

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan material di dunia konstruksi yang sangat pesat dan kebutuhan akan material yang sempurna sangat dibutuhkan untuk menunjang komponen konstruksi untuk bekerja secara maksimal dalam sebuah sistem. Untuk perkembangan teknologi dan ilmu yang semakin canggih semua pihak ingin meningkatkan mutu material dari segi penggunaan bahan akibat kelelahan pada konstruksinya, bila material tersebut menerima beban.

Saat ini, sebagian besar komponen konstruksi dirancang dengan kecenderungan untuk terus meningkatkan kinerja keseluruhan komponen dan struktur. Sebagai hasil dari kemajuan ini cepat dan terus menerus para desainer dan peneliti harus menghadapi banyak tantangan baru dalam hal kehandalan dan umur kelelahan lebih baik dari komponen rekayasa dan struktur. Dengan demikian, perlu untuk analisa kekuatan kelelahan khusus untuk komponen rekayasa tersebut.

Dalam lingkup kehidupan sehari-hari manusia sering bersinggungan dengan struktur bangun terutama jembatan gantung, sehingga manusia diharapkan sadar akan studi tentang komponen jembatan yaitu *hanger* yang sangat vital sehingga tidak diperbolehkan terjadinya kegagalan (*failure*) pada komponen-komponen *hanger* jembatan. Kegagalan suatu struktur selama ini kebanyakan disebabkan oleh beban dinamis (pembebanan yang berulang-ulang atau berubah-ubah besarnya). Pembebanan dinamis adalah suatu pembebanan dengan melibatkan tegangan aksial (tarik-tekan, *fleksural (bending)* dan torsional (puntiran) yang berfluktuasi. Meskipun tegangan yang diterima oleh material lebih rendah dari harga tegangan luluhnya, kegagalan dapat saja terjadi pada suatu saat. Kegagalan yang disebabkan oleh beban dinamis ini disebut dengan *fatigue failures*. Kebanyakan komponen rekayasa dan struktur mengalami siklus berulang beban berfluktuasi mengandung beberapa bentuk tegangan yang dihasilkan dari geometri atau diskontinuitas metalurgi (Murakami and Miller 2007:27). Dalam sebagian besar kasus komponen tersebut gagal karena fenomena yang dikenal sebagai kelelahan.

Fenomena kegagalan akibat beban dinamis mulai timbul pada pertengahan abad ke-19 yaitu dengan seringnya terjadi patah pada komponen kereta api dimasa itu.

Faktor kegagalan yang diakibatkan dari beban dinamis diperkirakan 50-90% (Hoepfner, 1996:19). Oleh karena itu diperlukan material yang sangat tahan terhadap beban dinamis yang tinggi.

Selama beberapa tahun terakhir, upaya ekstensif telah dikhususkan untuk mengembangkan metodologi yang memungkinkan prediksi kegagalan fatigue. Sebagai pengetahuan terkait dengan kelelahan diperluas, menjadi jelas bahwa dalam kasus-kasus tertentu kelelahan dapat diperlakukan dengan melihat dari titik retak awal (Ajma 2008:752). Pemahaman tersebut telah menyebabkan peningkatan penelitian dalam struktur terhadap beban siklus (*cyclic loading*). Untuk mendayagunakan salah satu komponen mekanis dan struktur dalam menghindari terjadinya fatigue yang menghasilkan kegagalan lelah. Namun, karena kondisi operasi dan persyaratan kinerja itu tidak selalu memungkinkan. Dengan demikian, prediksi yang diharapkan lokasi retak dan perilaku perambatan retak adalah tujuan utama bagi para peneliti dibidang ini.

Dalam sebuah investigasi runtuhnya jembatan Mahakam II diketahui bahwa sebelum terjadinya runtuhnya jembatan dilakukan aktivitas persiapan perbaikan (Rehabilitasi Jembatan) satu sisi badan jembatan yang dilakukan oleh 6 orang pekerja. Hal pokok kegiatan perbaikan adalah pengecekan, penggantian dan pengencangan baut yang kendur. Diindikasikan pada saat terjadi pengencangan baut jembatan, dan beban lalu-lintas kendaraan tetap bekerja, tiba-tiba alat sambung kabel penggantung di bentang tengah lepas dari kabel utamanya. Seluruh alat sambung kabel penggantung vertikal (sadel dan klem) di bentang tengah jebol dan jembatan runtuh, selama kurang lebih 30 detik.

Diketahui jika dilakukan persiapan perbaikan (Rehabilitasi Jembatan) berupa pondongkrakan di tengah. Hal ini menyebabkan terjadinya perubahan konsentrasi gaya pada *hanger* (tabel 1.1). Ini lah yang diduga menjadi faktor penyebab kegagalan *hanger*. Untuk itu perlu dilakukan modifikasi model dari *hanger* agar dapat menahan gaya karena perubahan konsentrasi model.

Tabel 1.1 Perubahan gaya pada *hanger*

Perubahan gaya pada <i>hanger</i>	sebelum	sesudah	selisih
a. <i>hanger</i> yang didongkrak (0 Hilir) (ton)	56.67	86.43	29.76

Metode elemen hingga (MEH) sebagai metode analisis dalam skripsi ini karena FEM merupakan metode pendekatan yang paling populer digunakan saat ini. Namun penggunaan metode elemen hingga akan menghasilkan persamaan yang banyak, sehingga apabila diselesaikan secara manual akan memakan waktu yang lama. Dengan perkembangan pesat di dunia komputer masalah tersebut dapat diatasi. Saat ini program-program simulasi numerik berbasis *finite element method*, FEM telah berkembang. Hal tersebut merupakan perkembangan yang sangat baik karena dengan memanfaatkan simulasi numerik, akan mengurangi biaya eksperimen yang diperlukan dalam penelitian. Disamping itu simulasi numerik akan menghasilkan perhitungan yang akurat..

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah :

1. Apakah terjadi kegagalan pada komponen *hanger clamp* halp atas?
2. Apakah kegagalan yang terjadi pada *hanger* akibat beban dinamis?

1.3 Batasan Masalah

Agar menjadikan penelitian ini lebih terarah maka diperlukan batasan-batasan masalah yang meliputi hal-hal dibawah ini :

- a. Penelitian hanya menggunakan model *hanger* jembatan.
- b. Tidak membahas bagian jembatan selain *hanger*.
- c. Perhitungan analisis dibantu dengan program komputer yang berbasis MEH.
- d. Dalam penelitian ini hanya mensimulasikan bagian jembatan yaitu *hanger*.
- e. Dalam penelitian ini amplitudo pembebanan dianggap tidak merupakan fungsi waktu. Amplitudo maksimum dan minimum akibat siklus pembebanan dianggap selalu konstan.

1.4 Tujuan Penelitian

1. Melakukan simulasi yang akan didapatkan hasil berupa *fatigue life* dan tegangan.
2. Tujuan akhir penelitian ini adalah menyelesaikan studi kasus tentang analisa kelelahan *hanger* sehingga dapat dicapai keahlian dalam bidang teknik konstruksi.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Memberi ilmu pemiikiran terhadap masyarakat terutama para akdemisi dalam hal pengetahuan tentang bidangkosntruksi
2. Mempelajari serta mengetahui cara kerja perangkat lunak berbasis MEH dalam menganalisa kekuatan struktur *hanger* jembatan



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Dionysius, dkk (2013) "*Failure Analysis of Kutai-Kartanegara Bridge's Hanger Clamps from Fracture Mechanics Viewpoint*" meneliti adanya kemungkinan retak akibat tegangan geser terhadap gaya saat perbaikan terjadi. Berdasarkan informasi dari energi yang diserap dari uji impak *charpy* pada clamp maka didapatkan ketangguhan retak clamp. Kondisi tegangan pada pin dan clamp dianalisa dari sudut pandang mekanika patahan dengan membandingkan ketangguhan patah dengan tegangan aktual yang terjadi pada struktur. Hasilnya bahwa walaupun tegangan yang terjadi lebih rendah dari beban maksimum yaitu saat penjurangan, patahan getas dapat terjadi ketika diasumsikan adanya cacat seperti retak pada sambungan pin dan clamp.

Vito Adivta Nugraha (2015) "*Study of Failure Factors Suspension Bridge: The Case of 470 Meter Suspension Bridge Collapse*" meneliti terjadi konsentrasi tegangan karena penjurangan saat perbaikan yang menyebabkan terjadi kenaikan konsentrasi tegangan bending faktor menjadi 2,2 dan konsentrasi tegangan geser faktor menjadi 3,23. Kegagalan tidak terjadi karena konsentrasi akibat penjurangan yang sebesar 87,1 Ton pada sisi hulu. Kegagalan terjadi pada bidang yang mengindikasikan turunnya kualitas dari material karena korosi dan retak yang disebabkan oleh fatigue. Kegagalan terjadi pada bidang kegagalan geser. Ini dapat terjadi karena penurunan dalam luasan efektif *cross sectional* sebesar 14,6%

I Wayan Hendra Adi Sanjaya (2013) "Evaluasi Kekuatan Struktur Utama Jembatan Kutai Kartanegara Saat Pemeliharaan Sebelum Jembatan Runtuh" dengan kesimpulan seluruh profil dan sambungan pada rangka mampu memikul gaya dalam yang terjadi dari setiap langkah yang dikondisikan tanpa mengalami kegagalan.

Sohei Matsuno (2012) "*A Study on The Cause of Kukar Bridge Collapse*" memberikan informasi bahwa runtuhnya jembatan ketika kabel utama terputus dari sambungan atas. Ini terbukti dari tidak adanya hanger yang tersisa di sambungan atas. Seharusnya komponen sambungan tidak terputus. Kekurangan dari desain sambungan juga berpengaruh berkurangnya *safety factor* dari runtuhnya jembatan. Jika faktor keamanan 2 dari titik luluh tidak akan terjadi runtuh bagaimana pun kondisinya.

2.2 Besi Cor Kelabu

Salah satu Karakteristik yang dimiliki oleh besi cor kelabu adalah bidang patahannya. Patahan terjadi dengan rambatan yang melintasi satu serpih ke serpih yang lainnya. Karena sebagian besar permukaan patahan melintasi serpih-serpih grafit, maka permukaannya berwarna kelabu. Untuk itu disebut besi cor kelabu.

Besi cor kelabu memiliki kandungan karbon antara 2,7 sampai 4 persen dan unsur mangan sekitar 0,8 persen. Besi cor kelabu ini mengandung unsur silicon relative tinggi yaitu antara satu sampai tiga persen. Dengan silicon sebesar ini, besi cor akan membentuk garfit dengan mudah, sehingga fasa karbida Fe_3C tidak terbentuk. Grafit serpih besi cor ini terbentuk saat proses pembekuan.

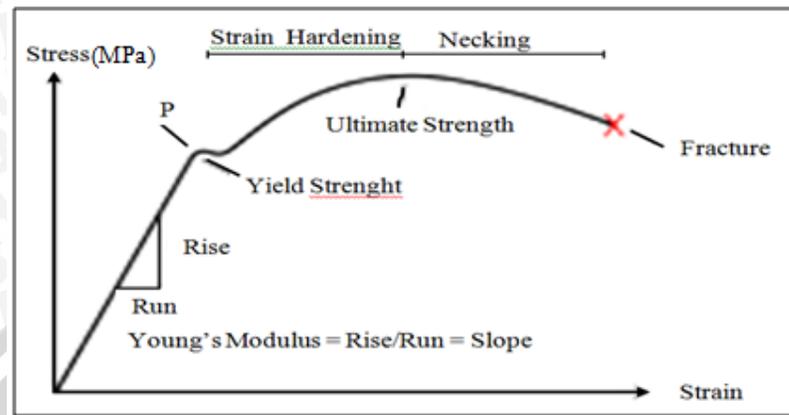
Besi cor kelabu mempunyai sifat mampu las yang buruk, ketahanan korosi rendah, dan ketahanan aus yang juga rendah. Namun demikian besi cor ini memiliki sifat mampu mesin yang baik dan mampu cor yang sangat baik.

2.3 Uji Tarik dan Uji Tekan

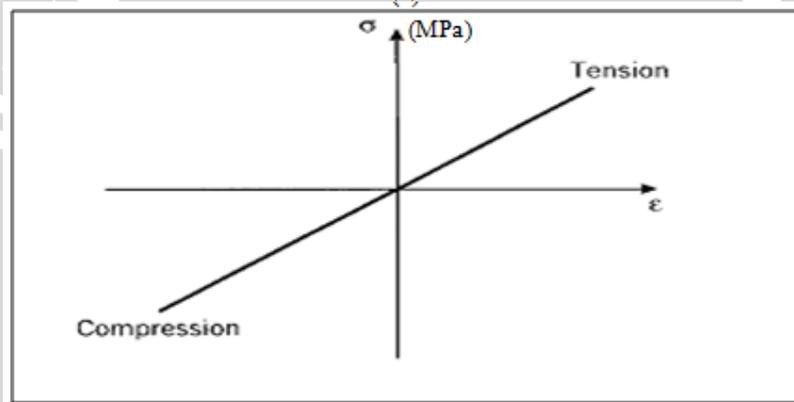
Sifat-sifat mekanik zat padat seperti kekuatan Tarik (*tensile strength*), kekuatan tekan (*compressive strength*), modulus elastisitas M (modulus young, modulus geser dan modulus bulk), keuletan, ketangguhan, kekerasan, dan kekuatan impak merupakan sifat-sifat fisis zat padat yang perlu mendapatkan perhatian bagi para peneliti yang melakukan rekayasa bahan karena sifat-sifat ini memberikan peranan penting bagi terciptanya suatu bahan yang sesuai dengan yang dikehendaki. Masingmasing bahan padat seperti logam, keramik, polimer, semi konduktor, dan super konduktor memiliki sifat-sifat mekanik yang berbeda satu sama lain. Hal inilah yang menyebabkan adanya perbedaan aplikasi bagi bermacam-macam benda padat tersebut diatas. Sebagai contoh, logam memiliki tingkat keuatan yang lebih tinggi dari pada polimer. Oleh karenanya logam banyak digunakan untuk peralatan yang membutuhkan kekuatan yang besar (alat-alat di industri, komponen peralatan transportasi dll), sementara polimer banyak digunakan untuk alat-alat rumah tangga.

Kekuatan tarik (*tensile strength*) atau kekuatan tekan (*compressive strength*) menyatakan ukuran besar gaya yang diperlukan untuk mematahkan atau merusak bahan. Diagram antara *stress* (tegangan) dan *strain* (regangan) dapat digunakan untuk menentukan sifat mekanik dari suatu bahan. Diagram tersebut menggambarkan perubahan *stress* terhadap *strain* bila benda dikenai suatu gaya. Pada titik tertentu akan

terjadi deformasi struktur benda yaitu pada titik dengan tanda X. Diagram umum *stress* terhadap *strain* suatu material dapat dilihat pada gambar 2.1.



(a)



(b)

Gambar 2.1 (a) Diagram Tegangan-Regangan Tarik (b) Diagram Tegangan-Regangan Tarik Tekan

Sumber : Ferdinan L. Singer, Andrew Pytel (1995 : 32)

2.4 Modulus Elastisitas

Elastisitas didefinisikan sebagai kemampuan bahan untuk menerima tegangan tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk yang permanen setelah tegangan dihilangkan. Peristiwa ini disebut juga deformasi elastis. Deformasi elastik terjadi bila logam atau bahan padat dibebani gaya. Bila tegangan tersebut disebabkan oleh gaya tarik maka benda akan bertambah panjang, setelah gaya ditiadakan benda akan kembali ke bentuk semula. Sebaliknya jika tegangan tersebut disebabkan oleh gaya tekan maka akan mengakibatkan benda akan menjadi lebih pendek dari keadaan semula (Van Vlack, 1991).

Bila hanya ada deformasi elastik, maka regangan sebanding dengan tegangan. Perbandingan antara tegangan (σ) dengan regangan elastik (ε) disebut modulus elastisitas (modulus Young) yang dapat ditulis sebagai berikut:

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (2-1)$$

Persamaan diatas dikenal juga dengan Hukum Hooke. Hukum Hooke berlaku di bawah batas elastik, dimana untuk sebagian besar bahan selama beban atau tegangan tidak melampaui batas elastik, regangan akan sebanding dengan tegangan. Regangan elastik akan sebanding dengan tegangan bila pada bahan/logam hanya terjadi deformasi elastik.

Pada pembebanan geser, bekerja dua gaya yang sejajar. Tegangan geser σ_s adalah gaya F_s dibagi dengan luas bidang geser A_s .

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_s} \quad (2-2)$$

Gaya geser menyebabkan adanya pergeseran sudut α . Regangan geser γ didefinisikan sebagai tangen α . Perbandingan tegangan geser σ_s dengan regangan geser γ disebut modulus geser G .

$$G = \frac{\sigma}{\gamma} \quad (2-3)$$

Modulus geser G disebut juga modulus kekakuan, berbeda dengan modulus elastisitas (modulus Young) E . Untuk regangan kecil berlaku hubungan:

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (2-4)$$

ν adalah bilangan Poisson yaitu perbandingan negatif antara regangan melintang ε_y dengan regangan tarik ε_z . Bilangan Poisson ν berada antara 0,25 sampai 0,5, maka nilai G mendekati 35% dari E .

Modulus elastik yang ketiga adalah modulus Bulk (modulus curah) dinotasikan dengan K . Modulus ini adalah kebalikan dari modulus kompresibilitas β , sama dengan perbandingan tekanan hidrostatik Ph dengan kompresi volum ($\Delta V/V$).

$$G = \frac{P_h V}{\Delta V} \quad (2-5)$$

Antara modulus Bulk K dan modulus elastisitas E terdapat hubungan:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2-6)$$

2.5 Deformasi Plastis

Hukum Hooke menyatakan bahwa strain berbanding lurus dengan stress dan hukum ini dipenuhi oleh benda pada daerah elastis. Jika bahan ditarik oleh suatu gaya

pada daerah elastis, maka benda tersebut akan mengalami perubahan ukuran, kemudian setelah gaya dihilangkan maka benda akan kembali pada keadaan semula.

Pada tegangan yang lebih tinggi (melewati batas elastis), terjadi pergeseran tetap atom-atom dalam suatu bahan disamping regangan elastik. Regangan tetap ini tidak mampu kembali pada keadaan semula ketika tegangan diiadakan. Regangan ini disebut regangan plastis (*plastic strain*). Pada daerah plastis, ukuran benda tidak dapat kembali seperti semula apabila gaya telah dihilangkan. Grafik stress terhadap strain pada daerah elastis adalah linier sedangkan pada daerah plastis menunjukkan harga maksimum *ultimate strength*. Harga slope grafik linier dinyatakan sebagai *modulus Young*. Luas daerah total dari kurva menyatakan harga *modulus of toughness*, sedangkan luas daerah elastis menyatakan harga *modulus of resilience*. *Modulus of toughness* (ketangguhan) didefinisikan sebagai energi total yang diserap oleh benda tiap satu satuan volume hingga terjadi deformasi struktur (patah atau robek). *Modulus of resilience* didefinisikan sebagai energi yang diserap oleh benda tiap satu satuan volume pada daerah elastis. Kedua besaran ini berpengaruh pada kerja benda yang pada umumnya berada pada daerah elastis.

Keuletan (*ductility*) ϵ_f menyatakan besarnya regangan plastis sampai patah, dapat dinyatakan dengan persentasi perpanjangan (*percent elongation*).

$$\epsilon_f = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (2-7)$$

Kekuatan luluh (*Yield strength*), S_y merupakan ketahanan suatu bahan terhadap deformasi plastis dinyatakan dengan besarnya gaya pada saat luluh dibagi luas penampang.

2.6 Analisa Tegangan

2.6.1 Prinsip Analisa Tegangan

Teori elastisitas merupakan dasar dari analisa tegangan. Tegangan terjadi dikarenakan benda diberi pembebanan. Perilaku selama pemberian beban dianalisa untuk memperoleh informasi yang dibutuhkan.

Prinsi analisa tegangan adalah:

1. Keseimbangan gaya dan momen : $\Sigma F = 0$. $\Sigma M = 0$
2. Teori hubungan tegangan dan regangan.

2.6.2 Konsep Tegangan dan Regangan

Tegangan dapat diperoleh dengan membagi gaya tarik atau tekan dengan luasan penampang mula-mula dari spesimen, yang dapat dirumuskan :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (\text{Gere dan Timoshenko, 1996: 3}) \quad (2-8)$$

Dengan σ = tegangan tarik (N/m^2)

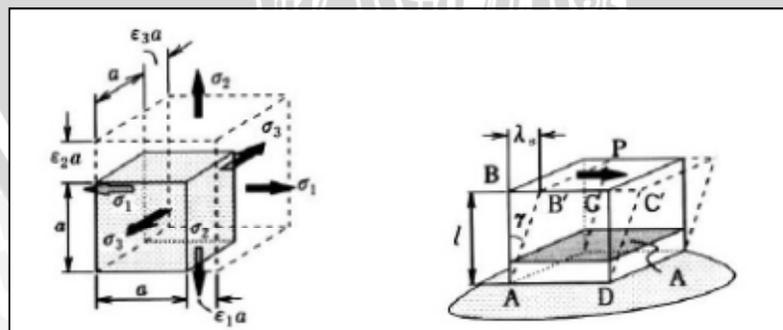
P = gaya tarik atau gaya tekan (N)

A = luas penampang (m^2)

Tegangan tarik (*tensile stress*) didefinisikan dengan nilai positif, sedang untuk tegangan tekan (*compressive stress*) didefinisikan dengan nilai negatif. Karena tegangan bekerja dalam arah tegak lurus permukaan terpotong maka ia disebut tegangan normal (*normal stress*). Jadi, tegangan normal dapat berbentuk tegangan tarik atau tekan. Selain tegangan normal, ada juga tegangan geser. Tegangan geser adalah tegangan yang arahnya sejajar dengan luasan permukaan tempatnya bekerja.

Dalam kasus yang lebih umum yaitu tegangan tiga dimensi, maka sebuah elemen tegangan akan menderita tegangan-tegangan normal dan geser pada semua permukaan. Tegangan-tegangan geser memiliki dua buah indeks bawah, dimana yang pertama menunjukkan bidang tegangan bekerja dan yang kedua mengidentifikasi arahnya dalam bidang tersebut.

Dari kesetimbangan elemen dapat dibuktikan bahwa tegangan-tegangan geser yang bekerja pada bidang-bidang tegak lurus pada garis perpotongan bidang-bidang ini besarnya sama. Untuk memperoleh satuan deformasi atau regangan (ϵ) adalah dengan membagi perpanjangan (δ) dengan panjang mula-mula (L_0) dari suatu spesimen.



Gambar 2.2 Regangan Normal dan Konstraksi dalam Arah y dan z

Sumber : Warren C. Young dan Richard G. Budynas (2002 : 15)

Pada gambar 2.5 diatas menerangkan bahwa jika suatu bahan diberi pembebanan dalam suatu garis lurus maka akan terjadi peregangan dalam arah tegak lurus maupun

searah pembebanan. Selain itu benda akan mengalami kontraksi dalam arah y dan z. Sehingga dapat dirumuskan dalam perubahan panjang masing-masing sumbu adalah : (Warren C. Young dan Richard G. Budynas, 2002 : 15)

$$\Delta x' = \Delta x + \epsilon_x \Delta x, \quad \Delta y = \Delta y + \epsilon_y \Delta y, \quad \Delta z = \Delta z + \epsilon_z \Delta z \quad (2-9)$$

Konstanta kesebandingan antara regangan aksial (arah sumbu x) dengan kontraksi (arah sumbu y dan z) disebut dengan *Poisson's ratio* (ν). Persamaan umum untuk konstanta ini :

$$\nu = -\frac{\text{regangan lateral}}{\text{regangan aksial}} \quad (\text{Gere dan Timoshenko, 1996: 20}) \quad (2-10)$$

Kontraksi dalam arah lateral, y dan z adalah sama dan dinyatakan sebagai : (Richard G. Budynas, 1997: 20)

$$\epsilon_y = -\nu \epsilon_x = \frac{\nu}{E} \sigma_x \quad (2-11)$$

$$\epsilon_z = -\nu \epsilon_x = \frac{\nu}{E} \sigma_x \quad (2-12)$$

Regangan normal yang disebabkan oleh σ_y dan σ_z sama dengan regangan yang disebabkan oleh σ_x . Regangan normal karena σ_y adalah (Richard G. Budynas, 1997: 20)

$$\epsilon_x = \epsilon_z = \frac{\nu \sigma_y}{E} \epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} \quad (2-13)$$

Sedangkan regangan normal yang disebabkan oleh σ_z adalah :

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \frac{\nu \sigma_z}{E} \epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} \quad (2-14)$$

Untuk tanda negatif pada persamaan diatas menunjukkan adanya pengurangan dimensi (kontraksi). Tinjauan untuk tegangan yang bekerja pada dua sumbu utama (biaksial dengan $\sigma_y = \tau_{yz} = \tau_{zy} = 0$) menghasilkan persamaan : (Richard G. Budynas, 1997: 21)

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y) \quad (2-15a)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x) \quad (2-15b)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y) \quad (2-15c)$$

Dengan melihat persamaan (2-10) dinyatakan sebagai tegangan maka akan menghasilkan persamaan : (Richard G. Budynas, 1997: 21)

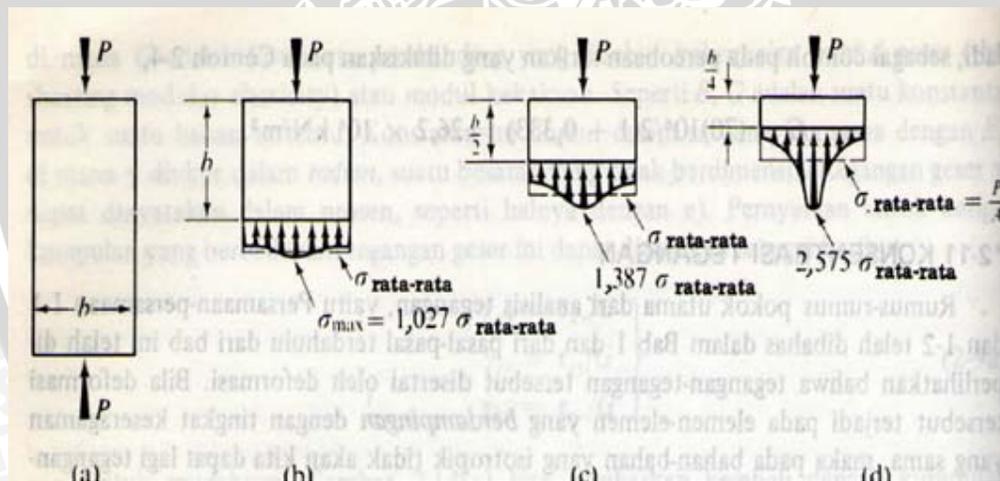
$$\epsilon_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y) \quad (2-16a)$$

$$\epsilon_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_y + \nu \epsilon_x) \quad (2-16b)$$

Bila tegangan bekerja pada ketiga sumbu secara bersamaan (tegangan triaksial), maka hubungan tegangan-regangan menjadi lebih kompleks, yaitu : (Warren C. Young and Richard G. Budynas, 2002 : 15)

2.7 Konsentrasi Tegangan

Dalam konsentrasi tegangan kita harus mengacu pada konsep Tegangan normal dan tegangan geser. Dari tegangan yang terjadi akan menimbulkan deformasi. Bila deformasi tersebut terjadi pada elemen yang berdampingan dengan tingkat keseragaman yang sama, maka pada bahan isentropik tidak akan kita dapat lagi tegangan-tegangan tambahan selain yang diberikan oleh persamaan-persamaan tegangan. Tetapi bila keseragaman dari luas penampang suatu bagian bangunan berbeda aksial tergantung atau bila gaya terpakai benar-benar diberikan pada suatu daerah yang luas yang sangat kecil, maka suatu gangguan pada tegangan dapat terjadi. Hal ini disebabkan oleh kenyataan bahwa status deformasi pada elemen-elemen yang berbatasan haruslah kontinu secara fisis. Mereka haruslah merentang atau menciut dengan jumlah yang sama dari semua partikel yang terletak pada sebelah menyebelah perbatasan. Deformasi-deformasi yang dihasilkan oleh deformasi perpanjangan dan geser ini menyangkut sifat-sifat bahan E , G dan ν serta gaya-gaya terpakai.



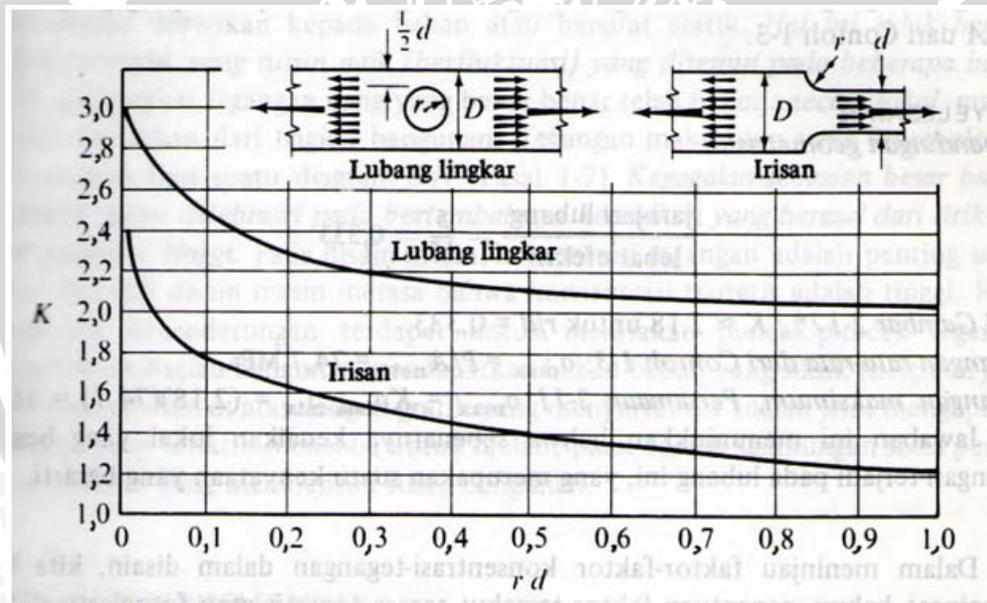
Gambar 2.3 Distribusi tegangan disekitar gaya terpusat
Sumber : Egor P. Popov (1976 : 135)

Gambar diatas dikenal sebagai azas Saint Venant dari dari penyebaran cepat tegangan yang terlokalisasi. Asas ini menyatakan, bahwa efek gaya atau tegangan yang bekerja pada suatu luas yang kecil, boleh diperlakukan sebagai suatu sistem yang setara secara statis pada jarak selebar atau setebal benda, hingga menyebabkan distribusi tegangan dapat mengikuti hukum yang sederhana. Karena itu persamaan tegangan normal hampir berlaku pada jarak selebar bagian bangunan dari titik tangkap

suatu gaya terpusat. Perhatikan pula bahwa pada setiap tingkat dimana tegangan tersebut diselidiki secara teliti, tegangan rata-rata masih bisa ditentukan dengan penggunaan persamaan tegangan normal. Hal ini disertai pula dengan syarat persamaan-persamaan statistika yang harus selalu dipenuhi. Tidak lah menjadi soal bagaimana ketidak teraturan distribusi tegangan tersebut pada suatu irisan tertentu dari suatu bagian bangunan, tetapi integral σdA terhadap seluruh luas harus sama dengan gaya yang terpakai.

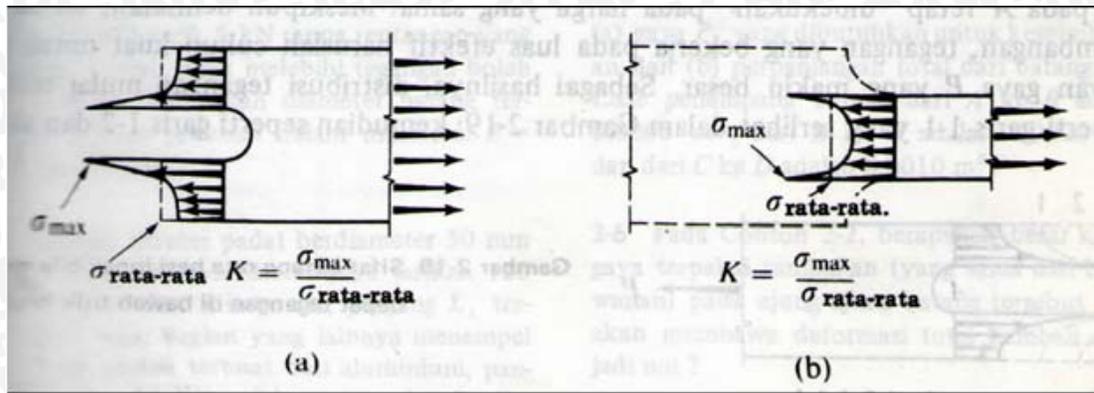
Karena susahnya menyelesaikan tegangan lokal pada puncak yang memiliki luas permukaan yang kecil kemudian di ketahui faktor konsentrasi tegangan (*stress concentration factor*) dan dilambangkan K . Harga faktor konsentrasi tegangan ini hanya dipengaruhi kepada perbandingan geometris bangunan. Maka persamaan tegangan menjadi

$$\sigma_{max} = K \frac{P}{A} \tag{2-17}$$



Gambar 2.4 Faktor konsentrasi tegangan untuk batang-batang rata dibawah tarikan.
 Sumber : Egor P. Popov (1976 : 135)

Dua faktor konsentrasi tegangan penting lain dari bagian bangunan yang rata berbeban aksial diperlihatkan di gambar diatas. Grafik ini menampilkan suatu perbandingan dari tegangan puncak suatu tangan yang sesungguhnya pada irisan bagian bangunan netto atau kecil, seperti yang terlihat gambar dibawah, dengan tegangan rata-rata dari irisan netto tersebut yang diberikan oleh persamaan tegangan normal.



Gambar 2.5 Pengertian faktor konsentrasi-tegangan K dalam bentuk tegangan.

Sumber : Egor P. Popov, (1976 ; 135)

2.8 Desain dan Safety Factor

Selalu ada faktor yang tidak diperhatikan dalam menentukan besar dari beban kerja dan tegangan yang terjadi selama pengoperasian; biasanya perhitungan beban akan di kira-kira. Selanjutnya, semua material menunjukkan sebuah variasi didalam perhitungan propertinya. Maka konsekuensinya desain izin harus dibuat untuk menahan pada kegagalan yang tidak tidak terduga. Salah satu caranya adalah dengan menghitung σ_d . Untuk kondisi statis dan ketika material yang digunakan ulet

$$\sigma_d = N' \sigma_c \quad (2-18)$$

Dimana N' lebih besar dari 1. Sehingga material yang digunakan untuk aplikasi tertentu

2.9 Kegagalan Lelah/Fatigue Failure

Kegagalan lelah merupakan suatu kegagalan yang terjadi ketika sebuah bahan telah mengalami siklus tegangan & regangan yang menghasilkan kerusakan yang permanen, juga dapat terjadi dibawah atau diatas tegangan luluh. Kegagalan lelah pada umumnya meliputi pertumbuhan inti dan penebaran dari sebuah retak.

Penyebab Kelelahan:

- Kelelahan yang dikontrol oleh tegangan.
 1. Rotating bending
 2. Getaran
 3. Penekanan
 4. Rolling Contact
- Kelelahan yang dikontrol oleh regangan
 1. Siklus

2. Tarikan besar
3. Terbuka / Tertutup

Pengukuran kelelahan diperoleh dari :

1. Struktur presisi dan bertekuk
 - a. Kelelahan meliputi pertumbuhan inti & penyebaran retakan (*propagation of crack*)
 - b. Karakteristik dengan umur $T - S$ (Tegangan - Siklus, $s-n$) atau $R - S$ (Regangan - Siklus, $\epsilon-N$)
 - c. Takikan yang mengkonsentrasikan tegangan & regangan.

2. Struktur Retak

- a. Kelelahan meliputi penyebab retak
- b. Karakteristik dengan laju pertumbuhan retak lelah (*fatigue crack growth rate*)

Tujuan untuk memprediksi umur lelah atau siklus pembebanan maksimum untuk menentukan umur yang tidak terbatas (*infinite life*).

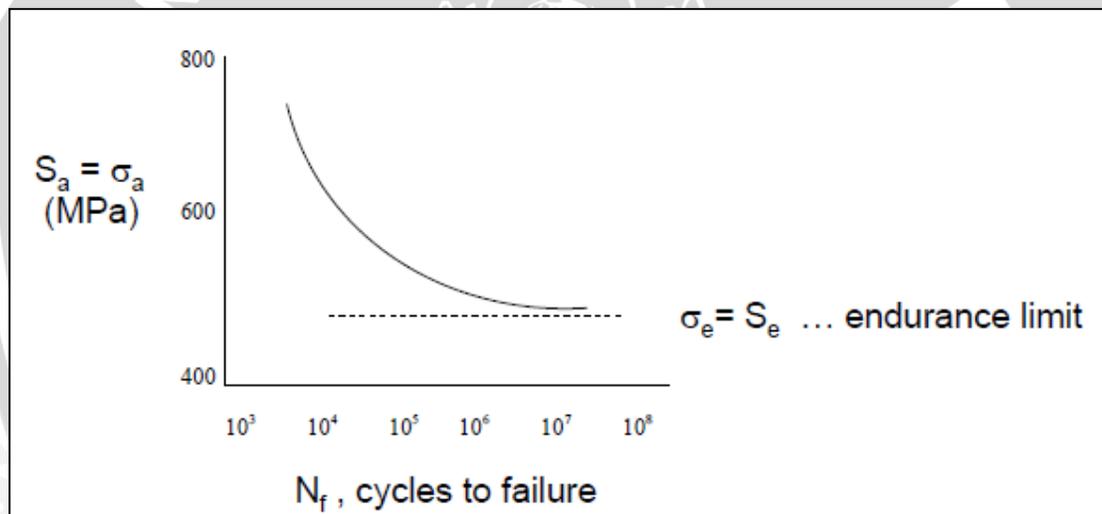
3. Penyebab utama kegagalan / kesalahan

- a. Kesalahan dalam perencanaan / desain
 - Operasi yang sebenarnya, antara lain : beban, lingkungan, suhu operasi, dsb.
 - Adanya tarikan
- b. Kesalahan dalam pemilihan material / bahan
 - Data material yang tidak mencukupi, misalnya hanya data uji tarik.
 - Kriteria pemilihan material
 - Kaitan antara beban, tegangan & suhu
 - Operasi dengan mekanisme kegagalan serta kriteria pemilihan material
- c. Cacat Material
 - Cacat dipermukaan dan didalam material akan menurunkan kekuatannya
 - Cacat pengecoran: inklusi, porositas, rongga, retak penyusutan.
 - Cacat pengerolan / tempa: segregasi, laminasi, oksida didekat permukaan
- d. Kesalahan dalam proses pemasangan / perekatan
 - Kesalahan dalam pemasangan, seperti halnya kelurusan akan menimbulkan beban yang berlebihan
 - Begitu pula dengan pemaksaan dalam perakitan
- e. Kesalahan dalam proses pengerjaan
- f. Kesalahan operasi

- Kondisi operasi yang tidak normal/berlebihan, misalnya: beban, kecepatan, suhu, akan merusak peralatan.
- Bila lingkungan lebih korosif yang diduga sebelumnya
- Perawatan yang kurang
- Prosedur *startup* dan *shutdown* yang salah

2.10 Kelelahan Logam

Dalam memperhitungkan beban siklus tentunya juga berpengaruh terhadap umur komponen tersebut. Umur komponen akibat beban siklus disini disebut dengan *fatiguelife*. *Fatiguelife* diukur dengan menggunakan diagram s-n. Diagram ini merupakan hubungan antara kekuatan lelah dengan jumlah siklus (*cycle*) yang dijelaskan pada gambar 2.6 dibawah



Gambar 2.6 Diagram *s-n*
Sumber : Stephens (2001 : 2)

Koordinat dari daigram *s-n* ini disebut kekuatan lelah (S_f) yang harus selalu diikuti dengan jumlah siklus n yang berkaitan. Berdasarkan besar siklus biasanya digolongkan menjadi dua golongan yaitu kelelahan siklus rendah dan kelelahan siklus tinggi. Batas kelelahan siklus rendah adalah antara $n=1/2$ dan $n=1000$.

Kelelahan logam diawali dengan pembentukan awal retak dan dilanjutkan dengan penjaralan retakan hingga komponen mengalami patah. Lokasi awal retak pada komponen atau logam yang mengalami pembebanan dinamis atau siklus adalah pada titik daerah dimana memiliki kekuatan yang paling minimum dan atau pada titik daerah

dimana mengalami tegangan yang paling maksimum. Oleh karena itu untuk memperkirakan umur lelah suatu komponen merupakan suatu hal yang cukup sulit, hal ini disebabkan oleh banyaknya faktor yang mempengaruhi umur lelahnya.

2.11 Beban Siklus

Beban dibagi menjadi dua jenis, yaitu beban statis dan beban dinamis. Beban siklus merupakan beban dinamis. Beban siklus adalah beban yang berubah terhadap waktu. Beban-beban ini dan jenis beban lainnya yang terjadi dalam anggota-anggota mesin menghasilkan tegangan yang disebut tegangan berulang (*repeated stresses*), tegangan bolak-balik (*alternating stresses*), atau tegangan berfluktuasi (*fluctuating stresses*) (E. Shigley, 1986)

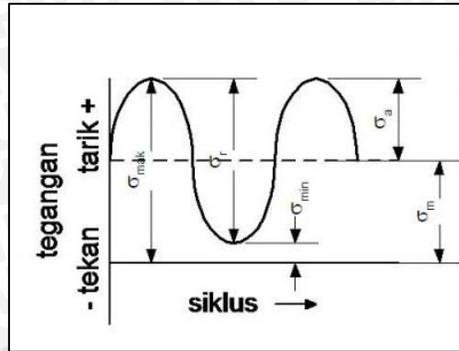
2.11.1 Komponen Beban Siklus

Pembebanan yang diberikan berulang pada suatu komponen tentunya memiliki tegangan maksimum dan tegangan minimum. Tegangan maksimum yang diberikan pada material sebenarnya masih dibawah kekuatan dari bahan tersebut dan bahkan cukup sering berada dibawah tegangan *yield* (E.Shigley, 1986). Tegangan ini diberikan pada benda dalam waktu yang lama sehingga mengalami kegagalan. Kegagalan akibat beban siklus ini disebut suatu *fatigue failure*.

Faktor yang paling menentukan terjadinya kegagalan fatigue adalah adanya siklus tegangan atau pembebanan yang berulang *cyclic*. Rasio tegangan yang diberikan mempunyai pengaruh yang berarti pada laju pertumbuhan retak. Seperti dijelaskan sebelumnya, rasio tegangan didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan minimum dengan tegangan maksimum.

$$R = \frac{S_{min}}{S_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}} \quad (2-19)$$

Komponen-komponen dari siklus tegangan berfluktuasi ditunjukkan oleh Gambar 2.7 dibawah ini.



Gambar 2.7 Model Pembebanan Berulang
 Sumber : Dieter (1988:124)

Pembagian komponen siklus pembebanan berulang pada gambar 2.8 adalah sebagai berikut:

1. Tegangan rata-rata (S_m), yaitu nilai rata-rata dari tegangan maksimum dan tegangan minimum pada siklus.

$$S_m = \frac{S_{max} + S_{min}}{2} \quad (2-19a)$$

2. Daerah tegangan atau jangkauan tegangan (S_r), yaitu perbedaan antara tegangan maksimum dengan tegangan minimum pada suatu siklus.

$$S_r = S_{max} - S_{min} \quad (2-19b)$$

3. Tegangan bolak-balik atau amplitudo tegangan (S_a), yaitu setengah dari jangkauan tegangan.

$$S_a = \frac{S_r}{2} = \frac{S_{max} + S_{min}}{2} \quad (2-19c)$$

Rasio tegangan berpengaruh terhadap kondisi beban yang dialami oleh suatu komponen. Dalam hubungannya membentuk kondisi beban, rasio tegangan memiliki hubungan dengan amplitudo tegangan. Hubungan antara rasio tegangan, amplitudo tegangan terhadap kondisi beban adalah sebagai berikut :

- Fully Reserved* : $R = -1$
- Zero to max* : $R = 0$
- Zero to min* : $R = \infty$

2.11.2 Variabel-amplitudo test

Semakin kompleks suatu amplitud dibutuhkan stimulasi stress yang terjadi dalam subjek secara aktual. Simulasi yang dimiripkan dengan kondisi nyata sangat kompleks. Untuk mencari hubungan akumulasi dari kerusakan yang diakibatkan oleh fatigue pada spesimen maka variabel amplitudo tes kelelahan dapat dibagi menjadi :

- *Cumulative damage test*

Tes ini dimana objektif terhadap investigasi teori kerusakan komulatif, dimana biasanya frekuensi dari amplitudo disederhanakan.

- *Service simulating test*

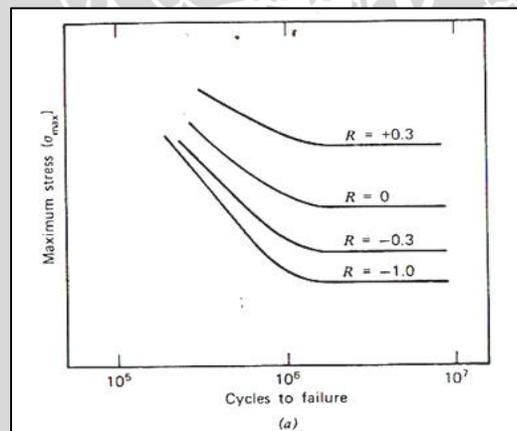
Tes ini lebih kepada kondisi nyata saat penggunaan material sehingga amplitudo dikondisikan semirip mungkin dengan kondisi pemakaian

2.11.3 Pengaruh Rasio Tegangan (*Stress Ratio*)

Rasio tegangan (R) mempunyai pengaruh yang berarti pada laju pertumbuhan retak. Rasio tegangan didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan minimum dengan tegangan maksimum.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}} \quad (2-20)$$

Bannaite (1990) menjelaskan bahwa untuk nilai ΔK yang konstan dengan semakin besar nilai R , maka laju pertumbuhan retak juga semakin besar. Faktor yang menentukan terjadinya kegagalan lelah (*fatigue*) adalah siklus tegangan atau pembebanan yang berulang. Seperti pada gambar 2.9



Gambar 2.8: Variasi tegangan terhadap umur *fatigue*
Sumber: Dieter (1988:126)

2.12 Sifat-sifat Logam pada Pembebanan Dinamis

Beban dinamis adalah beban yang berubah-ubah arah dan besarnya menurut waktu. Kelelahan adalah gejala patah dari bahan yang disebabkan beban yang berubah-ubah. Sedangkan batas ketahanan lelah ialah tegangan bolak-balik (*stress cyclic*) tertinggi

yang dapat ditahan oleh material sampai banyak balikan tak terhingga. Adapun beberapa faktor yang mempengaruhi kekuatan kelelahan yaitu :

- a. Jenis siklus pembebanan
- b. Besarnya beban amplitudo
- c. Frekuensi kerja/vibrasi jumlah balikan sampai patah
- d. Kondisi material dari benda kerja
- e. Keadaan dari pengolahan permukaan benda kerja
- f. Suhu
- g. Kondisi lingkungan

Dari uraian diatas maka setiap komponen mesin dibatasi oleh umur pemakaian (*life time*) dari komponen yang bersangkutan, yang mana berkaitan dengan :

- a. Frekuensi kerja komponen
- b. Beban atau gaya yang bekerja terhadap komponen
- c. Material dan proses manufaktur dari komponen (Sutantra, 2001)

2.14 Metode Elemen Hingga

FEM (*Finite Element Method*) atau Metode Elemen Hingga merupakan bentuk penyelesaian suatu problem dengan cara membagi objek analisa menjadi bagian-bagian kecil yang terhingga. Bagian-bagian kecil ini kemudian dianalisa dan hasilnya digabungkan kembali untuk mendapatkan penyelesaian untuk keseluruhan daerah. Sebaliknya pendekatan dengan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) merupakan suatu analisis pendekatan yang berdasarkan asumsi peralihan atau asumsi tegangan, bahkan dapat juga berdasarkan kombinasi dari kedua asumsi tadi dalam setiap elemennya (Cook, 2001).

Membagi bagian analisa menjadi bagian-bagian kecil disebut “*discretizing* atau diskritisasi”. Bagian-bagian kecil ini disebut elemen, yang terdiri dari titik-titik sudut (disebut nodal, atau node) dan daerah elemen yang terbentuk dari titik-titik tersebut.

Membagi sebuah objek menjadi bagian-bagian kecil secara fisika sebenarnya menuntun kita kepada pembuatan persamaan diferensial. Jadi secara lebih matematis, FEM didefinisikan sebagai teknik numerik untuk menyelesaikan problem yang dinyatakan dalam persamaan diferensial.

Secara umum langkah-langkah dalam FEM bias diringkas sebagai berikut:

1. Diskritisasi dan pemilihan elemen

Proses ini adalah proses pembagian struktur menjadi elemen-elemen kecil yang lebih sederhana yang dihubungkan pada titik simpul (node), kemudian dilakukan pemilihan elemen seperti model awal dari struktur. Hal ini dilakukan untuk mempermudah analisa.

$$\{D\} = \begin{Bmatrix} U_i \\ V_i \\ U_j \\ V_j \\ U_m \\ V_m \end{Bmatrix} \quad (2-21)$$

2. Memilih fungsi pendekatan

Variasi perpindahan pada suatu elemen didekati dengan fungsi interpolasi yang didasarkan pada harga simpul yang mengitari. Fungsi yang paling umum digunakan adalah polinomial. Pendekatan dengan fungsi interpolasi ini disebabkan karena sulitnya mencari jawaban tertutup sehingga dipilih suatu bentuk jawaban, yaitu distribusi perpindahan yang merupakan besaran yang tidak diketahui dengan memakai fungsi yang harus memenuhi hukum, prinsip dan syarat batas yang menjadi sifat persoalan yang ada.

Untuk problem plane stress, governing equation yang digunakan adalah

$$\epsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu \sigma_{xx}] \quad (2-22)$$

Dengan E adalah modulus young dan ν adalah *poisson ratio*

Dalam kondisi plane stress digunakan rumus equilibrium yaitu pada sumbu Y

$$\frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + b_y = 0 \quad (2-23)$$

3. Mendefinisikan regangan-*displacement*, dan tegangan regangan

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (2-24)$$

Untuk plane stress, tegangan σ_z , τ_{xz} , dan τ_{yz} diasumsikan nol, sehingga hubungan tegangan-regangannya adalah

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5(1-\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2-25)$$

Dimana

$$D = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5(1-\nu) \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

Jadi

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2-27)$$

Dari kondisi plane stress yang didefinisikan pada pemodelan material didapatkan matrik regangan sebagai berikut:

$$[\varepsilon] = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial V}{\partial y} \\ \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \beta_i & 0 & \beta_j & 0 & \beta_m & 0 \\ 0 & \gamma_i & 0 & \gamma_j & 0 & \gamma_m \\ \gamma_i & \beta_i & \gamma_j & \beta_j & \gamma_m & \beta_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_i \\ V_i \\ U_j \\ V_j \\ U_m \\ V_m \end{Bmatrix} \quad (2-28)$$

4. Mendefinisikan Matrik kekakuan dan equation

$$\{f\} = [K]\{d\} \quad (2-29)$$

Dari hasil penurunan rumus dengan parameter *shape function*, *energy potential*, dan gaya yang bekerja pada material, sehingga didapatkan matrik [K]

$$[K] = \begin{bmatrix} [K_{II}] & [K_{IJ}] & [K_{IM}] \\ [K_{JI}] & [K_{JJ}] & [K_{JM}] \\ [K_{MI}] & [K_{MJ}] & [K_{MM}] \end{bmatrix} \quad (2-30)$$

Dimana masing-masing matrix [K_{ii}] adalah matrik 2x2 yang didefinisikan

$$[K_{II}] = [B_i]^T [D] [B_i] tA, [K_{ij}] = [B_j]^T [D] [B_i] tA, [K_{Im}] = [B_i]^T [D] [B_m] tA \quad (2-31)$$

Kemudian diperoleh matrik kekakuan dan persamaan

$$[B_i] \frac{E}{2A} \begin{bmatrix} \beta_i & 0 \\ 0 & \gamma_i \\ \beta_i & \beta_i \end{bmatrix}, [B_j] \frac{E}{2A} \begin{bmatrix} \beta_j & 0 \\ 0 & \gamma_j \\ \beta_j & \beta_j \end{bmatrix}, [B_m] \frac{E}{2A} \begin{bmatrix} \beta_m & 0 \\ 0 & \gamma_m \\ \beta_m & \beta_m \end{bmatrix} \quad (2-32)$$

5. Menggabungkan persamaan elemen dan *boundary condition*

Penggabungan akhir atau persamaan global dapat ditulis dalam persamaan matrik sebagai berikut

$$\{f\} = [K]\{d\} \quad (2-33)$$

Dimana {F} adalah beban ekuifalen global nodal diperoleh dengan distribusi beban dan *elemen body force* pada nodes dan [K] adalah matrik kekakuan global. Sedangkan [d] adalah *total displacemen vector*.

6. Mendapatkan besaran sekunder dan interpretasi hasil

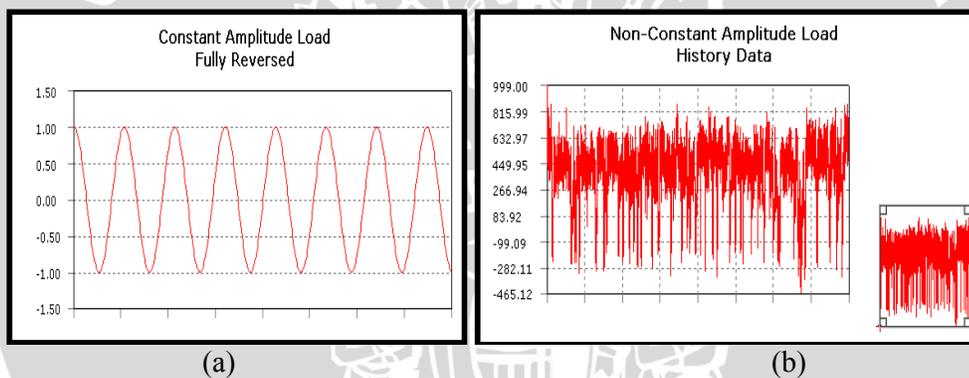
Dari besaran pertamanya yang berupa perpindahan, dapat dicari besaran sekunder yang dapat berupa tegangan maupun regangan, dengan menggunakan hubungan antara

keduanya. Hubungan tegangan-regangan dapat dinyatakan dalam bentuk matrik sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} U_i \\ V_i \\ U_j \\ V_j \\ U_m \\ V_m \end{pmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2-34)$$

2.14 Metode *Static Struktur* didalam Menganalisa *Fatigue*

Pada dasarnya bisa dilakukan analisa suatu komponen konstruksi menggunakan metode *static struktur*. Karena beban dinamis diasumsikan tidak merupakan fungsi waktu yang artinya pada suatu titik pada komponen mengalami pembebanan dinamis yang sama. Berikut ini contoh pembebanan dinamis yang merupakan fungsi waktu dan bukan fungsi waktu.

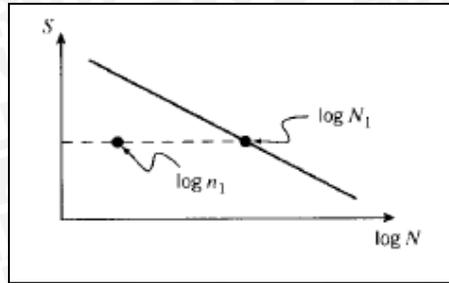


Gambar 2.9.a *Constant Amplitudo Load Fully Reversed*, (b) *Non-constant Amplitudo Load*

Sumber: *Ansys Fatigue Modul*, (2005:4)

2.15 *Miner's Law*

Perhitungan jumlah siklus yang terjadi didalam simulasi berbasis metode elemen hingga menggunakan Hukum Miner. Ketika uji fatigue diasumsikan siklus nyata dari suatu tegangan (σ_1) adalah N_1 dan N_2 ketika tegangan (σ_2). Namun ketika uji *fatigue* tegangan tersebut dipengaruhi kerusakan simultan yang biasanya faktor koreksi fatigue 0,7 yang menyebabkan jumlah siklus saat menjadi n_1 , dimana $n_1 < N_1$, dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Konsep Hukum Miner
 Sumber : David (2001 : 5)

Untuk menghitung berapa siklus yang terjadi pada tegangan tertentu σ_2 maka menggunakan rumus :

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1 \quad (2-35)$$

Untuk mengeneralisasikan rumus miner diperoleh :

$$\sum \frac{n_j}{N_j} = 1 \quad (2-36)$$

2.17 Hipotesa

Hipotesa yang terbentuk bahwa *Equivalent Stress (Von Misses)* paling besar dan umur lelah (*life*) yang paling rendah adalah berada di kontak antara pin dan *Halp Clamp* Atas. Maka akibat runtuhnya jembatan Mahakam akibat beban dinamis.



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini melakukan survei untuk mengetahui jenis material, material *properties*, kondisi *hanger*, inspeksi material dan merancang geometri *hanger*. Setelah survei dilaksanakan dilanjutkan mensimulasikan *hanger* sesuai kondisi lapangan dengan menggunakan *software* berbasis MEH.

3.2 Tempat dan Waktu Skripsi

Penelitian ini dimulai pada Agustus 2014 di Lembaga Uji Konstruksi Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Teknologi, Serpong Tangerang Selatan untuk pengambilan data material dan geometri *hanger*.

3.3 Peralatan Dan Bahan Penelitian

Peralatan dan bahan yang digunakan untuk uji analisis ini adalah:

- Komputer
- *Software* CAD
- *Software* Berbasis MEH
- Pustaka dan referensi yang mendukung

3.4 Variabel Penelitian

Variabel penelitian terdiri dari tiga yaitu variabel bebas, variabel terikat, dan variabel terkontrol. Ketiga variabel penelitian dijelaskan dan dijabarkan :

3.4.1 Variabel Bebas

Besarnya variabel bebas ditentukan sebelum penelitian. Variabel bebas dapat divariasikan untuk memperoleh hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat sehingga tujuan penelitian dapat tercapai. Dalam penelitian ini variabel bebas yang digunakan yaitu pemberian gaya pada batang *hanger* yaitu; 56.670 Kg dan 86.430 Kg.

Selain itu juga dilakukan pembebanan sesuai dengan tabel 3.1

Tabel 3.2 Pembebanan untuk mencari *s-n curve*

Variabel Bebas	
Pembebanan (N)	Tegangan (MPa)
418166	134,2140442
437766	140,504836
457366	146,7956279
476966	153,0864198
496566	159,3772116
516166	165,6680035
535766	171,9587953
555366	178,2495872
574966	184,540379
594566	190,8311709
614166	197,1219627
633766	203,4127546
653366	209,7035464
672966	215,9943383
692566	222,2851301
712166	228,575922
731766	234,8667138
751366	241,1575057
770966	247,4482976
790566	253,7390894
810166	260,0298813
829766	266,3206731
847014	271,8565699
868966	278,9022568
888566	285,1930487

3.4.2 Variabel Terikat

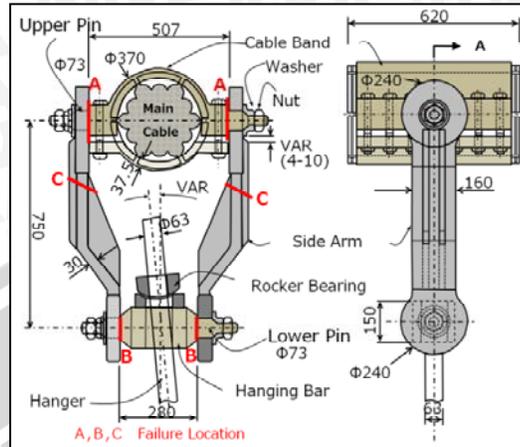
Variabel terikat yaitu variabel yang dapat dipengaruhi oleh variabel bebas yang telah digunakan. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah *fatigue life* (n), dan *equivalen stress* (MPa).

3.4.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol yaitu variabel yang nilainya dijaga konstan selama penelitian. Variabel terkontrol dari penelitian ini adalah :

- *Material Properties*.
- Letak titik tumpuan.
- Tipe tumpuan.
- Geometri *Hanger*

3.5 Pemodelan Geometri



Gambar 3.1 Model *Hanger* Tipe C2A

Sumber : Data Pribadi

3.6 Pemodelan Material

Pada pemodelan material ditentukan material yang akan digunakan dan memasukan *properties* material. Untuk penelitian ini digunakan material FCD600.

Tabel 3.2 Penamaan Material

JAPAN	JIS G 5521	FCD400-18	FCD400-15	FCD450-10	FCD500-7	FCD600-2	FCD700-2	FCD800-2
AMERICA	ASTM A-536	60-40-18	60-40-15	65-45-12	80-55-6	-	100-70-3	120-90-2
EUROPE	DIN 1532	EN-GJS-400-18(U)	EN-GJS 400-15U	EN-GJS 450-10U	EN-GJS 500-7U	EN-GJS 600-3U	EN-GJS 700-2U	EN-GJS 800-2U
ISO	1083	FCD400-18	FCD400-15	FCD450-10	FCD500-7	FCD600-2	FCD700-2	FCD800-2
TAIWAN	CNS 2869	FCD400-18	FCD400-15	FCD450-10	FCD500-7	FCD600-2	FCD700-2	FCD800-2

Spesifikasi material yang digunakan *hanger* adalah sebagai berikut :

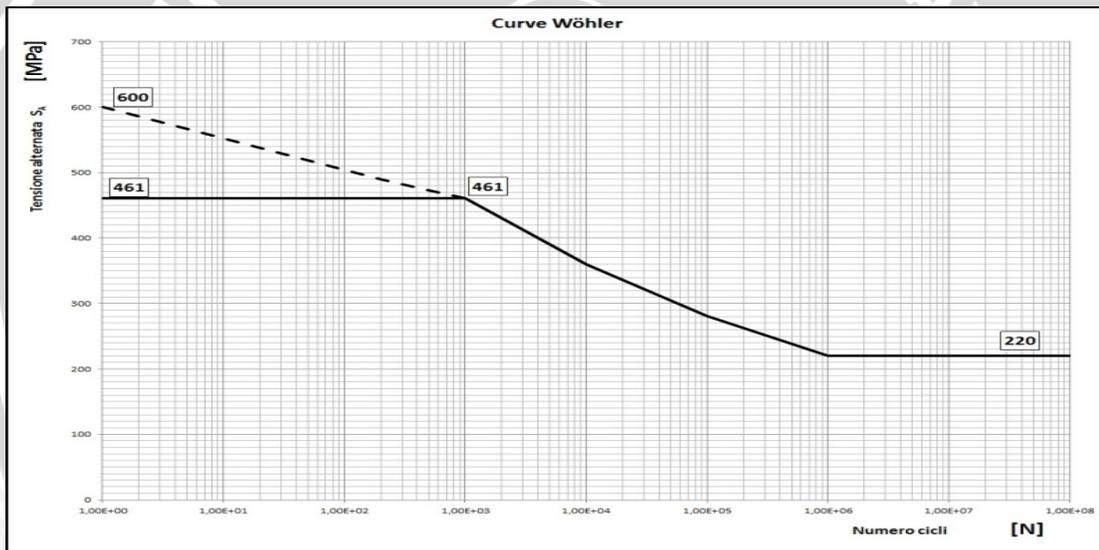
Properties Material

- Bahan : FCD600/GJS600
- Densitas : 7,86 g/cm³
- *Yield Strength* : 370 MPa
- *Ultimate Tensile Strength* : 620 MPa

- *Young's Modulus* : 220 GPa
- *Poisson's Ratio* : 0,275
- *Shear Modulus* : 86,2745 GPa

Tabel 3.3 Komposisi kimia FCD 600

FCD 600	
Unsur	Komposisi (%)
Karbon (C)	3,76
Silikon (Si)	2,98
Mangan (Mn)	0,41
Fosfor (P)	0,023
Sulfur (S)	0,015
(Cu)	0,30
Magnesium (Mg)	0,052



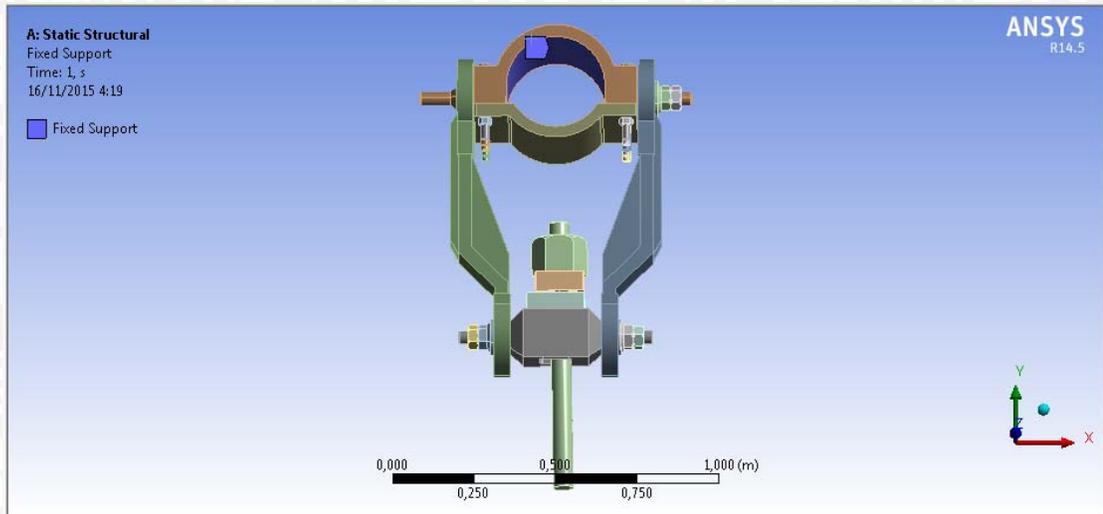
Gambar 3.2 Kurva S-N Wohler EN-GJS 600

3.7 Simulasi

3.7.1 Boundary Condition

3.7.1.1 Tumpuan

Setelah dilakukan pemodelan geometri *hanger* tersebut dan memilih material, langkah selanjutnya yaitu menetapkan simulasi yang akan dilakukan. Sebelum simulasi dilakukan langkah berikutnya adalah menentukan jenis (*fixed support*) dan letak tumpuan pada *hanger* yang terlihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.3 *Fixed Support Hanger*
 Sumber : Data pribadi

3.7.1.2 Gaya

Setelah dilakukan pemodelan tumpuan *hanger*, langkah selanjutnya yaitu menetapkan gaya yang bekerja pada simulasi yang akan dilakukan. yang terlihat pada gambar 3.3.

Gaya yang diterima hanger melalui batang hanger akan menimbulkan tegangan pada permukaan hanger. Tegangan ini yang nanti dimasukkan kedalam simulasi.

- Gaya

$$F = m \cdot a \quad \text{dimana : } a = g \text{ (9,8 m/s}^2\text{)}$$

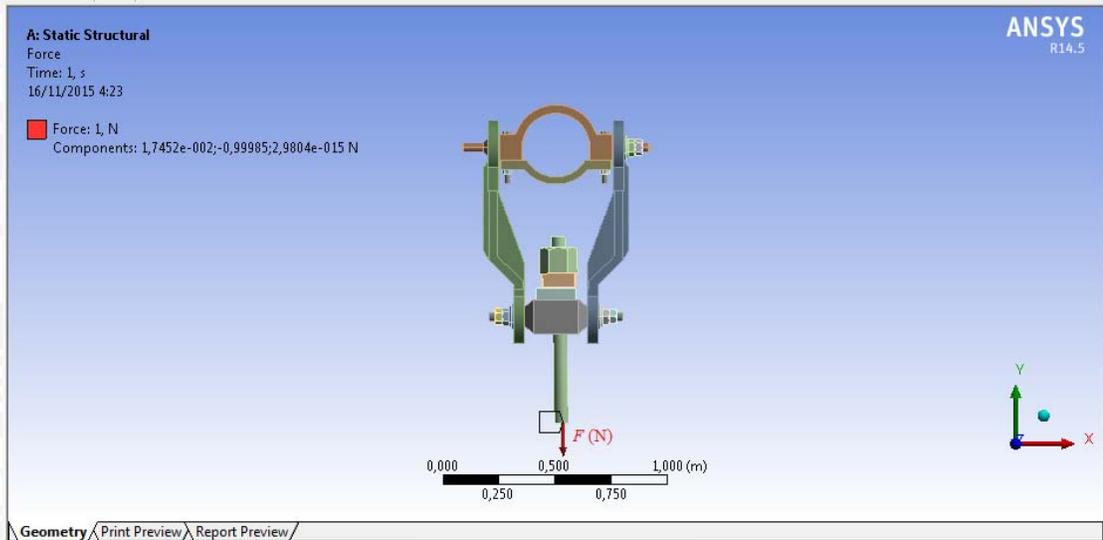
- Tegangan

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{dimana : } A = \text{luas penampang batang hanger}$$

$$= \pi \cdot r^2$$

$$= 3,14 \times (31,5)^2$$

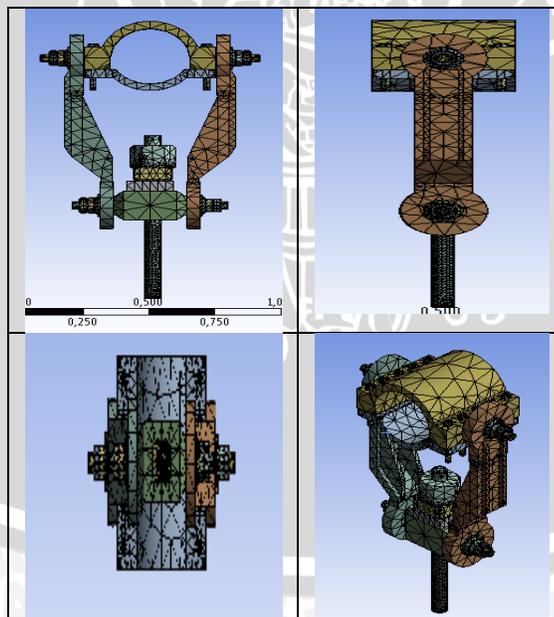
$$= 3115,7 \text{ mm}^2$$



Gambar 3.4 Pembebanan pada *hanger*
 Sumber : Data pribadi

3.7.3 Meshing

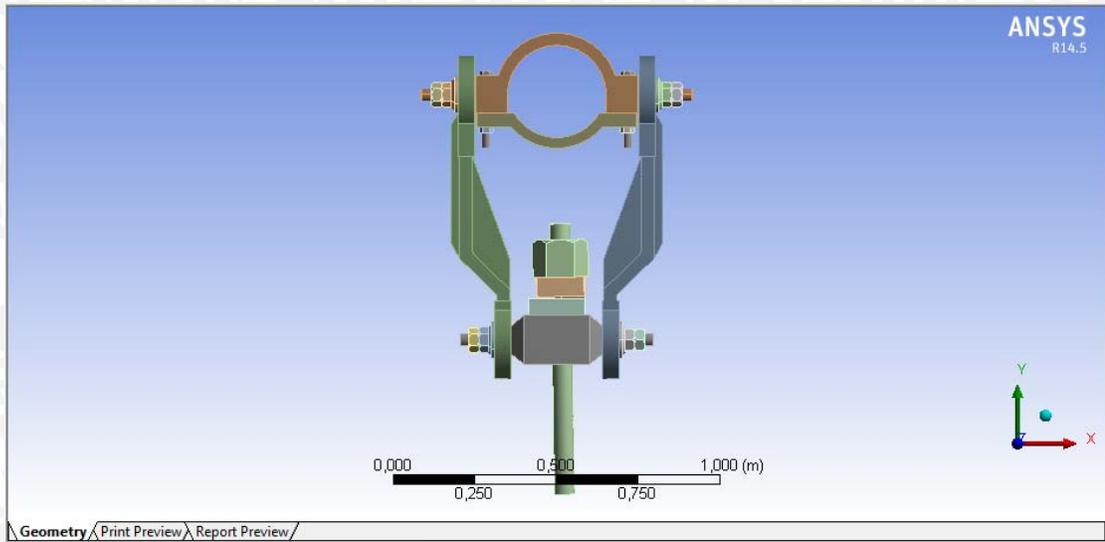
Meshing berfungsi untuk mendapatkan hasil simulasi benda kerja yang sesuai dengan eksperimen secara nyata. Semakin kecil *meshing* yang dilakukan maka semakin halus hasil simulasi benda. Hasil *meshing* pada *hanger* ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.5 *Mesing Hanger*

3.7.4 Pengambilan Data

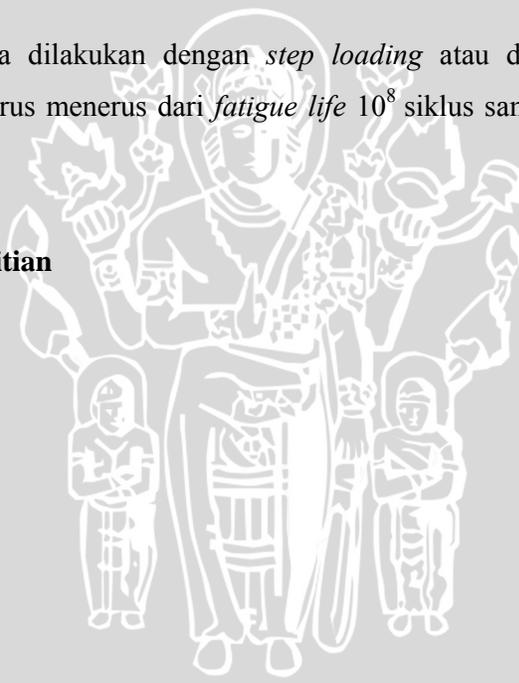
Pengambilan data dilakukan di seluruh bagian *hanger*.

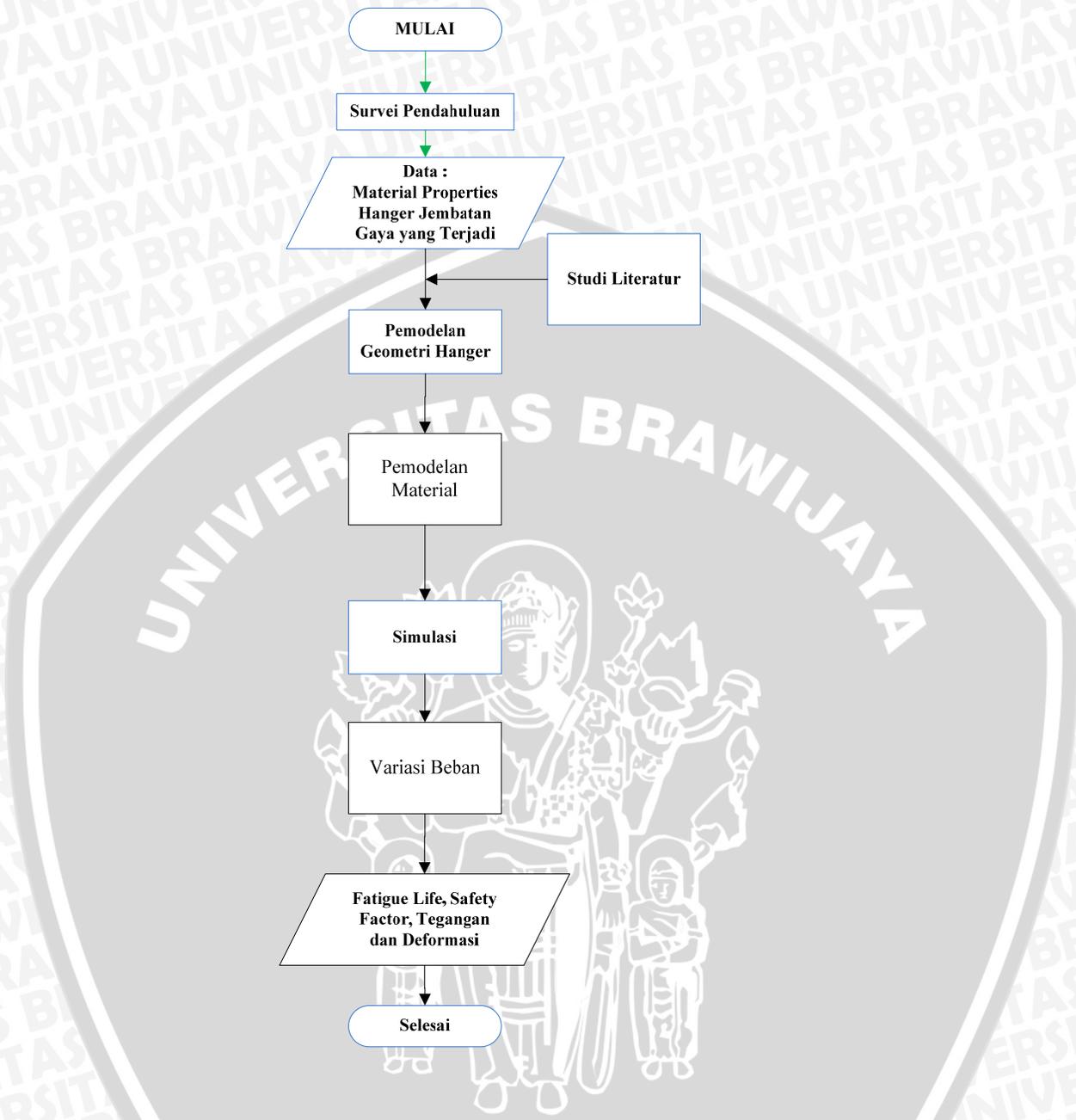


Gambar 3.6 Daerah pengambilan data siklus (n)

Pengambilan data dilakukan dengan *step loading* atau dengan penambahan beban 2000 kg secara terus menerus dari *fatigue life* 10^8 siklus sampai didapat *fatigue life* mendekati 0 siklus.

3.8 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.6 Diagram Alir Pelaksanaan Kegiatan Penelitian



BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Inspeksi Material

Dengan menggunakan alat *hardness tester* dapat diketahui *Ultimare Tensile Strength* dari material yang biasanya nilai aktualnya diatas nilai propertiesnya. Berikut ini adalah hasil dari tes dengan alat *hardness tester* yang dilakukan di BPPT Serpong.

Tabel 4.1 Pengujian Clamp Halp atas dengan *hardness tester*

Gambar Material	Hasil
	688,23 MPa
	693,12 MPa
	733,45 MPa
	701,38 MPa
	725,39 MPa
Nilai Rata-rata	708,31 MPa

Tabel 4.2 Pengujian Hanging Bar dengan *hardness tester*

Gambar Material	Hasil
	667,67 MPa
	678,89 MPa
	698,52 MPa
	689,80 MPa
	698,40 MPa
Nilai Rata-rata	686,56 MPa

Tabel 4.3 Pengujian Hanger Rod dengan *hardness tester*

Gambar Material	Hasil
	679,56 MPa
	697,34 MPa
	699,53 MPa
	674,38 MPa
	715,52 MPa
Nilai Rata-rata	693,26 MPa

Tabel 4.4 Pengujian Lock Nut dengan *hardness tester*

Gambar Material	Hasil
	669,45 MPa
	687,28 MPa
	691,18 MPa
	705,25 MPa
	713,56 MPa
Nilai Rata-rata	693,34

Tabel 4.5 Pengujian Hold Bar dengan *hardness tester*

Gambar Material	Hasil
	698,78 MPa
	693,69 MPa
	728,45 MPa
	701,38 MPa
	725,39 MPa
Nilai Rata-rata	713,64 MPa

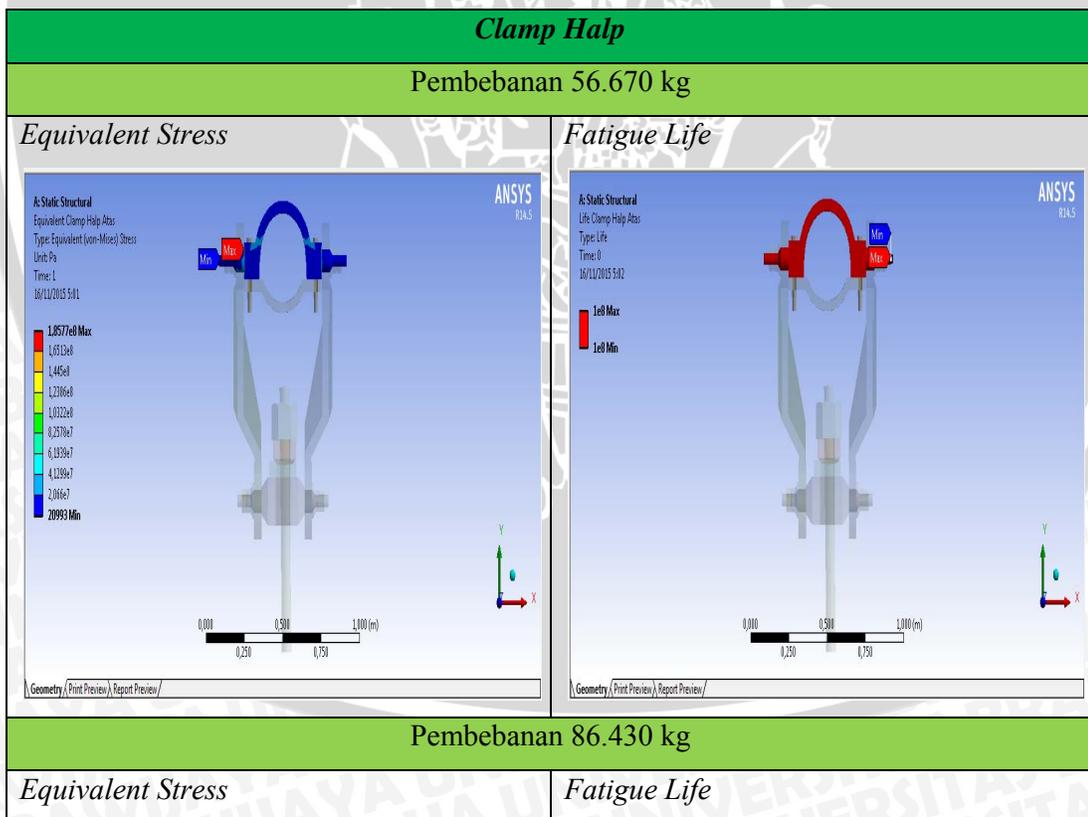
4.2 Hasil Simulasi

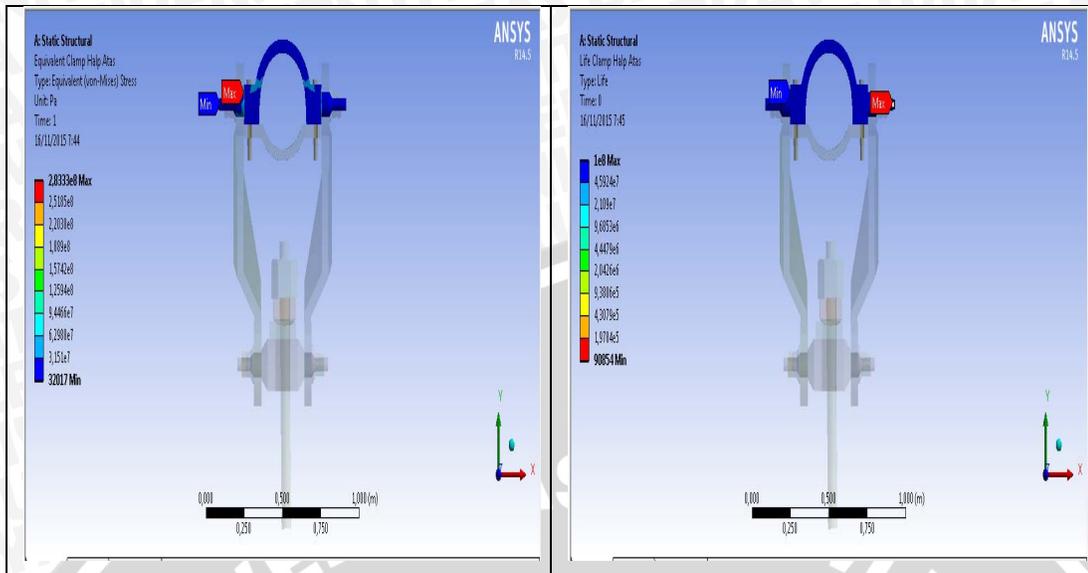
Hasil dalam kegiatan penelitian ini adalah pengumpulan bukti, data atau petunjuk yang dapat mengarahkan pada suatu analisa untuk mengetahui penyebab atau suatu perilaku yang menunjukkan suatu bentuk perubahan yang terjadi pada hanger. Data tersebut berupa gambar hasil simulasi., maupun informasi lain yang dapat memberikan keterangan yang lebih jelas, yang mana data atau informasi tersebut berkaitan dengan penelitian ini.

Dari hasil didapatkan nilai-nilai parameter mengenai kondisi yang terjadi ketika *hanger* mendapatkan pembebanan ketika keadaan normal dan ketika kondisi perbaikan berupa pengendoran baut yang menyebabkan konsentrasi tegangan.

4.2.1 Hasil Simulasi Pada *Clamp Halp*

Hasil simulasi pembebanan pada *Clamp Halp* pada kondisi normal (56.670kg) dan kondisi pembebanan (86.430 kg) dapat dilihat pada gambar 4.1 :





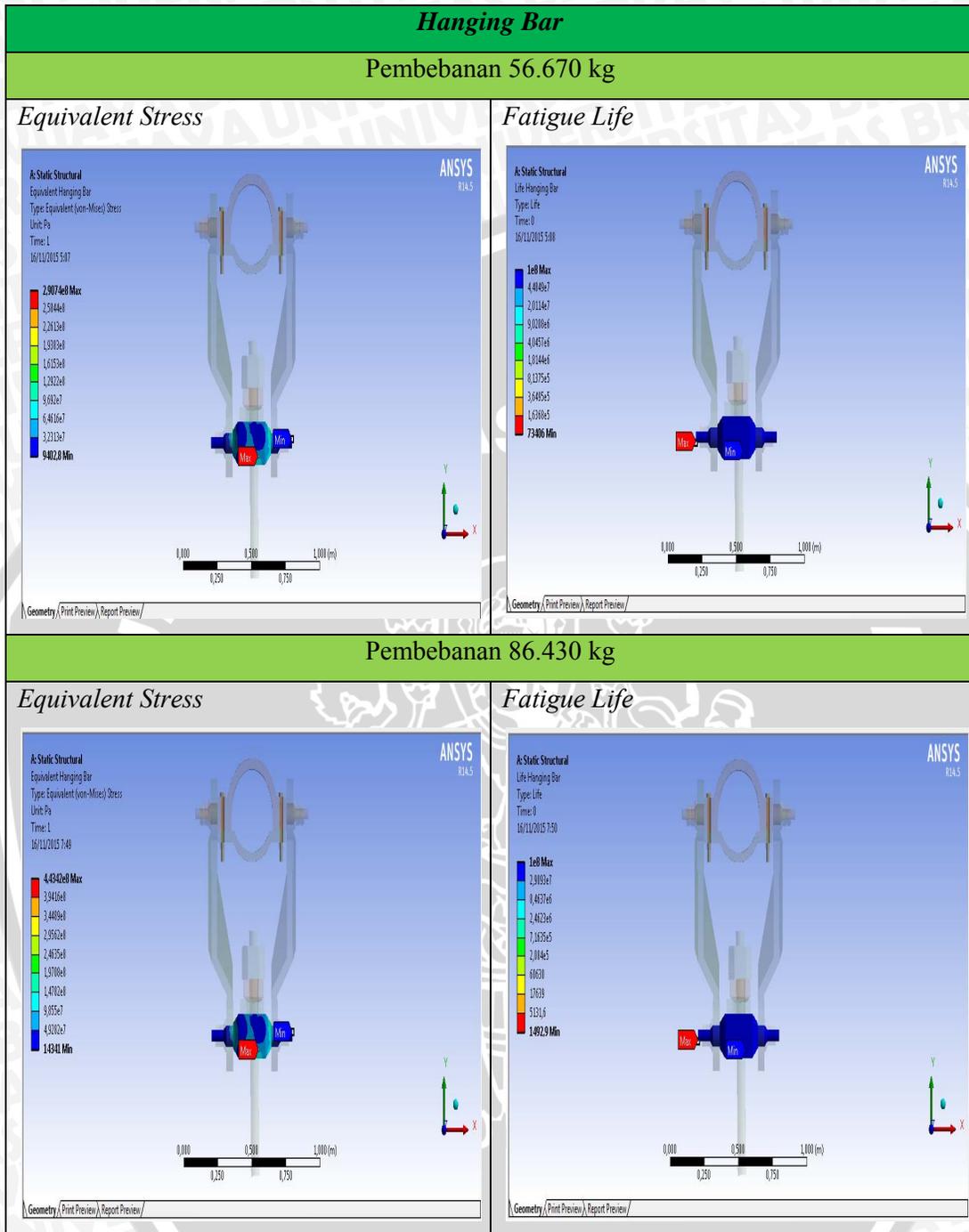
Gambar 4.1 *Equivalent Stress* dan dan *Fatigue Life* pada *Clamp Halp*

Equivalent stress yang terjadi pada *Clamp Halp* akibat beban yang diterima sebelum dan sesudah perbaikan dapat dilihat pada gambar 4.1. Tegangan yang terjadi bervariasi mulai dari tegangan tertinggi dan terendah dapat diketahui perkiraan besarnya berdasarkan warna yang tertera pada keterangan di bagian kiri gambar. Dengan tegangan paling tinggi 185,77 MPa dan tegangan paling rendah 20,93 MPa untuk kondisi pembebanan normal dan tegangan paling tinggi 283,33 MPa dan tegangan paling rendah 32 MPa untuk kondisi pembebanan saat perbaikan.

Fatigue life yang terjadi pada *Clamp Halp* akibat beban yang diterima sebelum dan sesudah perbaikan dapat dilihat pada gambar 4.1. *Fatigue life* yang terjadi bervariasi mulai dari *fatigue life* tertinggi dan terendah dapat diketahui perkiraan besarnya berdasarkan warna yang tertera pada keterangan di bagian kiri gambar. Dengan *fatigue life* paling tinggi 10^8 siklus untuk kondisi pembebanan normal dan *fatigue life* tinggi 10^8 siklus dan *fatigue life* paling rendah 90854 siklus untuk kondisi pembebanan saat perbaikan

4.2.2 Hasil Simulasi Pada *Hanging Bar*

Hasil simulasi pembebanan pada *Hanging Bar* pada kondisi normal (56.670kg) dan kondisi pembebanan (86.430 kg) dapat dilihat pada gambar 4.2 :



Gambar 4.2 Equivalent Stress dan dan Fatigue Life pada Hanging Bar

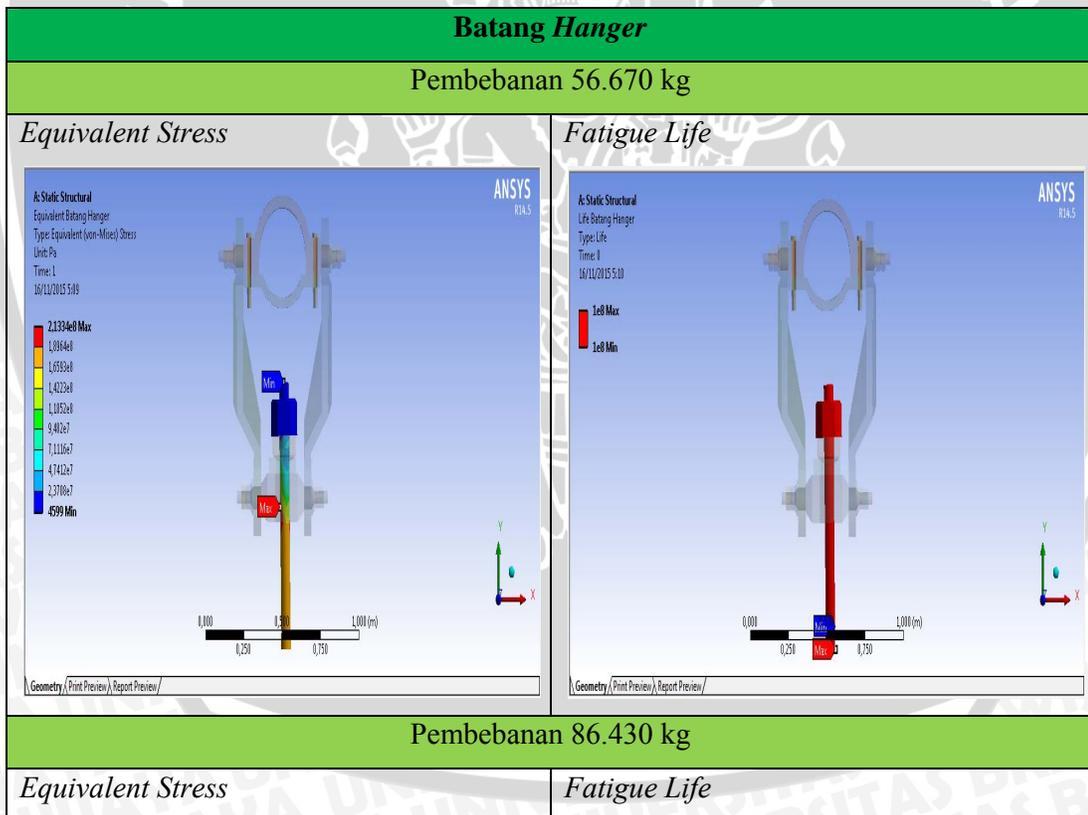
Equivalent stress yang terjadi pada Hanging Bar akibat beban yang diterima sebelum dan sesudah perbaikan dapat dilihat pada gambar 4.2. Tegangan yang terjadi bervariasi mulai dari tegangan tertinggi dan terendah dapat diketahui perkiraan besarnya berdasarkan warna yang tertera pada keterangan di bagian kiri gambar. Dengan tegangan paling tinggi 290,7 MPa dan tegangan paling rendah 94,8 MPa untuk kondisi

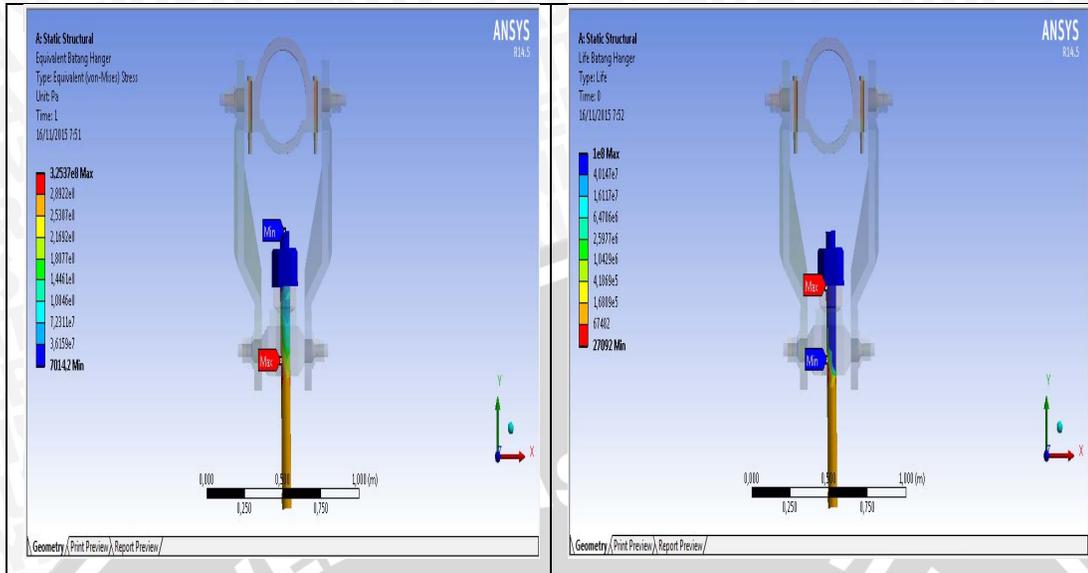
pembebanan normal dan tegangan paling tinggi 443,42 MPa dan tegangan paling rendah 143,41 MPa untuk kondisi pembebanan saat perbaikan.

Fatigue life yang terjadi pada *Hanging Bar* akibat beban yang diterima sebelum dan sesudah perbaikan dapat dilihat pada gambar 4.2. *Fatigue life* yang terjadi bervariasi mulai dari *fatigue life* tertinggi dan terendah dapat diketahui perkiraan besarnya berdasarkan warna yang tertera pada keterangan di bagian kiri gambar. Dengan *fatigue life* paling tinggi 10^8 siklus dan *fatigue life* paling rendah 73486 siklus untuk kondisi pembebanan normal dan *fatigue life* tinggi 10^8 siklus dan *fatigue life* paling rendah 1482,9 siklus untuk kondisi pembebanan saat perbaikan

4.2.3 Hasil Simulasi Pada Batang Hanger

Hasil simulasi pembebanan pada Batang *Hanger* pada kondisi normal (56.670kg) dan kondisi pembebanan (86.430 kg) dapat dilihat dilihat pada gambar 4.3 :





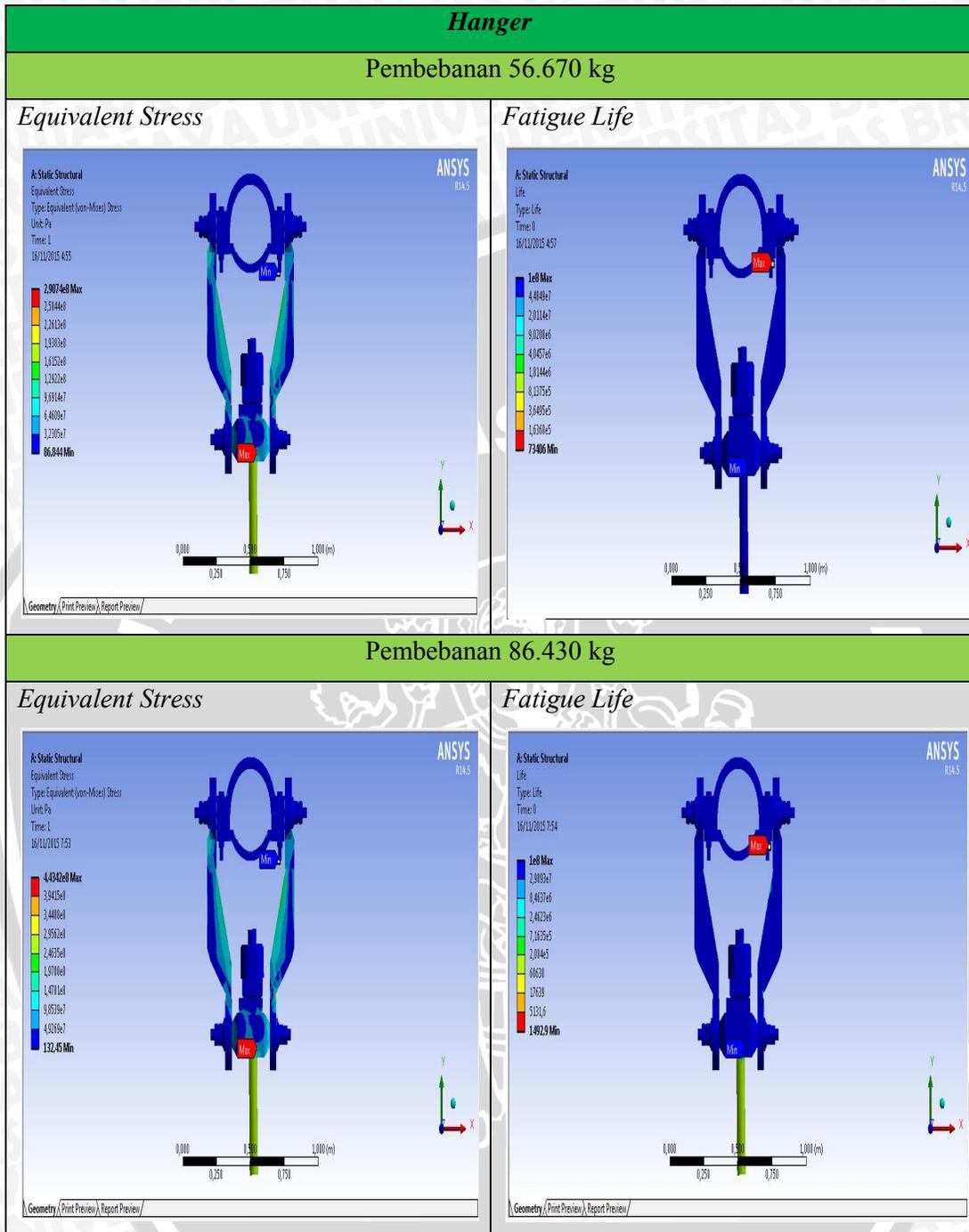
Gambar 4.3 *Equivalent Stress* dan dan *Fatigue Life* pada Batang Hanger

Equivalent stress yang terjadi pada Batang Hanger akibat beban yang diterima sebelum dan sesudah perbaikan dapat dilihat pada gambar 4.3. Tegangan yang terjadi bervariasi mulai dari tegangan tertinggi dan terendah dapat diketahui perkiraan besarnya berdasarkan warna yang tertera pada keterangan di bagian kiri gambar. Dengan tegangan paling tinggi 213,3 MPa dan tegangan paling rendah 4599 MPa untuk kondisi pembebanan normal dan tegangan paling tinggi 325,37 MPa dan tegangan paling rendah 7014,2 MPa untuk kondisi pembebanan saat perbaikan.

Fatigue life yang terjadi pada Batang Hanger akibat beban yang diterima sebelum dan sesudah perbaikan dapat dilihat pada gambar 4.3. *Fatigue life* yang terjadi bervariasi mulai dari *fatigue life* tertinggi dan terendah dapat diketahui perkiraan besarnya berdasarkan warna yang tertera pada keterangan di bagian kiri gambar. Dengan *fatigue life* paling tinggi 10^8 siklus untuk kondisi pembebanan normal dan *fatigue life* tinggi 10^8 siklus dan *fatigue life* paling rendah 27092 siklus untuk kondisi pembebanan saat perbaikan

4.2.4 Hasil Simulasi Pada Hanger

Hasil simulasi pembebanan pada hanger pada kondisi normal (56.670kg) dan kondisi pembebanan (86.430 kg) dapat dilihat dilihat pada gambar 4.4:

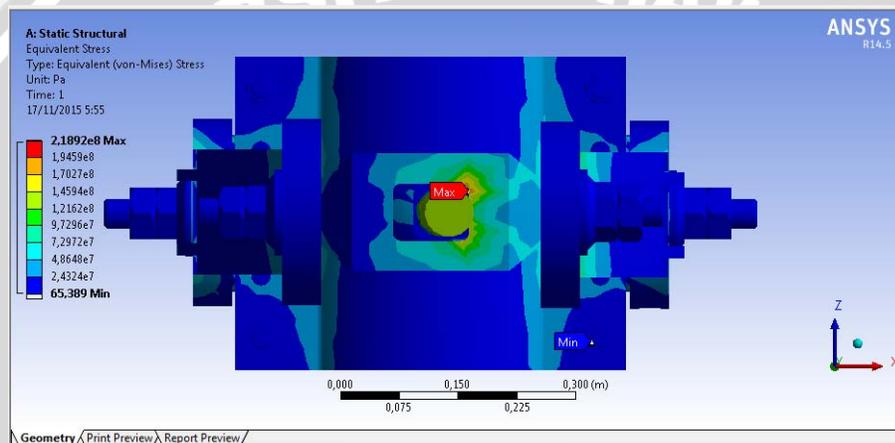


Gambar 4.4 Equivalent Stress dan dan Fatigue Life pada hanger

Equivalent stress yang terjadi pada hanger akibat beban yang diterima sebelum dan sesudah perbaikan dapat dilihat pada gambar 4.4. Tegangan yang terjadi bervariasi mulai dari tegangan tertinggi dan terendah dapat diketahui perkiraan besarnya berdasarkan warna yang tertera pada keterangan di bagian kiri gambar. Dengan tegangan paling tinggi 290,7MPa dan tegangan paling rendah 86MPa untuk kondisi pembebanan

normal dan tegangan paling tinggi 443,2MPa dan tegangan paling rendah 132,45MPa untuk kondisi pembebanan saat perbaikan.

Fatigue life yang terjadi pada *hanger* akibat beban yang diterima sebelum dan sesudah perbaikan dapat dilihat pada gambar 4.4. *Fatigue life* yang terjadi bervariasi mulai dari *fatigue life* tertinggi dan terendah dapat diketahui perkiraan besarnya berdasarkan warna yang tertera pada keterangan di bagian kiri gambar. Dengan *fatigue life* paling tinggi 10^8 siklus dan *fatigue life* paling rendah 73406 siklus untuk kondisi pembebanan normal dan *fatigue life* tinggi 10^8 siklus dan *fatigue life* paling rendah 1492 siklus untuk kondisi pembebanan saat perbaikan.



Gambar 4.5 Komponen yang memperoleh tegangan paling besar

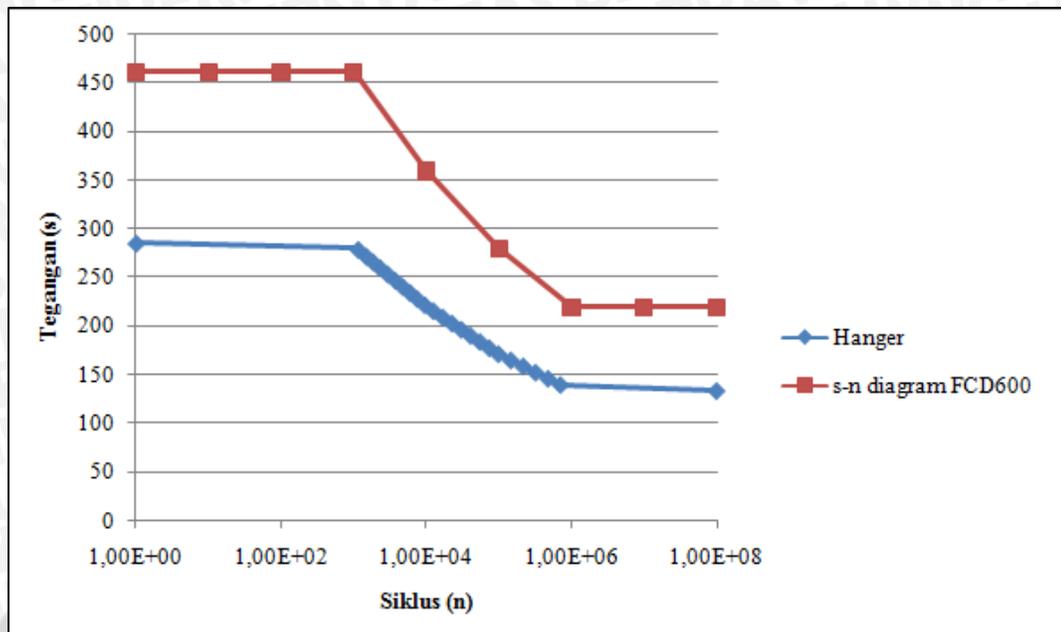
4.3 *s-n curve*

Data hasil simulasi pada *hanger* dapat dilihat pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil simulasi *Equivalent Stress (Von Misses)* MPa dan *Life (n)*

<i>Hanger</i>			
Pembebanan (N)	Tegangan (MPa)	<i>Equivalent Stress (Von Misses)</i> MPa	<i>Life (n)</i>
418166	134,214044	218,92	100000000
437766	140,504836	229,18	703170
457366	146,795628	239,44	474300
476966	153,08642	249,7	319920
496566	159,377212	259,96	215780
516166	165,668003	270,22	145550
535766	171,958795	280,48	98627
555366	178,249587	290,74	73406
574966	184,540379	301	54635
594566	190,831171	311,26	40664
614166	197,121963	321,52	30266
633766	203,412755	331,78	22526
653366	209,703546	342,05	16766
672966	215,994338	352,31	12479
692566	222,28513	362,57	9431
712166	228,575922	372,83	7464
731766	234,866714	383,09	5907
751366	241,157506	393,35	4675
770966	247,448298	403,61	3700
790566	253,739089	413,87	2928
810166	260,029881	424,13	2317
829766	266,320673	434,39	1834
847014	271,85657	443,42	1492
868966	278,902257	454,92	1148
888566	285,193049	465,18	0

Karena salah satu komponen dari hanger memiliki konsentrasi tegangan yang lebih besar dari yang lain maka dianggap pada daerah konsentrasi tegangan tersebut yang memiliki siklus yang paling rendah. Oleh karena itu pada gambar 4.5 merupakan daerah nilai siklus yang diploting menjadi diagram s-n dari geometri hanger.



Gambar 4.6 Grafik perbandingan antara *s-n curve hanger* dengan *s-n curve material FCD600*

4.4 Pembahasan

Ada pergeseran yang terjadi pada kurva *s-n* yang diakibatkan oleh ada peningkatan tegangan yang besar yaitu 180 MPa. Ini yang menyebabkan terjadinya pergeseran kurva *s-n*. Sudah diketahui bersama bahwa *s-n curve* material FCD600 adalah homogen disemua wilayah. Namun konsentrasi tegangan yang terjadi pada hanger bar menyebabkan meningkatnya tegangan yang terjadi.

Dilihat pada gambar 4.5 diketahui ada kontak antara batang hanger dengan *hold clamp*. Ini menyebabkan gaya tekan pada *hold clamp* menyebabkan terjadinya tegangan di area kontak. Ini menyebabkan naiknya tegangan yang menimbulkan bergesernya *s-n* diagram *hanger* yang dapat dilihat pada gambar 4.6. Ini berarti ada kesalahan dalam merancang geometri hanger. Diperlukan modifikasi untuk optimasi hanger. Namun dari gambar 4.5 diketahui akibat konsentrasi tegangan tidak menyebabkan kerusakan yang luas hanya konsentrasi kecil. Karena yang selama ini menjadi dugaan sementara runtuhnya jembatan kukar bahwa adanya kegagalan di area kontak antara pin dan clamp halp atas akibat adanya tegangan geser tidak terbukti dari hasil yang ditunjukkan oleh tabel 4.6.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Tegangan yang paling besar pada hanger bukan berada di komponen *clamp halp* atas. Melainkan pada *hold bar* pada bagian bawah *hanger*. Namun ini masih dikategorikan sebagai beban kerja yang aman. Beban kerja yang terjadi masih menyebabkan tegangan dibawah *endurance limit* dari material.

Tidak terjadi kegagalan akibat beban dinamis pada seluruh komponen hanger. Hanger masih dikatakan mampu menerima beban dinamis. Terdapat banyak faktor yang menyebabkan kegagalan pada *hanger* seperti adanya cacat porositas atau adanya cacat akibat proses pengkaratan.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan perbaikan geometri salah satu caranya dengan memperbesar diameter batang hanger atau dengan mengganti bahan batang dengan Baja cor
2. Perlu dilakukan penutupan jalan ketika sedang dilaksanakan perbaikan berkala untuk menghindari beban berlebih yang diterima *hanger* jembatan.