

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Klasifikasi Jembatan Standar Bina Marga

1. Jembatan yang dibangun tahun 1969-1988

Dalam periode 1969-1988, dikenal 3 kelas jembatan sebagai berikut:

- a. Kelas A, *option* 1,0 m + 7,0 m + 1,0 m dengan beban 100% Bina Marga *Loading*.
- b. Kelas B, *option* 0,5 m + 6,0 m + 0,5 m dengan beban 70% Bina Marga *Loading*.
- c. Kelas C, *option* 0,5 m + 4,5 m + 0,5 m dengan beban 50% Bina Marga *Loading*.

2. Jembatan yang dibangun setelah tahun 1988

Dalam periode sesudah tahun 1988, dikenal 3 kelas jembatan sebagai berikut:

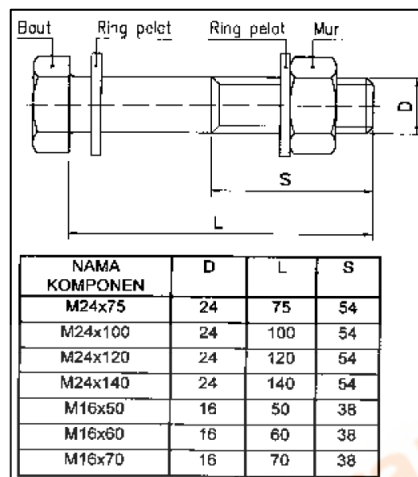
- a. Kelas A, *option* 1,0 m + 7,0 m + 1,0 m dengan beban 100% Bina Marga *Loading*.
- b. Kelas B, *option* 0,5 m + 6,0 m + 0,5 m dengan beban 100% Bina Marga *Loading*.
- c. Kelas C, *option* 0,5 m + 4,5 m + 0,5 m dengan beban 100% Bina Marga *Loading*.

Kelas A digunakan untuk jembatan yang terletak di jalan Nasional atau jalan Provinsi, Kelas B digunakan untuk jembatan yang terletak pada jalan Kabupaten, dan Kelas C digunakan untuk jembatan yang terletak pada ruas jalan Kabupaten atau pada ruas jalan yang lebih rendah dari pada jalan Kabupaten.

2.2 Jembatan Rangka Baja Tipe Austria Standar Bina Marga

Komponen-komponen baja konstruksi dalam Jembatan Rangka Austria dibuat dari baja yang memenuhi S355JO atau HISTAR S460 sesuai dengan standar DIN EN 10025, kecuali ikatan angin dan sandaran dibuat dari baja S235JO. Baut pada sambungan menggunakan M16 dan M20, baut tegangan tinggi kualitas 10.9 sesuai DIN 6914. Semua baut konstruksi untuk penyambungan batang sendiri-

sendiri, kecuali penyambungan tumpuan kepada pelat dasar yang berturut-turut, peredam-peredam kepada besi siku penyambung, harus diberikan pratekanan terakhir dengan memberi tarikan puntiran. Dimensi baut secara metrik dapat dilihat pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1 Baut standar metrik

(Sumber: Pedomen pemeriksaan jembatan rangka baja, Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga No. 005/BM/2009)

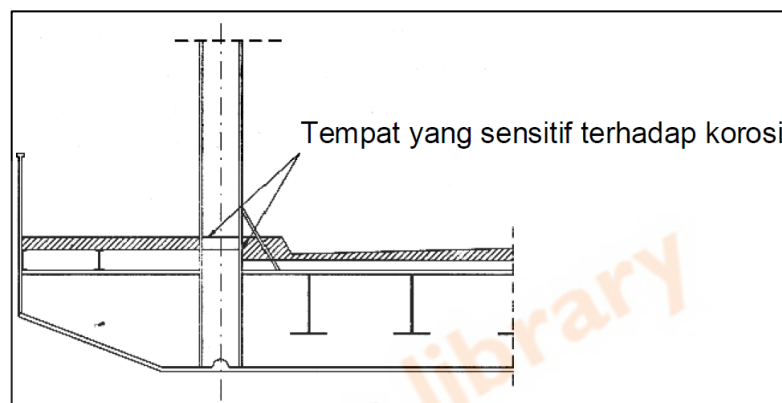
Sistem perletakan Jembatan Rangka Austria adalah jenis elastomer. Pelat elastomer diletakan di atas suatu pelat baja yang nantinya ditutup kembali dengan pelat baja. Sistem lantai Jembatan Rangka Austria menggunakan bekisting plat baja bergelombang didalamnya diberi tulangan agar menyatu dengan beton.

2.2.1 Kerusakan Tipikal Struktur Baja Jembatan

Korosi merupakan faktor utama terhadap penurunan kualitas bagian struktural dan sambungan. Kerusakan oleh korosi mengakibatkan meningkatnya tegangan dalam bagian struktural akibat pengurangan penampang, dan pengurangan kekakuan struktural. Ada lima jenis korosi yang teramati pada jembatan baja yaitu:

1. Korosi permukaan, terjadinya kerusakan seragam pada permukaan baja struktural yang relatif besar dan pengurangan penampang-lintang di dalam bagian struktural.

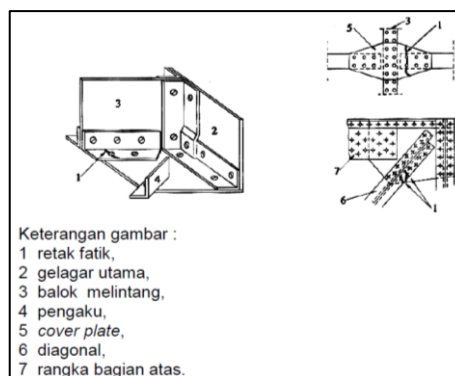
2. Korosi cekungan, terjadi pada permukaan baja struktural yang relatif kecil, mengembang sangat dalam didalam baja, dan mengarah pada konsentrasi tegangan lokal.
3. Korosi celah, terjadi di kontak pertemuan antara dua batang baja yang diperkuat oleh baut, pelat penyambung, serta pelat buhul.
4. Korosi galvanis, terjadi pada sambungan dua tipe baja yang berbeda seperti pada pengelasan dan mengarah pada perusakan bahan lokal.



Gambar 2.2 Penampang struktur jembatan dari tipe jembatan rangka dengan ikatan angin di bagian atas dengan lokasi yang sensitif

(Sumber: Pedoman pemeriksaan jembatan rangka baja, Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga No. 005/BM/2009)

Tipe kedua yang menyebabkan kerusakan bangunan atas jembatan baja adalah efek fatik dan retak fraktur tergantung pada intensitas beban siklis, tingkat tegangan dalam bagian struktur primer dan sekunder. Retak fraktur terjadi karena kekurangan daktilitas dan penurunan suhu secara signifikan.



Gambar 2.3 Lokasi yang memungkinkan dari retak fatik di dalam jembatan rangka yang disambung dengan baut

(Sumber: Pedoman pemeriksaan jembatan rangka baja, Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga No. 005/BM/2009)

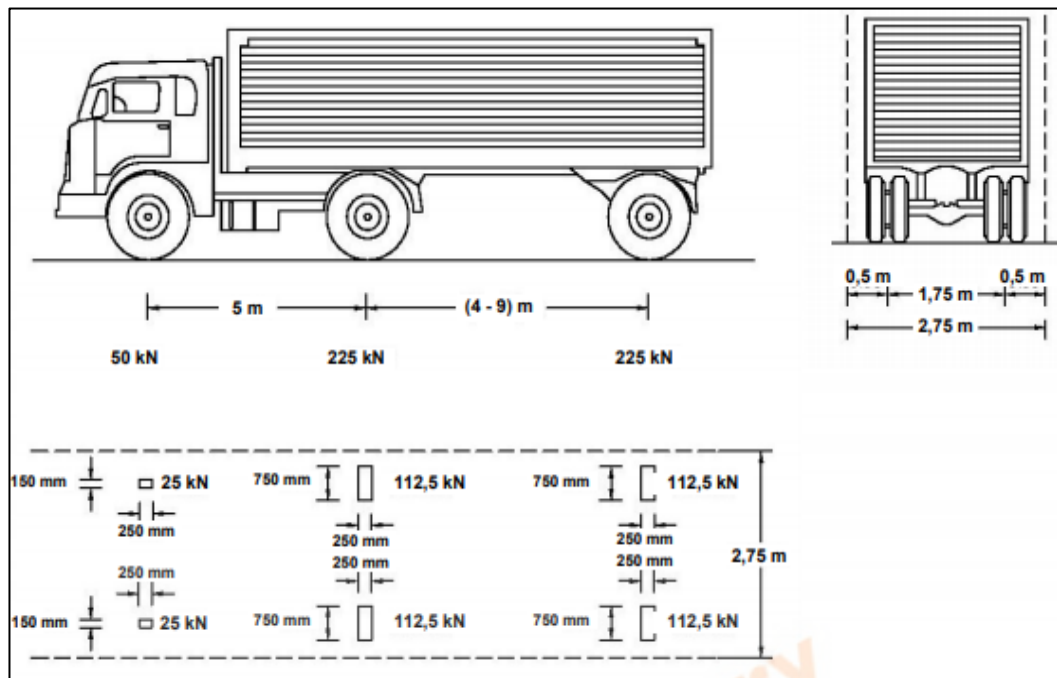
2.3 Teknologi *Weigh in Motion* (WIM)

Salah satu teknologi yang berkembang saat ini dalam pengukuran beban kendaraan yang optimal dengan durabilitas yang tinggi adalah pengukuran beban kendaraan bergerak (*Bridge Weigh in Motion*). Instrumen sensor dipasang pada batang jembatan untuk digunakan dalam mengukur respon batang tersebut terhadap beban lalu lintas yang dikonversi menjadi besaran beban lalu lintas itu sendiri yang memungkinkan kendaraan dapat melaju sesuai kecepatan lalu lintas tanpa adanya gangguan selama pengukuran dengan *Weigh in Motion* (WIM) dilakukan karena alat sensor ini dipasang di batang bawah jembatan. Parameter yang dapat diukur dari sistem ini adalah berat total kendaraan, berat sumbu kendaraan, jarak antar sumbu kendaraan, dan kecepatan kendaraan. Data tersebut salah satunya dapat digunakan untuk keperluan operasional dan perawatan infrastruktur jembatan.

Hasil pengukuran WIM (*Weigh in Motion*) berupa data statistik ini dalam bentuk jumlah kendaraan per kelas kendaraan. Klasifikasi jenis kendaraan yang digunakan adalah *data logger* Marksman 660 – *WIM System*, yaitu klasifikasi EURO13 yang membagi jenis kendaraan dalam 12 kelas kendaraan yang berbeda (Metro Count 2009).

2.4 Beban Truk Standar SNI 1725:2016

Pembebanan truk “T” yang diatur pada SNI 1725:2016 Pembebanan Jembatan terdiri dari kendaraan truk *semi-trailer* yang mempunyai susunan dan berat gandar tampak pada Gambar 2.4. Berat dari setiap gandar disebarkan menjadi 2 beban merata sama besar yang merupakan bidang kontak antara roda dengan permukaan lantai. Jarak antar 2 gandar tersebut bisa dirubah dari 4,0 m sampai 9,0 m untuk mendapatkan pengaruh terbesar pada arah memanjang jembatan.



Gambar 2.4 Pembebanan truk "T" (500 kN)
(Sumber : SNI 1725:2016 Pembebanan Jembatan)

2.5 Fatik

Fatig didefinisikan mekanisme kegagalan yang terjadi akibat formasi dan pertumbuhan retakan akibat tegangan berulang (Barker, 2007). Tegangan ini terjadi pada kendaraan yang melintas pada struktur perkerasan jembatan secara berulang dari waktu ke waktu. Fatig merupakan salah satu penyebab paling umum dari kegagalan struktur dengan material utamanya adalah baja.

Perhatian yang cukup dalam pemilihan sambungan dan detail dan pengetahuan tentang kebutuhan beban layan dapat hampir menghilangkan resiko kegagalan, sedangkan pengabaian faktor ini bisa menjadi sebuah bencana (Gurney, 1992). Kekuatan fatig tergantung pada konfigurasi sambungan bukan konstanta material seperti tegangan leleh atau modulus elastisitas. Hal yang mempengaruhi dalam perencanaan menggunakan analisis fatig adalah:

1. LHR (lalu lintas harian rata-rata) untuk kendaraan truk atau ADTT (*Average Daily Truck Traffic*) dalam suatu daerah yang akan dibangun jembatan, yang akan mempengaruhi nilai siklus.

2. Dimensi struktur, dan beban mati tambahan yang ditanggung oleh struktur berpengaruh terhadap tegangan yang terjadi saat beban kendaraan tidak ada dan berpengaruh terhadap *stress range*.
3. Konfigurasi dan tipe sambungan yang digunakan pada pertemuan batang struktur jembatan.
4. Panjang struktur batang jembatan. Semakin panjang batang yang digunakan maka fluktuasi akibat beban truk semakin besar.

Kekuatan fatik secara khusus terhubung dengan jangkauan tegangan beban hidup dan jumlah dari siklus tegangan dibawah kondisi beban layan. Karena sebgaiian besar truk tidak melebihi batas beban yang diizinkan, akan berlebihan apabila digunakan model beban hidup secara penuh. Ini berarti akan digunakan lebih sedikit beban untuk memperkirakan jangkauan tegangan beban hidup (Barker, 2007).

Lokasi awal retak pada komponen logam yang mengalami pembebanan dinamis atau siklik adalah pada titik daerah dimana memiliki kekuatan yang paling minimum dan atau apada titik daerah dimana mengalami tegangan yang paling maksimum. Dalam fatik terdapat 3 fase terjadinya kegagalan dalam perpatahan fatik yaitu:

1. Permulaan retak (*crack initiation*)

Mekanisme permulaan retak pada dasarnya dimulau dengan *crack* sebagai awal terjadinya fatik kemudian *crack* pada permukaan (seperti goresan, *notch*, lubang, dll) merambat karena adanya pembebanan berulang.

2. Perambatan retak (*crack propagation*)

Pembentukan awal retakan dapat terjadi pada lokasi yang paling lemah kemudian terjadi pembebanan bolak balik yang menyebabkan lokal plastisitas sehingga terjadi perambatan retak. Pada penyebaran retak ini jumlah siklus yang merupakan penyebab keretakan awal dan fase perambatannya. Dimana penyebaran retak ini berkembang menjadi *microcracks*. Perambatan *microcracks* berkembang membentuk *macrocracks* yang akan berujung pada *failure*.

3. Patah (*fracture*)

Patah adalah proses akhir dari kerusakan pada struktur pada saat mengalami pembebanan sehingga struktur tersebut mengalami kegagalan. Pada tahap ini perambatan retak yang terjadi pada material sangat cepat. Perpatahan terjadi ketika material telah mengalami siklus tegangan dan regangan yang akhirnya menghasilkan kerusakan permanen (Dieter, 2012)

2.5.1 Mekanisme Kelelahan Logam

Tingkat keuletan logam berpengaruh terhadap percepatan perambatan retak, semakin rendah tingkat keuletan logam maka lebih cepat mengalami *crack*, tetapi logam yang memiliki sifat daktilitas akan lebih sulit dalam tahap perambatan retaknya. Begitupun sebaliknya, logam yang keras akan lebih tahan terhadap pembentukan awal retak tetapi kurang tahan terhadap perambatan retak, maka logam tidak mengalami permulaan retak tetapi langsung ketahap perambatan retak.

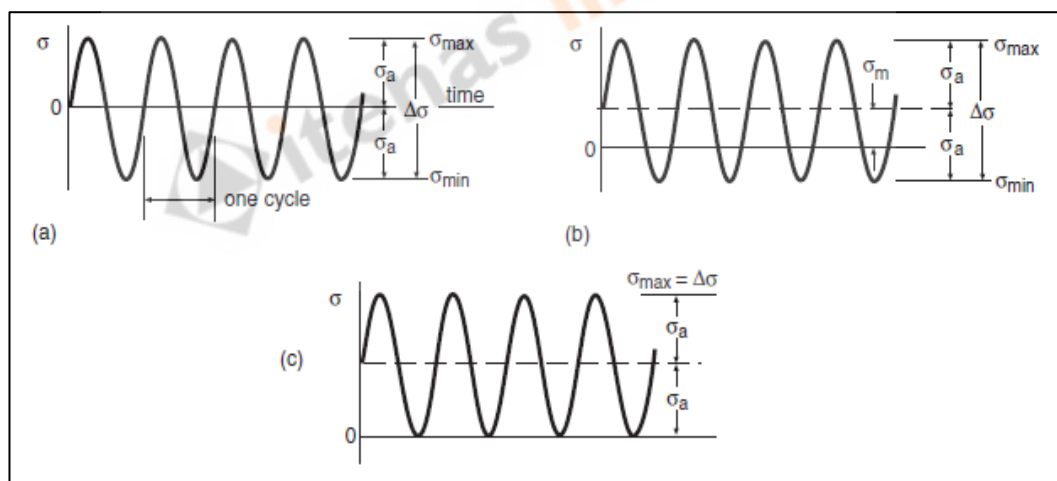
Logam yang bersifat daktilitas pada skala mikroskopik yaitu tidak homogen sehingga terdapat konsentrasi tegangan. Ketika ada beban dinamik di daerah *notch* maka akan menyebabkan pusat kelelahan pada daerah tersebut. Kelelahan plastis yang terpusat tersebut menyebabkan distorsi dan membentuk *slip band* yaitu daerah yang sangat intens mengalami deformasi. Semakin banyaknya tegangan yang beresilasi maka *slip bands* terus bertambah dan akan bergabung membentuk *microscopic crack*. Selama beban dinamik melampaui tegangan leleh walaupun tidak ada *nocth*, mekanisme ini tetap terjadi.

Perpatahan yang berujung tajam menimbulkan konsentrasi tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan *notch* dan daerah plastis selalu timbul di ujung *crack* ketika *crack* terbuka akibat tegangan tarik yang kemudian menumpulkan *crack*. *Crack* yang tumpul mengurangi efektivitas konsentrasi tegangan. Ketika tegangan tarik berubah siklus ke tegangan tekan/nol, maka akan menyebabkan *crack* menutup dan *momentarily yielding* berhenti dan hal ini menyebabkan *crack* meruncing kembali tetapi dengan dimensi yang cukup besar. Hal ini terjadi berulang-ulang sepanjang tegangan lokal di ujung *crack* bersiklus mulai dari bawah tegangan tarik leleh ($< \sigma_y$) sampai tegangan diatas tegangan tarik leleh ($> \sigma_y$).

2.5.2 Beban Siklik

Beban siklik merupakan pengaplikasian dari pengulangan atau fluktuasi tegangan, regangan, atau intensitas tegangan pada suatu komponen struktural. Beberapa pengaplikasian praktisi, dan beberapa pengujian fatik/kelelahan pada suatu material meliputi siklus antara tegangan maximum dan minimum itu adalah konstan. Siklus tersebut merupakan tegangan amplitudo konstan yang ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.

Rentang tegangan, $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$, merupakan perbedaan antara nilai maksimum dan minimum. Tegangan dinamis terjadi mulai dari tegangan rata-rata nol ($\sigma_m = 0$) dengan amplitudo yang konstan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.5 (a)**, tetapi tidak terjadi pada yang ditunjukkan pada **Gambar 2.5 (b)** memiliki tegangan rata rata tidak sama dengan nol ($\sigma_m \neq 0$). Tegangan dinamis dimulai diatas garis rata-rata nol dengan amplitudo konstan ($\sigma_{min} = 0; \sigma_{max} = \Delta\sigma$) seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.5 (c)**.



Gambar 2.5 Siklus amplitudo konstan

Amplitudo (σ_a), merupakan variasi dari nilai rerata. Persamaan matematika dari **Gambar 2.5** memenuhi persamaan 2.1

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}, \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (a,b) \quad (2.1)$$

Nilai dari σ_a dan $\Delta\sigma$ selalu positif, jika $\sigma_{max} > \sigma_{min}$, dimana tegangan yang terjadi positif. Rasio dua variabel tersebut dapat digunakan yang dipenuhi oleh persamaan 2.2.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}, A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (2.2)$$

dimana R merupakan rasio tegangan dan A adalah rasio amplitudo.

Tegangan rata-rata yang mempengaruhi ketahanan fatik dapat ditunjukkan dengan amplitudo tegangan yang dinyatakan dengan ratio tegangan (R). Untuk $R=-1$ artinya amplitudo tegangan tarik sama dengan amplitudo tegangan tekan. Bila nilai R cenderung positif maka ketahanan fatiknya menjadi turun.

Hubungan antara nilai rasio tegangan dan rasio amplitudo (Akuan 2007) yaitu:

- a. Jika $R = -1$, maka $A = \sim$ (kondisi *fully reversed*)
- b. Jika $R = 0$, maka $A = 1$ (kondisi *zero to maximum*)
- c. Jika $R = \sim$, maka $A = -1$ (kondisi *zero to minimum*)

2.5.3 Stress Versus Life (S-N) Curve

Untuk memahami fenomena kelelahan logam maka pendekatan utama yang biasa digunakan adalah konsep tegangan-siklus (*Stress verses Life S-N Curve*). Jumlah siklus dimulai dari pengintian retak sampai perambatan retak.

Konsep *S-N Curve* yaitu tegangan yang terjadi pada daerah elastik dan umur lelah cukup panjang. Konsep ini tidak dapat dipakai dalam kondisi sebaliknya yaitu tegangan dalam daerah plastis dan umur lelah relatif pendek

1. S-N Curve berdasarkan Tahanan Nominal

Penentuan *S-N Curve* dapat dilakukan dengan beberapa metode, diantaranya dengan menggunakan tahanan nominal dalam peraturan seperti dalam (ASSHTO LRFD: *Bridge Design Spesification* 2012), atau dengan cara eksperimental (Saber et al. 2016). Dalam (ASSHTO LRFD: *Bridge Design Spesification* 2012) bagian 6.6.1.2.2, untuk kondisi fatik akibat beban ditetapkan harus memenuhi kriteria memenuhi Persamaan 2.3.

$$\gamma(\Delta f) \leq (\Delta F)_n \quad (2.3)$$

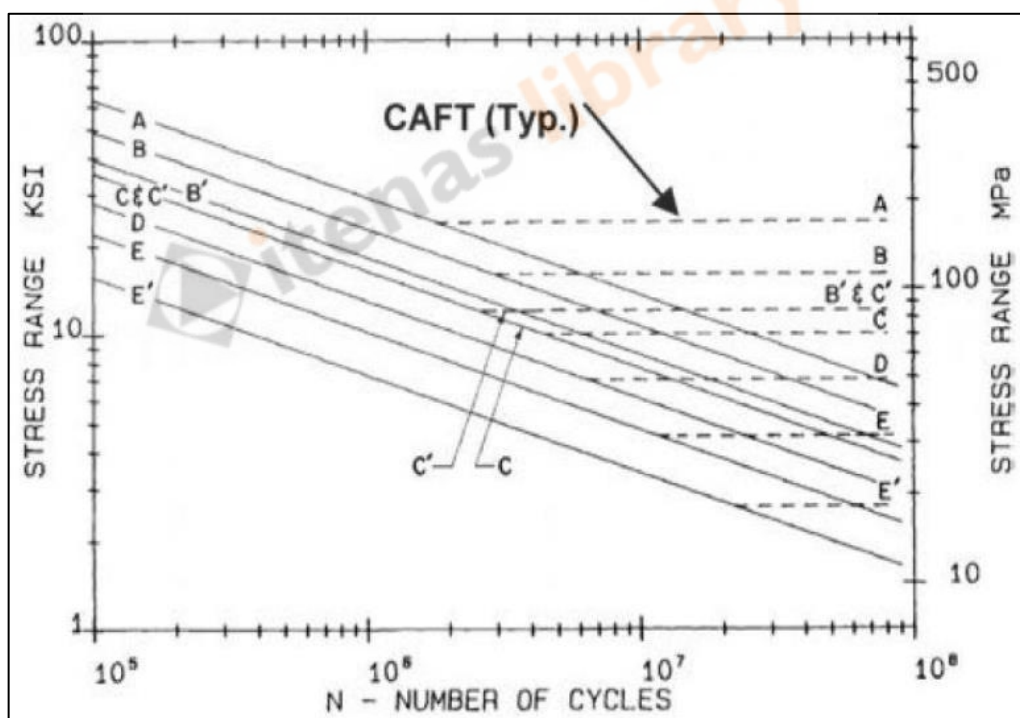
Keterangan:

γ = faktor beban untuk kombinasi beban fatik (Fatik-I=1,5 & Fatik-II=0.75)

(Δf) = efek pembebanan yaitu *stress range* (rentang tegangan fatik) (MPa)

$(\Delta F)_n$ = tahanan fatik nominal (MPa)

Parameter (Δf) didapat dari luaran analisis struktur, sedangkan parameter $(\Delta F)_n$ ditentukan (AASHTO LRFD: *Bridge Design Specification* 2012) bagian 6.6.1.2.5. Pada bagian tersebut, tahanan nominal fatik dibagi menjadi dua bagian, yaitu pada kondisi umur fatik tak terhingga dan kondisi umur fatik terhingga. Jika digambarkan dalam kurva rentang tegangan terhadap jumlah siklus S-N *Curve* seperti tampak pada **Gambar 2.6**, kurva batasan tahanan fatik nominal ini akan membentuk kurva miring pada bagian umur fatik terhingga dan menurun pada bagian umur fatik tak terhingga pada suatu batasan nilai rentang tegangan tertentu dengan umur fatik tak terhingga. Batasan ini berdasarkan kategori detil struktur baja yang dianalisis.



Gambar 2.6 Kurva S-N untuk tegangan biasa
(Sumber: AASHTO LRFD: *Bridge Design Specification* 2012)

2. Kategori Detail

Kategori detail merupakan penentuan yang diberikan pada detail tertentu untuk indikasi penggunaan tipe kurva S-N dalam pendekatan fatik. Kategori detail mempertimbangkan pemusatan tegangan setempat pada tempat tertentu, ukuran

dan bentuk terhadap diskontinuitas maksimum yang dapat diterima, keadaan pembebanan, pengaruh metalurgi, tegangan sisa, cara pengelasan, dan tiap penyempurnaan setelah pengelasan. Bilangan kategori detil ditentukan oleh kekuatan fatik pada 2.000.000 beban ulang di kurva S-N. Detail yang tidak diklasifikasi harus dianggap sebagai kategori detil paling rendah dari detil serupa, kecuali dapat dibuktikan dengan pengujian atau analisis dan pengujian bahwa kekuatan fatiknya lebih besar.

Kategori detil tergantung pada detil sambungan yang direncanakan. Nilai dari kategori terdapat pada AASHTO LRFD: *Bridge Design Specification* 2012 bagian 6.6.1.2.3. Kategori detil dibagi kedalam 8 kategori yaitu A, B, B', C, D, E, dan E' yang masing-masing kategorinya memiliki tahanan fatik yang berbeda dimana semakin rendah kategori semakin kecil tahanan fatiknya.

2.5.4 Analisis Fatik

Stress range adalah perbedaan tegangan saat dengan beban mati (kondisi kosong) dan tegangan saat truk melintas (beban dinamis), karena kondisi fatik dianggap terjadi saat kondisi fluktuasi akibat truk melintas. Pada analisis fatik *stress range* tersebut diperhitungkan pada jembatan dimana besaran nilai *stress range* harus lebih kecil dari *stress range* nominal yang disyaratkan oleh AASHTO LRFD: *Bridge Design Specification* 2012.

1. Fatik II

Fatik II adalah *finite fatigue life*, dimana *stress range* diperhitungkan berdasarkan populasi kendaraan truk dan umur rencana. Dalam kondisi ini diasumsikan batang akan mengalami fatik dengan umur rencana tertentu. Rentang tegangan nominal pada fatik-II memenuhi Persamaan 2.4.

$$(\Delta f)_n = \left(\frac{A}{N}\right)^{1/3} \quad (2.4)$$

Keterangan:

$(\Delta f)_n$ = rentang tegangan nominal fatik (MPa)

A = konstan kategori detail sambungan (MPa³) dapat diambil pada **Tabel**

2.1

N = jumlah dari siklus rentang tegangan sesuai kelas kendaraan

Tabel 2.1 Nilai Konstan

<i>Detail Category</i>	<i>Constant A Times 10¹¹</i>
	<i>ksi³ (MPa³)</i>
A	250(82)
B	120(39.3)
B'	61(20)
C	44(14.4)
C'	44(14.4)
D	22(7.21)
E	11(3.61)
E'	3.9(1.28)
A164 (A325M) bolts in axial tension	17.1(5.61)
M253 (A490M) bolts in axial tension	31.5(10.3)

(Sumber: AASHTO LRFD: *Bridge Design Specification* 2012)

Nilai N dapat diperhitungkan banyaknya truk yang melintas pada satu jalur dengan memperkirakan umur rencana selama 75 tahun (AASHTO LRFD: *Bridge Design Specification* 2012), nilai N memenuhi Persamaan 2.5.

$$N = 365 \frac{\text{hari}}{\text{tahun}} \times 75 \text{ tahun} \times n \times ADTT_{sl} \quad (2.5)$$

$ADTT_{sl}$ (*Average Daily Truck Traffic Single Lane*) atau $LHRT_{sl}$ adalah jumlah truk yang melaju pada satu jalur yang besarnya dapat dilihat pada **Tabel 2.2** dan disesuaikan dengan kategori detail.

Tabel 2.2 Nilai $ADTT_{sl}$

<i>Detail Category</i>	<i>75-year (ADTT_{sl}) (trucks per day) Equivalent to Infinite Life</i>
A	530
B	860
B'	1035
C	1290
C'	745
D	1875
E	3530
E'	6485

(Sumber: AASHTO LRFD: *Bridge Design Specification* 2012)

Nilai n adalah siklus rentang tegangan pada setiap truk yang melintas, dengan besaran dapat dilihat pada **Tabel 2.3**.

Tabel 2.3 Nilai konstanta n

<i>Longitudinal Members</i>	<i>Span Length</i>	
	<i>>40 ft</i>	<i>≤40 ft</i>
	<i>(12000 mm)</i>	<i>(12000 mm)</i>
<i>Simple-span girders</i>	1	2
<i>Continuous girders:</i>		
<i>1. Near interior support</i>	1.5	2
<i>2. Elsewhere</i>	1	2
<i>Cantilever girders</i>		5
<i>Trusses</i>		1
	<i>Spacing</i>	
	<i>>20 ft</i>	<i>≤20 ft</i>
<i>Transverse members</i>	1	2

(Sumber: AASHTO LRFD: *Bridge Design Specification* 2012)

2. Fatik I

Infinite load-induced fatigue life adalah kondisi dimana dianggap beban rencana akan membuat retakan. Pada fatik I, *stress range* nominal dianggap sama dengan *threshold* (AASHTO LRFD: *Bridge Design Specification* 2012). *Threshold* adalah batas *stress range* pada struktur yang nilainya tergantung pada kategori detail. Jika *stress range* rencana melewati batas *threshold* maka jembatan akan mengalami fatik. Dari persamaan 2.3, diartikan bahwa rentang tegangan tidak boleh melampaui *threshold*. Nilai *threshold* untuk kategori detail dapat dilihat pada **Tabel 2.4**.

Tabel 2.4 Nilai titik ambang fatik

Kategori Detail	Titik Ambang Fatik [MPa]
A	165
B	110
B'	82.7
C	69
C'	82.7
D	48.3
E	31
E'	17

(Sumber: AASHTO LRFD: *Bridge Design Specification* 2012)

2.6 Stabilitas Batang Tarik

Batang tarik merupakan batang pada struktur yang menerima gaya aksial tarik murni. Sebuah batang tarik dapat mengalami kegagalan apabila mencapai satu dari dua batasan yaitu deformasi yang berlebihan atau fraktur. Untuk mencegah deformasi yang berlebihan, dimulai dengan beban pada luas penampang bruto (A_g) harus cukup kecil sehingga tegangan pada luas penampang bruto (A_g) kurang dari tegangan leleh (F_y). Untuk mencegah fraktur, tegangan pada luas penampang netto efektif (A_e) harus lebih kecil dibandingkan dengan tegangan fraktur/ultimit (F_u). Pada permasalahan ini, tegangan $\frac{P}{A}$ harus lebih kecil dibandingkan dengan tegangan batas F . Sehingga tahanan nominal dalam kondisi leleh memenuhi persamaan 2.6

$$P_u \leq \phi(F_y \times A_g) \quad (2.6)$$

dan tahanan nominal pada kondisi fraktur memenuhi persamaan 2.7

$$P_u \leq \phi(F_u \times A_e) \quad (2.7)$$

dimana ϕ merupakan faktor reduksi kekuatan sesuai LRFD, untuk kondisi leleh 0,9 dan untuk kondisi fraktur 0,75. Luas penampang netto efektif (A_e) merupakan hasil perkalian dari luas netto (A_{net}) dengan koefisien reduksi (U) akibat adanya eksentrisitas pada sambungan yang disebut *shear leg*, sehingga menghasilkan penampang netto efektif yang besarnya memenuhi persamaan 2.8

$$A_e = A_{net} \times U \quad (2.8)$$

dimana koefisien reduksi (U) untuk sistem sambungan yang menggunakan baut memenuhi persamaan 2.9

$$U = 1 - \frac{x}{L} \leq 0,9 \quad (2.9)$$

Keterangan:

X = jarak antara titik berat penampang komponen yang disambung dengan bidang sambungan (mm)

L = panjang sambungan pada arah gaya (mm)

2.6.1 Kelangsingan Batang Tarik

Kelangsingan komponen struktur batang tarik memenuhi persamaan 2.10.

$$\lambda = \frac{L_k}{r} \leq 240 \quad (2.10)$$

Keterangan:

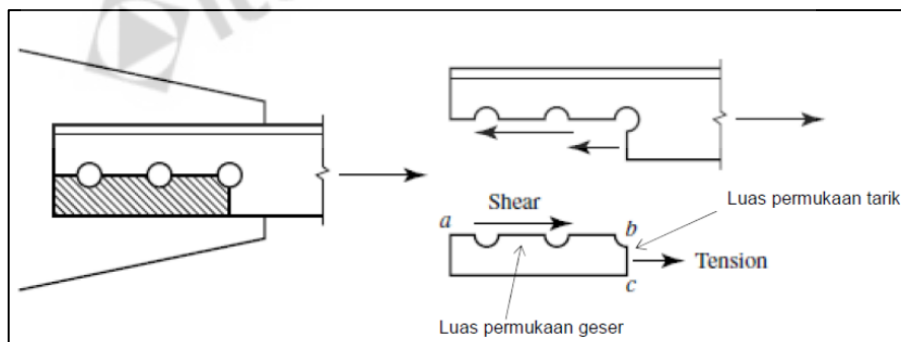
λ = kelangsingan

L_k = panjang batang tarik (mm)

r = jari-jari inersia (mm)

2.6.2 Geser Blok

Geser blok yaitu suatu keruntuhan dimana mekanisme keruntuhannya merupakan kombinasi geser dan tarik yang terjadi sepanjang lubang-lubang baut pada komponen struktur tarik. Keruntuhan jenis ini sering terjadi terhadap badan yang tipis pada komponen struktur tarik pada sistem sambungan baut. Keruntuhan ini juga sering dijumpai pada sambungan pendek, yaitu sambungan yang menggunakan dua baut atau kurang pada sumbu searah gaya.



Gambar 2.7 Geser blok, kombinasi keruntuhan geser dan tarik

Kekuatan yang tersedia untuk keadaan batas keruntuhan blok geser sepanjang alur kegagalan geser atau alur-alur dan alur kegagalan tarik tegak lurus harus diambil sebesar persamaan 2.11.

$$R_n = 0,6F_u A_{nv} + U_{bs}F_u A_{nt} \leq 0,6F_y A_{gv} + U_{bs}F_u A_{nt} \quad (2.11)$$

Dimana $\phi = 0,75$

Keterangan:

U_{bs} = 1 ; bila tegangan tarik merata, 0,5 ; bila tegangan tarik tidak merata

A_{gv} = Luas penampang bruto akibat geser (mm^2)

A_{nv} = Luas penampang netto akibat geser (mm^2)

A_{gt} = Luas penampang bruto akibat tarik (mm^2)

A_{nt} = Luas penampang netto akibat tarik (mm^2)

F_y = tegangan leleh (MPa)

F_u = tegangan fraktur/ultimit (MPa)

2.7 Stabilitas Batang Tekan

Batang tekan merupakan bagian dari batang struktur yang hanya menerima gaya aksial. Gaya aksial ini terjadi sepanjang arah sumbu longitudinal yang berada di titik tengah bidang diagonal batangnya. Pada batang yang langsing tekanan sebelum tekuk berada dibawah batas proporsional yaitu batang masih dalam kondisi elastis, maka beban tekuk kritis memenuhi persamaan 2.12.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times EI}{L^2} \quad (2.12)$$

Keterangan:

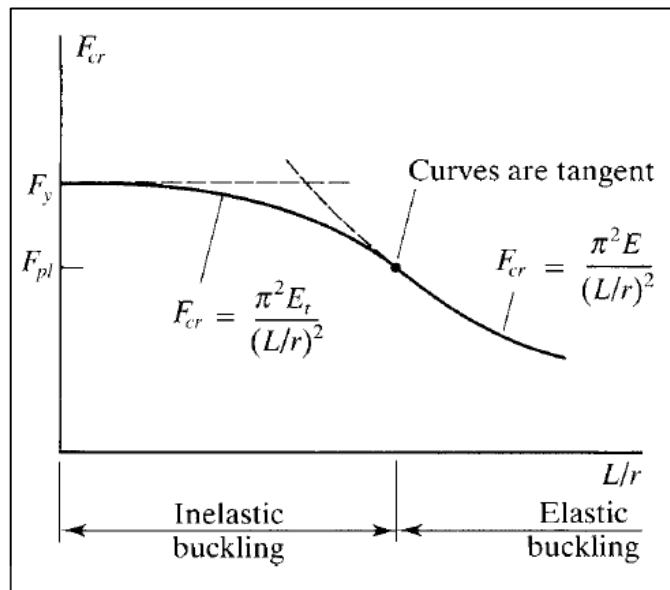
P_{cr} = beban tekuk kritis (Newton)

E = modulus elastisitas penampang (MPa)

I = momen inersia penampang (mm^4)

L = panjang batang tekan (mm)

Untuk beberapa material, tegangan tekuk kritis (F_{cr}) dapat diplot berdasarkan fungsi dari kelangsingan seperti tampak pada **Gambar 2.8**.



Gambar 2.8 Tegangan tekuk kritis pada kondisi in-elastis dan elastis

Tahanan nominal tekan untuk LRFD memenuhi persamaan 2.13.

$$P_u \leq \phi(F_{cr} \times A_g) \quad (2.13)$$

Keterangan:

P_u = beban terfaktor (Newton)

ϕ = faktor untuk tekan sebesar 0,9

F_{cr} = tegangan tekuk kritis (MPa)

A_g = luas penampang bruto (mm^2)

dalam kondisi elastis dimana $\frac{KL}{r} \leq 4,71 \times \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ tegangan kritis memenuhi persamaan 2.14

$$F_{cr} = 0,877 \times F_e \quad (2.14)$$

dan dalam kondisi in-elastis dimana $\frac{KL}{r} > 4,71 \times \sqrt{\frac{E}{F_y}}$ tegangan kritis memenuhi persamaan 2.15

$$F_{cr} = (0,658^{\frac{F_y}{F_e}}) \times F_y \quad (2.15)$$

dimana tegangan tekuk kritis memenuhi persamaan 2.16.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad (2.16)$$

2.8 Stabilitas Batang Lentur

Suatu komponen struktur yang memikul momen lentur terhadap sumbu lemah dapat dianalisis dengan metode elastis yang harus memenuhi persamaan 2.17

$$M_u \leq \phi M_n \quad (2.17)$$

Keterangan:

M_u = Momen lentur terfaktor (N – mm)

M_n = Kuat nominal momen lentur penampang (N – mm)

ϕ = Faktor reduksi, diambil 0,9

1. Kuat Lentur Nominal Penampang dengan Pengaruh Tekuk Lokal

Kuat lentur nominal ini meliputi *Flange Local Buckling* (FLB) dan *Web Local Buckling* (WLB) yang harus memenuhi persyaratan berikut ini:

a. Batasan Momen

Momen leleh (M_y) merupakan momen lentur yang menyebabkan penampang mulai mengalami tegangan leleh dengan besaran memenuhi persamaan 2.18

$$M_y = F_y \times S \quad (2.18)$$

Keterangan:

M_y = Momen leleh (N – mm)

F_y = Tegangan leleh penampang (MPa)

S = Modulus elastisitas penampang (mm³)

Kuat lentur plastis (M_p) adalah momen lentur yang menyebabkan seluruh penampang mengalami tegangan leleh dengan besaran memenuhi persamaan 2.19

$$M_p = F_y \times Z_x < 1,6 \times F_y \quad (2.19)$$

Keterangan:

M_p = Momen plastis (N – mm)

F_y = Tegangan leleh penampang (MPa)

Z_x = Modulus penampang elastis (mm³)

b. Kelangisngan Penampang

AISC mengklasifikasikan bentuk penampang terhadap bentuk kompak, tidak kompak tergantung terhadap nilai rasio parameter kelangisngan. Untuk profil IWF, rasio untuk memproyeksikan bagian sayap (sebuah batang yang tidak kaku) adalah $\frac{b_f}{2t_f}$, dan rasio untuk bagian badan (sebuah batang yang kaku) adalah $\frac{h}{t_w}$, jika:

$\lambda \leq \lambda_p$, maka penampang kompak

$\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$, maka penampang tidak kompak

$\lambda > \lambda_r$, maka penampang langsing

Besaran nilai rasio kelangisngan dapat dilihat pada **Gambar 2.9**.

Element	λ	λ_p	λ_r
Flange	$\frac{b_f}{2t_f}$	$0.38 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$
Web	$\frac{h}{t_w}$	$3.76 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

*For hot-rolled I shapes in flexure.

Gambar 2.9 Nilai rasio kelangisngan untuk profil IWF

Untuk penampang kompak, maka kuat lentur nominal penampang memenuhi persamaan 2.20

$$M_n = M_p \quad (2.20)$$

untuk penampang tidak kompak, maka kuat lentur nominal penampang memenuhi persamaan 2.21

$$M_n = M_p - (M_p - 0,7F_y S_x) \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \quad (2.21)$$

untuk penampang langsing, maka kuat lentur nominal penampang memenuhi persamaan 2.22.

$$M_n = 0,7F_y S_x \left(\frac{\lambda_r}{\lambda} \right)^2 \quad (2.22)$$

Keterangan:

M_p = momen plastis (N – mm)

F_y = tegangan leleh (MPa)

λ = parameter kelangsingan

λ_p = batasan maksimum parameter kelangsingan untuk penampang tidak kompak

λ_r = batasan maksimum parameter kelangsingan untuk penampang kompak

2. Kuat Lentur Nominal Penampang dengan Pengaruh Tekuk Lateral

Kuat lentur nominal ini harus memenuhi persyaratan:

a. Batasan Momen

Momen kritis terhadap tekuk torsi lateral (M_{cr}) ditentukan oleh persamaan 2.23.

$$M_{cr} = C_b \times \frac{\pi}{L} \times \sqrt{E \times I_y \times G \times J + \left(\frac{\pi \times E}{L}\right)^2 \times I_y \times I_w} \quad (2.23)$$

Keterangan:

E = modulus elastisitas (MPa)

I_y = momen inersia penampang (mm⁴)

G = modulus geser baja (MPa)

J = konstanta torsi = $2 \times \left(\frac{bf \times t^3}{3}\right)$

I_w = konstanta warping atau putir lengkung

C_b = faktor pengali momen

Faktor pengali momen memenuhi persamaan 2.24.

$$C_b = \frac{12,5 M_{max}}{2,5 M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \leq 2,3 \quad (2.24)$$

dimana:

M_{max} = momen maksimum pada bentang yang ditinjau (N – mm)

M_A, M_B, M_C = momen $\frac{1}{4}$ bentang, $\frac{1}{2}$ bentang, dan $\frac{3}{4}$ bentang (N – mm)

b. Pengekang Lateral

Kekuatan momen lentur dari penampang kompak adalah fungsi dari panjang yang tidak terkekang (L_b), didefinisikan sebagai jarak antara titik-titik dukungan lateral, atau menguatkan. Dalam menentukan batas perilaku elastis dan elastis dengan membandingkan besaran nilai L_b , L_r , dan L_p .

Panjang L_r memenuhi persamaan 2.25

$$L_r = 1,95r_{ts} \frac{E}{0,7 F_y} \sqrt{\frac{JC}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{JC}{S_x h_o}\right)^2 + 6,76\left(\frac{0,7F_y}{E}\right)^2}} \quad (2.25)$$

Panjang L_p memenuhi persamaan 2.26.

$$L_p = 1,76r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (2.26)$$

Untuk penampang tidak ada kestabilan ($L_b \leq L_r$), maka kuat lentur nominal penampang memenuhi persamaan 2.27

$$M_n = M_p = F_y \times Z_x \quad (2.27)$$

untuk penampang tidak elastis ($L_p < L_b \leq L_r$), maka kuat lentur nominal penampang memenuhi persamaan 2.28

$$M_n = M_p - (M_p - 0,7F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p}\right) \quad (2.28)$$

untuk penampang elastis ($L_b > L_r$), maka kuat lentur nominal penampang memenuhi persamaan 2.29

$$M_n = F_{cr} \times S_x \leq M_p \quad (2.29)$$

dimana:

$$F_{cr} = \frac{Cb \times \pi^2 \times E}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \sqrt{1 + 0,078 \frac{JC}{S_x h_o} \left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \quad (2.30)$$

2.9 Tahanan Nominal Baut

Suatu baut memikul beban terfaktor (R_n) sesuai persyaratan LRFD harus memenuhi persamaan 2.31.

$$R_u \leq \phi R_n \quad (2.31)$$

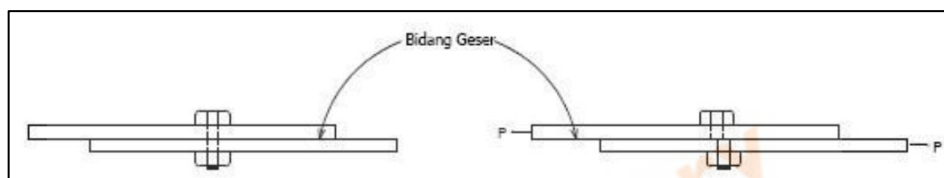
Keterangan:

R_n = tahanan nominal baut (Newton)

ϕ = faktor reduksi yang diambil sebesar 0.75

2.9.1 Tahanan Tarik dan Geser Baut

Secara umum hubungan struktural baut dalam arah tegak lurus terhadap panjang baut pat mencegah terjadinya gerakan material yang disambung seperti pada **Gambar 2.10**.



Gambar 2.10 Baut yang mengalami geser tunggal

Kapasitas pikul beban sebuah baut yang mengalami geser tunggal maupun rangkap sama dengan hasil kali antara jumlah bidang geser dengan tegangan geser putus di seluruh luas bruto penampang melintangnya. Tahanan nominal satu baut baut yang memikul gaya geser, sesuai SNI 1729:2015 Bab 73.6 memenuhi persamaan 2.32

$$\phi R_n = \phi F_n \times A_b \quad (2.32)$$

Keterangan:

ϕ = Faktor ketahanan kondisi geser baut

R_n = Kuat nominal geser baut (Newton)

F_{nt} = Tegangan tarik nominal baut sesuai **Tabel 2.5**. (MPa)

F_{nv} = Tegangan geser nominal baut sesuai **Tabel 2.5**. (MPa)

A_b = Luas nominal tubuh baut tidak berulir atau bagian berulir (mm²)

Tabel 2.5 Kekuatan nominal pengencang dan bagian yang berulir

Deskripsi Pengencang	Kekuatan Tarik Nominal	Kekuatan Geser Nominal Dalam Sambungan Tipe Tumpu
	(F_{nt})	$[F_{nv}]$
	[MPa]	[MPa]
Baut 307	310	188
Baut group A (misal A325) bila ulir tidak dikecualikan dari bidang geser	620	372
Baut group A (misal A325) bila ulir tidak termasuk dari bidang geser	620	457
Baut group A490 atau 490M bila ulir tidak dikecualikan dari bidang geser	780	457
Baut group A490 atau 490M bila ulir tidak termasuk dari bidang geser	780	579
Bagian berulir memenuhi persyaratan Pasal A3.4, bila ulir tidak dikecualikan dari bidang geser	$0,75 F_u$	$0,45 F_u$
Bagian berulir memenuhi persyaratan Pasal A3.4, bila ulir tidak termasuk dari bidang geser	$0,75 F_u$	$0,45 F_u$

(Sumber: SNI 1729-2015)

2.9.2 Tahanan Tumpu Baut

Tahanan tumpu nominal baut tergantung pada kondisi yang terlemah dari baut atau komponen pelat yang disambung. Besarnya dapat ditentukan sesuai SNI 1729:2015 Bab J3.10 (a). Jika deformasi lubang baut pada beban layan merupakan perhitungan desain maka besaran tahanan tumpu memenuhi persamaan 2.23.

$$R_n = 1.2 \times L_c \times t \times F_u \leq 2.4 \times d_b \times t_p \times F_u \quad (2.23)$$

Jika deformasi lubang baut pada beban layan bukan perhitungan desain maka besaran tahanan tumpu memenuhi persamaan 2.24.

$$R_n = 1.5 \times L_c \times t \times F_u \leq 3 \times d_b \times t_p \times F_u \quad (2.24)$$

Keterangan:

L_c = Jarak bersih dalam arah gaya, antar tepi lubang baut (mm)

F_u = Kuat tarik baut putus minimum baja (MPa)

d_b = Diameter baut pada daerah tak berulir (mm²)

t_p = Tebal material yang disambung, digunakan yang paling tipis (mm)

2.9.3 Sambungan Slip Kritis

Sambungan slip kritis digunakan untuk mencegah slip pada keadaan batas dari sambungan tipe tumpuan. Semua permukaan baut yang menahan slip harus dipersiapkan untuk mencapai ketahanan slip desain. Ketahanan slip yang tersedia untuk keadaan batas dari slip sesuai SNI 1725:2015 memenuhi persamaan 2.35.

$$\phi R_n = \phi \mu D_u h_f T_b n_s \quad (2.35)$$

Keterangan:

ϕ = faktor reduksi, untuk lubang ukuran standar yaitu 1; untuk lubang ukuran berlebih yaitu 0,85; dan ukuran lubang slot panjang yaitu 0,7.

μ = koefisien slip rata-rata, untuk permukaan kelas A yaitu 0,3; untuk permukaan kelas B yaitu 0,5.

D_u = suatu pengali yang mencerminkan rasio dari rata-rata pratark baut terpasang terhadap pratark baut minimum yang disyaratkan.

T_b = gaya tarik minimum sesuai **Tabel 2.6**.(Newton)

h_f = faktor untuk pengisi, bila tidak ada pengisi atau dimana baut telah ditambahkan untuk mendistribusikan beban pada pengisi yaitu 1, untuk satu pengisi yaitu 1, untuk dua atau lebih pengisi yaitu 0,85

n_s = jumlah bidang slip yang diperlukan untuk mengizinkan sambungan dengan slip.

Tabel 2.6 Pratark baut minimum

Ukuran Baut [mm]	Baut A325M [kN]	Baut A490M [kN]
M16	91	114
M20	142	179
M22	176	221
M24	205	257
M27	267	334
M30	326	408
M36	475	595
Sama dengan 0,7 dikalikan kekuatan tarik minimum baut, dibulatkan mendekati kN, seperti disyaratkan dalam spesifikasi untuk baut ASTM A325M dan A490M dengan ulir UNC		

(Sumber: SNI 1729-2015)

2.10 Metode Batang Hingga

Material dapat disebut nonlinier ketika sifat dari material adalah fungsi dari kondisi tegangan atau regangan, termasuk elastisitas nonlinier, plastisitas dan rangkakan. Masalah yang muncul pada material yaitu berubahnya material menjadi nonlinier akibat kekakuan, dan kemungkinan termasuk akibat beban yang menjadi fungsi dari peralihan atau deformasi.

Penyelesaian perhitungan tegangan nonlinier dapat menggunakan variabel dari aljabar, diferensial yang memenuhi syarat batas sekalipun tidak mudah untuk masalah yang sederhana. Metode batang hingga (*Finite batang method*) adalah suatu metode numerik dengan tujuan memperoleh pemecahan pendekatan dari suatu persamaan diferensial parsial (*Partial differential equation*). Kesulitan pada metode ini dalam menentukan syarat batas disolusikan dengan membagi sebuah kontinum menjadi bagian-bagian kecil yang disebut batang, sehingga solusi dalam setiap bagian kecilnya dinyatakan dalam fungsi yang jauh lebih sederhana daripada fungsi keseluruhannya. Bagian-bagian kecil tersebut secara sistematis dihubungkan satu sama lain dengan kondisi sedemikian sehingga kompatibel dan kontinum antar bagian kecil atau batang. Syarat-syarat batas ini berupa gaya luar yang bekerja, perpindahan yang diketahui, hubungan antar nodal, dan tumpuan. Dengan kata lain, titik kerja gaya luar, titik tumpuan, dan titik yang akan diketahui parameternya harus merupakan titik nodal. Jika beban yang bekerja merupakan beban terdistribusi, maka beban tersebut harus diekivalensikan menjadi gaya-gaya pada titik-titik nodal atau berupa tekanan pada batang-batang.

Satu langkah penting dalam analisis batang hingga, yaitu memilih tipe batang yang sesuai untuk mempresentasikan sifat struktur yang akan dianalisis. Prosedur analisis dengan metode batang hingga adalah sebagai berikut:

1. Benda dibagi menjadi sejumlah batang dan nodal.
2. Mengasumsikan fungsi perpindahan untuk sejumlah batang.
3. Melengkapi hubungan regangan dan perpindahan serta hubungan tegangan dan regangan dalam batang.
4. Menentukan matriks kekakuan dan beban ekuivalen pada nodal dengan prinsip energi.

5. Membentuk persamaan kesetimbangan untuk perpindahan nodal
6. Menghitung tegangan pada titik yang diinginkan serta bila perlu menentukan gaya reaksi tumpuan.

2.11 *Software Fine Batang Analysis (FEA) ANSYS*

ANSYS adalah sebuah *software* analisis batang hingga dengan kemampuan menganalisis dengan cakupan yang luas untuk berbagai jenis masalah (Tim Langlais, 1999). ANSYS mampu memecahkan persamaan differensial dengan cara memecahnya menjadi batang-batang yang lebih kecil. Pada awalnya program ini bernama STASYS (*Structural Analysis System*), kemudian berganti nama menjadi ANSYS yang ditemukan pertama kali oleh Dr. John Swanson pada tahun 1970.

ANSYS merupakan tujuan utama dari paket pemodelan batang hingga untuk secara numerik memecahkan masalah mekanis. Masalah yang ada termasuk analisis struktur statis dan dinamis (baik linear maupun nonlinear), distribusi panas dan masalah cairan, begitu juga dengan ilmu bunyi dan masalah elektromagnetik.

2.11.1 Sistem Kerja Analisis Program

ANSYS bekerja dengan sistem metode batang hingga, dimana penyelesaiannya pada suatu objek dilakukan dengan memecah satu rangkaian kesatuan menjadi bagian-bagian yang lebih kecil dan dihubungkan dengan node. Hasil yang diperoleh dari ANSYS berupa pendekatan dengan menggunakan analisis numerik. Ketelitiannya sangat bergantung pada cara kita memecah model tersebut dan menggabungkannya.

Secara umum, suatu solusi batang hingga dapat dipecahkan dengan mengikuti 3 tahapan berikut ini:

1. *Preprocessing* (Pendefinisian Masalah)

Masalah adalah bagian terpenting dalam suatu proses riset, karena masalah dapat menghadirkan petunjuk berupa jenis informasi atau definisi yang nantinya akan dibutuhkan. *Preprocessing* merupakan tahapan awal dalam mengolah data input sebelum memasuki proses tahapan utama. Pada tahap pertama ini, dilakukan pendefinisian dari objek yang nantinya akan diproses pada tahap selanjutnya.

Langkah umum dari *preprocessing* terdiri dari:

- a. Mendefinisikan *keypoint/lines/areas/volume* dari objek, dalam hal ini, pendefinisian diatas harus dilakukan setelah dilakukannya pemodelan terlebih dahulu. Pemodelan merupakan proses menggambar ataupun mengimport gambar benda atau objek yang akan didefinisikan kedalam lembar kerja,
- b. mendefinisikan tipe batang dan material yang digunakan/sifat geometrik dari objek, dan
- c. mendefinisikan mesh *lines/areas/volume* sebagaimana dibutuhkan. Jumlah detil yang dibutuhkan akan tergantung pada dimensi daerah yang dianalisis seperti 1D, 2D, axisymmetric, dan 3D.

2. *Solution/Assigning Loads, Constraints, and Solving*

Pemecahan masalah adalah suatu proses terencana yang perlu dilaksanakan agar memperoleh penyelesaian tertentu dari sebuah masalah yang mungkin tidak didapat dengan segera (Saad dan Ghani, 2008:120)

Pada tahap ini, perlu dilakukan penentuan beban, model pembebanan, translansi serta rotasi, dan kemudian menyelesaikan hasil persamaan yang telah diset pada objek

3. *Postprocessing/Further Processing and Viewing of The Results*

Postprocessing adalah langkah akhir dalam suatu analisis berupa visualisasi yang memungkinkan penganalisis untuk mengeksplor data. Hal yang dilakukan pada langkah ini adalah mengorganisasi dan menginterpretasi data hasil simulasi yang bisa berupa gambar, kurva, dan animasi. Dalam bagian ini pengguna mungkin dapat melihat:

- a. Daftar pergeseran nodal.
- b. Gaya batang dan momentum.
- c. *Plot deflection*.
- d. Diagram kontur tegangan (stress) atau pemetaan suhu.