

SKRIPSI

**EVALUASI MIKROSTRUKTUR BAJA TULANGAN
TERHADAP SIFAT MEKANIS**

*Evaluation of Reinforcing Steel Microstructure on
Mechanical Properties*

Disusun dan diajukan oleh:

**NURUL ANNISA RAHMAWAN
D011 20 1107**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

EVALUASI MIKROSTRUKTUR BAJA TULANGAN TERHADAP SIFAT MEKANIS

Disusun dan diajukan oleh

NURUL ANNISA RAHMAWAN
D011 20 1107

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, MEng
NIP: 196805292002121002

Menyetujui,
Pembimbing Utama,



Prof. Dr. Eng. Ir. Rudy Djamaluddin, ST, MEng, IPU
NIP: 197011081994121001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Nurul Annisa Rahmawan

NIM : D011201107

Program Studi : Teknik Sipil

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul :

{ Evaluasi Mikrostruktur Baja Tulangan Terhadap Sifat Mekanis }

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 2 Agustus 2024

Yang Menyatakan



Nurul Annisa Rahmawan

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa, atas segala kebaikan dan karunia-Nya kepada setiap insan intelektual, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tak lupa sholawat serta salam kepada baginda Rasulullah Muhammad SAW sebaik-baiknya suri tauladan. Penyusunan tugas akhir yang berjudul **“EVALUASI MIKROSTRUKTUR BAJA TULANGAN TERHADAP SIFAT MEKANIS”** merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa terselesaikannya Tugas Akhir ini tidak hanya dari penulis sendiri melainkan berkat ilmu, arahan, bimbingan serta bantuan dari berbagi pihak. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. **Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. H. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T.,IPM** selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. **Bapak Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge S.T., M.Eng., dan Dr. Eng. Bambang Bakri, ST., MT.** selaku Ketua dan Sekretaris Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. **Bapak Prof Dr. Eng. Rudy Djamaluddin, S.T., M.Eng.,** selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan penulis dari awal penelitian hingga selesainya tugas akhir ini. Semoga kebaikan, kesehatan serta kemudahan senantiasa dilimpahkan kepada beliau.
4. **Ibu Prof. Dr. Eng. Rita Irmawaty, ST., MT., dan Bapak Dr. Eng. Fakhrudin, ST, M.Eng.,** selaku dosen Laboratorium Riset Rekayasa & Perkuatan Struktur yang senantiasa turut meluangkan waktunya untuk memberikan masukan kepada penulis hingga selesainya penelitian ini.
5. Seluruh dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

6. Seluruh staf dan karyawan Departemen Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staf Laboratorium dan asisten Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Dan yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu ayahanda **Drs. Ramlan** dan ibunda **Dra. Marwah** atas semua kasih sayang yang begitu tulus dan doa yang tiada henti serta nasehat-nasehat yang selalu melekat pada penulis setiap waktu. Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan kalian.
2. **Surahmat Rahmawan S.Pd, Afiat Mufasir Rahmawan S.Pd, Tri Hardiyanty Rahmawan S.K.M., M.Kes, dan Ummu Khaerat Rahmawan S.K.M., M.KKK** sebagai saudara tercinta yang selalu memberikan tunjangan serta dukungan dalam hidup penulis. Kepada **Yuni Andilla S.Pd, Rismawati A.Md.Farm, dan Rahmat Amirul Salam S.Pd** sebagai saudara ipar tercinta yang telah turut memberikan nasehat kepada penulis. Terakhir kepada **Sitti Aminah S.E** yang telah memberikan dukungan moral maupun materi sehingga penulis bisa tetap bersemangat.
3. Kepada keponakan tersayang **Andi Ashima Dinillah Rahmawan, Andi Alesha Nurtaqiyah Rahmawan, Andi Arumi Syakhira Rahmat, dan Andi Muhammad Abrar Rahmawan** yang telah memberikan semangat dan menghibur penulis selama ini.
4. Ibu **Waode Amala Rabia Malim S.T., M.T** selaku rekan TA yang senantiasa memberikan masukan dan semangat dalam penyelesaian tugas akhir.
5. Sahabat seperjuangan penulis di masa perkuliahan **Puput S.T., Dhafiyah S.T., Aswar S.T., Mayo, Fanny S.T, Marcel, Dika S.T, Nushrah, Ilham, Afdhal, Acel, Gloria S.T., Syahdi, dan Farid S.T** yang selalu menemani, menyemangati, menghibur, memberikan warna yang indah, dan selalu memberikan dorongan serta bantuan selama perkuliahan.
6. Terima kasih kepada laboran dan asisten **Hasan S.T., Herli, Fadhil, Valdo S.T, Mita S.T., Syawal S.T, Anjas, Angel, Fajrul, Ammar, dan Ibrah** sebagai keluarga asisten di Laboratorium Struktur dan Bahan yang sangat turut

membantu dan mendengar keluh kesah penulis mulai dari penelitian hingga proses penulisan tugas akhir ini.

7. Teman-teman berdiskusi dan sepejuangan di Laboratorium Riset Rekayasa & Perkuatan Struktur yang telah menghidupkan suasana mukim perkuatan serta membuat penulisan tugas akhir ini menyenangkan **Fadli S.T, Farhan S.T, Tasim S.T, Sarjan S.T, Enal, Mali S.T, Raiza, dan Ica**.
8. **Nadila S.Gz., Wilda S.KM, Radha S.E., Aulia S.Si., Iffa, Dinara S.Sos., Tirza,** dan **Diva** sebagai sahabat penulis. Terima kasih untuk selalu ada kebersamaan di kala suka dan duka penulis.
9. Saudara-saudari **ENTITAS 2021** yang memberikan begitu banyak warna dan pengalaman yang sangat berharga.
10. Terakhir, **Nurul Annisa Rahmawan**, ya! Diri saya sendiri. Apresiasi karena telah mampu berusaha keras dan berjuang sejauh ini, mampu mengendalikan diri dari berbagai tekanan diluar keadaan dan tak pernah memutuskan menyerah sesulit apapun proses penyusunan skripsi ini dengan menyelesaikan sebaik dan semaksimal mungkin, serta senantiasa menikmati setiap prosesnya. Terima kasih sudah bertahan.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kekurangan, oleh karena itu mengharapkan kepada pembaca kiranya dapat memberi sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini.

Akhir kata semoga Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa melimpahkan kebaikan dan karunia-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa, Juli 2024

Nurul Annisa Rahmawan

ABSTRAK

NURUL ANNISA RAHMAWAN. *Evaluasi Mikrostruktur Baja Tulangan Terhadap Sifat Mekanis* (dibimbing oleh Prof. Dr. Eng. Rudy Djamaluddin, S.T., M.Eng.)

Seiring dengan peningkatan jumlah penduduk di Indonesia, industri konstruksi bangunan mengalami perkembangan pesat, namun juga rentan terhadap kegagalan struktur akibat kesalahan perancangan, pelaksanaan, serta kelebihan beban. Beton bertulang telah menjadi bahan konstruksi unggulan karena kombinasi kuat tekan beton dan kuat tarik baja tulangan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi sifat mekanis dan mikrostruktur baja tulangan yang tersedia di Indonesia untuk memastikan kesesuaian dengan standar yang berlaku. Pengujian dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) untuk analisis mikrostruktur dan Universal Testing Machine (UTM) untuk pengujian kekuatan tarik dan daktilitas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa baja tipe A, B, C, dan D telah memenuhi sifat mekanis pada tabel SNI 2052:2017 yaitu kelas BjTS 420B. Baja tipe C memiliki rata-rata nilai kuat tarik lebih tinggi (678.31 MPa) dengan regangan (24.96%) sedangkan baja tipe D memiliki kuat tarik terendah (617.17 MPa) dengan regangan (26.50%). Analisis SEM mengungkapkan bahwa baja tipe D memiliki kandungan karbon tertinggi (2.333%), sedangkan baja tipe C memiliki kandungan karbon terendah (1.453%). Temuan ini menunjukkan variasi signifikan dalam sifat mekanis dan mikrostruktur baja tulangan yang mempengaruhi performa struktur beton bertulang. Oleh karena itu, penting untuk memastikan bahwa baja tulangan yang digunakan memenuhi standar yang ditetapkan guna mencegah kegagalan struktur yang dapat membahayakan keselamatan pengguna bangunan.

Kata Kunci: Baja Tulangan, Kuat Tarik, Daktilitas, *Scanning Electron Microscope* (SEM), Mikrostruktur.

ABSTRACT

NURUL ANNISA RAHMAWAN. *Evaluation of Reinforcing Steel Microstructure on Mechanical Properties* (supervised by Prof. Dr. Eng. Rudy Djamaluddin, S.T., M.Eng.)

With the increasing population in Indonesia, the building construction industry has experienced rapid development, yet it is also prone to structural failures due to design errors, implementation issues, and overload. Reinforced concrete has become a preferred construction material due to the combination of the compressive strength of concrete and the tensile strength of reinforcing steel. This study aims to evaluate the mechanical properties and microstructure of reinforcing steel available in Indonesia to ensure compliance with applicable standards. Testing was conducted using a Scanning Electron Microscope (SEM) for microstructure analysis and a Universal Testing Machine (UTM) for tensile strength and ductility testing. The results showed that steel types A, B, C, and D have met the mechanical properties in the SNI 2052: 2017 table, namely class BjTS 420B. Type C steel has a higher average tensile strength value (678.31 MPa) with strain (24.96%) while type D steel has the lowest tensile strength (617.17 MPa) with strain (26.50%). SEM analysis revealed that type D steel had the highest carbon content (2.333%), whereas type C steel had the lowest carbon content (1.453%). These findings indicate significant variations in the mechanical properties and microstructure of reinforcing steel, which affect the performance of reinforced concrete structures. Therefore, it is essential to ensure that the reinforcing steel used meets established standards to prevent structural failures that could endanger building occupants' safety.

Keywords: Reinforcing Steel, Tensile Strength, Ductility, Scanning Electron Microscope (SEM), Microstructure.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	15
1.1 Latar Belakang	15
1.2 Rumusan Masalah	17
1.3 Tujuan Penelitian	18
1.4 Manfaat Penelitian	18
1.5 Ruang Lingkup.....	18
1.6 Sistematika Penulisan	18
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	20
2.1 Penelitian Terdahulu	20
2.2 Baja Karbon	22
2.3 Sifat Mekanik Baja.....	27
2.3.1 Tegangan.....	33
2.3.2 Regangan.....	33
2.3.3 Modulus Elastisitas	33
2.4 <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM)	34
2.4.1 SEM yang dilengkapi EDS/EDAX	36
BAB III METODE PENELITIAN	37
3.1 Bagan Alir Penelitian	37
3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian	37
3.3 Variabel Penelitian	38
3.4 Alat dan Bahan Penelitian.....	38
3.4.1 Alat Penelitian.....	38
3.4.2 Bahan Penelitian	41
3.5 Teknik Pengumpulan Data.....	43
3.6 Langkah Penelitian.....	44
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	51
4.1 Data Hasil Penelitian.....	51
4.1.1 Data hasil pengujian sifat mekanik uji kuat tarik dengan UTM (<i>Universal Testing Machine</i>)	51
4.1.2 Data hasil pengujian mikrostruktur SEM (<i>Scanning Electron Microscope</i>)	52
4.2 Hubungan Tegangan dan Regangan	63
4.2.1 Hubungan Tegangan dan Regangan (Strain Gauge) Baja Tipe A	63
4.2.2 Hubungan Tegangan dan Regangan (Strain Gauge) Baja Tipe B	64
4.2.3 Hubungan Tegangan dan Regangan (Strain Gauge) Baja Tipe C	65

4.2.4 Hubungan Tegangan dan Regangan (Strain Gauge) Baja Tipe D	66
4.2.5 Hubungan Tegangan dan Regangan (Extensometer).....	69
4.3 Kadar Karbon Maksimum.....	70
4.4 Mode Kegagalan Putus	72
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	77
5.1 Kesimpulan	77
5.2 Saran.....	78
DAFTAR PUSTAKA	79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Baja tulangan polos	24
Gambar 2. Baja tulangan sirip.....	25
Gambar 3. Jaring kawat baja (<i>wiremesh</i>).....	26
Gambar 4. Kode warna penandaan pada besi tulangan.....	27
Gambar 5. Grafik hubungan tegangan dan regangan.....	28
Gambar 6. Diagram alur penelitian.....	37
Gambar 7. Strain gauge baja dan CN <i>adhesive</i>	39
Gambar 8. Extensometer	39
Gambar 9. <i>Load cell</i> dan <i>data logger</i> TDS 530.....	40
Gambar 10. <i>Universal Testing Machine</i> (UTM).....	40
Gambar 11. Alat-alat pendukung	41
Gambar 12. Bahan penelitian.....	42
Gambar 13. Bentuk uji yang mempunyai diameter > 15 mm	42
Gambar 14. Model benda uji.....	43
Gambar 15. Skema peralatan uji kadar karbon	46
Gambar 16. Set up sampel di alat UTM.....	48
Gambar 17. Spesimen putus setelah di uji tarik.....	49
Gambar 18. Panjang sampel setelah putus.....	50
Gambar 19. Diameter sampel setelah putus	50
Gambar 20. Hasil uji komposisi baja tulangan tipe A	52
Gambar 21. Hasil uji komposisi baja tulangan tipe B.....	54
Gambar 22. Hasil uji komposisi baja tulangan tipe C.....	57
Gambar 23. Hasil uji komposisi baja tulangan tipe D	60
Gambar 24. Hubungan Tegangan dan Regangan (Strain Gauge) Baja Tipe A	64
Gambar 25. Hubungan Tegangan dan Regangan (Strain Gauge) Baja Tipe B.....	65
Gambar 26. Hubungan Tegangan dan Regangan (Strain Gauge) Baja Tipe C.....	66
Gambar 27. Hubungan Tegangan dan Regangan (Strain Gauge) Baja Tipe D	67
Gambar 28. Hubungan Tegangan dan Regangan (Strain Gauge) Semua Benda Uji.....	67
Gambar 29. Hubungan Tegangan dan Regangan (Extensometer).....	69
Gambar 30. Kadar karbon baja tipe A, B, C, dan D	70
Gambar 31. Tampak potongan daerah putus sampel A1	72
Gambar 32. Tampak potongan daerah putus sampel A2	73
Gambar 33. Tampak potongan daerah putus sampel B2.....	73
Gambar 34. Tampak samping daerah putus sampel C1	74
Gambar 35. Tampak potongan daerah putus sampel C1.....	74
Gambar 36. Tampak samping daerah putus sampel D1	75
Gambar 37. Tampak potongan daerah putus sampel D1	75

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Ukuran baja tulangan beton polos.....	24
Tabel 2. Ukuran baja tulangan beton sirip/ulir.....	25
Tabel 3. Komposisi kimia billet baja tuang kontinyu (Ladle Analysis)	26
Tabel 4. Sifat mekanis (SNI 2052 : 2017).....	32
Tabel 5. Ukuran spesimen standar	43
Tabel 6. Hasil uji tarik baja tulangan	51
Tabel 7. Hasil uji komposisi baja tulangan tipe A	54
Tabel 8. Hasil uji komposisi baja tulangan tipe B	56
Tabel 9. Hasil uji komposisi baja tulangan tipe C	59
Tabel 10. Hasil uji komposisi baja tulangan tipe D	61
Tabel 11. Persentase berat unsur karbon (C)	62
Tabel 12. <i>Tensile Requirements</i> ASTM A 611-97.....	63
Tabel 13. <i>Chemical Requirements</i> ASTM A 611-97	63
Tabel 14. Rekapitulasi Nilai Tegangan dan Regangan (Strain Gauge)	68
Tabel 15. Rekapitulasi Nilai Tegangan dan Regangan (Extensometer)	69
Tabel 16. Daktilitas baja tulangan berdasarkan grafik tegangan regangan	70
Tabel 17. Hubungan regangan – persentase unsur karbon.....	71

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
A	Luas penampang
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BjTP	Baja tulangan polos
BjTS	Baja tulangan sirip
BSE	<i>Backscattered Electron</i>
C	Carbon
cm	Centimeter
D	Diameter
E	Modulus elastisitas
EDS	<i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i>
F	Gaya
f	Tegangan
Fe	Besi
fu	Tegangan tarik maksimum
fy	Tegangan leleh
G	Panjang pengukur
kN	Kilo Newton
Lf	Panjang akhir spesimen
Lo	Panjang awal spesimen
m	Meter
mm	Milimeter
Mpa	Satuan Mega Pascal
O	Oksigen
OM	<i>Optical microscope</i>
Pu	Beban ultimate
Py	Beban leleh
R	Jari-jari cekungan
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i>

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
Si	Silika
SNI	Standar Nasional Indonesia
TS	<i>Tensile Strength</i>
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
UTS	<i>Ultimate Tensile Strength</i>
YS	Yield Strength
ΔL	Pertambahan panjang
ε	Regangan
μm	Mikrometer

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi.....	51
Lampiran 2 Grafik pengujian mikrostruktur SEM.....	55
Lampiran 3 Model benda uji.....	67

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring bertambahnya jumlah penduduk Indonesia, perkembangan konstruksi bangunan mengalami kemajuan pesat. Pemenuhan kebutuhan infrastruktur bangunan yang baik perlu selalu mengutamakan keselamatan, keamanan, dan kenyamanan pengguna gedung. Namun pada kenyataannya, mayoritas konstruksi bangunan gedung saat ini dinilai masih rawan terhadap kegagalan struktur. Kegagalan struktur dapat disebabkan oleh kesalahan perancangan dan pelaksanaan, serta kelebihan beban pada bangunan akibat perubahan fungsi bangunan (Zaka Syahdana et al., 2021).

Beton bertulang saat ini menjadi bahan utama dalam konstruksi bangunan di seluruh dunia karena keunggulannya yang signifikan dalam industri konstruksi global. Beton bertulang adalah material komposit yang menggabungkan beton dan baja tulangan untuk memanfaatkan kelebihan masing-masing bahan. Beton memiliki kuat tekan yang tinggi, membuatnya ideal untuk menahan beban berat, namun memiliki kelemahan pada kuat tarik yang rendah. Maka dari itu, baja sebagai tulangan penguat dalam beton bertulang dimanfaatkan untuk mengkompensasi kekuatan tarik beton secara signifikan.

Kekuatan tarik dan kekuatan leleh dari baja tulangan sangat dipengaruhi oleh kualitas bahan dan proses pembuatannya. Baja tulangan biasanya terbuat dari baja karbon karena daya tahannya yang tinggi. Komposisinya mencakup unsur paduan seperti mangan, fosfor, belerang, dan sering kali ditambahkan vanadium untuk meningkatkan sifat-sifat tertentu. Pemilihan material yang cermat sangat menentukan kualitas baja tulangan dan berpengaruh pada ketahanannya terhadap gaya dan tekanan yang diberikan dalam aplikasi konstruksi. Proses pembuatan yang tepat dan kontrol kualitas yang ketat memastikan baja tulangan memiliki performa optimal dalam mendukung struktur bangunan yang kuat dan tahan lama.

Baja tulangan memainkan peran penting dalam konstruksi, dan pengguna harus memahami sifat-sifatnya sebelum menggunakannya untuk tujuan desain atau proyek konstruksi (Achamyeleh & Şahin, 2019). Baja tulangan dengan kadar

karbon rendah umumnya memiliki sifat daktilitas yang lebih baik karena struktur mikronya lebih homogen. Daktilitas adalah kemampuan material untuk mengalami deformasi plastis sebelum patah, yang sangat penting untuk keselamatan dalam konstruksi. Struktur mikro yang baik dapat meningkatkan deformasi plastis dan memberikan tanda peringatan sebelum kegagalan total terjadi. Sebaliknya, baja tulangan dengan kandungan karbon yang tinggi cenderung memiliki struktur mikro yang lebih kasar dan elastisitas yang lebih rendah, sehingga lebih mungkin menyebabkan keruntuhan mendadak dengan tanda peringatan yang minimal. Daktilitas yang baik dalam baja tulangan sangat diinginkan untuk menjaga keselamatan pengguna bangunan gedung beton bertulang. Ketika beton bertulang mulai gagal, struktur yang daktil memberikan peringatan seperti defleksi balok berlebih sebagai tanda awal kegagalan struktur. Dengan struktur yang daktil, penghuni gedung dapat diberi waktu yang cukup untuk mengungsi sebelum gedung benar-benar mengalami keruntuhan (Opeyemi Joshua et al., 2018).

American Concrete Institute (ACI) 318M-14 dan Standar Nasional Indonesia (SNI) 2847:2013 dalam aturannya telah mensyaratkan rasio kekuatan tarik (TS) terhadap kekuatan luluh (YS) minimal 1,25. Persyaratan ini didasarkan pada asumsi bahwa kemampuan suatu komponen struktur untuk mengembangkan kapasitas rotasi inelastisnya bergantung pada panjang daerah leleh. Tingkat daktilitas struktur yang diperlukan tergantung pada tujuan penggunaan dan perilaku struktur dalam perancangan metode desain yang digunakan. Semakin tinggi rasio TS/YS batang baja, maka strukturnya semakin daktil (Tavio dkk., 2018).

A. Salman dan F. Djavanroodi (2018) mengemukakan bahwa terdapat variasi kekuatan leleh dan kekuatan tarik yang diyakini disebabkan oleh variasi dalam praktik penggulungan dan tindakan pengendalian kualitas yang digunakan oleh produsen yang berbeda-beda. Selain itu, variasi kekuatan leleh dan Tarik juga dapat dipengaruhi oleh faktor luas penampang, kekuatan baja, dan laju pembebanan yang bervariasi. Hal ini menunjukkan bahwa produksi tulangan baja harus dipastikan bahwa standar yang disyaratkan benar-benar dipatuhi oleh semua produsen baja.

Penelitian terkait analisis mikrostruktural, mekanis, dan elektrokimia dari karbon yang dilakukan oleh seperti Yufei Lu et al. (2019); Aghogho et al. (2020); Muhammad Ishtiaq et al. (2022) mengungkapkan bahwa semakin tinggi kandungan

karbon maka semakin besar fraksi volume perlit pada matriks ferit, dan keberadaan ferit pada struktur mikro mempengaruhi nilai kekerasan baja karbon. Dikemukakan juga bahwa ketika konsentrasi karbon meningkat dari 0,19% menjadi 0,54%, laju korosi meningkat karena pembentukan martensit yang kuat.

Berdasarkan SNI 2052:2017, tulangan harus dirancang dengan diameter dan luas penampang yang sesuai, memiliki kuat tarik minimal 525 MPa, serta tingkat perpanjangan (daktilitas) tertentu untuk mencegah keruntuhan mendadak. Selain itu, komposisi kimia tulangan juga diatur untuk memenuhi suatu batasan maksimum. Jika sifat-sifat tulangan yang tersedia secara komersial dan digunakan dalam konstruksi tidak memenuhi asumsi desain ini, maka potensi kegagalan struktur akan sangat tinggi.

Sifat mekanis baja sangat bergantung pada kandungan karbonnya. Kandungan karbon yang kecil saja sudah cukup untuk mengubah besi lunak atau besi bulat menjadi material dengan sifat mekanis yang berbeda. Semakin tinggi kandungan karbon, baja akan semakin kuat, keras, dan kurang ulet, yang membuat pengerjaannya menjadi lebih sulit, terutama untuk baja dengan kandungan karbon di atas 0,3%. Selain itu, kandungan fosfor dan belerang dalam baja dapat menyebabkan sifat getas, meskipun biasanya terdapat dalam jumlah kecil (hingga sekitar 0,6%).

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini melakukan kajian terhadap kandungan kimia beberapa merek baja tulangan yang beredar di Indonesia, dengan judul “**Evaluasi Mikrostruktur Baja Tulangan Terhadap Sifat Mekanis**”.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah, sebagai berikut:

1. Bagaimana sifat mekanik baja tulangan yang digunakan dalam industri konstruksi di Indonesia?
2. Bagaimana pengaruh kandungan unsur baja hasil analisis SEM (*Scanning Electron Microscope*) terhadap kekuatan baja tulangan?

1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah, sebagai berikut:

1. Mengevaluasi sifat mekanik baja tulangan, berupa kekuatan serta daktilitas yang diperoleh dari pengujian tarik baja tulangan pada industri konstruksi di Indonesia.
2. Mengevaluasi pengaruh kandungan unsur baja tulangan terhadap mikrostruktur menggunakan metode *Scanning Electron Microscope* sebagai penentu kuat baja tulangan.

1.4 Manfaat Penelitian

Melalui penelitian ini diharapkan memberi sejumlah manfaat sebagai berikut:

1. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengaruh unsur baja tulangan yang diproduksi di Indonesia.
2. Hasil penelitian ini bermanfaat untuk pemilihan penggunaan baja tulangan yang tepat dalam perancangan bangunan.

1.5 Ruang Lingkup

Untuk memastikan kelancaran dan pencapaian tujuan yang diinginkan, penelitian ini dibatasi dengan parameter sebagai berikut:

1. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Teknik Sipil Fakultas teknik Universitas Hasanuddin dan Laboratorium Mikroskop Elektron Pusat Penelitian Nanosains dan Nanoteknologi Institut Teknologi Bandung (ITB).
2. Penelitian ini menggunakan sampel yang beredar di Indonesia dengan kode: A, B, C, dan D.
3. Penelitian ini fokus pada variasi unsur baja tulangan dan pengaruhnya terhadap kekuatan dan daktilitas.
4. Penelitian ini melakukan pengujian tarik menggunakan mesin UTM dengan sampel yang telah dibubut sesuai dengan ketentuan ASTM E8/E8M-13a, dan mengukur regangan dengan menggunakan strain gauge baja tipe FLKB-2-11-5LJC-F.

5. Uji SEM (*Scanning Electron Microscope*) dilakukan untuk menganalisis unsur yang terkandung pada baja tulangan.

1.6 Sistematika Penulisan

Secara keseluruhan, tulisan ini disusun dalam 5 (lima) bab yang meliputi Pendahuluan, Tinjauan Pustaka, Metode Penelitian, Hasil Pengujian dan Pembahasan, serta Kesimpulan dan Saran. Berikut adalah gambaran umum mengenai kandungan yang tercakup dalam setiap bab, yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini terdiri atas latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, ruang lingkup, dan diakhiri dengan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini, menyajikan kumpulan informasi, konsep, teori, temuan penelitian sebelumnya, atau kerangka pemahaman yang menjadi dasar atau landasan bagi penelitian yang akan dilakukan.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini membahas mengenai diagram alir penelitian, waktu dan lokasi penelitian, variabel penelitian, bahan uji dan alat, teknik pengumpulan data, dan langkah penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi data hasil penelitian meliputi uji sifat mekanik uji tarik pada alat *Universal Testing Machine* (UTM) dan uji struktur mikro *Scanning Electron Microscope* (SEM).

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini, terdapat kesimpulan hasil dari analisis penelitian yang telah dilakukan dan juga saran serta rekomendasi yang dapat diambil sebagai panduan untuk penelitian mendatang.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Achamyeleh, T et al. (2019) menyajikan laporan tahunan tentang sifat mekanis tulangan rebar dari lokasi konstruksi dengan mengambil proyek di sekitar Amhara dan Ethiopia. Difokuskan hanya pada tulangan berdiameter 8, 10, 12, dan 16 mm dengan menggunakan Universal Testing Machine, menganalisis kekuatan sifat-sifat seperti kekuatan tarik ultimat (UTS), kekuatan luluh (YS), persentase perpanjangan putus (%) dan massa jenis (kg/m). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai rata-rata YS dan UTS dari semua diameter melampaui nilai standar yang direkomendasikan oleh BS449:1997 dan ASTM A706. Selain itu, nilai rata-rata persentase perpanjangan untuk semua produk baja yang diuji melampaui batas 12% yang direkomendasikan oleh BS 449, 10% oleh ASTM A706 untuk semua diameter. Namun, nilai rata-rata massa per panjang untuk 8, 10, 12 dan 16 mm berada di bawah standar nilai yang ditetapkan oleh ASTM A615/A615M.

Odusote, JK et al. (2019) menyelidiki sifat mekanis dan kimiawi batang baja tulangan dari pabrik baja lokal di Nigeria karena seringnya terjadi keruntuhan bangunan maka dilakukan penelitian terhadap besi tua untuk memastikan kesesuaiannya dengan standar yang disyaratkan. Tiga diameter (10, 12, 16 mm) batang baja tulangan dipilih dari masing-masing delapan pabrik baja (A-H). Analisis komposisi kimia dilakukan dengan menggunakan spektrometer emisi optik (LMF06, nomor seri 15007384). Analisis uji mekanis (kekuatan luluh, kekuatan tarik ultimate dan persentase perpanjangan) dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik universal Instron Satec Series 600DX dengan kapasitas 600 kN. Dari hasil penelitiannya disimpulkan analisis kimia menunjukkan bahwa ada tiga puluh satu (31) unsur utama, residu dan unsur perusak yang ada pada baja tulangan. Variasi kandungan karbon serta mangan, silikon, sulfur dan fosfor memiliki dampak yang berbeda-beda terhadap sifat mekanik tulangan. Hasil investigasi juga menunjukkan bahwa beberapa sampel memiliki kekuatan luluh yang melampaui spesifikasi standar yang direkomendasikan dan dapat digunakan untuk keperluan struktur/konstruksi. Kesimpulannya, sebagian besar batang baja memenuhi semua

standar dalam hal kekuatan luluh, keuletan kekuatan tarik ultimit dan nilai kekerasan dan dengan demikian dapat digunakan untuk aplikasi struktural.

Sukarno dan Setiawan (2020) melakukan penelitian tentang proses pengerasan permukaan atau *surface treatment* dengan karburasi plasma terhadap variasi tekanan sifat kekerasan baja, meliputi uji kekerasan dan uji mikrostruktur *Scanning Electron Microscopy* (SEM) setelah melalui proses pembentukan lapisan tipis permukaan specimen baja. Dari hasil penelitian menunjukkan kekerasan yang terbesar atau optimum diperoleh pada tekanan 1.6 mBar, yaitu pada 201,07 HVN. Kemudian hasil dari pengamatan mikrostruktur bahwa lapisan tipis terlihat di bagian luar permukaan dengan unsur karbon yang teridentifikasi sangat tipis. Dari hasil pengujian EDS menghasilkan unsur campuran karbon (C) dengan unsur-unsur lainnya seperti campuran Oksigen (O), Silikon (Si), dan Klorida (Cl) dengan besi (Fe).

Lestaringrum, A.U. (2021) melakukan pengujian kedalaman kekerasan dengan menggunakan uji kekerasan metode Mikro Vickers dan pengujian struktur mikro menggunakan metode SEM-EDS. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, didapatkan hasil bahwa pada proses perlakuan panas carburizing temperature 700°C dan nitriding temperatur 500°C meningkatkan nilai kekerasan spesimen sebesar 320% dari kekerasan semula sebelum proses perlakuan panas. Dan berdasarkan data hasil uji SEM-EDS, hasil penambahan karbon tertinggi pada hasil proses perlakuan panas carburizing temperatur 700°C dan nitriding temperatur 500°C yakni sebesar 16.53% dari yang semula tanpa perlakuan panas sebesar 9.27%. Kadar karbon mengalami peningkatan sebesar 7.26%.

Wasiu Ajagbe et al. (2019) menjelaskan tulangan baja melengkapi beton dalam struktur beton bertulang untuk memberikan kekuatan, kekakuan dan daya tahan yang dibutuhkan. Studi ini menyelidiki tingkat kesesuaian tulangan baja yang tersedia di industri konstruksi Nigeria melalui investigasi pada persentase komposisi kimia dan sifat tarik dalam kaitannya dengan standar lokal dan internasional yang relevan. Sampel dari 12 perusahaan yang berbeda dipertimbangkan dalam penelitian ini. Hasil analisis kimia menemukan 16 elemen, beberapa di antaranya yang merupakan elemen residu dalam jumlah kecil. Sembilan sampel memiliki kandungan karbon kurang dari 0,27%, 17 sampel memiliki

kandungan fosfor kurang dari 0,055%, 16 sampel memiliki kandungan sulfur kurang dari 0,055%, 9 sampel memiliki kandungan tembaga kurang dari 0,25% dan 17 sampel memiliki karbon kurang dari 0,54% yang semuanya merupakan persyaratan NIS 117. Demikian pula, sebagian besar sampel yang diperiksa tidak memenuhi persyaratan NIS 117 dan BS4449 sehubungan dengan batang baja diameter, kekuatan karakteristik, keuletan, rasio kekuatan luluh, atau kombinasi keduanya parameter dengan kekuatan luluh berkisar antara 462,02 N/mm² hingga 558,27 N/mm². Sebuah indikasi tingkat kualitas batang baja yang tersedia di industri konstruksi Nigeria dapat disimpulkan dari hasil penelitian ini.

2.2 Baja Karbon

Menurut SNI 2052:2017, baja karbon atau baja paduan yang berbentuk batang berpenampang bundar dengan permukaan polos atau sirip/ulir dan digunakan untuk penulangan beton. Baja ini diproduksi dari bahan baku *billet* dengan cara canai panas (*hot rolling*).

Baja adalah logam paduan dimana logam besi sebagai unsur dasar dengan beberapa elemen lainnya, termasuk karbon. Kandungan unsur karbon dalam baja berkisar antara 0.2% hingga 2.1% berat sesuai gradenya. Unsur lain yang ada dalam baja adalah: karbon, mangan, fosfor, sulfur, silikon, dan sebagian kecil oksigen, nitrogen, dan aluminium. Penambahan kandungan karbon pada baja dapat meningkatkan kekerasan (*hardness*) serta kekuatan tariknya (*tensile strength*), namun disisi lain membuatnya menjadi getas (*brittle*) serta menurunkan keuletan (*ductility*) (Mulyanto & Ardiyan, 2015).

Syarat mutu tulangan beton berdasarkan SNI 07-2052-2002, bahwa syarat mutu baja tulangan yang digunakan pada struktur beton bertulang dari beberapa aspek sebagai berikut:

1. Sifat tampak

Baja tulangan beton tidak boleh mengandung sepihan, lipatan, retakan, cema (luka pada besi beton yang terjadi karena proses cenai) yang dalam dan hanya diperbolehkan berkarat ringan pada permukaan.

2. Bentuk

Besi tulangan polos, permukaan batang baja tulangan tidak bersirip. Sedangkan permukaan batang baja bersirip harus bersirip teratur, setiap batang diperkenankan mempunyai rusuk memanjang yang searah dan sejajar dengan sumbu batang, serta sirip sirip lain dengan arah melintang sumbu batang. Sirip sirip yang melintang harus mempunyai jarak yang teratur, serta bentuk dan ukuran yang sama.

3. Ukuran

Diameter, berat, dan ukuran sirip beton harus sesuai dengan standar SNI dengan toleransi yang berbeda disetiap ukuran diameter baja tulangan. Misalnya pada toleransi panjang tulangan beton ditetapkan sampai 70 mm dari ukuran yang ditetapkan.

Tulangan baja yang biasanya berbentuk silinder pejal diletakkan di dalam beton, khususnya di daerah tarik untuk memikul gaya tarik yang timbul dari beban eksternal yang bekerja pada struktur beton. Tulangan juga digunakan untuk meningkatkan tahanan tekan dari struktur beton, selain fungsi utamanya pada kuat tarik. Harga tulangan baja lebih mahal dari beton itu sendiri, tetapi tulangan baja memiliki kuat luluh hingga 10 kali lebih baik daripada kuat tekan beton. Berdasarkan letaknya dalam beton, tulangan baja dibagi menjadi:

1. Tulangan utama, merupakan tulangan yang memanjang yang berfungsi memikul gaya tarik maupun gaya tekan yang terjadi.
2. Tulangan sekunder atau tulangan pembagi, merupakan tulangan dalam arah tegak lurus tulangan utama.
3. Tulangan sengkang atau tulangan geser, merupakan tulangan arah melintang dari tulangan utama, yang berfungsi menahan gaya geser pada beton bertulang.

Besi/baja tulangan dapat diklasifikasikan dalam beberapa jenis diantaranya sebagai berikut:

1. Baja Tulangan Beton polos (BjTP) adalah baja tulangan beton berpenampang bundar dengan permukaan rata tidak bersirip. Tegangan leleh minimum pada besi tulangan polos biasanya sebesar 240 MPa. Menurut SNI 2052:2014 panjang baja tulangan beton ditetapkan antara (10-12) m.



Gambar 1. Baja Tulangan Polos

Sumber : tokobangunanonline.com

Umumnya ukuran/diameter baja tulangan beton polos (BjTP) yang beredar di pasaran berbeda-beda. **Tabel 1** menjelaskan ukuran dan luasan tulangan yang ada di Indonesia sesuai dengan SNI 2052:2017.

Tabel 1. Ukuran baja tulangan beton polos

No	Penamaan	Diameter Nominal (d)	Luas penampang Nominal (A)	Berat nominal Per meter*
		mm	mm ²	Kg/m
1	P 6	6	28	0,222
2	P 8	8	50	0,395
3	P 10	10	79	0,617
4	P 12	12	113	0,888
5	P 14	14	154	1,208
6	P 16	16	201	1,578
7	P 19	19	284	2,226
8	P 22	22	380	2,984
9	P 25	25	491	3,853
10	P 28	28	616	4,834
11	P 32	32	804	6,313
12	P 36	36	1018	7,990
13	P 40	40	1257	9,865
14	P 50	50	1964	15,413

Sumber : SNI 2052 : 2017

2. Baja Tulangan Beton Sirip (*deform*)/ (Ulir/BjTS) adalah baja tulangan beton dengan bentuk khusus yang permukaannya memiliki sirip melintang dan memanjang yang dimaksudkan untuk meningkatkan daya lekat dan guna menahan gerakan membujur dari batang secara relatif terhadap beton. Tegangan leleh minimum pada baja tulangan deform biasanya sebesar 400 MPa.



Gambar 2. Baja Tulangan Sirip
Sumber : jawabansuper.github.io

Untuk ukuran/ diameter Baja Tulangan Beton Sirip (*deform*)/ (Ulir/BjTS), tabel di bawah ini akan menjelaskan ukuran dan luasan tulangan yang ada di Indonesia sesuai dengan SNI 2052:2017.

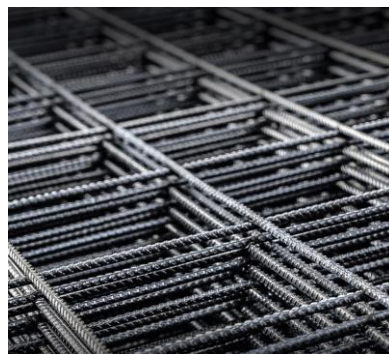
Tabel 2. Ukuran baja tulangan beton sirip/ulir

No	Pena maan	Dia- meter nominal (d)	Luas penam- pang nominal (A)	Tinggi sirip (H)		Jarak sirip melintang (P) Maks	Lebar sirip membujur (T) Maks	Berat nominal per meter
				min	maks			
		mm	mm ²	mm	mm	mm	mm	Kg/m
1	S 6	6	28	0,3	0,6	4,2	4,7	0,222
2	S 8	8	50	0,4	0,8	5,6	6,3	0,395
3	S 10	10	79	0,5	1,0	7,0	7,9	0,617
4	S 13	13	133	0,7	1,3	9,1	10,2	1,042
5	S 16	16	201	0,8	1,6	11,2	12,6	1,578
6	S 19	19	284	1,0	1,9	13,3	14,9	2,226
7	S 22	22	380	1,1	2,2	15,4	17,3	2,984
8	S 25	25	491	1,3	2,5	17,5	19,7	3,853
9	S 29	29	661	1,5	2,9	20,3	22,8	5,185
10	S 32	32	804	1,6	3,2	22,4	25,1	6,313
11	S 36	36	1018	1,8	3,6	25,2	28,3	7,990

12	S 40	40	1257	2,0	4,0	28,0	31,4	9,865
13	S 50	50	1964	2,5	5,0	35,0	39,3	15,413
14	S 54	54	2290	2,7	5,4	37,8	42,3	17,978
15	S 57	57	2552	2,9	5,7	39,9	44,6	20,031

Sumber : SNI 2052:2017

3. Jaring kawat baja (*wiremesh*), merupakan sekumpulan tulangan polos atau tulangan ulir yang dilas satu sama lain sehingga membentuk *grid* (jaringan) biasanya digunakan untuk lantai/slab dan dinding.



Gambar 3. Jaring kawat baja (*wiremesh*)

Sumber : www.mbtsteel.com

Berdasarkan SNI 2052:2017 telah ditetapkan tentang kandungan unsur maksimum yang terdapat dalam baja tulangan sesuai kelasnya seperti yang tertera pada **Tabel 3**. Kode warna digunakan sebagai penanda pada besi tulangan yang menunjukkan kelas mutu dari baja itu sendiri seperti yang terlihat pada **Gambar 4**.

Tabel 3. Komposisi Kimia Billet Baja Tuang Kontinyu (Ladle Analysis)

Kelas baja tulangan	Kandungan unsur maksimum (%)					
	C	Si	Mn	P	S	C _{Eq} *
BjTP 280	-	-	-	0,050	0,050	-
BjTS 280	-	-	-	0,050	0,050	-
BjTS 420A	0,32	0,55	1,65	0,050	0,050	0,60
BjTS 420B	0,32	0,55	1,65	0,050	0,050	0,60
BjTS 520	0,35	0,55	1,65	0,050	0,050	0,625
BjTS 550	0,35	0,55	1,65	0,050	0,050	0,625
BjTS 700**	0,35	0,55	1,65	0,050	0,050	0,625

Sumber : SNI 2052:2017

Kelas Baja		Warna
BjTP 280	BjTS 280	Hitam
	BjTS 420A	Kuning
	BjTS 420B	Merah
	BjTS 520	Hijau
	BjTS 550	Putih
	BjTS 700	Biru

Gambar 4. kode warna penandaan pada besi tulangan

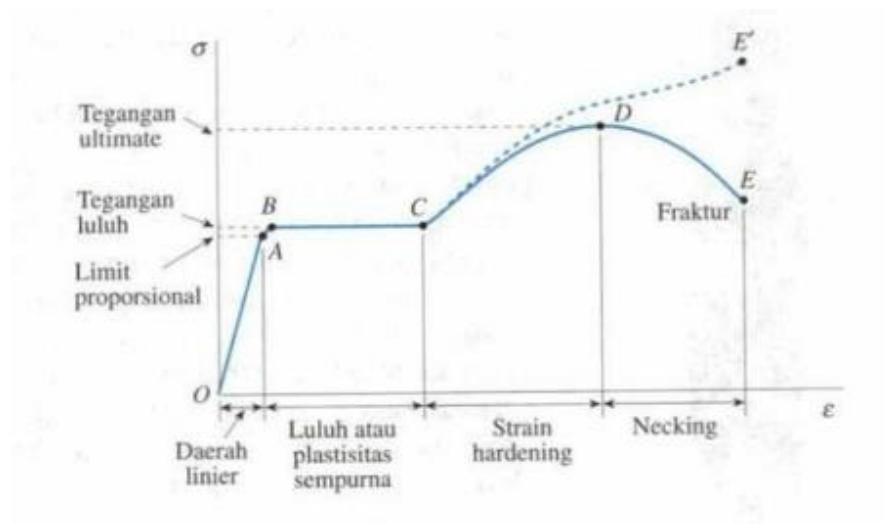
Sumber : www.ilmubeton.com

2.3 Sifat Mekanik Baja

Menurut Yahya, t.t., setiap material memiliki sifat mekanik yang berbeda-beda. Sifat mekanik dapat diketahui melalui kekuatan dan elastisitas dari logam. Banyak dilakukan untuk melengkapi informasi rancangan dasar kekuatan suatu bahan dan sebagai data pendukung bagi spesifikasi bahan. Sifat mekanik logam merupakan suatu hal vital karena menyatakan kemampuan suatu logam untuk menerima beban atau gaya dari luar tanpa mengalami kerusakan. Salah satu cara untuk mengetahui besaran sifat mekanik dari logam adalah dengan uji tarik. Pengujian tarik adalah suatu metode yang digunakan untuk menguji kekuatan suatu bahan/material dengan cara memberikan beban (gaya statis) secara lambat atau cepat. Uji tarik dilakukan dengan cara menarik spesimen hingga putus untuk mengetahui bagaimana material tersebut bereaksi terhadap gaya tarikan dan mengetahui sejauh mana material tersebut bertambah panjang. Selain itu, tujuan lain daripada uji tarik adalah untuk mengetahui sifat-sifat mekanis suatu material, khususnya logam diantara sifat-sifat mekanis yang dapat diketahui dari hasil pengujian tarik adalah sebagai berikut:

1. Kekuatan tarik
2. Kuat luluh dari material
3. Keuletan dari material
4. Modulus elastic dari material
5. Kelentingan dari suatu material
6. Ketangguhan

Dengan melakukan uji tarik maka akan diperoleh profil tarikan yang lengkap berupa kurva hubungan antara tegangan dengan regangan yang diperlukan dalam proses desain yang menggunakan material tersebut seperti pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Grafik hubungan tegangan dan regangan

Sumber : buku mekanika bahan gere & timoshenko

Gambar 5. menunjukkan diagram yang dimulai dengan garis lurus dari pusat sumbu O ke titik A , yang berarti bahwa hubungan antara tegangan dan regangan pada daerah awal ini bukan saja *linier* melainkan juga *proporsional*. Melewati titik A , proporsional antara tegangan dan regangan tidak ada lagi, jadi tegangan di A disebut limit proporsional. Kemiringan garis lurus dari O ke A disebut modulus elastisitas. Dengan meningkatnya tegangan hingga melewati limit proporsional, maka regangan mulai meningkat secara lebih cepat untuk setiap pertambahan tegangan. Dengan demikian, kurva tegangan-regangan mempunyai kemiringan yang berangsur-angsur semakin kecil, sampai pada titik B kurva tersebut menjadi

horizontal. Mulai dari titik ini, terjadi perpanjangan yang cukup besar pada benda uji tanpa adanya penambahan gaya tarik (dari *B* ke *C*). Fenomena ini disebut luluh dari bahan, dan titik *B* disebut titik luluh. Tegangan yang berkaitan dengan ini disebut tegangan luluh dari baja.

Sesudah mengalami regangan besar yang terjadi selama peluluhan di daerah *BC*, baja mulai mengalami pengerasan regang (strain hardening). Perpanjangan benda uji di daerah ini membutuhkan peningkatan beban tarik, sehingga diagram tegangan-regangan mempunyai kemiringan positif dari *C* ke *D*. Beban tersebut pada akhirnya mencapai harga maksimumnya, dan tegangan pada saat itu (di titik *D* disebut tegangan ultimate. Penarikan batang lebih lanjut pada kenyataannya akan disertai dengan pengurangan beban dan akhirnya terjadi putus/patah di suatu titik seperti titik *E*. Baja struktural yang mengalami regangan permanen besar sebelum kegagalan terjadi dikelompokkan ke dalam bahan yang daktil (ulet). Untuk menghitung daktilitas baja terdapat beberapa parameter yang sering digunakan antara lain:

- Parameter geometrik penampang : Radius dimensi penampang, radius fillet, dan ketebalan elemen.
- Parameter material : Tegangan leleh (f_y), modulus elastisitas (E), dan kurva tegangan-regangan.
- Parameter beban : Momen lentur nominal (M_n) dan momen lentur ultimit (M_u).
- Parameter daktilitas : Faktor daktilitas (μ) dan rotasi plastis.
- Parameter lainnya : Jumlah dan distribusi tulangan dan jenis sambungan.

Berdasarkan parameter diatas maka digunakan parameter material perhitungan daktilitas berdasarkan kurva tegangan-regangan, yaitu rasio antara regangan patah dan regangan leleh.

Sifat Mekanik yang didapat dari uji tarik meliputi:

1. Kekuatan Tarik, yaitu tegangan maksimum yang mampu ditahan struktur pada pembebanan tarik

$$f_u = \frac{P_u}{A_0}$$

Dimana:

f_u = Tegangan tarik maksimum / ultimate (kN/mm²)

P_u = Beban ultimate (kN)

A_0 = Luas penampang (mm²)

2. Kekuatan Leleh, yaitu tegangan yang terjadi di batas antara daerah elastis dengan plastis

$$f_y = \frac{P_y}{A_0}$$

Dimana:

f_y = Tegangan leleh (kN/mm²)

P_y = Beban leleh (kN)

A_0 = Luas penampang (mm²)

3. Regangan, yaitu perbandingan antara pertambahan panjang dengan panjang mula-mula

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\%$$

Dimana:

ε = Regangan (%)

ΔL = Pertambahan panjang (mm)

L_0 = Panjang awal spesimen (mm)

4. Modulus Elastisitas, yaitu perbandingan antara tegangan dan regangan

$$E = \frac{f}{\varepsilon}$$

Dimana:

E = Modulus elastisitas

f = Tegangan (kN/mm²)

ε = Regangan (%)

5. Daktilitas (keuletan), yaitu mengukur besarnya deformasi plastis sebelum patah dalam % elongation

$$\% \text{ elongation} = \frac{L_f + L_0}{L_0}$$

Dimana:

L₀ = panjang awal spesimen (m)

L_f = panjang akhir spesimen (m)

Menurut (Loporcaro dkk., 2019), setelah mengalami deformasi plastis, baja pasti akan mengalami penuaan regangan dan selanjutnya akan mengurangi keuletannya. Misalnya, baja yang mengalami regangan awal hingga 0,03 mm mengalami penurunan keuletan hingga 40% dari nilai yang diharapkan. Baik peningkatan kuat leleh maupun penurunan daktilitas harus dipertimbangkan pada tahap evaluasi bangunan beton bertulang yang rusak akibat gempa dan direkomendasikan untuk dimasukkan dalam peraturan di masa mendatang.

Studi mengenai kekuatan baja tulangan berdasarkan kandungan komposisi kimia dilakukan dengan menganalisis hubungan antara komposisi kimia baja tulangan dan sifat mekaniknya. Adapun sifat mekanik baja tulangan beton berdasarkan SNI 2052:2017 seperti yang tercantum pada tabel berikut:

Tabel 4. Sifat Mekanis (SNI 2052:2017)

Kelas Baja Tulangan	Kuat luluh/leleh (YS) Mpa	Uji Tarik		Sudut lengkun g	Uji Lengkung		Rasio TS/YS (Hasil Uji)
		Kuat tarik (TS) Mpa	Regangan dalam 200 mm, Min %		Diameter pelengkung mm	Diameter pelengkung mm	
BjTP 280	Min. 280 Maks. 405	Min. 350	11 ($d \leq 10$ mm)	180°	3,5d ($d \leq 16$ mm)	-	
			12 ($d \geq 12$ mm)	180°	5d ($d \geq 19$ mm)		
BjTS 280	Min. 280 Maks. 405	Min. 350	11 ($d \leq 10$ mm)	180°	3,5d ($d \leq 16$ mm)	Min.1, 25	
			12 ($d \geq 13$ mm)	180°	5d ($d \geq 19$ mm)		
BjTS 420A	Min. 420 Maks. 545	Min. 525	9 ($d \leq 19$ mm)	180°	3,5d ($d \leq 16$ mm)	Min. 1,25	
			8 ($22 \leq d \leq$ 25mm)	180°	5d ($19 \leq d \leq$ 25mm)		
			7 ($d \geq 29$ mm)	180° 90°	7d ($29 \leq d \leq$ 36mm) 9d ($d > 36$ mm)		
BjTS 420B	Min. 420 Maks. 545	Min. 525	14 ($d \leq 19$ mm)	180°	3,5d ($d \leq 16$ mm)	Min. 1,25	
			12 ($22 \leq d \leq$ 36mm)	180°	5d ($19 \leq d \leq$ 25mm)		
			10 ($d > 36$ mm)	180° 90°	7d ($29 \leq d \leq$ 36mm) 9d ($d > 36$ mm)		
BjTS 520	Min. 520 Maks. 645	Min. 650	7 ($d \leq 25$ mm)	180°	5d ($d \leq 25$ mm)	Min. 1,25	
			6 ($d \geq 29$ mm)	180° 90°	7d ($29 \leq d \leq$ 36mm) 9d ($d > 36$ mm)		
BjTS 550	Min. 550 Maks. 675	Min. 687.5	7 ($d \leq 25$ mm)	180°	5d ($d \leq 25$ mm)	Min. 1,25	
			6 ($d \geq 29$ mm)	180° 90°	7d ($29 \leq d \leq$ 36mm) 9d ($d > 36$ mm)		
BjTS 700**	Min. 700 Min. 825	Min. 805	7 ($d \leq 25$ mm)	180°	5d ($d \leq 25$ mm)	Min. 1,25	
			6 ($d \geq 29$ mm)	180° 90°	7d ($29 \leq d \leq$ 36mm) 9d ($d > 36$ mm)		

Sumber : SNI 2052:2017

2.3.1 Tegangan

Tegangan adalah besaran pengukuran intensitas gaya (F) yaitu reaksi yang timbul dari dalam material per satuan luas (A). Tegangan tarik adalah tegangan yang diakibatkan beban tarik atau beban yang arahnya tegak lurus meninggalkan luasan permukaan. Tegangan tekan adalah tegangan yang diakibatkan beban tekan atau beban yang arahnya tegak lurus menuju luasan permukaan suatu benda yang statis.

2.3.2 Regangan

Regangan atau strain adalah perubahan pada ukuran benda karena gaya dalam kesetimbangan dibandingkan terhadap ukuran semula. Ketika batang tersebut mengalami tarik, maka regangannya disebut regangan tarik (tensile strain), yang menunjukkan perpanjangan elemen. Jika batang tersebut mengalami tekan, maka regangannya adalah regangan tekan (compressive strain) dan batang akan mengalami perpendekan. Regangan juga dapat dikatakan sebagai tingkat deformasi. Deformasi terjadi bila material mengalami gaya ataupun reaksi terhadapnya. Deformasi ada dua macam yaitu deformasi elastis dan deformasi plastis. Yang dimaksud deformasi elastis adalah deformasi yang terjadi akibat adanya beban yang jika beban ditiadakan, maka material akan kembali ke ukuran semula. Sedangkan deformasi plastis didefinisikan deformasi yang bersifat permanen jika bebannya dilepas.

2.3.3 Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas merupakan kemiringan dari diagram tegangan dan regangan yang masih dalam kondisi elastis. Sifat keelastisitas suatu bahan berhubungan langsung dengan kekakuan suatu bahan dalam penerimaan beban. Modulus elastisitas merupakan perbandingan antara tegangan yang diberikan dengan perubahan bentuk persatuan panjang. Dimana semakin besar modulus elastisitas maka semakin kecil lendutan yang terjadi. Masalah kontrol pada baja tulangan menjadi masalah penting ketika seseorang merencanakan desain bangunan tahan gempa. Dalam desain seismik, kerusakan struktural dan non struktural dapat terjadi, tetapi keruntuhan seluruh struktur harus menunjukkan daktilitas selama

gempa. Penting untuk memastikan bahwa pada kondisi ekstrim dimana struktur dibebani hingga gagal, struktur akan berperilaku duktail dengan deformasi yang besar pada saat mendekati kapasitas maksimum. Lendutan yang besar pada beban maksimum memberikan peringatan yang cukup sebelum kegagalan, sehingga keruntuhan total dapat dicegah dan nyawa dapat diselamatkan.

Rumus:

$$E = \frac{\Delta y}{\Delta \varepsilon} = \frac{y_2 - y_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{y - 0}{\varepsilon - 0}$$

$$E = \frac{y}{\varepsilon}$$

2.4 Scanning Electron Microscope (SEM)

Secara umum, terdapat dua jenis mikroskop, yaitu *optical microscope* (OM) dan *scanning electron microscope* (SEM). SEM merupakan alat karakterisasi yang berfungsi untuk melihat suatu objek dengan perbesaran yang tinggi. Informasi yang didapatkan dari karakterisasi SEM adalah mengenai topografi, morfologi, komposisi, dan berbagai informasi mengenai mikrostruktur pada permukaan suatu objek dengan perbesaran yang lebih besar dan detail yang lebih baik jika dibandingkan dengan OM. SEM dapat menghasilkan gambar permukaan objek yang lebih baik dengan memindai sampel dalam pola raster dengan berkas elektron berenergi tinggi. Keuntungan dari penggunaan SEM adalah luasnya aplikasi penggunaannya, hasil gambar tiga dimensi dan hasil topografi yang didapatkan lebih terperinci. Keuntungan lainnya adalah pengoperasian SEM yang mudah dan cepat. Untuk menghasilkan informasi tambahan, SEM dapat digunakan bersamaan dengan detektor *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS).

Scanning Electron Microscope (SEM) adalah sebuah mikroskop yang melakukan pemfokusan pancaran tinggi elektron (electron beam) pada sebuah permukaan untuk melakukan pemindaian (scanning) terhadap permukaan material. SEM bekerja menggunakan berinteraksi dengan atom-atom pada sampel. Dari hasil interaksi akan dihasilkan elektron pantulan yang menghasilkan sinyal yang berisi informasi tentang topografi, morfologi, dan komposisi permukaan material. Hasil pemindaian SEM berupa gambar 3 dimensi dari permukaan sampel yang dipindai.

Scanning dilakukan melalui *Secondary Electron (SE)* dan *Backscattered Electron (BSE)*. Scanning dapat dilakukan melalui scanning point dan mapping. Set peralatan SEM dilengkapi dengan Energy Dispersive Spectrometer (EDX), sehingga dapat mendeteksi komponen/ unsur yang terdapat pada sampel.

Penggunaan SEM banyak digunakan diberbagai bidang mulai dari biologi hingga teknik material, dengan resolusi hingga 1 nm dan perbesaran 1.000.000x. Adapun fungsi dari instrumen SEM, antara lain untuk memperoleh informasi tentang :

1. Topografi

Topografi adalah sebuah studi yang mempelajari relief permukaan berupa image tiga dimensi. Objek dari topografi adalah koordinat suatu bagian permukaan. Topografi material yang menjadi sampel pemindaian SEM dapat berupa bentuk permukaan dan teksturnya (kekerasan, sifat memantulkan cahaya, keberadaan crack). Dari informasi mengenai topografi ini, SEM dapat digunakan di berbagai terapan keilmuan, mulai dari mengamati permukaan sel hingga nanomaterial (dalam bentuk keramik ,logam dan komposit), mengukur ketebalan dan celah (crack) specimen skala nano.

2. Morfologi

Instrumen SEM memindai morfologi permukaan sampel, yaitu bentuk dan ukuran dari komponen penyusun objek (misalnya grain, grain boundary, pori dan defect)

3. Komposisi

Instrumen SEM dapat menganalisis komposisi spot atau keseluruhan sampel yang dipindai, yaitu data kuantitatif unsur dan senyawa yang terkandung dalam objek.

Pada perangkat SEM terdapat dua macam pemindaian berdasarkan jenis hamburan elektron, yaitu Secondary Electron (SE) atau Back Scattered Electron (BSE). SE untuk memindai struktur permukaan, BE untuk memindai struktur permukaan dan informasi elemen rata-rata permukaan sampel kemudian dideteksi oleh detektor dan dimunculkan dalam bentuk gambar di bagian display.

2.4.1 SEM yang dilengkapi dengan EDS / EDAX

Fitur Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) dapat digunakan jika pada instrumen SEM terdapat detektor sinar X. EDS adalah sebuah teknik untuk menganalisis sampel secara kualitatif atau hampir semi kualitatif untuk menentukan komposisi elemen dari sebuah area yang ingin diidentifikasi dan diobservasi. Setelah elektron pemindai menumbuk permukaan sampel, elektron di dalam atom mengalami eksitasi. Ketika elektron-elektron pada atom kemudian kembali pada keadaan dasarnya, maka sinar x teremisi. Sinar X ini kemudian dikumpulkan oleh detektor X Ray dan dikonversi menjadi informasi yang bermanfaat. Sebuah gambar yang dihasilkan dari SE dan BSE memang penting, tapi emisi sinar X dari spesimen memberikan informasi tentang komposisi elemen penyusun pada area yang dipindai. Sebagai hasilnya, teknik EDS dapat mendeteksi elemen dari karbon (C) hingga uranium (U) jika dengan kuantitas paling rendah 1.0 wt% di dalam material. Kombinasi teknik EDS dan SEM memberikan analisis dari area spesifik dari spesimen berupa hasil gambar (image) pemindaian dan analisis semi kuantitatif.