2
10	10	7.48	10	-	10	6.24
11	11	7.68	11	-	11	6.33
12	12	7.5	12	-	12	6.45
13	13	7.51	13	-	13	7.79
14	14	7.51	14	-	14	7.65
15	15	7.5	15	-	15	7.7
16	16	7.57	16	-	16	7.62
17	17	7.62	17	7.27	17	7.55
18	18	7.61	18	7.27	18	7.75
19	19	7.63	19	7.26	19	6.48
20	20	7.63	20	7.29	20	6.48
21	21	7.61	21	7.35	21	6.2
22	22	7.58	22	7.28	22	6.24
23	23	7.58	23	7.26	23	6.33
24	24	7.62	24	7.28	24	6.45
25	25	7.69	25	7.04	-	-
26	26	7.67	26	7.13	-	-
27	27	7.68	27	7.1	-	-
28	28	7.66	28	7.05	-	-
29	29	7.65	29	7.15	-	-
30	30	7.66	30	7.08	-	-
31	31	7.68	31	7.07	-	-
32	32	7.69	32	7.09	-	-
33	33	7.72	33	-	-	-
34	34	7.69	34	-	-	-
35	35	7.72	35	-	-	-
36	36	7.66	36	-	-	-
37	37	7.64	37	-	-	-
38	38	7.63	38	-	-	-
39	39	7.6	39	-	-	-
40	40	7.61	40	-	-	-

Lanjutan Tabel 5.7 Rekapitulasi hasil Pengukuran *Thickness Flange*

<i>FLANGE</i>						
IWF 200 X 100			IWF 150 X 75		UNP 100 X 50	
No	Luasan	T Rata-Rata	Luasan	T Rata-Rata	Luasan	T Rata-Rata
41	41	7.51	41	7.33	-	-
42	42	7.53	42	7.31	-	-
43	43	7.54	43	7.3	-	-
44	44	7.5	44	7.27	-	-
45	45	7.58	45	7.24	-	-
46	46	7.53	46	7.24	-	-
47	47	7.54	47	7.26	-	-
48	48	7.56	48	7.27	-	-
49	49	7.7	-	-	-	-
50	50	7.61	-	-	-	-
51	51	7.63	-	-	-	-
52	52	7.63	-	-	-	-
53	53	7.61	-	-	-	-
54	54	7.64	-	-	-	-
55	55	7.62	-	-	-	-
56	56	7.67	-	-	-	-
57	57	7.62	-	-	-	-
58	58	7.6	-	-	-	-
59	59	7.58	-	-	-	-
60	60	7.61	-	-	-	-
61	61	7.64	-	-	-	-
62	62	7.61	-	-	-	-
63	63	7.58	-	-	-	-
64	64	7.59	-	-	-	-

Pada pengukuran ketebalan menggunakan *Ultrasonic Thickness Gauge* SW-6510S pada profil IWF 150 × 75, pada area *flange* tidak seluruh titik pengujian dapat menghasilkan nilai ketebalan yang terbaca secara konsisten, khususnya pada area *flange* bagian tengah yang bersambungan dengan *web* yaitu pada luasan 9 sampai 16 dan 33 sampai 40. Pada beberapa percobaan pengukuran, nilai ketebalan yang ditampilkan oleh alat menunjukkan variasi yang tidak stabil, dengan pembacaan yang berubah-ubah, seperti 9 mm, 17 mm, hingga 23 mm, pada titik pengukuran yang sama.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa gelombang ultrasonik yang dipancarkan oleh alat tidak dapat merambat dan dipantulkan secara optimal pada area tersebut. Hal ini diduga dipengaruhi oleh geometri profil IWF, khususnya pada pertemuan antara *flange* dan *web* yang memiliki perubahan ketebalan serta sudut sambungan, sehingga menyulitkan transmisi gelombang ultrasonik secara tegak lurus. Selain itu, keterbatasan bidang kontak sensor serta kondisi permukaan pada area sambungan *flange–web* turut mempengaruhi kestabilan hasil pembacaan.

5.3 Uji Tarik baja

Pengujian tarik baja dimaksudkan untuk dapat mengetahui suatu mutu baja. Di mana mutu baja yang diperoleh akan menggambarkan kemampuan yang dimiliki material baja tersebut dalam menerima beban yang bekerja padanya. Benda uji yang digunakan pada pengujian tarik ini merupakan benda uji yang sama dan telah diuji kekerasan sebelumnya. Pengujian tarik baja dilakukan dengan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM).

5.3.1 Pengukuran Nilai Uji Kuat Tarik pada Spesimen Profil Baja

Pengujian tarik dilakukan pada beberapa jenis profil baja, yaitu WF 200 x 100, WF 150 x 75, dan UNP 100 x 50, dengan masing-masing sampel diambil pada bagian *web*/badan maupun *flange*/sayap sesuai ASTM E8, yang di mana sebelumnya telah dilakukan pengujian kekerasan (*hardness*) terlebih dahulu. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh nilai karakteristik mekanik baja yang meliputi beban leleh (P_y), tegangan leleh (F_y), beban maksimum (P_u), kuat tarik maksimum (F_u). Dari hasil pengujian diperoleh kurva tegangan–regangan yang dapat menggambarkan perilaku material baja mulai dari fase elastis, plastis, hingga patah.

Pada tahap awal pembebanan, baja menunjukkan hubungan linier antara tegangan dan regangan. Pada fase ini, baja masih bersifat elastis, artinya apabila beban dihentikan maka spesimen akan kembali ke bentuk semula. Nilai batas elastis ini ditandai sebagai tegangan leleh (F_y), yang diperoleh dengan membagi beban leleh (P_y) terhadap luas penampang awal spesimen. Setelah melewati titik leleh,

baja memasuki fase plastis. Pada tahap ini, material mulai mengalami deformasi permanen meskipun bebannya tidak bertambah. Seiring penambahan beban, baja mengalami *strain hardening*, di mana material tetap mampu menahan beban tambahan hingga mencapai beban maksimum (P_u). Beban ini kemudian digunakan untuk menghitung kuat tarik maksimum (F_u). Setelah melewati beban maksimum, spesimen mengalami *necking* (penyempitan penampang di satu titik). Akibat fenomena ini, beban yang dapat ditahan menurun hingga akhirnya mencapai titik patah (beban putus). Nilai beban putus lebih rendah dibandingkan beban maksimum karena penampang efektif baja semakin mengecil. Data yang diperoleh dari Pengujian tarik dapat dilihat pada Tabel 5.8 sampai Tabel 5.9 berikut ini.

Tabel 5. 8 Data Uji Tarik Web

<i>Web</i>											
No	Benda	Sampel	L0	T0	A0	P0	P1	L1	T1	Py	Pu
	Uji		mm	mm	mm ²	mm	mm	mm	mm	Kgf	Kgf
1	WF	1	40.20	5.20	209.04	220.70	268.4	32.5	3.5	7925	9910
2	200 X 100	2	40.80	5.20	212.16	220.50	258	32.7	4.7	9050	10885
3		3	40.00	5.30	212.00	220.60	273.2	32	3.6	8025	9975
4	WF	1	40.00	5.20	208.00	210.80	249.2	32.95	3.6	8400	9555
5	150 X 75	2	40.20	5.30	213.06	212.00	249.2	32.9	3.6	8400	9555
6		3	40.20	5.30	213.06	212.00	250	32.2	3.5	8175	9450
7	UNP	1	40.00	4.60	184.00	218.20	244.7	33.6	3.3	7050	9525
8	100 X 50	2	41.10	4.90	201.39	222.20	268.4	31.6	3.2	7075	9710
9		3	40.80	4.40	179.52	217.80	252.7	32	3.7	7155	9525

Tabel 5. 9 Data Uji Tarik Flange

<i>Flange/ Sayap</i>											
No	Benda	Sampel	L0	T0	A0	P0	P1	L1	T1	Py	Pu
	Uji		mm	mm	mm ²	mm	mm	mm	mm	Kgf	Kgf
1	WF	1	13.20	7.90	104.28	49.70	64.40	8.30	5.00	3520	4645
2	200 X 100	2	13.90	7.70	107.03	49.70	61.90	8.90	0.43	3370	4590
3		3	12.80	7.90	101.12	47.40	61.20	8.30	4.40	3590	4500
4	WF	1	13.30	6.60	87.78	47.60	62.10	8.90	3.80	3100	3860
5	150 X 75	2	12.70	7.00	88.90	48.20	61.60	9.20	4.20	3040	3860

Lanjutan Tabel 5. 9 Data Uji Tarik *Flange*

6		3	13.50	6.90	93.15	48.00	58.80	9.20	4.20	3295	4170
7	UNP	1	13.20	5.60	73.92	47.50	57.70	9.50	4.00	3630	3640
8	100 X 50	2	12.70	5.30	67.31	45.30	54.50	9.30	4.10	3415	3415
9		3	13.10	5.70	74.67	45.00	56.10	9.70	4.20	2720	3800

Untuk mendapatkan nilai kuat tarik maka diperlukan suatu persamaan, berikut persamaan dari nilai kuat tarik pada spesimen profil baja.

1. Luas penampang awal (A_0)

$$A_0 = L_0 \times T_0 \quad (5-4)$$

Di mana,

$$L_0 = \text{Lebar benda uji awal (mm)}$$

$$T_0 = \text{Tebal benda uji awal (mm)}$$

2. Tegangan leleh (F_y)

$$F_y = \frac{P_y}{A_0} \quad (5.5)$$

Di mana,

$$P_y = \text{Beban leleh (Kgf)}$$

3. Tegangan maksimum/kuat tarik (F_u)

$$F_u = \frac{P_u}{A_0} \quad (5.6)$$

Di mana,

$$P_u = \text{Beban maksimum (Kgf)}$$

Sehingga dari persamaan di atas dapat dihitung nilai dari uji tarik pada profil baja sebagai berikut.

1. Perhitungan spesimen WF 200 × 100 daerah *web* sampel 1

- a. Luas penampang awal (A_0)

$$\begin{aligned} A_0 &= L_0 \times T_0 \\ &= 40,2 \times 5,2 \\ &= 209,04 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- b. Tegangan leleh (F_y)

$$\begin{aligned} F_y &= \frac{P_y}{A_0} \\ &= \frac{7925 \times 9,81}{209,04} \\ &= 371,91 \text{ MPa} \end{aligned}$$

c. Tegangan maksimum/kuat tarik (F_u)

$$\begin{aligned} F_u &= \frac{P_u}{A_0} \\ &= \frac{9910 \times 9,81}{209,04} \\ &= 465,06 \text{ MPa} \end{aligned}$$

2. Perhitungan spesimen WF 200 × 100 daerah *flange* sampel 1

a. Luas penampang awal (A_0)

$$\begin{aligned} A_0 &= L_0 \times T_0 \\ &= 13,2 \times 7,9 \\ &= 104,28 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

b. Tegangan leleh (F_y)

$$\begin{aligned} F_y &= \frac{P_y}{A_0} \\ &= \frac{3520 \times 9,81}{104,28} \\ &= 331,14 \text{ MPa} \end{aligned}$$

c. Tegangan maksimum/kuat tarik (F_u)

$$\begin{aligned} F_u &= \frac{P_u}{A_0} \\ &= \frac{4645 \times 9,81}{104,28} \\ &= 436,97 \text{ MPa} \end{aligned}$$

3. Perhitungan spesimen WF 150 x 75 daerah *web* sampel 1

a. Luas penampang awal (A_0)

$$\begin{aligned} A_0 &= L_0 \times T_0 \\ &= 40 \times 5,2 \\ &= 208 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

b. Tegangan leleh (F_y)

$$\begin{aligned} F_y &= \frac{P_u}{A_0} \\ &= \frac{8400 \times 9,81}{208} \\ &= 371,91 \text{ MPa} \end{aligned}$$

c. Tegangan maksimum/kuat tarik (F_u)

$$\begin{aligned}
 F_u &= \frac{P_u}{A_0} \\
 &= \frac{9555 \times 9,81}{208} \\
 &= 450,65 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

4. Perhitungan spesimen WF 150 x 75 daerah *flange* sampel 1

a. Luas penampang awal (A_0)

$$\begin{aligned}
 A_0 &= L_0 \times T_0 \\
 &= 13,3 \times 6,6 \\
 &= 87,78 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

b. Tegangan leleh (F_y)

$$\begin{aligned}
 F_y &= \frac{P_y}{A_0} \\
 &= \frac{3100 \times 9,81}{87,78} \\
 &= 346,45 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

c. Tegangan maksimum/kuat tarik (F_u)

$$\begin{aligned}
 F_u &= \frac{P_u}{A_0} \\
 &= \frac{3860 \times 9,81}{87,78} \\
 &= 431,38 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

5. Perhitungan spesimen UNP 100 x 50 daerah *web* sampel 1

a. Luas penampang awal (A_0)

$$\begin{aligned}
 A_0 &= L_0 \times T_0 \\
 &= 40 \times 4,6 \\
 &= 184
 \end{aligned}$$

b. Tegangan leleh (F_y)

$$\begin{aligned}
 F_y &= \frac{P_y}{A_0} \\
 &= \frac{7050 \times 9,81}{184} \\
 &= 375,87 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

c. Tegangan maksimum/kuat tarik (F_u)

$$\begin{aligned}
 F_u &= \frac{P_u}{A_0} \\
 &= \frac{9525 \times 9,81}{184}
 \end{aligned}$$

$$= 507,83 \text{ MPa}$$

$$= 8,32 \text{ mm}^2$$

6. Perhitungan spesimen UNP 100 x 50 daerah *flange* sampel 1

a. Luas penampang awal (A_0)

$$\begin{aligned} A_0 &= L_0 \times T_0 \\ &= 13,2 \times 5,6 \\ &= 73,92 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

b. Tegangan leleh (F_y)

$$\begin{aligned} F_y &= \frac{P_y}{A_0} \\ &= \frac{3630 \times 9,81}{73,92} \\ &= 481,74 \text{ MPa} \end{aligned}$$

c. Tegangan maksimum/kuat tarik (F_u)

$$\begin{aligned} F_u &= \frac{P_u}{A_0} \\ &= \frac{3640 \times 9,81}{73,92} \\ &= 483,07 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Rekapitulasi hasil perhitungan nilai kuat tarik pada spesimen profil baja dapat dilihat pada Tabel 5.10 sampai Tabel 5.11 berikut.

Tabel 5. 10 Rekapitulasi Nilai Kuat Tarik *Web*

<i>Web</i>							
No	Luasan	IWF 200 x 100		IWF 150 x 75		UNP 100 x 50	
		F_y	F_u	F_y	F_u	F_y	F_u
1	1	373.13	427.13	318.27	429.37	407.99	487.78
2	2	330.36	426.88	356.96	429.80	358.48	480.14
3	3	345.81	424.08	324.22	448.71	401.55	502.03
4	4	344.87	435.01	319.78	427.98	422.78	485.50
5	5	362.18	444.61	324.27	462.93	454.92	481.43
6	6	318.75	426.68	368.08	429.59	407.82	508.89
7	7	316.46	437.54	369.14	430.76	454.60	482.40
8	8	314.41	441.61	373.52	451.71	460.75	487.66

Lanjutan Tabel 5.10 Rekapitulasi Nilai Kuat Tarik Web

<i>Web</i>							
No	Luasan	IWF 200 x 100		IWF 150 x 75		UNP 100 x 50	
		Fy	Fu	Fy	Fu	Fy	Fu
9	9	353.56	462.82	378.17	429.57	490.34	488.18
10	10	310.56	457.73	346.76	424.06	493.41	475.40
11	11	353.38	444.87	336.62	455.55	483.55	514.67
12	12	366.28	459.11	382.66	444.51	369.04	504.77
13	13	340.17	431.27	321.94	445.30	453.50	516.79
14	14	319.67	428.25	318.39	424.93	466.31	476.18
15	15	335.45	460.22	357.41	445.60	469.29	505.20
16	16	313.81	462.86	348.08	448.53	393.70	494.15
17	17	365.54	450.10	382.87	460.84	352.89	508.22
18	18	365.98	434.58	348.39	426.80	432.35	509.26
19	19	322.09	447.52	323.71	451.65	385.45	477.55
20	20	351.35	444.57	366.26	435.06	407.10	513.09
21	21	346.68	434.70	323.00	447.78	481.69	488.99
22	22	310.28	422.17	352.12	463.65	473.44	474.09
23	23	366.47	458.44	376.45	422.86	418.36	494.36
24	24	336.41	424.46	381.32	446.96	491.35	509.72
25	25	330.80	425.03	313.50	439.38	364.50	496.50
26	26	326.42	425.64	356.93	435.63	356.08	509.52
27	27	309.08	427.75	324.65	440.81	392.76	511.48
28	28	312.79	463.39	380.80	438.09	419.94	493.07
29	29	347.49	459.68	348.67	429.50	387.53	496.87
30	30	316.80	428.02	326.66	445.84	-	-
31	31	318.81	426.21	348.97	460.93	-	-
32	32	317.63	455.17	312.06	452.75	-	-
33	33	348.55	427.13	365.23	443.62	-	-
34	34	311.75	443.78	323.63	451.99	-	-
35	35	328.84	451.66	318.77	445.50	-	-
36	36	358.39	460.97	-	-	-	-
37	37	368.51	421.59	-	-	-	-
38	38	349.93	428.93	-	-	-	-
39	39	337.39	436.46	-	-	-	-
40	40	312.04	438.59	-	-	-	-
41	41	311.63	426.01	-	-	-	-
42	42	348.71	433.53	-	-	-	-
43	43	325.40	459.06	-	-	-	-
44	44	310.22	430.99	-	-	-	-

Lanjutan Tabel 5.10 Rekapitulasi Nilai Kuat Tarik *Web*

<i>Web</i>							
No	Luasan	IWF 200 x 100		IWF 150 x 75		UNP 100 x 50	
		Fy	Fu	Fy	Fu	Fy	Fu
45	45	321.50	428.60	-	-	-	-
46	46	328.04	425.06	-	-	-	-
47	47	364.40	445.56	-	-	-	-
48	48	335.88	428.45	-	-	-	-
49	49	310.96	440.77	-	-	-	-

Tabel 5. 11 Rekapitulasi Nilai Kuat Tarik *Flange*

<i>Flange</i>							
No	Luasan	IWF 200 x 100		IWF 150 x 75		UNP 100 x 50	
		Fy	Fu	Fy	Fu	Fy	Fu
1	1	366.87	421.94	360.18	421.91	380.87	474.05
2	2	347.44	433.97	347.57	438.71	390.93	519.35
3	3	372.06	448.23	384.76	460.99	407.75	497.32
4	4	389.50	438.69	336.10	437.28	364.79	506.66
5	5	336.55	424.31	355.23	459.01	372.53	519.62
6	6	392.04	434.92	320.77	430.70	439.99	475.14
7	7	329.01	442.65	335.64	462.98	408.44	474.84
8	8	332.58	456.86	337.44	461.94	475.59	492.50
9	9	313.72	435.05	381.29	429.95	407.30	473.43
10	10	389.79	463.29	362.80	432.65	409.25	498.61
11	11	368.24	427.31	323.42	460.91	380.82	513.25
12	12	388.68	432.38	383.06	449.54	453.32	505.84
13	13	321.75	459.12	383.85	443.19	488.19	484.25
14	14	349.96	423.75	363.48	444.47	471.84	474.33
15	15	351.42	439.20	319.80	428.72	398.86	483.50
16	16	309.02	463.89	331.73	445.19	363.39	476.66
17	17	319.17	463.40	337.27	461.51	406.15	483.71
18	18	366.89	461.67	323.46	463.70	346.49	499.76
19	19	366.95	459.24	337.65	457.84	351.04	508.13
20	20	340.64	446.97	319.79	433.08	366.49	474.53
21	21	394.77	450.41	355.68	436.02	479.50	502.13
22	22	334.02	460.73	384.16	444.37	417.61	511.82
23	23	338.75	456.29	394.23	445.52	495.09	510.68
24	24	380.70	457.61	385.67	450.01	478.51	502.57
25	25	309.16	457.62	331.98	458.58	-	-
26	26	368.67	443.60	341.22	428.76	-	-

Lanjutan Tabel 5.11 Rekapitulasi Nilai Kuat Tarik *Flange*

<i>Flange</i>							
No	Luasan	IWF 200 x 100		IWF 150 x 75		UNP 100 x 50	
		Fy	Fu	Fy	Fu	Fy	Fu
27	27	381.40	432.39	324.18	453.48	-	-
28	28	345.72	460.35	330.49	420.70	-	-
29	29	314.20	456.34	327.59	439.70	-	-
30	30	380.42	454.50	362.07	443.05	-	-
31	31	328.31	445.82	384.26	430.05	-	-
32	32	396.03	425.77	395.31	442.55	-	-
33	33	333.65	448.49	348.00	438.53	-	-
34	34	360.11	453.59	315.01	429.32	-	-
35	35	383.09	432.75	313.21	428.48	-	-
36	36	326.93	436.65	356.64	423.70	-	-
37	37	395.85	436.81	330.02	425.73	-	-
38	38	331.83	440.73	376.57	449.72	-	-
39	39	376.08	458.52	381.15	464.09	-	-
40	40	373.98	429.41	318.33	439.31	-	-
41	41	358.93	452.26	318.02	425.69	-	-
42	42	370.18	438.46	359.76	425.16	-	-
43	43	310.08	447.19	337.93	437.69	-	-
44	44	388.67	453.96	379.33	443.87	-	-
45	45	385.73	421.55	381.12	435.73	-	-
46	46	337.86	443.58	349.49	459.40	-	-
47	47	343.76	425.16	327.92	453.33	-	-
48	48	315.33	429.46	375.49	461.26	-	-
49	49	336.27	460.08	-	-	-	-
50	50	325.79	445.01	-	-	-	-
51	51	325.54	438.11	-	-	-	-
52	52	339.25	463.31	-	-	-	-
53	53	377.45	422.37	-	-	-	-
54	54	366.77	426.45	-	-	-	-
55	55	371.66	438.18	-	-	-	-
56	56	385.29	432.11	-	-	-	-
57	57	322.47	434.94	-	-	-	-
58	58	389.03	440.40	-	-	-	-
59	59	395.21	435.46	-	-	-	-
60	60	343.28	430.57	-	-	-	-
61	61	316.14	437.72	-	-	-	-
62	62	324.46	421.15	-	-	-	-

Lanjutan Tabel 5.11 Rekapitulasi Nilai Kuat Tarik *Flange*

<i>Flange</i>							
No	Luasan	IWF 200 x 100		IWF 150 x 75		UNP 100 x 50	
		Fy	Fu	Fy	Fu	Fy	Fu
63	63	383.01	445.64	-	-	-	-
64	64	316.62	449.20	-	-	-	-

5.4 Analisis Korelasi

Analisis korelasi antar variabel membahas hasil pengolahan data pengujian kekerasan dan sifat mekanik baja tulangan yang diperoleh dari pengujian laboratorium. Data yang dianalisis meliputi nilai kekerasan *Leeb* (HL), kekerasan *Vickers* (HV), tebal material (T), kuat luluh (Fy), dan kuat tarik maksimum (Fu). Pembahasan ini difokuskan pada:

1. Hubungan antar variabel melalui analisis korelasi,
2. Kemampuan parameter kekerasan dalam memprediksi kuat tarik,
3. Perbandingan kinerja berbagai model regresi,
4. Kesesuaian hasil penelitian dengan teori mekanika material dan standar pengujian.

Pendekatan ini bertujuan untuk menilai potensi pengujian tidak merusak (*Non-Destructive Testing* / NDT) sebagai metode estimasi awal sifat mekanik baja tulangan.

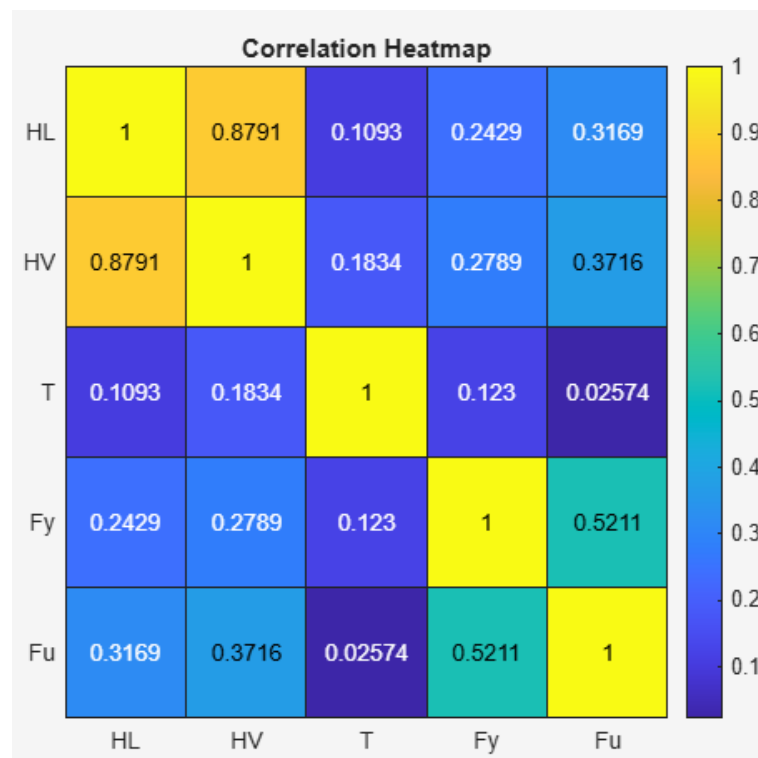
5.4.1. Analisis Matriks Korelasi Antar Variabel

Untuk memahami hubungan linier antar parameter yang digunakan dalam penelitian ini, dilakukan analisis korelasi menggunakan koefisien korelasi Pearson. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi tingkat keterkaitan antar variabel kekerasan, tebal material, serta sifat mekanik baja tulangan sebelum dilakukan pemodelan regresi lebih lanjut.

Koefisien korelasi *Pearson* dipilih karena seluruh variabel yang dianalisis berupa data numerik kontinu dan diperoleh dari hasil pengujian laboratorium. Nilai koefisien korelasi berada pada rentang -1 hingga $+1$, di mana nilai mendekati $+1$ menunjukkan hubungan linier positif yang kuat, nilai mendekati -1 menunjukkan

hubungan linier negatif yang kuat, dan nilai mendekati 0 menunjukkan tidak adanya hubungan linier yang signifikan.

Hasil perhitungan koefisien korelasi *Pearson* antar variabel kekerasan Leeb (HL), kekerasan Vickers (HV), tebal material (T), kuat luluh (F_y), dan kuat tarik maksimum (F_u) disajikan dalam bentuk matriks korelasi (*Correlation Heatmap*). Matriks korelasi dan tabel korelasi dapat dilihat pada Gambar 5.7 dan Tabel 5.12 berikut.



Gambar 5. 7 Correlation Heatmap

Tabel 5. 12 Tabel Korelasi

No	Variabel	r	Interpretasi
1	HL - HV	0.879	Sangat kuat
2	HL - Fu	0.317	Lemah
3	HV - Fu	0.372	Lemah - Sedang
4	Fy - Fu	0.521	Sedang
5	T - Fu	0.026	Hampir nol

1. Hubungan antara Kekerasan *Leeb* (HL) dan Kekerasan *Vickers* (HV)

Berdasarkan Gambar dapat diamati bahwa tingkat hubungan antar variabel bervariasi dari sangat lemah hingga sangat kuat. Korelasi tertinggi terjadi antara kekerasan *Leeb* (HL) dan kekerasan *Vickers* (HV) dengan nilai koefisien sebesar 0,879, yang termasuk dalam kategori sangat kuat. Hal ini menunjukkan bahwa kedua metode pengujian kekerasan tersebut memiliki keterkaitan yang sangat erat. Secara fisik, hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut.

- a. Metode *Leeb* dan *Vickers* sama-sama mengukur resistansi material terhadap deformasi plastis,
- b. Perbedaan hanya terletak pada prinsip pengujian dan kedalaman penetrasi.

Korelasi yang tinggi ini mengindikasikan bahwa data kekerasan yang diperoleh dari alat *Leeb Hardness Tester* memiliki konsistensi yang baik dan dapat mengilustrasikan hubungan yang serupa dengan metode *Vickers*.

Namun demikian, korelasi yang sangat tinggi juga menunjukkan adanya redundansi informasi, sehingga penggunaan HL dan HV secara bersamaan dalam model regresi perlu diperhatikan karena berpotensi menimbulkan multikolinearitas.

2. Hubungan Kekerasan terhadap Kuat Tarik Maksimum (F_u)

Nilai korelasi antara kekerasan dan kuat tarik maksimum menunjukkan hubungan yang relatif lemah hingga sedang sebagai berikut.

- a. HL terhadap F_u sebesar 0,317
- b. HV terhadap F_u sebesar 0,372

Nilai tersebut menunjukkan bahwa meskipun terdapat hubungan statistik, kekerasan bukan satu-satunya faktor yang menentukan kuat tarik maksimum material. Secara mekanika material, hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut.

- a. Pengujian kekerasan bersifat lokal dan hanya merepresentasikan kondisi permukaan material,
- b. Kuat tarik maksimum merupakan sifat mekanik global yang dipengaruhi oleh mikrostruktur, komposisi kimia, serta distribusi tegangan dalam material.

Oleh karena itu, peningkatan nilai kekerasan tidak selalu diikuti oleh peningkatan kuat tarik maksimum secara proporsional.

3. Hubungan antara Kuat Luluh (F_y) dan Kuat Tarik Maksimum (F_u)

Korelasi antara kuat luluh (F_y) dan kuat tarik maksimum (F_u) menunjukkan nilai sebesar 0,521 yang termasuk kategori sedang hingga kuat. Hasil ini konsisten dengan teori mekanika material, di mana material dengan kuat luluh yang lebih tinggi umumnya juga memiliki kuat tarik maksimum yang lebih tinggi. Namun, hubungan tersebut tidak sepenuhnya linier karena dipengaruhi oleh tingkat keuletan material dan mekanisme deformasi plastis material. Hasil ini memperkuat bahwa data uji tarik yang digunakan memiliki keterkaitan internal yang logis dan valid.

4. Pengaruh Tebal Material (T)

Sementara itu, variabel tebal material (T) menunjukkan korelasi yang sangat rendah terhadap kuat tarik maksimum, yaitu sebesar 0,026 yang mendekati nol. Hal ini menunjukkan bahwa tebal material tidak memiliki pengaruh langsung terhadap sifat mekanik tarik baja tulangan. Secara fisik hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut.

- a. Tebal material lebih berperan sebagai parameter geometrik.
- b. Kuat tarik merupakan sifat intrinsik material.

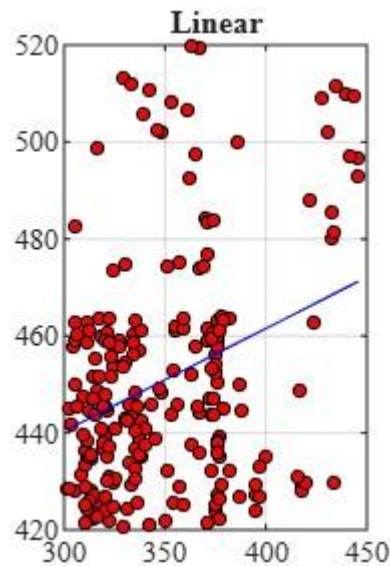
Dengan demikian, variabel tebal tidak dapat dijadikan parameter utama dalam estimasi kuat tarik.

Secara keseluruhan, hasil analisis korelasi pada Gambar 5.8 menunjukkan bahwa tidak terdapat satu variabel tunggal yang memiliki hubungan linier sangat kuat terhadap kuat tarik maksimum (F_u). Secara

khusus, penggunaan satu parameter kekerasan saja, baik kekerasan *Leeb* (HL) maupun kekerasan *Vickers* (HV), belum cukup mampu memprediksi kuat tarik maksimum secara akurat. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan analisis lanjutan melalui pemodelan regresi, baik linier maupun multivariat, untuk mengevaluasi pengaruh gabungan dari beberapa variabel terhadap kuat tarik material

5.4.2. Analisis Regresi Linier antara Kekerasan Leeb dan Kuat Tarik Maksimum

Analisis regresi linier sederhana dilakukan untuk mengevaluasi hubungan antara kekerasan Leeb (HL) dan kuat tarik maksimum (Fu). Pendekatan ini bertujuan untuk menilai sejauh mana hasil pengujian kekerasan Leeb, sebagai metode pengujian tidak merusak (*Non-Destructive Testing* / NDT), dapat digunakan untuk mengestimasi sifat mekanik tarik material baja tulangan. Regresi linier dari kekerasan Leeb (HL) dan kuat tarik maksimum (Fu) dapat dilihat pada Gambar 5.8 berikut ini.



Gambar 5. 8 Regresi Linier HL dan Fu

Hasil analisis regresi linier menghasilkan persamaan hubungan sebagai berikut.

$$Fu=376,89 + 0,212HL \quad (5-1)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa nilai kuat tarik maksimum cenderung meningkat seiring dengan peningkatan nilai kekerasan Leeb, di mana nilai konstanta 376,89 merepresentasikan nilai F_u saat nilai HL bernilai nol, sedangkan koefisien regresi sebesar 0,212 menunjukkan bahwa setiap peningkatan satu satuan nilai kekerasan Leeb diikuti oleh peningkatan kuat tarik maksimum sebesar 0,212 MPa. Meskipun persamaan regresi menunjukkan adanya hubungan positif antara nilai kekerasan Leeb dan kuat tarik maksimum, pengujian signifikansi statistik tetap diperlukan untuk memastikan bahwa hubungan tersebut tidak terjadi secara kebetulan. Hasil uji signifikansi statistik model regresi ditampilkan dalam Tabel 5.13 berikut ini

Tabel 5. 13 Hasil Uji Signifikansi t-statistik Model Regresi Linier HL terhadap F_u

Variabel Independen	Koefisien Regresi	t-statistik	p-value	Keterangan
Konstanta	376.89	-	-	-
HL	0.212	4.9	0.00019	0.00019 < 0.05 Signifikan

Berdasarkan Tabel 5.13, variabel HL memiliki koefisien regresi sebesar 0.212 yang bernilai positif, menunjukkan bahwa peningkatan nilai HL akan diikuti oleh peningkatan nilai F_u . Pengujian signifikansi koefisien regresi dilakukan menggunakan uji t, yang bertujuan untuk menilai apakah koefisien regresi tersebut berbeda secara signifikan dari nol atau hanya muncul akibat variasi acak dalam data. Nilai t-statistik sebesar 4.90 menunjukkan bahwa koefisien regresi HL memiliki besaran sekitar 4.90 kali lebih besar dibandingkan kesalahan standarnya, sehingga mengindikasikan pengaruh yang cukup kuat. Nilai p-value sebesar 1.9×10^{-6} menyatakan bahwa peluang diperolehnya nilai t sebesar tersebut secara kebetulan, apabila HL sebenarnya tidak berpengaruh terhadap F_u , sangat kecil dan jauh di bawah tingkat signifikansi $\alpha = 0.05$. Oleh karena itu, hipotesis nol ditolak

dan dapat disimpulkan bahwa variabel HL berpengaruh signifikan terhadap variabel Fu dalam model regresi yang digunakan.

Selain pengujian secara parsial menggunakan uji t, evaluasi model regresi juga dilakukan secara simultan melalui analisis statistik F dan p-value untuk menilai kelayakan model secara keseluruhan. Analisis F-statistik dan p-value diperoleh dari hasil pengolahan data menggunakan perangkat lunak Matlab Hasil pengolahan data berupa grafik hubungan linier antara HL dan Fu disajikan pada Gambar 5.9, sedangkan hasil uji signifikansi statistik model regresi disajikan pada Tabel 5.14 berikut ini.

Tabel 5. 14 Hasil Uji Signifikansi F-statistik Model Regresi Linier HL terhadap Fu

Variabel Independen	f-statistik	p-value	α	Keterangan
HL - Fu	24.0	0.001	0.05	0.001 < 0.05 Signifikan

Uji F-statistik digunakan untuk menilai signifikansi model regresi secara keseluruhan, yaitu untuk mengetahui apakah hubungan antara variabel HL dan Fu yang dibentuk oleh model regresi benar-benar ada atau hanya terjadi secara kebetulan. Berdasarkan Tabel 5.14, diperoleh nilai F-statistik sebesar 24.0 dengan p-value < 0.001, yang nilainya lebih kecil dibandingkan tingkat signifikansi $\alpha = 0.05$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa hipotesis nol yang menyatakan bahwa model regresi tidak memiliki kemampuan menjelaskan variabel Fu ditolak. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa model regresi linier antara HL dan Fu signifikan secara statistik dan layak digunakan untuk merepresentasikan hubungan antara kedua variabel tersebut.

Nilai t-statistik dan F-statistik merupakan ukuran kekuatan hubungan yang diperoleh dari data, sedangkan p-value digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan statistik. Semakin besar nilai t-statistik atau F-statistik, maka semakin kecil nilai p-value yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, baik uji t maupun uji f

menghasilkan p-value yang lebih kecil dari 0,05, sehingga dapat disimpulkan bahwa hubungan antara kekerasan Leeb dan kuat tarik maksimum signifikan secara statistik.

Setelah model regresi dinyatakan signifikan secara statistik melalui uji t dan uji F, langkah selanjutnya adalah mengevaluasi kemampuan model dalam menjelaskan variasi data serta tingkat kesalahan prediksinya. Evaluasi tersebut dilakukan dengan melihat nilai koefisien determinasi (R^2) dan *Root Mean Square Error* (RMSE). Nilai koefisien determinasi (R^2) dan *Root Mean Square Error* (RMSE) yang diperoleh dari hasil pengolahan data menggunakan perangkat lunak Matlab disajikan pada Tabel 5.15 berikut ini.

Tabel 5. 15 Nilai R^2 dan RMSE Model Regresi Linier HL terhadap Fu

No	Parameter Statistik	Nilai	Satuan
1	Koefisien Determinasi (R^2)	0.1	-
2	<i>Root Mean Square Error</i> (RMSE)	22.3	Mpa
3	Rentang nilai Fu	420.70 - 520.50	Mpa
4	RMSE relatif terhadap Fu	$\pm 4 - 5$	%

Nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh sebesar 0,10. Nilai ini menunjukkan bahwa hanya 10% variasi nilai Fu dapat dijelaskan oleh variasi nilai HL, sedangkan 90% variasi lainnya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model atau oleh variasi acak (*noise*). Dengan demikian, termasuk dalam kategori sangat rendah (0,00-0,19). Secara statistik, nilai R^2 yang rendah mengindikasikan bahwa hubungan HL terhadap Fu tidak cukup kuat atau sangat lemah (*very weak*) untuk menjelaskan perubahan Fu secara komprehensif, meskipun hubungan tersebut terbukti signifikan secara statistik berdasarkan uji t dan uji F. Kondisi ini menunjukkan bahwa HL bukan satu-satunya parameter yang dominan dalam menentukan nilai Fu, dan masih terdapat variabel lain yang berperan.

Nilai RMSE sebesar 22,3 MPa menunjukkan bahwa secara rata-rata, hasil prediksi Fu oleh model menyimpang sekitar 22,3 MPa dari nilai Fu aktual. Karena Fu dinyatakan dalam satuan MPa, maka RMSE juga memiliki satuan MPa, yang

secara langsung merepresentasikan besarnya kesalahan prediksi dalam skala fisik yang sama dengan variabel terikat. Jika dibandingkan dengan rentang nilai F_u yang berada pada kisaran 420,70–520,50 MPa, maka nilai RMSE tersebut setara dengan sekitar 4–5% dari nilai F_u . Hal ini menunjukkan bahwa akurasi prediksi model berada pada tingkat sedang, di mana model masih mampu memberikan estimasi kasar yang cukup mendekati nilai aktual, meskipun belum dapat digunakan untuk prediksi presisi tinggi.

Berdasarkan nilai koefisien determinasi (R^2) yang sangat rendah dan nilai RMSE yang berada pada tingkat sedang, dapat disimpulkan bahwa hubungan antara HL dan F_u nyata secara statistik, namun memiliki kemampuan prediksi yang terbatas. Signifikansi statistik yang ditunjukkan oleh uji t dan uji F menegaskan bahwa pengaruh HL terhadap F_u bukan terjadi secara kebetulan, akan tetapi besarnya pengaruh tersebut tidak cukup kuat untuk menjelaskan variasi F_u secara menyeluruh. Kondisi ini bukan merupakan kegagalan model, melainkan ciri khas data pengujian non-destruktif (NDT), di mana satu parameter uji umumnya hanya mampu menangkap sebagian kecil karakteristik mekanik material.

5.4.3. Analisis Regresi Nonlinier antara Kekerasan Leeb dan Kuat Tarik Maksimum

Regresi non-linier merupakan metode analisis statistik yang digunakan untuk memodelkan hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat apabila hubungan tersebut tidak dapat dijelaskan secara tepat menggunakan model regresi linier. Pada regresi non-linier, perubahan nilai variabel terikat terhadap variabel bebas tidak bersifat proporsional, sehingga hubungan antar variabel sering kali membentuk pola melengkung, eksponensial, logaritmik, atau berpangkat. Berbeda dengan regresi linier yang mengasumsikan hubungan berbentuk garis lurus, regresi non-linier memungkinkan penggunaan fungsi matematis yang lebih kompleks. Dengan demikian, model ini mampu menggambarkan pola hubungan data yang menunjukkan kecenderungan pertumbuhan, penurunan, atau perubahan yang tidak konstan.

Untuk meningkatkan kualitas prediksi kuat tarik maksimum, dilakukan pengujian beberapa model regresi non-linier antara kekerasan *Leeb* dan kuat tarik

maksimum. Model non-linier yang diuji meliputi model *Quadratic*, *Exponential*, *Logarithmic* dan *Power*. Pemilihan model-model tersebut didasarkan pada kemungkinan adanya hubungan non-linier antara kekerasan dan sifat mekanik tarik material.

1. *Quadratic*

Regresi kuadratik merupakan salah satu bentuk regresi non-linier yang memodelkan hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat menggunakan fungsi polinomial orde dua. Model ini digunakan apabila hubungan antarvariabel menunjukkan pola lengkungan yang tidak dapat direpresentasikan secara memadai oleh regresi linier. Dengan memasukkan unsur kuadrat dari variabel bebas, regresi kuadratik mampu menggambarkan hubungan non-linier yang bersifat melengkung. Persamaan dari regresi kuadratik dapat dilihat sebagai berikut.

$$Y = \alpha + bX + cX^2 \quad (5-21)$$

Di mana :

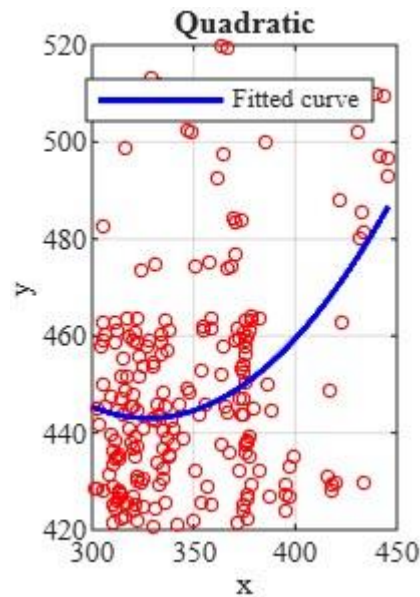
Y = Variabel terikat

X = Variabel bebas

α = Konstanta

b = Koefisien regresi

Perhitungan dan analisis hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat dalam penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak Matlab dengan menerapkan regresi non-linier kuadratik. Hasil perhitungan tersebut selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik regresi kuadratik untuk memperlihatkan tingkat kesesuaian model terhadap data serta kecenderungan hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat. Grafik regresi kuadratik dapat dilihat pada Gambar 5.9 berikut ini.



Gambar 5. 9 Grafik Regresi Kuadratik

2. *Exponential*

Regresi eksponensial merupakan model regresi non-linier yang menggambarkan hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat dalam bentuk fungsi eksponensial. Model ini digunakan apabila laju perubahan variabel terikat meningkat atau menurun secara tidak konstan seiring perubahan variabel bebas. Regresi eksponensial banyak diterapkan pada analisis data eksperimental yang menunjukkan pola pertumbuhan atau peluruhan yang signifikan. Persamaan dari regresi eksponensial dapat dilihat sebagai berikut.

$$Y = \alpha e^{bX} \quad (5-22)$$

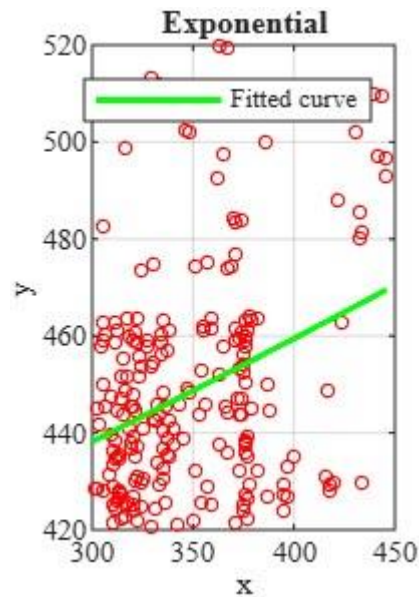
Di mana :

e = Bilangan eksponensial natural ($\approx 2,718$)

α = Konstanta

b = Laju perubahan

Perhitungan dengan perangkat lunak Matlab dihasilkan grafik regresi eksponensial yang dapat dilihat pada Gambar 5.10 berikut ini.



Gambar 5. 10 Grafik Regresi Eksponensial

3. *Logarithmic*

Regresi logaritmik merupakan model regresi non-linier yang menyatakan hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat melalui fungsi logaritma natural. Model ini sesuai digunakan apabila peningkatan variabel bebas memberikan pengaruh yang semakin menurun terhadap variabel terikat. Model ini banyak digunakan untuk menggambarkan hubungan yang bersifat menurun secara bertahap. Persamaan dari regresi logaritmik dapat dilihat sebagai berikut.

$$Y = \alpha + b \ln(X) \quad (5-23)$$

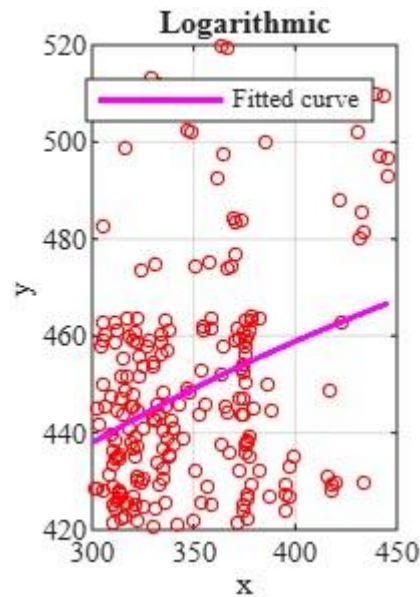
Di mana :

$\ln(X)$ = Logaritma natural

α = Konstanta

b = Koefisien regresi

Perhitungan dengan perangkat lunak Matlab dihasilkan grafik regresi logaritmik yang dapat dilihat pada Gambar 5.11 berikut ini.



Gambar 5. 11 Grafik Regresi Logaritmik

4. *Power*

Regresi pangkat merupakan bentuk regresi non-linier yang menyatakan hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat dalam bentuk fungsi berpangkat. Model ini digunakan apabila perubahan variabel terikat dipengaruhi oleh variabel bebas secara non-linier dengan pola eksponensial berpangkat. Persamaan dari regresi power dapat dilihat sebagai berikut.

$$Y = \alpha X^b \quad (5-24)$$

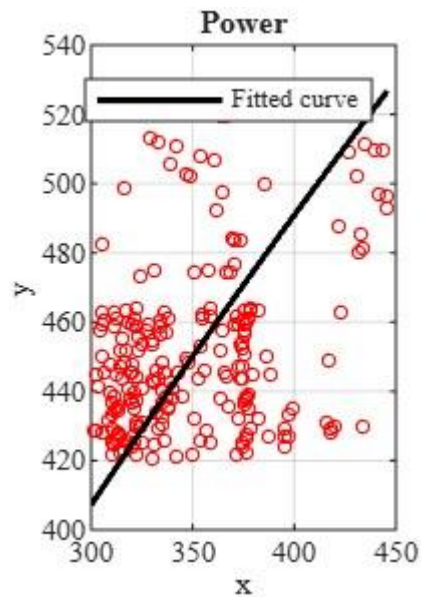
Di mana :

X = Variabel bebas

α = Konstanta

b = Koefisien regresi

Perhitungan dengan perangkat lunak Matlab dihasilkan grafik regresi power yang dapat dilihat pada Gambar 5.12 berikut ini.



Gambar 5. 12 Grafik Regresi Power

Hasil evaluasi kualitas masing-masing model regresi non-linier *quadratic*, *exponential*, *logarithmic*, *power* disajikan dalam bentuk nilai koefisien determinasi (R^2) dan RMSE. Perbandingan prediksi model regresi non-linier dapat dilihat pada Tabel 5.16 berikut ini.

Tabel 5. 16 Perbandingan Prediksi Model Regresi Non-linier

No	Model	R^2	RMSE	Interpretasi
1	<i>Quadratic</i>	0.245	20.7	Terbaik, tetapi beresiko <i>overfitting</i>
2	<i>Exponential</i>	0.171	21.7	Sedikit lebih baik dari linier
3	<i>Logarithmic</i>	0.161	21.9	Hampir sama
4	<i>Power</i>	-0.836	32.3	Tidak cocok

Berdasarkan Tabel 5.16 seluruh model regresi non-linier yang diuji menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) yang rendah, yang mengindikasikan bahwa hubungan antara kekerasan Leeb (HL) dan kekuatan tarik maksimum (F_u) tidak sepenuhnya dapat dijelaskan oleh model non-linier sederhana. Diantara model yang diuji, model *Quadratic* memberikan nilai koefisien determinasi tertinggi, yaitu

sebesar 0,245 dan nilai RMSE terendah yaitu sebesar 20.07, sehingga secara statistik memiliki tingkat kesesuaian terbaik terhadap data dibandingkan model *non-linier* lainnya yaitu eksponensial, logaritmik, dan power. Hal ini menunjukkan bahwa model kuadratik mampu menangkap sebagian hubungan non-linier antara kekerasan Leeb (HL) dan kuat tarik maksimum (Fu), yang tidak sepenuhnya dapat direpresentasikan oleh model linier. Dengan demikian, terdapat kecenderungan pola non-linier dalam hubungan HL dan Fu yang lebih baik dijelaskan oleh model *Quadratic* dibandingkan model linier sederhana. Model *Exponential* dan *Logarithmic* menunjukkan kinerja yang hampir serupa, dengan tingkat kesalahan prediksi yang masih relatif tinggi. Sementara itu, model regresi *Power* menghasilkan nilai R^2 negatif -0.836 dan RMSE paling besar 32.3, yang menandakan bahwa model tersebut tidak sesuai untuk merepresentasikan hubungan antara HL dan Fu pada data penelitian ini.

Meskipun model regresi nonlinier kuadratik menunjukkan peningkatan kinerja dibandingkan model linier, nilai R^2 sebesar 0,245 masih tergolong rendah sehingga kemampuan penjelasan model terhadap variasi kuat tarik belum kuat. Oleh karena itu, peningkatan tersebut perlu dievaluasi secara hati-hati. Model kuadratik hanya menggambarkan hubungan matematis antar variabel dan belum tentu secara langsung mencerminkan mekanisme fisik perilaku material. Selain itu, model nonlinier cenderung lebih sensitif terhadap variasi data dan berisiko mengalami *overfitting*, terutama apabila jumlah data terbatas atau rentang data yang digunakan berbeda dari data pelatihan. Kondisi ini dapat menyebabkan penurunan stabilitas dan akurasi prediksi ketika model diterapkan pada data baru.

5.4.4. Analisis Regresi Multivariat

Regresi multivariat (sering juga disebut regresi linier berganda) merupakan metode analisis statistik yang digunakan untuk memodelkan hubungan antara satu variabel terikat dengan dua atau lebih variabel bebas secara simultan. Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk mengetahui seberapa besar pengaruh masing-masing variabel bebas terhadap variabel terikat, baik secara parsial maupun secara keseluruhan, serta untuk membangun model prediksi yang merepresentasikan

fenomena fisik yang diamati secara kuantitatif. Dalam konteks penelitian material, regresi multivariat sangat relevan karena sifat mekanik suatu material umumnya tidak dipengaruhi oleh satu parameter tunggal, melainkan dipengaruhi oleh kombinasi beberapa parameter yang bekerja secara bersamaan. Oleh karena itu, analisis regresi multivariat digunakan untuk menilai besarnya pengaruh masing-masing variabel pengujian terhadap respon mekanik yang diamati, dengan tetap mempertimbangkan keberadaan variabel lain dalam model. Pendekatan ini memungkinkan peneliti memperoleh interpretasi hasil yang lebih sistematis, objektif, dan mencerminkan kondisi material secara lebih menyeluruh.

Secara matematis, regresi linier multivariat dinyatakan dalam suatu persamaan linier yang memuat konstanta (*intercept*) dan koefisien regresi dari masing-masing variabel bebas. Koefisien regresi tersebut menggambarkan arah hubungan serta besarnya pengaruh setiap variabel bebas terhadap variabel terikat, yaitu perubahan nilai variabel terikat akibat peningkatan satu satuan variabel bebas dengan asumsi variabel lainnya tetap. Selain itu, validitas model regresi dievaluasi melalui uji signifikansi statistik, seperti uji t untuk pengaruh individual variabel dan uji F untuk signifikansi model secara keseluruhan. Pendekatan ini telah banyak digunakan dalam penelitian rekayasa dan ilmu material untuk menghubungkan parameter hasil pengujian non-destruktif dan destruktif dengan sifat mekanik utama material, karena mampu memberikan pemahaman kuantitatif yang sistematis dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Berikut persamaan dari regresi multivariat dapat dilihat sebagai berikut.

1. Koefisien b

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (5-25)$$

2. Regresi linier multivariat

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n + \varepsilon \quad (5-26)$$

$$Fu = b_0 + b_1HL + b_2HV + b_3T + \varepsilon \quad (5-27)$$

Di mana :

Y = Variabel terikat (respon)

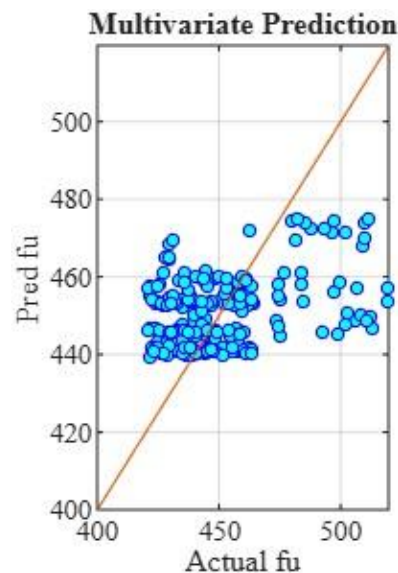
b_0 = Konstanta (intercept)

b_i = Koefisien regresi variabel ke- i

X_i = Variabel bebas ke- i

ε = Galat (*error*)

Regresi linier multivariat yang digunakan dalam penelitian ini bertujuan untuk memodelkan hubungan antara kekuatan tarik maksimum (F_u) dengan beberapa parameter pengujian yang diukur secara simultan, yaitu kekerasan Leeb (HL), kekerasan Vickers (HV), dan ketebalan (T). Pendekatan multivariat memungkinkan evaluasi pengaruh masing-masing variabel bebas terhadap F_u dengan mempertimbangkan keterkaitan antarvariabel dalam satu model terpadu. Dalam konteks ini, nilai *Actual* F_u merepresentasikan hasil pengujian tarik secara eksperimental, sedangkan *Predicted* F_u merupakan nilai F_u yang diperkirakan oleh model regresi berdasarkan kombinasi nilai HL, HV, dan T. Hasil permodelan Regresi Multivariat dapat dilihat pada Gambar 5.13 berikut ini.



Gambar 5. 13 Regresi Multivariat

Hasil analisis regresi multivariat menghasilkan persamaan sebagai berikut.

$$F_u = 408,74 - 0,036HL + 0,544HV - 0,824T \quad (5-28)$$

Persamaan regresi yang diperoleh menunjukkan hubungan linier antara kekuatan tarik maksimum (F_u) sebagai variabel terikat dengan nilai kekerasan Leeb (HL), kekerasan Vickers (HV), dan parameter T sebagai variabel bebas. Konstanta sebesar 408.74 merepresentasikan nilai dasar F_u dalam model regresi dan berfungsi sebagai titik awal perhitungan, meskipun tidak selalu memiliki makna fisik secara langsung. Koefisien regresi HL bernilai -0.036 , yang menunjukkan kecenderungan penurunan nilai F_u seiring meningkatnya nilai HL dengan asumsi variabel lain konstan. Variabel HV memiliki koefisien positif sebesar 0.544, yang mengindikasikan adanya hubungan positif antara kekerasan Vickers dan kekuatan tarik maksimum material. Sementara itu, koefisien regresi variabel T bernilai -0.824 , yang menunjukkan kecenderungan penurunan F_u seiring meningkatnya nilai T.

1. Uji Signifikansi Statistik dan Kualitas Model

Untuk mengetahui apakah pengaruh masing-masing variabel tersebut bermakna secara statistik, dilakukan uji signifikansi menggunakan uji t dan p-value, yang hasilnya disajikan pada tabel hasil uji signifikansi. Tabel hasil analisis regresi multivariat dan uji signifikansi variabel dapat dilihat pada Tabel 5.17 berikut.

Tabel 5. 17 Tabel Uji Signifikansi t-statistik dan p-value

No	Vriabel Bebas	Koefisien Regresi	Arah Pengaruh	t-statistik	p-value	keterangan
1	Konstanta	408.74	-	-	-	Nilai dasar model regresi
2	HL	-0.036	Negatif	-0.403	0.688	> 0.05 Tidak signifikan
3	HV	0.544	Positif	3.155	0.0018	Signifikan
4	T	-0.824	Negatif	-0.719	0.472	> 0.05 Tidak signifikan

Koefisien regresi menunjukkan arah dan besarnya perubahan nilai F_u akibat perubahan satu satuan variabel bebas dengan asumsi variabel lain tetap konstan. Arah pengaruh ditunjukkan oleh tanda koefisien, di mana nilai positif menandakan hubungan searah, sedangkan nilai negatif menunjukkan hubungan berlawanan arah. Namun demikian, besarnya koefisien saja belum cukup untuk menyimpulkan apakah suatu variabel benar-benar berpengaruh terhadap F_u , sehingga diperlukan pengujian signifikansi statistik. Variabel kekerasan Leeb (HL) memiliki koefisien regresi sebesar $-0,036$ dengan arah pengaruh negatif, yang mengindikasikan bahwa peningkatan nilai HL cenderung diikuti oleh penurunan nilai F_u . Namun, nilai t-statistik sebesar $-0,403$ dengan p-value sebesar $0,688$ (lebih besar dari $0,05$) menunjukkan bahwa pengaruh HL terhadap F_u tidak signifikan secara statistik. Hal ini berarti bahwa secara parsial, perubahan nilai HL tidak memberikan kontribusi yang berarti terhadap variasi kekuatan tarik maksimum dalam model regresi yang digunakan.

Sebaliknya, variabel kekerasan Vickers (HV) menunjukkan koefisien regresi positif sebesar $0,544$, yang mengindikasikan bahwa peningkatan nilai HV berkaitan dengan peningkatan kekuatan tarik maksimum material. Nilai t-statistik sebesar $3,155$ dan p-value sebesar $0,0018$ (lebih kecil dari $0,05$) menegaskan bahwa pengaruh HV terhadap F_u signifikan secara statistik. Dengan demikian, HV dapat dianggap sebagai variabel yang berkontribusi nyata dalam menjelaskan variasi kekuatan tarik maksimum pada model regresi ini. Parameter T memiliki koefisien regresi sebesar $-0,824$ dengan arah pengaruh negatif. Namun, nilai t-statistik sebesar $-0,719$ dan p-value sebesar $0,472$ (lebih besar dari $0,05$) menunjukkan bahwa pengaruh parameter T terhadap F_u tidak signifikan secara statistik. Hal ini mengindikasikan bahwa, dalam rentang data pengujian yang digunakan, parameter T tidak memiliki pengaruh langsung yang dominan terhadap kekuatan tarik maksimum material.

Secara keseluruhan, hasil uji t-statistik pada Tabel 5.17 menunjukkan bahwa dari ketiga variabel bebas yang dianalisis, hanya kekerasan Vickers

(HV) yang berpengaruh signifikan secara parsial terhadap kekuatan tarik maksimum (F_u). Sementara itu, variabel HL dan T tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan secara statistik, sehingga kontribusinya terhadap perubahan F_u relatif terbatas dalam model regresi multivariat ini. Untuk menilai kelayakan dan kinerja model regresi linier multivariat yang dibangun, dilakukan evaluasi model secara global menggunakan beberapa parameter statistik. Evaluasi ini mencakup uji signifikansi model secara keseluruhan melalui uji F dan nilai p-value, serta pengukuran kemampuan model dalam menjelaskan variasi data dan tingkat ketepatan prediksi melalui koefisien determinasi (R^2) dan *Root Mean Square Error* (RMSE). Hasil uji F-statistik dan kualitas model dapat dilihat pada Tabel 5.18 berikut ini.

Tabel 5. 18 Hasil uji F-statistik dan Prediksi Model

No	Parameter Statistik	Nilai	Kriteria Evaluasi	Interpretasi
1	F-statistik	11.62	$p < 0.05$	Model signifikan
2	p-value	$\ll 0.001$	$p < 0.05$	Model layak digunakan
3	R^2	0.141	$0 \leq R^2 \leq 1$	Daya jelaskan model sangat rendah
4	RMSE	22.1 MPa	Semakin kecil semakin baik	<i>Error</i> prediksi model

Berdasarkan hasil uji F, diperoleh nilai F-statistik sebesar 11.62 dengan nilai p-value yang jauh lebih kecil dari 0.05. Hasil ini menunjukkan bahwa model regresi secara keseluruhan signifikan secara statistik, yang berarti kombinasi variabel HL, HV, dan T secara simultan memiliki pengaruh terhadap F_u . Dengan demikian, model yang dibangun dapat dinyatakan layak digunakan untuk analisis lebih lanjut karena kecil kemungkinan hubungan yang diperoleh terjadi secara kebetulan.

Nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.141 menunjukkan bahwa model regresi mampu menjelaskan sekitar 14.1% variasi nilai kekuatan tarik

maksimum (F_u). Nilai R^2 yang sangat rendah (0,00-0,19) mengindikasikan bahwa meskipun model signifikan secara statistik, sebagian besar variasi F_u masih dipengaruhi oleh faktor lain di luar variabel yang dimasukkan dalam model. Kondisi ini umum terjadi pada penelitian material, di mana sifat mekanik dipengaruhi oleh banyak parameter mikrostruktur dan kondisi pengujian yang tidak seluruhnya terakomodasi dalam model regresi linier sederhana. Selain itu, nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 22.1 MPa menggambarkan besarnya deviasi rata-rata antara nilai F_u hasil prediksi model dan nilai F_u hasil pengujian aktual. Nilai RMSE ini memberikan ukuran ketelitian model dalam melakukan prediksi, di mana semakin kecil nilai RMSE maka semakin baik ketepatan model. Dalam konteks ini, RMSE menunjukkan bahwa meskipun model signifikan, tingkat kesalahan prediksi masih relatif cukup besar, sejalan dengan nilai R^2 yang sangat rendah.

Berdasarkan hasil analisis regresi linier multivariat yang menghubungkan kekuatan tarik maksimum (F_u) dengan kekerasan Leeb (HL), kekerasan Vickers (HV), dan parameter T, dapat dilakukan interpretasi fisik terhadap peran masing-masing variabel dalam merepresentasikan perilaku mekanik material. Hasil uji signifikansi parsial menunjukkan bahwa hanya variabel kekerasan Vickers (HV) yang berpengaruh signifikan terhadap F_u , sedangkan variabel HL dan T tidak signifikan secara statistik. Dominannya pengaruh HV mengindikasikan bahwa kekerasan Vickers merupakan parameter yang paling representatif dalam menjelaskan variasi kekuatan tarik maksimum material.

Sebaliknya, variabel kekerasan Leeb (HL) tidak menunjukkan pengaruh signifikan meskipun secara konseptual sama-sama merepresentasikan kekerasan material. Kondisi ini dapat dijelaskan oleh adanya multikolinearitas antara HL dan HV. Multikolinearitas terjadi ketika dua atau lebih variabel bebas dalam model regresi memiliki hubungan linier yang kuat satu sama lain, sehingga informasi yang dibawa oleh variabel-variabel tersebut menjadi saling tumpang tindih. Akibatnya, ketika HV sudah dimasukkan ke dalam model, kontribusi tambahan dari HL menjadi tidak

signifikan secara statistik, meskipun secara fisik HL tetap berkaitan dengan sifat kekerasan material. Secara matematis, multikolinearitas dapat diidentifikasi melalui koefisien korelasi Pearson antar variabel bebas atau melalui Variance Inflation Factor (VIF). Koefisien korelasi Pearson antara 2 variabel bebas HL dan HV dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$r_{HL,HV} = \frac{\sum(HL_i - \bar{HL})(HV_i - \bar{HV})}{\sqrt{\sum(HL_i - \bar{HL})^2 \sum(HV_i - \bar{HV})^2}} \quad (5-29)$$

Di mana :

HL_i = kekerasan leeb ke-i

HV_i = Kekerasan Vickers ke-i

\bar{HL} = Rata-rata kekerasan leeb

\bar{HV} = Rata-rata kekerasan vickers

Dari persamaan tersebut menghasilkan nilai $|r|$ yang mendekati 1 menunjukkan adanya hubungan linier yang kuat. Dalam penelitian ini, nilai korelasi sebesar 0,88 mengindikasikan multikolinearitas yang tinggi, sehingga secara statistik menyebabkan koefisien HL menjadi tidak signifikan ketika HV telah mewakili informasi kekerasan material dalam model. Parameter T juga tidak menunjukkan pengaruh signifikan terhadap F_u , yang mengindikasikan bahwa dalam rentang data dan kondisi pengujian yang digunakan, parameter tersebut tidak memiliki pengaruh langsung yang dominan terhadap kekuatan tarik maksimum. Hal ini dapat terjadi apabila pengaruh T terhadap F_u bersifat tidak langsung atau telah terakomodasi melalui perubahan sifat kekerasan material.

5.4.5. Perbandingan dan Evaluasi Kinerja Model Regresi

Untuk menentukan model yang paling sesuai dalam memprediksi kuat tarik maksimum, dilakukan perbandingan kinerja antara model regresi linier sederhana, model regresi nonlinier, dan model regresi multivariat. Evaluasi kinerja model dilakukan berdasarkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebagai indikator kemampuan penjelasan variasi data, serta *Root Mean Square Error* (RMSE)

sebagai ukuran tingkat kesalahan prediksi. Hasil perbandingan kinerja masing-masing model regresi disajikan pada Tabel 5.19 berikut ini.

Tabel 5. 19 Perbandingan Kualitas Model Regresi

No	Model Regresi	R ²	RMSE (MPa)	Interpretasi Statistik	Keterangan
1	Regresi Linier (HL)	0.1	22.63	Daya jelaskan rendah, galat prediksi relatif besar	Model <i>Baseline</i>
2	Regresi Non-linier (<i>Quadratic</i>)	0.245	20.73	R ² meningkat dan RMSE menurun signifikan	Fit terbaik secara numerik, namun beresiko <i>overfitting</i>
3	Regresi Multivariat Linier	0.141	22.12	Sedikit lebih akurat dibanding regresi linier	Dapat menjadi model alternatif apabila model kuadratik mengalami <i>overfitting</i>

Berdasarkan Tabel 5.19, Model regresi linear sederhana dengan parameter HL digunakan sebagai *baseline* model. Model ini menghasilkan nilai R² sebesar 0,1 dan RMSE sebesar 22,63. Nilai R² tersebut menunjukkan bahwa model hanya mampu menjelaskan sekitar 10% variasi data dan termasuk dalam kategori sangat rendah (0,00-0,19) berdasarkan interpretasi koefisien determinasi. sementara nilai RMSE yang relatif besar mengindikasikan tingkat kesalahan prediksi yang masih tinggi. Oleh karena itu, model ini berfungsi sebagai pembanding awal untuk mengevaluasi peningkatan kinerja model yang lebih kompleks.

Model regresi nonlinier kuadratik menunjukkan peningkatan kinerja dibandingkan model linier dengan nilai R² sebesar 0,245 dan RMSE sebesar 20,73. Meskipun terjadi peningkatan R² disertai penurunan RMSE, nilai R² tersebut hanya mampu menjelaskan sekitar 24,5% variasi data, sehingga berdasarkan kategori interpretasi koefisien determinasi termasuk dalam tingkat hubungan rendah (0,20–0,39). Hal ini menunjukkan bahwa model belum memiliki kemampuan penjelasan

yang kuat terhadap variasi kuat tarik. Selain itu, Penggunaan model polinomial berorde lebih tinggi berisiko mengalami *overfitting*, terutama jika jumlah data terbatas. Kondisi ini dapat menyebabkan model bekerja baik pada data pelatihan, tetapi kurang akurat ketika diterapkan pada data baru dengan rentang berbeda. Oleh karena itu, meskipun model kuadratik menunjukkan kinerja relatif lebih baik, penggunaannya tetap terbatas pada rentang data yang serupa dengan data penelitian.

Model regresi linear multivariat menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,141 dan RMSE sebesar 22,12. Nilai R^2 tersebut menunjukkan bahwa model hanya mampu menjelaskan sekitar 14,1% variasi data dan termasuk dalam kategori sangat rendah (0,00-0,19) berdasarkan interpretasi koefisien determinasi. Meskipun model ini menggunakan lebih dari satu variabel sehingga pengaruhnya lebih lengkap, hasilnya tetap lebih rendah dibandingkan model regresi nonlinier kuadratik, sehingga model ini tidak menjadi kandidat utama untuk digunakan.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, model nonlinier kuadratik dipilih menjadi model yang terbaik, meskipun apabila rentang data uji terlalu lebar model berpotensi mengalami *overfitting*. Meski begitu model nonlinier kuadratik tetap layak digunakan karena *range* data kuat leleh dan kuat tarik baja tidak selebar data material konstruksi yang lain. Demikian perlu diberikan penjelasan lebih lanjut terkait karakteristik *cluster* data material baja yang digunakan.

Secara umum, setiap kelas baja memiliki rentang nilai sifat mekanik yang berbeda-beda. Baja tidak berada dalam satu distribusi nilai yang sangat lebar, melainkan terbagi dalam beberapa kelompok (*cluster*) berdasarkan jenis dan kelasnya. Perbedaan ini dipengaruhi oleh komposisi kimia, proses produksi, serta standar mutu yang digunakan, berikut ini pengelompokan baja berdasarkan jenis dan kelasnya.

1. Baja struktural *hot-rolled* profil (*Wide Flange, Channel Section, Angle Section, T-Section, Flat Bar, Steel Plate*)

Berdasarkan standar seperti ASTM International ASTM A36 dan ASTM A992, serta EN 10025 (S235–S355), baja struktural *hot-rolled* umumnya memiliki:

- a. Kuat leleh (F_y) sekitar 235–355 MPa

- b. Kuat tarik (F_u) sekitar 360–630 MPa
2. Baja tulangan beton (*Rebar*)
Berdasarkan ASTM International ASTM A615 dan Badan Standardisasi Nasional melalui SNI 2052, baja tulangan memiliki:
 - a. Kuat leleh sekitar 280–520 MPa (tergantung kelas BjTP/BjTS)
 - b. Kuat tarik minimum sekitar 420–805 MPa
3. Baja mutu tinggi (*High Strength Steel*)
Pada baja mutu tinggi struktural (misalnya ASTM A572 Grade 50 atau setara)
 - a. kuat leleh dapat mencapai ≥ 345 MPa dan
 - b. kuat tarik dapat melebihi 450–620 MPa

Dari uraian tersebut terlihat bahwa masing-masing jenis baja memiliki rentang nilai mekanik yang relatif terkonsentrasi dalam kelompoknya sendiri. Dengan kata lain, data penelitian secara alami membentuk cluster berdasarkan kelas baja. Rentang nilai dalam satu cluster relatif tidak terlalu lebar dibandingkan jika seluruh jenis baja digabungkan dalam satu populasi besar. Model bekerja optimal pada rentang data yang homogen dan tidak terlalu menyebar. Apabila rentang data diperluas secara signifikan dengan menggabungkan berbagai jenis baja yang berbeda kelas dan proses produksinya, maka terdapat potensi terjadinya *overfitting* atau penurunan akurasi prediksi karena perbedaan karakteristik mekanis antar *cluster*.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Hasil pengujian baja menggunakan metode *non-destructive testing* dengan alat *leeb hardness tester type D* adalah sebagai berikut.
 - a. Parameter Leeb hardness (HL) dilakukan pada 249 luasan uji pada profil baja IWF 200×100 , IWF 150×75 dan UNP 100×50 , di mana seluruh luasan uji berhasil terbaca. Dan seluruh titik luasan uji memenuhi syarat dari ketentuan *leeb hardness tester*.
 - b. Konversi hasil pengujian HL ke kekerasan Vickers (HV) menggunakan alat dan benda uji yang sama menghasilkan 233 luasan uji yang terbaca, sedangkan 16 luasan uji tidak terbaca karena berada di bawah batas minimum pembacaan HV (83 HV), yaitu pada profil UNP 100×50 di bagian *web*. Secara umum, pengujian NDT berbasis *Leeb hardness* efektif untuk evaluasi kekerasan logam secara non-destruktif, dengan hasil konversi HV yang perlu diperhatikan sesuai keterbatasan rentang alat.
2. Dari hasil analisis regresi ditemukan hubungan korelasi antara kuat tarik dengan variabel bebas adalah sebagai berikut.
 - a. Model regresi linear sederhana (HL–Fu) menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,1 dan RMSE sebesar 22,63. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model hanya mampu menjelaskan sekitar 10% variasi data dan termasuk dalam kategori sangat rendah, dengan tingkat kesalahan prediksi yang relatif tinggi. Oleh karena itu, model ini digunakan sebagai baseline untuk membandingkan peningkatan kinerja model lainnya.
 - b. Model regresi nonlinier kuadratik (HL–Fu) menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,245 dan RMSE sebesar 20,73. Nilai R^2 ini termasuk dalam

kategori rendah dan menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan sekitar 24,5% variasi data. Meskipun kemampuan penjelasannya belum kuat, model ini menunjukkan peningkatan kinerja dibandingkan model linear sederhana maupun linear multivariat, ditinjau dari kenaikan R^2 dan penurunan RMSE. Namun demikian, penggunaan model polinomial berorde lebih tinggi memiliki potensi risiko *overfitting*.

- c. Model regresi linear multivariat (HL, HV, T–Fu) menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,141 dan RMSE sebesar 22,12. Nilai R^2 tersebut termasuk dalam kategori sangat rendah dan menunjukkan bahwa model hanya mampu menjelaskan sekitar 14,1% variasi data. Meskipun model ini melibatkan lebih dari satu variabel bebas, peningkatan kinerja yang dihasilkan masih terbatas dan tetap berada di bawah model nonlinier kuadratik.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan yang telah diidentifikasi, beberapa saran dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya dan pengembangan di bidang teknik sipil.

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan parameter yang berkaitan dengan kondisi fisik dan geometri spesimen, seperti diameter baja tulangan, tebal selimut beton (*concrete cover*), serta lokasi pengujian kekerasan pada elemen struktur. Penambahan parameter ini diharapkan dapat meningkatkan kemampuan model dalam merepresentasikan kondisi aktual material dan mengurangi variasi data yang tidak terjelaskan dalam analisis regresi.
2. Disarankan untuk memisahkan data pengujian berdasarkan daerah material, khususnya antara bagian *web* dan *flange*. Perbedaan proses deformasi plastis, distribusi tegangan, serta karakteristik mikrostruktur pada masing-masing daerah berpotensi menghasilkan respons mekanik yang berbeda. Pemisahan ini diharapkan dapat menghasilkan model yang lebih spesifik dan

meningkatkan konsistensi hubungan antara parameter kekerasan dan kuat tarik maksimum.

3. Untuk mengatasi potensi multikolinearitas antar variabel kekerasan, penelitian lanjutan disarankan menggunakan metode Principal Component Analysis (PCA). Metode ini dapat mereduksi jumlah variabel menjadi beberapa komponen utama yang saling independen, sehingga model regresi yang dibangun menjadi lebih stabil dan interpretasi statistiknya lebih andal.
4. Selain regresi linier, penelitian selanjutnya dapat menggunakan metode analisis berbasis komputer seperti *Random Forest*. Metode ini mampu mengenali hubungan yang tidak linier dan saling memengaruhi antar variabel tanpa harus menentukan bentuk persamaan terlebih dahulu. Dengan kemampuan tersebut, *Random Forest* berpotensi memberikan prediksi kuat tarik maksimum yang lebih akurat, terutama pada material yang memiliki variasi sifat material yang cukup besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfashinta. 2017. Analisis Tegangan Dan Deformasi Balok Baja *Kantilever Castellated* Dengan Bukaannya Lingkaran Penampang Non-Prismatis Dengan Metode Elemen Hingga (Variasi Diameter Lubang, Jarak Antar Lubang, Dan Panjang Bentang). Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Arifin, E. R., and Hidayanti, N., 2006. Analisis Pengaruh Penggunaan Kolom Baja dan Kolom Komposit terhadap Perilaku Struktur Portal Baja dengan Variasi Tingkat. Universitas Islam Yogyakarta.
- Armanto, H. dan Daryanto, 1999. *Ilmu Bahan*. Jakarta, Bumi Aksara.
- ASTM International, 1993. ASM Handbook vol. 1:329.
- ASTM International, 2019. *Standard Hardness Conversion Tables for Metals*. Designation: E140. United States.
- ASTM International. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. Designation: E8/E8M -13a. United States.
- Aziz, A.M., 2015. Tinjauan Kuat Lentur Balok Beton Bertulang Dengan Tambahan Tulangan Baja Menyalang Pasca Bakar Dengan Berbagai Variasi Waktu. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2017. *Metode uji kekerasan leeb untuk besi dan baja*. SNI 8461:2017. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2017. *Cara Uji Keras dengan Metode Vickers*. SNI 8390:2017. Jakarta.
- Bembenek, M., & Pawlik, J. (2021, November). Analysis of the influence of surface roughness of various types of wood on the results of their hardness measured by the Leeb method. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1199, No. 1, p. 012071). IOP Publishing.
- Bates, D. M., & Watts, D. G. (1988). *Nonlinear regression analysis and its applications* (Vol. 2, pp. 52-60). New York: Wiley.
- Caprili, S., Mattei, F., Mazzatura, I., Ferrari, F., Gammino, M., Mariscotti, M., ... & Piscini, A. 2023. Evaluation of mechanical characteristics of steel bars by non-destructive Vickers micro-hardness tests. *Procedia Structural Integrity*, 44, 886-893.

- Chiumiento, G., Di Lorenzo, G., & Formisano, A. (2019). Leeb hardness experimental tests for mechanical characterization of structural steels. *In XVIII ANIDIS Conference–Seismic Engineering in Italy* (Vol. 15)
- Davis, J. R. (Ed.). 2004. *Tensile Testing*. Asm International.
- Deddy Krisnawan, 2015. Perancangan Rubber Grip Tools Sebagai Alat Bantu Mesin Uji Tarik Di Laboratorium Pengetahuan Bahan Fti-Uajy (Doctoral Dissertation). Universitas Atma jaya.
- Dieter, G. E. 1986. *Metalurgi Mekanik*. Jakarta: erlangga.
- Ding, B., Xiao, N., Zhang, S., & Wang, Y. 2017. Research on NDT technology in inference of steel member strength based on macro/micro model. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017(1), 4393279.
- Draper, N. R., & Smith, H. (1998). *Applied regression analysis* (Vol. 326). John Wiley & Sons.
- Fitria, W. 2018. Korelasi Nilai Kuat Tarik Dan Modulus Elastisitas Baja Dengan Kekerasan Pada Equotip Portable Rockwell Hardness. (Doctoral Dissertation) Universitas Brawijaya.
- Gere, J. M., Timoshenko, S. P., Hardani, W., & Suryoatmono, B. 2000. *Mekanika Bahan*. Erlangga.
- Ghorbani, S., Hoseinie, S. H., Ghasemi, E., & Sherizadeh, T. 2023. Adoption of ASTM A956-06 Leeb hardness testing standard to rock engineering applications. *Construction and Building Materials*, 364, 129886.
- Indarto, D. 2009. Pengaruh Waktu Tahan Proses Hot dipping Baja Karbon Rendah Terhadap Ketebalan Lapisan, Kekuatan Tarik Dan Harga Impak Dengan Bahan Pelapis Aluminium (Doctoral dissertation) Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Irawan, I. 2014. Perilaku Oksidasi Baja Aisi 4130 Pada Temperatur 850° C (Doctoral Dissertation) Fakultas Teknik.
- ISO, 2015. *Metallic materials-leeb hardness*. 16859-1(E). Switzerland.
- ISO, 2015. *Metallic materials-leeb hardness*. 16859-2(E). Switzerland.
- Khamdun, M. 2015. Ketahanan Oksidasi Baja A238 Yang Dilapisi Aluminium Pada Temperatur 750 Oc.

- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2005). *Standardized multiple regression model. Applied linear statistical models*, 5, 271-277.
- Mashudi, Z. A. 2016. Pengaruh sudut Chamfer Satu Sisi dan Burn Of Length Terhadap Kekerasan dan Porositas pada Sambungan Las AL6061-ST41 (Doctoral dissertation, Universitas Brawijaya).
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley & Sons.
- Mulyati 2013. *Mekanika Bahan*. Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Padang.
- Ratkowsky, D. A., & Giles, D. E. (1990). *Handbook of nonlinear regression models* (Vol. 107). New York: M. Dekker.
- Refani, A. N., Alrasyid, H., & Irmawan, M. 2015. Evaluasi Struktur Bangunan Gedung Beton Bertulang Berusia 50 Tahun Berdasarkan SNI 1726 2012 dan SNI 2847 2013. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 13(2), 17-26.
- Simbolon, L. N. S., 2021. Evaluasi Kinerja Bangunan Gedung Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. *Jurnal Manajemen Aset Infrastruktur & Fasilitas*, 5(2).
- Seber, G. A., & Wild, C. J. (2003). *Nonlinear regression*. Hoboken. New Jersey: John Wiley & Sons, 62(63), 1238.
- Sugiyono (2016). *Metode penelitian kuantitatif kualitatif dan R&D*. Alfabeta, Bandung.
- Suseno, H. 2010. *Bahan Bangunan Untuk Teknik Sipil*. Malang: Bargie Media.
- Syasko, V., & Nikazov, A. 2021. Research and development of metrological assurance elements for Leeb hardness measurements. *Inventions*, 6(4), 86.
- Umanskii, A., Gogolinskii, K., Syasko, V., & Golev, A. 2022. *Modification of the Leeb impact device for measuring hardness by the dynamic instrumented indentation method. Inventions*, 7(1), 29.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probability & statistics for engineers & scientists*. Prentice Hall.
- Wibowo, Y. S., Salahudin, X., & Pramono, C. 2023. Analisis Hasil Uji Tarik Pada Sambungan Las Shield Metal Arc Welding (Smaw) Dengan Variasi Ketebalan Baja Mild Steel. ULIL ALBAB: *Jurnal Ilmiah Multidisiplin*, 2(7), 2796-2800.

- Widnyana, I. 2022. Analisa Pengaruh Penggunaan Arus *Electromagnetic Stirring* Terhadap Laju Erosi *Submerged Entry Nozzle* Pada Proses *Continuous Casting Machine* (Doctoral dissertation) ITN MALANG.
- Wirotama, I, N, G., 2018. Korelasi Nilai Kuat Tekan Beton Dengan Menggunakan *Non- Destructive Test* Dan *Destructive Test*. *Tugas Akhir*. Universitas Brawijaya, Malang.
- Wiryo Sumarto, Harsono dan Okumura, T. 2004. *Teknologi Pengelasan Logam*. Cetakan 9 Penerbit Pradnya Paramita. Jakarta.
- Wooldridge, J. M. (2018). *Introductory Econometrics* . Cengage Learnin

LAMPIRAN

Lampiran 1 Benda Uji

1. IWF 200 x 100 daerah *web*



2. IWF 200 x 100 daerah *flange* bagian 1



3. IWF 200 x 100 daerah *flange* bagian 2



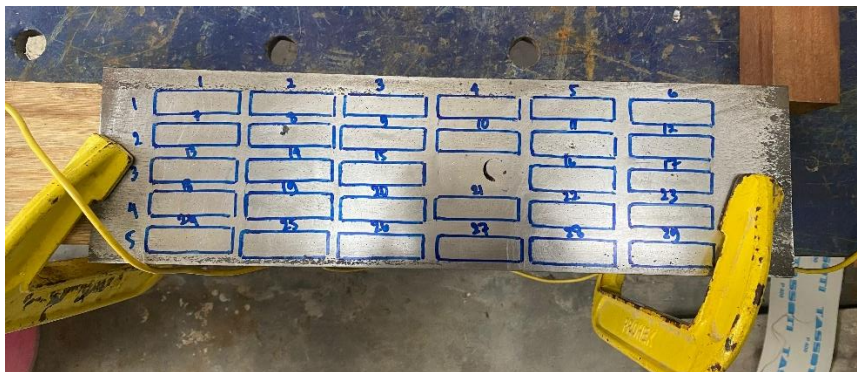
4. IWF 150 x 75 daerah *web*



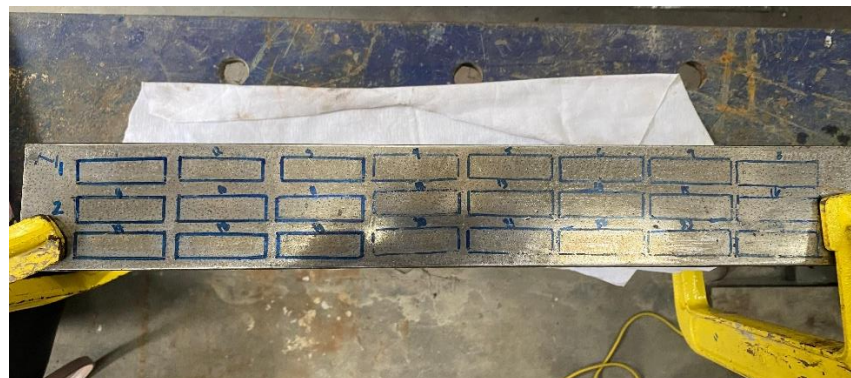
5. IWF 150 x 75 daerah *flange*



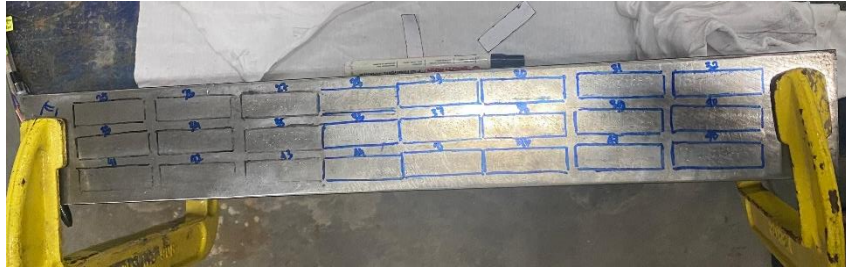
6. UNP 100 x 50 daerah *web*



7. UNP 100 x 50 daerah *flange* bagian 1



8. UNP 100 x 50 daerah *flange* bagian 2



Lampiran 2 Data Uji Tarik

1. Data uji tarik daerah web



LABORATORIUM BAHAN KONSTRUKSI TEKNIK
 JURUSAN TEKNIK SIPIL
 FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
 UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
 Kampus Jalan Kaliurang Km. 14.4 Yogyakarta. Telp. (0274) 368471, 366472 eks. 3250 email: lab.bkt@uii.ac.id

DATA UJI TARIK PLAT BAJA IWF dan UNP bagian web

Nomor : /Ka.Lab./01/LBKT/ /

Pengirim :

Instansi :

Pekerjaan :

Lokasi : Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik

Nomor Order :

Tanggal Order :

Diuji tanggal : 06 - 08 - 2025

NO	Lebar Benda uji (L ₀) mm	Tebal Benda uji (T ₀) mm	Luas mm ²	Panjang awal (P ₀) mm	Panjang akhir (P ₁) mm	Lebar Benda uji (L ₁) mm	Tebal Benda uji (T ₁) mm	Beban leleh Kgf	Tegangan leleh Kg/mm ²	Beban maksimal Kgf	Kuat tarik Kg/mm ²	Perpanjangan %	Reduksi %	Keterangan/ Kode
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
1	40,20	5,20		220,70	268,40	32,50	3,50	7025		9010				S1 IWF 200x100
2	40,80	5,20		220,50	258,60	32,70	4,70	9050		10885				S2 IWF 200x100
3	40,00	5,30		220,60	273,20	32,00	3,60	8025		9075				S3 IWF 200x100
4	40,00	5,20		210,80	240,20	32,05	3,60	8400		9555				S1 IWF 150x75
5	40,20	5,30		212,00	240,20	32,00	3,60	8400		9555				S2 IWF 150x75
6	40,20	5,30		212,00	250,00	32,20	3,50	8175		9450				S3 IWF 150x75
7	40,00	4,60		218,20	244,70	33,60	3,30	7050		9525				S1 UNP 100x50
8	41,10	4,90		222,20	268,40	31,60	3,20	7050		9710				S2 UNP 100x50
9	40,80	4,40		217,80	252,70	32,00	3,70	7155		9525				S3 UNP 100x50

Keterangan :

Yogyakarta

CS - Dipindai dengan Scanner

Lampiran 3 Data Uji Tarik Daerah Web

2. Data uji tarik daerah flange



LABORATORIUM BAHAN KONSTRUKSI TEKNIK
 JURUSAN TEKNIK SIPIL
 FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
 UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
 Kampus : Jalan Kaliurang Km 14.4 Yogyakarta Telp. +02741896471, 896472 eks. 3250 email : lab.bkt@uii.ac.id

DATA UJI TARIK PLAT BAJA lwf dan UMP bagian Flange

Nomor : / Ka.Lab. / 01 / LBKT / /

Pengirim :
 Instansi :
 Pekerjaan :
 Lokasi : Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik

Nomor Order :
 Tanggal Order :
 Diuji tanggal : 11-08-2025

NO	Lebar Benda uji (L ₀) mm	Tebal Benda uji (T ₀) mm	Luas mm ²	Pajang awal (P ₀) mm	Panjang akhir (P ₁) mm	Lebar Benda uji (L ₁) mm	Tebal Benda uji (T ₁) mm	Beban leleh Kg	Tegangan leleh Kg/mm ²	Beban maksimal Kg	Kuat tarik Kg/mm ²	Perpanjangan %	Reduksi %	Keterangan/ Kode
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
	13,20	7,00		40,70	64,40	8,30	5,00	3520	415	4645				S1 lwf 200x100
	13,00	7,70		40,70	61,00	8,00	4,30	3370	380	4500				S2 lwf 200x100
	12,80	7,90		47,40	61,20	8,30	4,40	3500	415	4500				S3 lwf 200x100
	13,30	6,60		47,60	62,10	8,00	3,80	3100	375	3860				S1 lwf 150x75
	12,70	7,00		48,20	61,60	8,20	4,20	3040	370	3860				S2 lwf 150x75
	13,50	6,00		48,00	58,80	8,20	4,20	3205	390	4170				S3 lwf 150x75
	13,20	5,60		47,50	57,70	8,50	4,00	3630	425	3640				S1 UMP 100x50
	12,70	5,30		45,30	54,50	8,30	4,10	3415	405	3415				S2 UMP 100x50
	13,10	5,70		45,00	56,10	8,70	4,20	2720	310	3800				S3 UMP 100x50

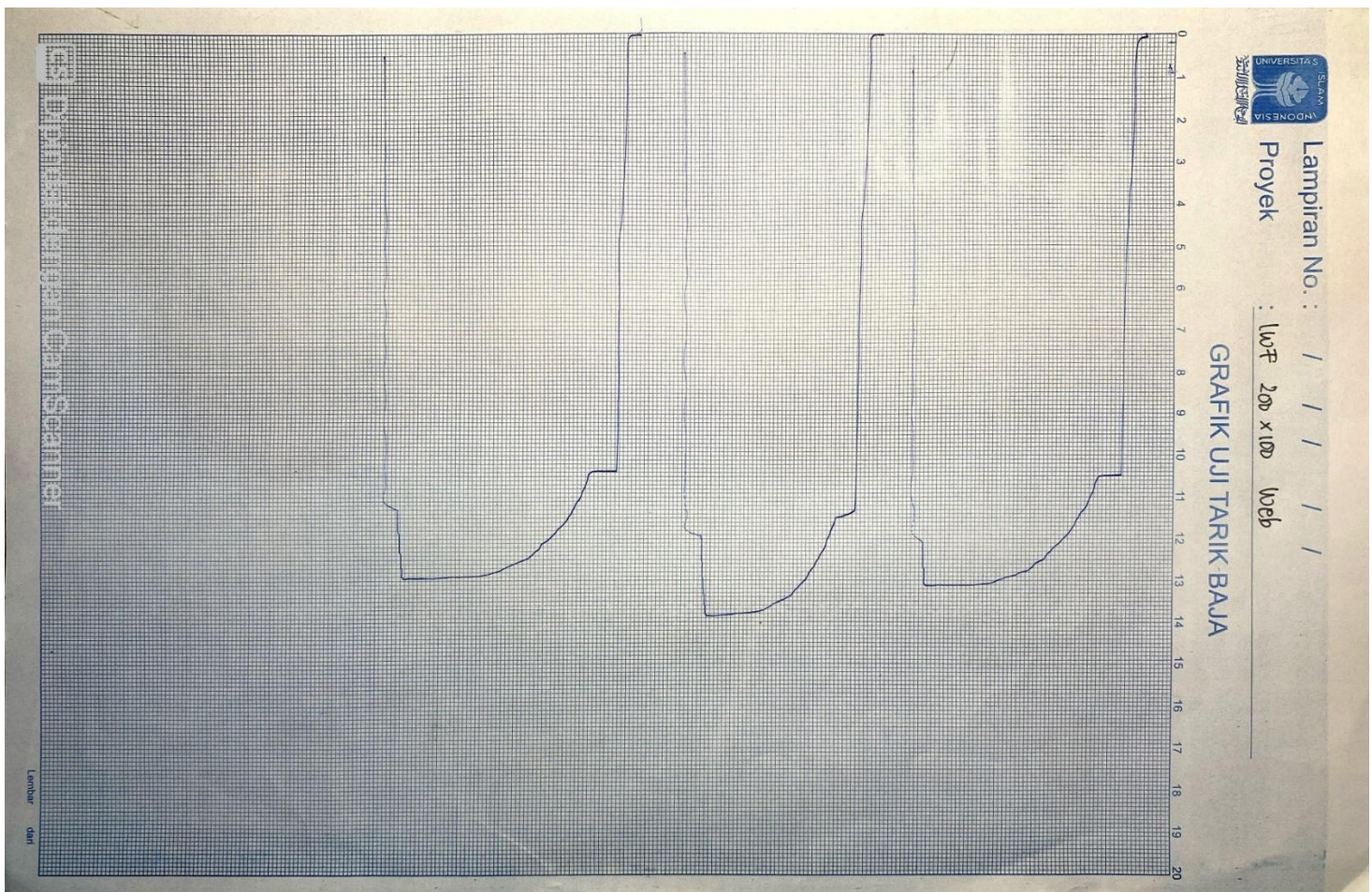
Keterangan :

Yogyakarta

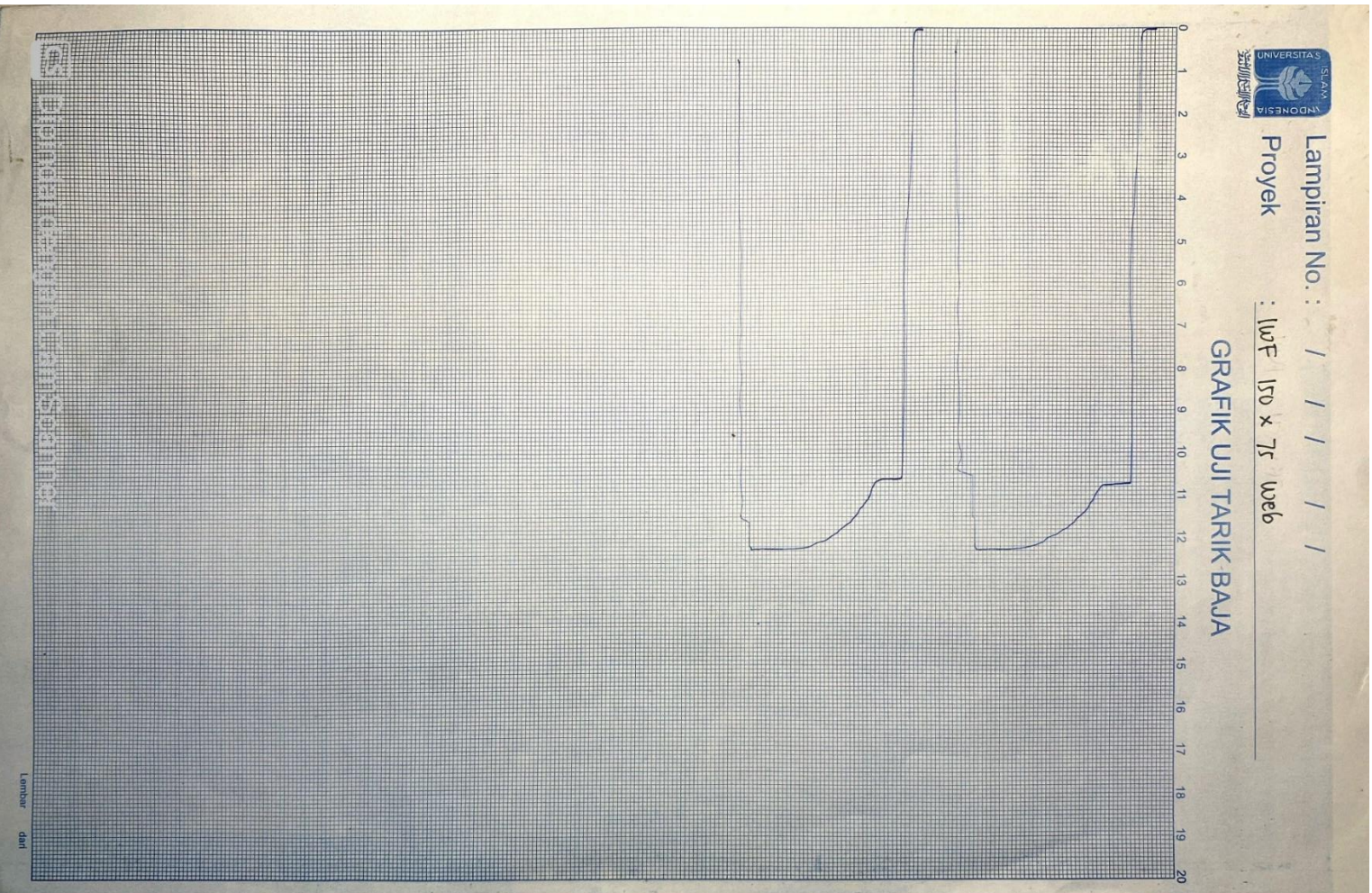
CS-Dipindai dengan Scanner

Lampiran 4 Grafik Uji Tarik Baja

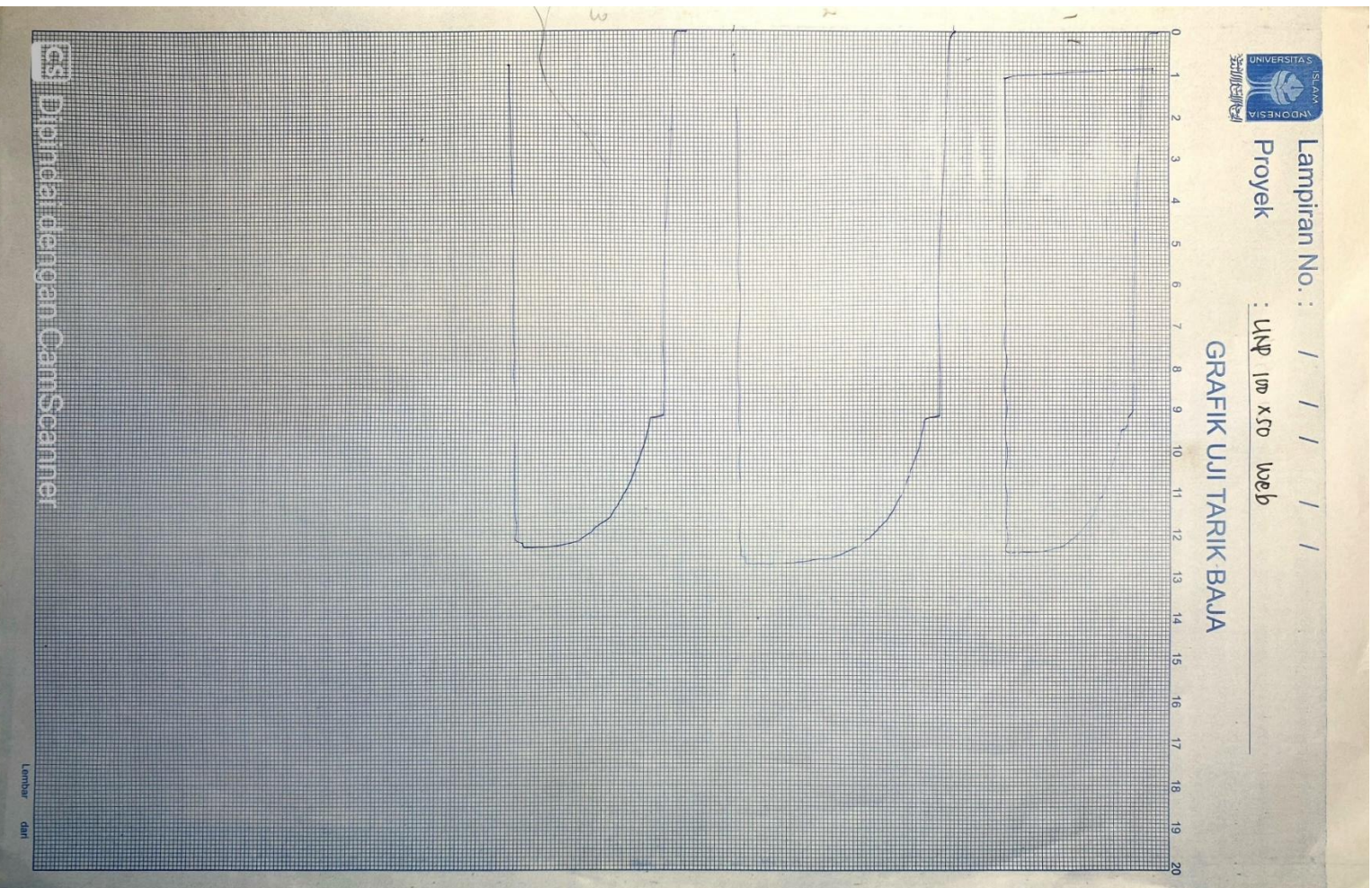
1. Grafik uji tarik baja IWF 200 x 100 web



2. Grafik uji tarik baja IWF 150 x 75 web



3. Grafik uji tarik baja UNP 100 x 50 web



4. Grafik uji tarik baja IWF 200 x 100, IWF 150 x 75 dan UNP 100 x 50 flange

