

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Dalam penelitian penulis menggunakan studi literatur terhadap referensi yang sesuai dan mendukung rencana penelitian yang akan dilakukan. Referensi yang diambil adalah dari jurnal internasional, dengan metode dan hasil penelitian sebagai berikut :

Pramono, Andika Widya. (2020). Dalam Journal Analisis Kegagalan Material Stem Control Valve Desuperheater PLTU 1x660 Mw PT.Lestari Banten Energi. Pada boiler terdapat desuperheater yang berfungsi untuk mengontrol temperatur uap yang keluar dari superheater *Control valve* digerakkan oleh actuator dan minyak hidrolik sebagai penggerak buka tutupnya *valve*, pada material actuator ditemukan suatu komponen yang mengalami kegagalan material berupa patahnya suatu stem. Untuk mengetahui akar penyebab dan mekanisme kegagalan stem, maka dilakukan studi serta penelitian yang meliputi pengamatan visual dan analisis dari beberapa pengujian seperti pengujian kekerasan, pengujian metalografi guna mengetahui struktur mikro, pengujian fraktografi untuk melihat struktur makro dan pengujian SEM – EDS mapping. (Pramono, 2020)

Rewata, bill. (2020). Pengaruh Proses Tempa Dingin Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Baja Karbon Tinggi Dengan Paduan Rendah 1.92%C-0.73%Cr-2%Ni Berbasis *Laterit* Untuk Aplikasi Grinding Ball. Perkembangan industri baja Indonesia masih terkendala oleh keterbatasan bahan baku dan energi. Dari segi bahan baku, Indonesia tidak memiliki bijih besi dalam jumlah yang memadai. Keterbatasan bijih besi ini akan diatasi dengan pemanfaatan bijih besi (nikel) *laterit*. Ketika dilebur menjadi baja, bijih jenis ini akan menghasilkan baja dengan kandungan nikel antara 2-3%. Sejumlah penelitian menjanjikan munculnya sifat-sifat unggul, terutama untuk menghasilkan baja mutu tinggi yang sangat dibutuhkan dalam pembangunan infrastruktur di Indonesia. Penambahan kromium pada baja laterit bertujuan untuk

meningkatkan kekuatan, kekerasan, kelenturan, dan ketahanan aus terhadap karat dan asam. Proses penempaan juga dapat menyebabkan distorsi butiran dan meningkatkan kekuatan serta kekerasan, serta meningkatkan kemampuan. Ketersediaan sumber daya alam menjadikan bijih laterit potensial sebagai basis kemandirian dalam memenuhi kebutuhan baja nasional. Dengan melakukan uji keras, uji ketahanan aus, dan uji mikro, dapat diketahui sifat mekanik baja laterit Cr-Ni. (Rewata, 2020)

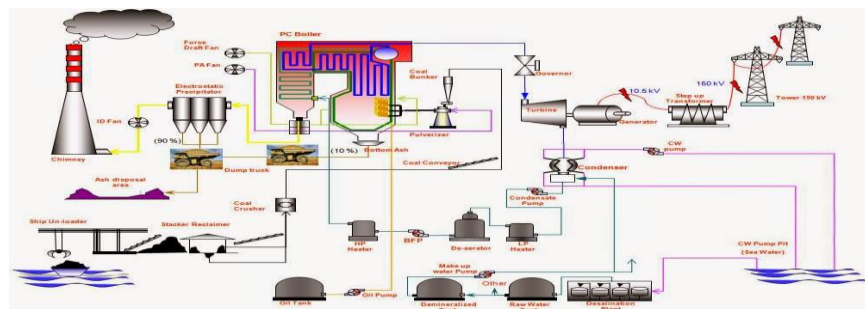
Sahlan, S. (2019). Studi Literatur Analisis Dugaan Luluh Energi Pada Tube Baja A53-Grade B. *JURNAL POWERPLANT*, 4(2), 69–75. Pentingnya mempertimbangkan literatur studi tentang pengaruh berbagai kondisi batas, efek laju regangan, dan pengaruh inersia dalam memprediksi respons sistem tersebut ditunjukkan. Dalam kondisi tumbukan, ditunjukkan bahwa sekelompok tabung tersebut mengalami gelombang kejut yang merambat melalui sistem. Hasil eksperimen ini sebanding dengan prediksi teori gelombang kejut struktural-numerik. (Sahlan, 2019)

Rusjdi, H., Pramono, A. W., & Faathir, W. B. (2019). Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Sifat Mekanis Dan Struktur Mikro Pada Baja AISI 4340. *JURNAL POWERPLANT*, 4(2), 95–106. Perlakuan panas merupakan kombinasi operasi pemanasan dan pendinginan pada logam atau paduan dalam keadaan padat dengan interval waktu penahanan tertentu. Perlakuan panas ini diberikan pada logam atau paduan untuk mendapatkan sifat-sifat tertentu. Proses perlakuan panas bervariasi tergantung pada tujuan pemberian perlakuan panas itu sendiri, yang umumnya mengacu pada sifat mekanik dan struktur mikro material. Dalam penelitian ini, kami ingin mengetahui pengaruh perlakuan panas terhadap sifat mekanik dan struktur mikro yang terjadi. Proses perlakuan panas dilakukan dengan metode quenching dan tempering, dilakukan pada awal benda kerja AISI4340 dan baja karbon sedang dan pengujian mekanis yang dilakukan adalah uji tarik, uji kekerasan Rockwell, dan pengujian struktur mikro. (Rusjdi, H., Pramono, A. W., & Faathir, 2019)

Sulistyo, E., & Jumadi, J. (2019). Analisis Pengaruh Unsur Pemadu Terhadap Struktur Mikro Dan Kekerasan Pada Baja Laterit. *JURNAL POWERPLANT*, 4(1), 12–20. Analisis pengaruh unsur paduan terhadap komposisi pengangkatan dalam

2.2.1 Landasan Teori

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berperan penting dalam memenuhi kebutuhan energi secara global. (Hidayat, A., & Susanto, 2021) PLTU bekerja dengan mengubah energi panas menjadi energi mekanis melalui siklus termodinamika. Pembangkit Listrik tenaga uap standar terdiri dari komponen-komponen utama seperti *boiler* untuk menghasilkan uap *superheated*, turbin uap untuk ekspansi dan mengubah energi panas menjadi energi mekanik. *Condenser* untuk mengubah uap menjadi air, dan pompa untuk menaikkan tekanan fluida kerja ke tekanan kerja boiler (Al-Dabbagh, M. S., & Mohammed, 2021), ditunjukkan oleh gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Siklus PLTU

2.2.2 Parameter Turbin

Parameter turbin dan boiler merupakan data operasional krusial yang menggambarkan performa serta kondisi kerja system pembangkit listrik. Data ini mencakup variabel teknis yang spesifik pada turbin dan boiler, khususnya saat beroperasi dalam kondisi normal. Pemantauan dan analisis parameter-parameter ini sangat penting untuk memastikan efisiensi, keandalan, dan keamanan operasional PLTU secara keseluruhan, ditunjukkan pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Parameter kinerja Turbin

No	Paramater Turbin (Qingdao Jieneng)	Nilai
1	Daya Output	25 MW
2	<i>Speed Turbin</i>	3000 r/min
3	<i>Main steam Pressure</i>	7 ~ 8 MPa
4	<i>Main steam Temperatur</i>	535 ~ 540 deg Celcius
5	<i>Main steam Flow</i>	92.6 T/h
6	<i>Vacuum Pressure</i>	-78.84 KPa
7	Diameter <i>Steam inlet</i> MSV	200 mm

Dan untuk parameter operasi boiler terlampir pada Tabel 2.2 berikut ini:

Tabel 2. 2 Parameter kinerja Boiler

No	Paramater Boiler (CFB Boiler)	Nilai
1	<i>Pressure Furnace</i>	-87 Pa
2	<i>Level Steam Drum</i>	26~27 mm
3	Total <i>Coal Flow</i>	20 T/h
4	Kualitas Batubara dengan Nilai Kalori	3800 ~4100 KCal

2.3 Governor Valve Turbin

Governor valve turbin adalah komponen penting dalam sistem pengendalian turbin uap di PLTU. *Valve* ini berfungsi untuk mengatur aliran uap yang masuk ke turbin, sehingga dapat mengendalikan kecepatan putaran turbin dan daya keluaran generator (Idoc.Pub.com, 2019) (Scribd.com, n.d.)

Komponen-komponen utama dari *Governor valve* pada turbin utama:

1. *Valve Body*: sebagai wadah utama yang menampung semua komponen internal *governor valve* dan biasanya terdapat inlet dan outlet untuk aliran uap.
2. *Valve Stem*: sebagai penghubung actuator dengan *valve disc*. Stem ini meneruskan gaya dari actuator untuk membuka dan menutup katup.
3. *Valve disc*: komponen yang secara langsung mengatur aliran uap dengan membuka atau menutup terhadap seat (dudukan katup). Di PLTU Amurang terdapat 5 *valve disc*, di mana setiap *valve disc* mempunyai settingan yang berbeda untuk pengaturan *steam* yang masuk ke *valve*.
4. *Seat*: Permukaan tempat *valve disc* menutup untuk menghentikan aliran uap yang masuk.
5. *Cross Bar Guide*: sebagai tempat dari 5 *valve disc* menjadi kesatuan utuh untuk mengatur aliran uap yang masuk ke *valve*.
6. *Linkage Arm*: sebagai penghubung *valve stem* dengan actuator LVDT.
7. *LVDT*: untuk mengatur posisi *valve stem* dan memberikan sinyal feedback ke sistem control.
8. *Hidraulic Actuator*: berfungsi untuk menggerakkan *valve stem* berdasarkan sinyal dari sistem kontrol.

Prinsip kerja *Governor valve (GV) Steam Turbine*: Pengendalian aliran melalui sekunsing pembukaan *multi-disc*.

Governor valve pada turbin uap, yang dalam kasus ini adalah “*disc gv* amurang unit 2”, berfungsi sebagai perangkat pengatur utama untuk mengontrol laju aliran massa uap yang disuplai ke turbin, dan secara langsung mempengaruhi daya yang dihasilkan serta kecepatan putaran turbin. Katup ini menggunakan desain inovatif *multi-disc* yang diatur pada sebuah *cross bar*, memungkinkan control aliran yang sangat presisi melalui sekuensing pembukaan individual *disc*. Pergerakan *cross bar* ini dikendalikan oleh stem actuator, yang merespons sinyal dari system control turbin. (Michael Gron, G., Justin D. BALTRUCKI, Peter Popadiuc, Robb Janak, 2019)

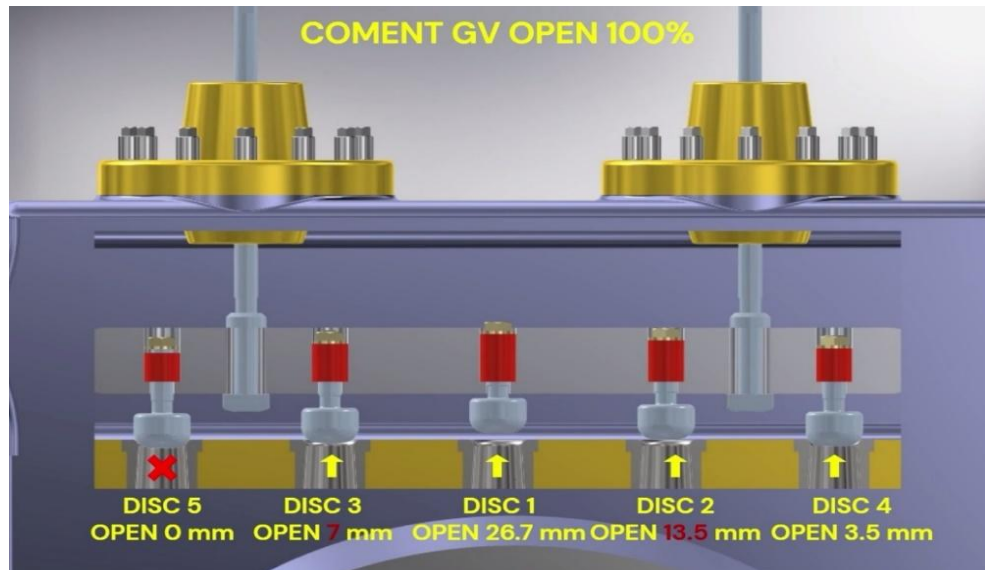
Proses *opening governor valve* dari 0% sampai 100% ditunjukkan pada tabel 2.3, menjelaskan tentang proses kenaikan *disc valve* no. 1, no. 2, no. 3, no. 4, dan no. 5.

Tabel 2. 3 *Opening governor valve*

<i>Opening GV</i>	<i>Disc 1</i>	<i>Disc 2</i>	<i>Disc 3</i>	<i>Disc 4</i>	<i>Disc 5</i>
0%	0	0	0	0	0
10%	1 mm	0	0	0	0
20%	1.7 mm	0	0	0	0
30%	5.2 mm	0	0	0	0
40%	8.2 mm	0	0	0	0
50%	10.2 mm	0	0	0	0
60%	14.7 mm	0	0	0	0
70%	17.7 mm	1 mm	1 mm	0	0
80%	20.7 mm	4 mm	4 mm	0	0
90%	23.7 mm	7 mm	7 mm	0.5 mm	0
100%	26.7 mm	10 mm	10 mm	3.5 mm	0

Saat 100% Open (katup terbuka penuh). Kondisi fisik *cross bar* telah terangkat ke posisi puncaknya, yaitu 26.7 mm dari posisi 0 mm. posisi dan bukaan *disc* (berdasarkan "COMENT GV OPEN 100%). *Disc* no. 5 tetap dalam kondisi open 0 mm (tertutup), seperti yang ditandai dengan silang merah. Ini adalah fungsi desain yang disengaja, di mana *disc* no. 5 tidak berkontribusi pada penambahan aliran. *Disc* no. 3 terangkat 7 mm dari dudukannya. *Disc* no. 1 terangkat 26.7 mm dari dudukannya. (ini adalah *disc* dengan bukaan tertinggi dan menjadi referensi untuk

stroke total). *Disc* no. 2 terangkat 13.5 mm dari dudukannya. *Disc* no. 4 terangkat 3.5 mm dari dudukannya. Aliran uap mencapai volume maksimum yang diizinkan oleh konfigurasi bukaan *disc* yang berbeda ini. Meskipun katup 100% open, aliran tidak sepenuhnya tanpa hambatan karena *disc* no. 5 tetap tertutup dan *disc* lain memiliki bukaan maksimal yang berbeda-beda. Seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Prinsip kerja (*opening sequence disc GV*)

Pengaturan daya/kecepatan dengan memvariasikan posisi cross bar, sistem kontrol turbin (*governor*) dapat mengatur bukaan gabungan dari *disc-disc* katup. Peningkatan bukaan *disc* akan meningkatkan aliran massa uap ke turbin, menghasilkan daya yang lebih besar dan kecepatan putaran yang lebih tinggi. Sebaliknya, penutupan *disc* mengurangi aliran uap, menurunkan daya dan kecepatan. Kontrol presisi sekuensing pembukaan *multi-disc* yang kompleks ini memungkinkan control aliran uap yang sangat halus dan presisi. Setiap *disc* memberikan kontribusi aliran yang berbeda pada tahapan tertentu, memungkinkan karakteristik aliran non-linear yang dapat dioptimalkan untuk efisiensi turbin pada berbagai beban.

2.4 Material *Disc Governor Valve Turbin*

Pemilihan material yang ideal untuk *governor valve steam* turbin sesuai standar API 611 melibatkan pertimbangan yang cermat terhadap berbagai faktor. API 611 sendiri merupakan standar yang mengatur turbin uap untuk keperluan umum, dan di dalamnya terdapat paduan terkait material yang direkomendasikan. (American Petroleum Institute, 2022)

2.4.1 Faktor-faktor dalam pemilihan material:

a. Kondisi operasi pembangkitan turbin PLTU Amurang:

Mainsteam flow beban 100%: 90-95 t/h, pressure *main steam* 8 ~ 9.2 MPa. *Temperature GV* terpapar pada suhu dan tekanan uap yang tinggi. Material harus tahan terhadap kondisi ekstrem ini tanpa mengalami deformasi atau kerusakan. Material harus tahan terhadap korosi untuk mencegah kerusakan dan kebocoran.

b. Kinerja mekanik:

Kekuatan dan ketangguhan material harus memiliki kekuatan dan ketangguhan yang tinggi untuk menahan gaya-gaya yang bekerja pada katup, seperti gaya tekan, gaya geser, dan gaya impact.

c. Sifat Fisik:

Koefisien ekspansi termal material harus memiliki koefisien ekspansi termal yang rendah untuk meminimalkan perubahan dimensi akibat perubahan suhu.

d. Kemampuan manufacture:

Kemampuan las, jika diperlukan perbaikan atau modifikasi, material harus mudah di proses *machining* atau dilas.

e. Biaya

Ketersedia, harga, biaya material dan ketersediannya juga menjadi pertimbangan penting.

2.4.2 Material yang direkomendasikan oleh API 611. (American Petroleum Institute, 2022)

API 611 umumnya merekomendasikan baja paduan tinggi untuk komponen-komponen *governor valve*. Beberapa jenis baja paduan yang umum digunakan adalah:

- a. Baja tahan karat Austenitik: Jenis baja ini memiliki kombinasi kekuatan, ketahanan terhadap korosi, dan ketahanan terhadap suhu tinggi yang baik.
- b. Baja Martensitik yang memiliki kekuatan yang tinggi, tetapi kurang tahan terhadap korosi dibandingkan baja austenitik.
- c. Paduan nikel, sering digunakan untuk aplikasi suhu tinggi karena memiliki kekuatan dan ketahanan terhadap korosi yang sangat baik pada suhu ekstrem.

2.4.3 Pemilihan material yang ideal:

Pemilihan material yang ideal untuk *governor valve steam* turbin harus mempertimbangkan factor-factor di atas dan disesuaikan dengan kondisi operasi spesifik turbin. API 611 memberikan panduan umum untuk memenuhi standar dan spesifikasi yang relevan.

DIN CK45 adalah material existing yang baja karbon medium dengan kekuatan dan ketangguhan yang baik. Kandungan karbonnya yang berkisar antara 0.42% - 0.50% memberikan kekuatan yang cukup berbagai aplikasi Teknik.

Sifat-sifat DIN CK45 yang releva untuk *disc governor valve* turbin:

- a. Kekuatan Tarik tinggi, mampu menahan gaya tarik yang bekerja pada *disc governor*.
- b. Ketangguhan yang baik, tahan terhadap retakan dan patah, penting untuk komponen yang berputar dengan kecepatan tinggi.
- c. Kekerasan sedang, dapat ditingkatkan melalui perlakuan panas untuk meningkatkan ketahanan terhadap keausan.
- d. Kemampuan mesin yang baik dapat diproses *machining* menjadi komponen yang presisi.

Aplikasi DIN CK45 pada *disc governor valve turbin*, sering digunakan untuk membuat komponen yaitu *Disc*, poros penghubung *Disc* dengan mekanisme kontrol, dan tuas pengungkit. (Rahman, A., & Susanto, 2020)

AISI Material 410 adalah material baja tahan karat martensitik yang memiliki kandungan chromium minimal 12%. Baja ini dapat dikeraskan melalui perlakuan panas dan memiliki ketahanan terhadap korosi yang baik.

Sifat-sifat AISI Material 420 yang relevan untuk *disc governor valve turbin*:

- a. Kekuatan dan kekerasan tinggi yang memiliki ketahanan terhadap keausan dan deformasi.
- b. Ketahanan terhadap korosi, untuk lingkungan kerja *turbin* yang lembab dan berpotensi korosif.
- c. Kemampuan mesin yang baik, yaitu mudah dibentuk dan diproses *machining*.

2.5 Analisa Gaya, Tegangan, dan Pemuaian *Thermal* pada *Lock Nut Disc GV*

Analisis gaya tekanan merupakan fondasi krusial dalam berbagai ilmu Teknik, khususnya dalam perancangan dan evaluasi komponen yang berinteraksi langsung dengan fluida. Dalam konteks sistem fluida bertekanan, seperti pada PLTU yang melibatkan aliran uap bertekanan tinggi, pemahaman mendalam tentang distribusi dan magnitude gaya tekanan menjadi esensial untuk menjamin integritas struktural, keamanan operasional, dan efisiensi sistem secara keseluruhan. Gaya tekan yang timbul akibat interaksi antara fluida dan permukaan padat, dapat menyebabkan tegangan material, deformasi, dan bahkan kegagalan fatal jika tidak diperhitungkan dengan cermat.

Menghitung Gaya Akibat Tekanan Uap pada *Nut & Bolt Disc GV* (Willam, 2018)

Rumus yang digunakan:

Menurut prinsip dasar mekanika fluida gaya yang ditimbulkan oleh tekanan pada suatu permukaan dihitung sebagai:

$$F = P \times A$$

Di mana:

$$P = \text{Tekanan uap (Pa)} \quad A = \pi r^2$$

$$A = \text{Luas penampang tempat tekanan bekerja (m}^2\text{)}$$

Menghitung Tegangan Tarik pada Ulir Baut untuk Masing-masing Material

Rumus yang digunakan :

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Di mana:

$$F_{\text{steam.GV}} = \text{Luas efektif ulir, diasumsikan 75\% dari luas total baut berdasarkan standar desain ulir ISO 898-1}$$

Faktor keamanan untuk masing-masing material (Safety Factor-SF)

Faktor keamanan (SF) adalah rasio yang menunjukkan seberapa besar suatu material lebih kuat dari beban yang diterimanya. Dalam konteks ini, SF dihitung dengan membagi kekuatan luluh material (σ_y) dengan tegangan yang dialami oleh ulir (σ_{thread}).

$$SF = \frac{\sigma_y}{\sigma_{\text{thread}}}$$

Menghitung Pemuaian Termal pada ulir baut Rumus yang digunakan:

Menurut hukum pemuaian linier :

$$\Delta L = \alpha \times L_{\text{Initial}} \times \Delta T$$

2.6 Analisa Tegangan Lentur (*bending stress*) maksimum pada Pin

Penyebab potensial patah pada pin kemungkinan besar disebabkan oleh faktor berikut:

1. Fatigue (kelelahan material): getaran berulang akibat nur kendor menyebabkan retak mikro yang berkembang menjadi patah. (*Referensi; ASME B31.1 – Power Piping, Fatigue Analysis Section*).

2. Impact Load (Beban kejut): Jika nut kendur, pin bisa mengalami benturan mendadak. (Referensi; ASTM E23 – *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*).
3. *Fretting Wear*: gesekan berulang akibat nut kendur dapat menyebabkan keausan yang memperlemah struktur pin. (Referensi: *ASM Handbook, Volume 19: Fatigue and Fracture*).

Menghitung Tegangan Fatigue Akibat Getaran

Untuk mengetahui apakah pin patah akibat getaran, kita harus menghitung tegangan dinamis maksimum (σ_{dyn}) dan membandingkannya dengan batas kelelahan material ($\alpha_{\text{endurance}}$) *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, fatigue Analysis Criteria*

Tegangan Lentur Maksimum

Rumus :

$$\sigma_a = \frac{Mc}{I}$$

Di mana :

- $M = \frac{Fl}{4}$ (momem maksimum untuk beban titik di tengah bantang dengan tumpuan di kedua ujung)
- $c = \frac{d}{2}$ (jarak dari netral axis ke serat terluar)
- $I = \frac{\pi d^4}{64}$ (momen inersia untuk batang silinder)

2.7 Penentuan Torque Tightening untuk Bolt & Nut GV

a. Perhitungan Gaya Preload (F)

Konsep Gaya Preload

Menurut VDI 2230 – *Systematic calculation of high duty bolted joints*, gaya *preload* (F) dihitung berdasarkan 70% dari kekuatan tarik material baut, karena baut tidak boleh mencapai batas elastisnya dalam kondisi normal.

$$F = 0.7 \times A_s \times R_m$$

Luas Akar Ulir Efektif (A_s)

Berdasarkan ISO 898-1, luas akar ulir efektif untuk M30 adalah

$$A_s = 561 \text{ mm}^2$$

b. Perhitungan *Torque Tightening* (T)

Menurut ASME PP-1 dan VDI 2230, torsi pengencangan dihitung dengan rumus:

$$T = K \times F \times d$$

Di mana :

- K = Koefisien gesekan $(0.16 - 0.2)$ untuk baut baja berpelumas, berdasarkan ASME PCC-1
- F = Gaya preload
- d = Diameter nominal baut (m)

Menggunakan $K = 0.18$ dan $d = 30 \text{ mm} = 0.03 \text{ m}$:

c. Faktor Keamanan Tidak Selalu 70% dari Kekuatan Tarik

Dalam aplikasi nyata, manufaktur seperti Thosiba atau Siemens sering kali tidak menggunakan 70% dari kekuatan tarik sebagai gaya preload maksimum. Sebagai gantinya, mereka menggunakan 30% - 50% dari kekuatan tarik untuk memperhitungkan :

- Pengaruh pemuaian akibat suhu tinggi
- Pencegahan tegangan berlebih pada baut

- Mencegah deformasi plastis pada material baut dan komponen yang dikencangkan

Jika manufaktur menggunakan 30% dari kekuatan tarik yang kemudian dijadikan SOP :

$$F = 0.3 \times A_s \times R_m$$

2.8 Tegangan dan Regangan pada Material

Salah satu jenis pengujian mekanik untuk menentukan sifat-sifat mekanis suatu material. Ketika logam, ketika dikenai gaya tarik aksial yang terus meningkat hingga material tersebut putus atau patah.

Tegangan (*Stress*, σ): Gaya yang diberikan persatuan luas penampang material.

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Di mana:

- σ = Tegangan (Pa) atau MPa atau N/mm^2
- F = Gaya tarik yang diberikan (N)
- A_0 = Luas penampang awal spesimen (mm^2)

Regangan (*Strain*, ϵ): Perubahan panjang per satuan panjang awal material. Ini menunjukkan seberapa besar deformasi yang terjadi relatif terhadap dimensi aslinya.

Rumusnya:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}$$

Di mana:

- ϵ = Regangan (tidak berdimensi atau mm/mm)
- ΔL = Pertambahan panjang (mm)
- L = Panjang akhir (mm)
- L_0 = Panjang awal spesimen (panjang ukur/gauge length) (mm).

Modulus Elastisitas (*Modulus Young*, E): Ini adalah ukuran kekakuan material dalam daerah elastis. Rumusnya:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \text{ (di daerah elastis)}$$

Di mana:

- E = Modulus Elastisitas (Pa atau MPa)
- σ = Tegangan (Pa atau MPa).
- ϵ = Regangan (tidak berdimensi).

Persentase Perpanjangan (Elongation, %EL): Mengukur keuletan material. Rumusnya:

$$\%EL = \frac{(L_f - L_0)}{L_0} \times 100\%$$

Di mana:

- L_f = Panjang akhir spesimen setelah patah (mm).
- L_0 = Panjang awal spesimen (panjang ukur) (mm).

Persentase Reduksi Luas Penampang (*Reduction of Area*, %RA): Juga mengukur keuletan material, menunjukkan seberapa banyak luas penampang berkurang di area patahan. Rumusnya:

$$\%RA = \frac{(A_0 - A_f)}{A_0} \times 100\%$$

Di mana:

- A_0 = Luas penampang awal spesimen (mm²).
- A_f = Luas penampang akhir spesimen di daerah patah (mm²)