

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. KELAYAKAN OPERASI (*FITNESS-FOR-SERVICE*)

Fitness-for-service assessment atau penentuan kelayakan operasi merupakan pendekatan multidisiplin untuk mengevaluasi komponen struktural yang berguna untuk menentukan apakah komponen tersebut dalam keadaan baik atau tidak untuk digunakan dalam operasi. Komponen tersebut kemungkinan mengandung cacat atau sebuah kerusakan atau juga komponen tersebut bekerja pada kondisi operasi yang lebih berat dari kondisi operasi desain. Tipe hasil dari pengkajian kelayakan ini adalah keputusan jalan atau berhentinya untuk melanjutkan operasi. Evaluasi umur sisa atau jangkauan inspeksi juga dapat menjadi bagian dari pengkajian, sepanjang perbaikan dari mekanisme degradasi.

Prosedur *Fitness-for-service assessment* ini dibuat berdasarkan dan dijelaskan dengan detail pada *American Petroleum Institute Recommended Practice 579* (API RP 579). Prosedur *Fitness-For-Service assessment* pada API RP 579 tersebut disusun tiap bagian berdasarkan tipe cacat atau tipe mekanisme kerusakannya. Dalam beberapa kasus penting untuk melakukan pengkajian dengan menggunakan banyak bagian analisa jika kerusakan tidak terlihat jelas. Sebagai contoh degradasi logam pada komponen akan berhubungan dengan korosi umum, korosi local, atau korosi pitting. Jika terdapat multi kerusakan maka kelas degradasi, misalnya korosi/erosi, dapat membantu dalam evaluasi. Kelas degradasi dapat dilihat pada Gambar 2.1. Dari gambar tersebut terlihat bahwa beberapa jenis retak dan mekanisme kerusakan akan perlu dilakukan pengkajian untuk menentukan kelayakan komponen.

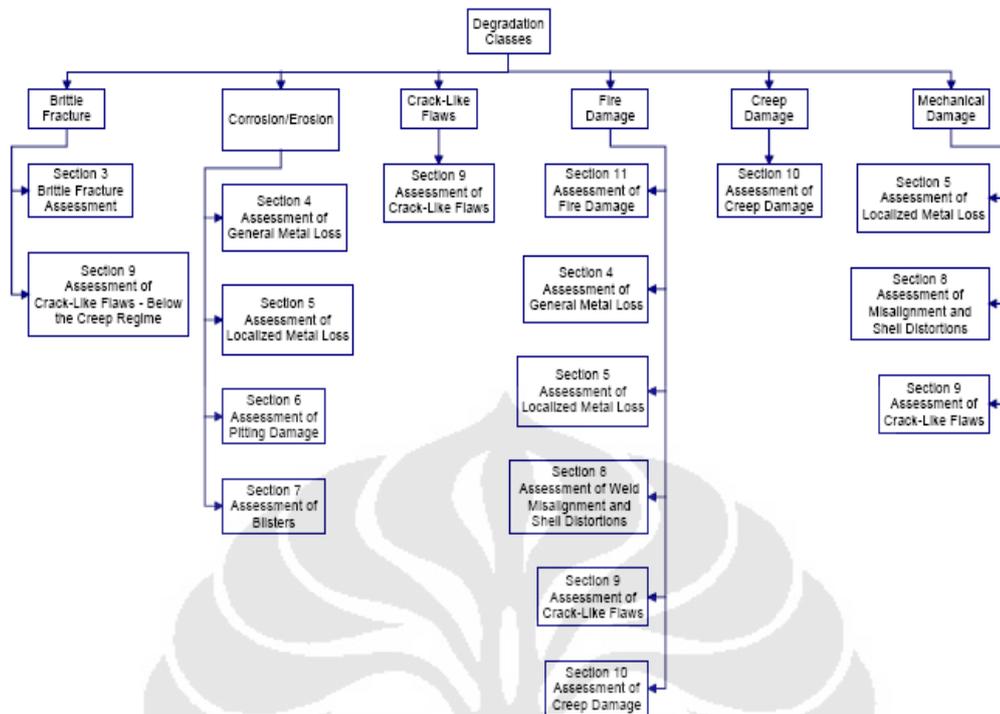
Pada pengkajian kelayakan ini terdapat 3 level prosedur pengkajian. 3 level pengkajian tersebut merupakan hal yang tidak berhubungan antara satu dengan yang lainnya. Pembagian level ini dikarenakan adanya pembagian berdasarkan tingkat kesulitan pengkajian dan penggunaan data yang akan diperoleh. Umumnya pada setiap level membutuhkan keseimbangan antara sejumlah informasi yang dibutuhkan untuk evaluasi, skill orang yang melakukan pengkajian dan kerumitan dari analisa.

Level 1 merupakan level yang paling konservatif. Pengkajian dilakukan bertahap mulai level 1 sampai dengan level 3. Jika pada setiap level, yaitu mulai dari level 1 tidak ditemukan hasil yang dapat diterima, maka akan dilanjutkan ke level selanjutnya. Misalnya, pengkajian menggunakan level 1 namun ditemukan hasil yang *unacceptable* maka pengkajian dilanjutkan ke tahap selanjutnya yaitu level 2 dan seterusnya sampai level 3 jika masih terus ditemukan hasil yang *unacceptable*. Penjelasan umum dari masing-masing level terdapat pada bagian dibawah ini^[1]:

Level 1 – Prosedur pengkajian yang termasuk didalam level ini adalah untuk memberikan penyaringan kriteria yang dapat diterima dengan melakukan inspeksi yang minimum dan menggunakan informasi tentang komponen. Pengkajian level 1 biasanya dikaji oleh operator lapangan atau personal inspeksi.

Level 2 – Prosedur pengkajian yang termasuk pada level ini bertujuan untuk memberikan evaluasi yang lebih detail yang menghasilkan hasil yang lebih presisi dari pengkajian level 1. Pada pengkajian level 2 ini, informasi inspeksi sama dengan informasi yang dibutuhkan pada level 1, namun perhitungan yang lebih detail akan digunakan pada evaluasi ini. Pengkajian level 2 biasa dilakukan oleh insinyur pabrik.

Level 3 – Prosedur pengkajian yang termasuk pada level ini adalah memberikan evaluasi yang paling detail yang akan menghasilkan hasil yang lebih presisi dari Level 2. Pada pengkajian Level 3 dibutuhkan data inspeksi dan informasi komponen yang paling detail, dan analisa yang dilakukan berdasarkan teknik numerik seperti metode *finite element*. Analisa Level 3 umumnya digunakan oleh *spesialis engineer* yang berpengalaman dan mempunyai pengetahuan yang luas terhadap *fitness for service*.



Gambar 2.1 Prosedur *fitness-for-service* berdasarkan tipe cacat atau mekanisme kerusakannya.[1]

2.2. PENENTUAN UMUR SISA (*REMAINING LIFE ASSESSMENT*)

Banyaknya jumlah plant yang telah beroperasi melebihi dari umur desainnya sekitar 30 - 40 tahun. Namun pada umumnya industri tersebut akan berusaha memaksimalkan agar plant tersebut dapat digunakan terus bahkan sampai 20 – 40 tahun selanjutnya. Banyak faktor yang menyebabkan industri melakukan hal seperti itu yaitu karena akan menghabiskan biaya yang lebih besar, akan terjadi kelebihan kapasitas, terbatasnya area untuk bangunan baru, serta meningkatnya aturan tentang keselamatan dan lingkungan.

Dari studi yang pernah ada menunjukkan bahwa biaya yang dibutuhkan untuk memperpanjang umur sekitar 20-30 % dari biaya konstruksi dari pembuatan plant baru dan rasio untung-rugi sangat tinggi^[2]. Kalimat perpanjangan umur (*life extension*) sering disalah mengerti. Tujuan dari perpanjangan umur adalah bukan untuk melanjutkan operasi dari plant diatas umur penggunaan, namun maksudnya

adalah untuk menentukan nilai maksimal dari umur penggunaan. Ide untuk menghindari penghentian plant atau komponennya yang belum pada saatnya, berada pada dasar yang disebut desain umur penggunaan, sebab umur penggunaan aktual sering lebih panjang dari umur desain sebenarnya.

Namun perpanjangan dari umur plant tersebut tidak diinginkan jika hasilnya hanya akan membuat ketidakefisienan. Banyaknya pengembangan kualitas dan desain material terhadap komponen yang kritis telah dilakukan beberapa dekade ini. Penggantian yang selektif dari komponen dengan desain yang lebih modern merupakan bagian yang juga harus dilakukan pada perpanjangan umur penggunaan.

Kunci utama dari perpanjangan umur plant adalah dari teknologi penentuan umur sisa atau yang biasa disebut *Remaining Life Assessment (RLA)*. Namun jika pada pengkajian tersebut ditemukan bahwa harus dilakukan pergantian secara meluas, maka perpanjangan umur tersebut bukan merupakan pilihan yang tepat untuk dilakukan. Selain dari itu, perpanjangan umur ini atau yang biasa disebut *life extension* dapat digunakan untuk tujuan yang lain. Salah satunya adalah untuk membantu mengatur jadwal inspeksi yang baik, prosedur perawatan, dan prosedur operasi. Data dan metode yang digunakan untuk *life extension* sama dengan apa yang dibutuhkan untuk mengoptimalkan faktor tersebut. Selain itu prosedur *start-up* dan *shutdown* untuk komponen plant dapat dioptimalkan, yang akan menghasilkan peningkatan efisiensi, kelayakan, dan umur. Dari berbagai macam keuntungan dari teknologi penentuan umur sisa, penelitian telah banyak dilakukan beberapa tahun terakhir ini^[3].

2.2.1. Umur Desain Komponen

Komponen yang dioperasikan pada temperatur rendah dibawah daerah *creep* biasanya didesain dengan dasar yield strength, kekuatan tarik, dan ketahanan fatik dengan memasukkan *safety factor* pada nilai tersebut. Karena deformasi dan retak tidak merupakan hal yang tergantung pada waktu maka dalam hal ini tidak ada nilai spesifik dari desain umur komponen. Pada dasarnya sepanjang tegangan yang ada tidak melebihi tegangan desain, maka komponen

tersebut akan tahan tanpa batas tertentu, walaupun pada praktiknya berbagai macam faktor dapat mereduksi umur sisa komponen.

Pada kasus untuk komponen temperatur tinggi yang beroperasi pada daerah *creep*, baik deformasi maupun retak merupakan variable yang tergantung pada waktu (*time-dependent*)^[3]. Oleh karena itu komponen tersebut di desain dengan memperhatikan pada target umur penggunaan yang umumnya didasarkan pada sejumlah regangan atau retak yang diizinkan pada 100.000 jam. Faktor lebih lanjut dari keamanan dengan diaplikasikan tegangan tertentu, yang akan mewujudkan umur penggunaan yang diharapkan yaitu sekitar menjadi 30-40 tahun. Banyak faktor metalurgi dan faktor operasi yang dapat memperpanjang umur aktual dari komponen diluar umur desain. Namun akan lain hal jika faktor tersebut berlawanan, maka umur aktual akan berkurang. Beberapa dari banyak faktor baik dan tidak baik membuat keseimbangan antara umur desain dan umur actual^[3].

2.3. BEJANA TEKAN (*PRESSURE VESSEL*)

Pressure vessel merupakan bejana yang di desain untuk menahan tekanan dari dalam maupun dari luar. Pressure vessel di buat berdasarkan ASME *Boiler dan Pressure Vessel Section VII*. Bejana jenis ini merupakan benda yang bekerja pada tekanan operasi internal maupun eksternal sebesar 15 lbf/in² (103 KPa)^[4].

Tekanan eksternal pada bejana dapat disebabkan oleh vakum internal atau karena tekanan bangunan antara pelindung bagian luar dengan dinding bejana. Kolom, tower, drum, reaktor, *heat exchanger*, kondenser, pendingin udara, *sphere*, dan akumulator merupakan tipe pressure vessel yang umum pada industri.

Pressure vessel di buat dalam berbagai macam bentuk yaitu dalam bentuk silinder, spheroid, atau kotak. Yang termasuk bejana silinder adalah seperti *exchanger* dan *condenser*. Dapat dibuat vertical maupun horizontal dan akan didukung dengan tiang baja atau plat bola. Bejana bola biasanya didukung dengan tiang baja diperkokoh dengan dikaitkan pada penyangga. Dan bejana bola sebagian atau sepenuhnya biasanya diperkokoh dengan disandarkan pada tanah^[4].

2.3.1. Kegunaan Pressure Vessel

Pressure vessel digunakan pada sebagian besar proses pada industri pemurnian dan petrokimia. Pressure vessel tersebut digunakan untuk aliran proses, yang secara umum biasanya digunakan sebagai^[4]:

- reaktor katalis untuk mengandung muatan kimia yang diperlukan proses
- fraksinasi untuk memisahkan bermacam unsur yang dihasilkan reaksi
- pemisah untuk memisahkan gas, zat kimia, atau katalis untuk produk
- unit pemroses zat kimia
- regenerator untuk membalikkan katalis menjadi sifat awal
- *exchanger*, condenser, pendingin, dan berbagai macam tujuan yang lainnya.

2.3.2. Metode dan Material Konstruksi

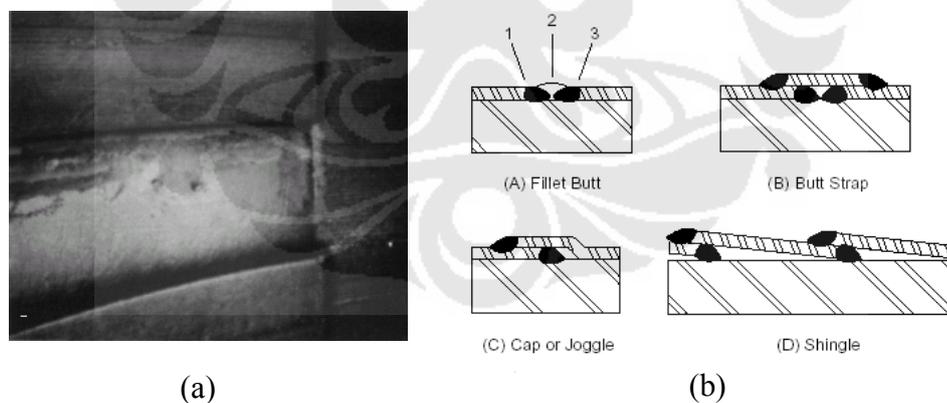
Sebelum adanya pengembangan dari pengelasan, pengelingan/pemakuan merupakan metoda konstruksi yang paling umum. Pada penyambungan harus dilakukan pendempulan agar tidak terjadi kebocoran, namun pada temperatur tinggi sulit membuat dempul tersebut untuk tetap kuat. Walaupun beberapa vessel jenis ini masih di temukan pada *refiner* tua, namun metoda konstruksi seperti ini sekarang sudah jarang digunakan.

Saat ini beberapa metoda yang berbeda digunakan untuk mengkonstruksi pressure vessel. Kebanyakan pressure vessel dibuat dengan cara penggabungan dengan pengelasan. Sedangkan cincin shell biasa dibuat dengan menggunakan merolling plate baik pada temperatur tinggi maupun rendah. Silinder dibuat dengan mengelas plate yang telah dirolling pada bagian ujungnya disambungkan satu sama lain. Selain itu hot forging juga merupakan metoda lain untuk membuat silinder vessel. Sedangkan vessel yang lain biasanya menggabungkan metoda hot forging dengan tekanan tinggi, dengan vessel yang tebal^[4].

Baja karbon merupakan material yang paling umum digunakan untuk membuat pressure vessel. Untuk tujuan tertentu paduan austenit dan feritik, alloy 400, nikel, titanium, paduan nikel tinggi, ataupun aluminium sering digunakan. Sedangkan tembaga dan paduannya jarang digunakan pada vessel pemurnian (*refining*), namun dapat ditemukan pada jenis vessel pada industri petrokimia.

Material yang dipilih untuk mengkontruksi bagian pada *exchanger* dipilih untuk dapat tetap aman pada penggunaan dan pembebanan kondisi panas. Selain itu material murah yang tahan terhadap korosi juga menjadi pilihan yang sering diinginkan.

Jika baja karbon tidak tahan terhadap korosi atau erosi atau menghasilkan kontaminasi terhadap produk, vessel biasanya dilapisi dengan logam atau non-logam yang lain. Bejana (*vessel*) yang dilapisi biasanya lebih ekonomis dari membangun dengan material baru yang tahan terhadap kondisi diatas. Namun ketika *pressure vessel* akan dioperasikan pada temperatur tinggi, tekanan tinggi, ataupun keduanya, baja paduan solid dapat menjadi pilihan utama dan ekonomis. Lapisan logam dapat dipasang dengan menggunakan berbagai macam cara yaitu dapat digabungkan dengan material plate yang diroll ataupun *explosion bonded* sebelum *vessel* di fabrikasi. Logam tahan korosi dapat juga digunakan pada permukaan *vessel* dengan proses pemasangannya yang berbagai macam. Lapisan logam tersebut dapat dibuat dari paduan feritik, alloy 300, nikel, timah, atau berbagai macam logam yang tahan terhadap korosi. Berikut adalah gambar 2.2 a dan 2.2 b yang menunjukkan berbagai macam metode dari aplikasi lapisan logam



Gambar 2.2 (a) Permukaan logam las (b) Prinsip pelapisan kepingan^[4]

Lapisan non-logam dapat digunakan sebagai lapisan tahan korosi dan erosi untuk menginsulasi dan mereduksi temperatur pada dinding dari *pressure vessel*. Lapisan non-logam yang paling sering digunakan antara lain beton bertulang, batu asam, material refraktori, material insulasi, batu karbon, karet, kaca, dan plastik.

2.3.3. Inspeksi pada Bejana Tekan

Alasan dasar untuk dilakukannya inspeksi adalah untuk menentukan kondisi fisik dari vessel dan menentukan tipe, laju, dan sebab dari penyusutan fungsi benda. Informasi ini harus didokumentasikan secara baik pada setiap dilakukannya inspeksi. Dengan data tersebut keselamatan dapat terjaga, periode operasi dengan tanpa dilakukan shutdown dapat diperpanjang, laju dari penyusutan dapat dikurangi, perbaikan dan pergantian dapat ditentukan.

Faktor keselamatan juga merupakan salah satu alasan untuk dilakukan inspeksi. Jadwal inspeksi berperiodik dapat menunjukkan kondisi yang sebenarnya yang akan timbul jika terjadi atau yang menyebabkan terjadinya keadaan darurat atau *shutdown* yang tidak terjadwal karena ada gangguan, atau bahkan terjadi kegagalan pada vessel.

Inspeksi periodik dapat mengarahkan kita pada program perencanaan perawatan yang baik. Laju korosi dan korosi sisa yang diizinkan ditentukan oleh inspeksi yang merupakan dasar yang digunakan untuk memprediksi kebutuhan untuk pergantian atau perbaikan. Prediksi ini dibutuhkan untuk perawatan terencana dan operasi yang berkelanjutan serta membantu untuk menentukan keselamatan dan kelayakan plant.

Inspeksi eksternal dilakukan dengan menggunakan instrumen ultrasonik atau radiografi atau peralatan *non-destructive test* yang lainnya yang akan memberikan kita informasi tanpa membutuhkan perlu merusak komponen yang ingin diketahui kondisinya. Cacat seperti bocor, retak, pemasangan yang kurang baik, getaran dan suara tak wajar, dan tanda-tanda lain yang menunjukkan kegagalan pemakaian akan ditemukan dengan menggunakan peralatan ini. Jika gejala ini segera dianalisa dan diambil langkah yang benar, maka umur kelayakan dari operasi akan bertambah.

Sebelum dilakukan inspeksi pada *pressure vessel*, khususnya pada kondisi operasi yang berat, inspektur harus menentukan tekanan, temperatur, dan kondisi kerja *vessel* dengan menggunakan data inspeksi terakhir. Inspektur harus hati-hati terhadap detail konstruksi peralatan termasuk material konstruksi, alat pelengkap internal, dan detail lasan. Inspektur tersebut juga harus memperhatikan operasi untuk menentukan kondisi operasi yang abnormal atau gangguan seperti

temperatur dan tekanan yang berlebihan. Data ini akan menjadi petunjuk yang berguna untuk menentukan tipe dan lokasi korosi dan kerusakan yang lain, seperti *scaling*, *bulging*, dan *warping*.

Inspeksi visual harus dilakukan hati-hati dan teliti untuk menentukan jenis inspeksi yang lain yang perlu dilakukan. Persiapan permukaan penting untuk semua jenis inspeksi yang lainnya. Jika bagian eksternal ataupun internal dibungkus dengan insulasi, lapisan refraktori, atau lapisan tahan korosi dalam keadaan baik tanpa adanya bukti yang menunjukkan kondisi yang tidak aman, hal tersebut tidak perlu dilakukan pemindahan benda tersebut untuk dilakukan inspeksi. Namun terkadang dilakukan pemindahan sebagian pada pelapis tersebut untuk melihat logam bagian dalamnya, khususnya jika pada inspeksi sebelumnya menunjukkan gejala korosi. Jika ditemukan ketidaksempurnaan pada pelapis tersebut, maka pelapis pada daerah sekitar cacat harus dipindahkan untuk mencari logam yang mengalami deterioration atau pembusukan.

2.3.4. Penyebab Kerusakan

Kerusakan dapat terjadi pada permukaan vessel yang berhubungan langsung dengan berbagai macam jenis kandungan organik dan inorganik, kontaminan, air, uap air, maupun atmosfer. Bentuk dari penyusutan sifat dapat terjadi secara elektrokimia, kimia, mekanik, ataupun kombinasi dari tiga hal tersebut. Penyusutan sifat dapat dipercepat dengan faktor temperatur, tekanan, tumbukan, getaran, atau aliran kecepatan tinggi. Namun secara khusus *pressure vessel* dapat terjadi kerusakan, karena disebabkan oleh penyebab-penyebab sebagai berikut ini:

a) Mekanisme Korosi

Korosi merupakan penyebab utama terjadinya pembusukan pada *vessel* dan dapat terjadi pada berbagai macam bagian pada bejana. Pembusukan ini dipengaruhi oleh ketahanan korosi dari material konstruksi. Banyak kontaminasi dari minyak dan zat kimia yang berada pada unit proses dan kemudian bereaksi dengan logam akan menghasilkan korosi.

Adanya kondisi aliran juga dapat menyebabkan terjadinya degradasi, baik erosi maupun korosi. Secara umum pengurangan logam akan membutuhkan

waktu. Pencatatan rutin terhadap berkurangnya logam merupakan hal yang sangat penting, karena dari catatan itu masa inspeksi yang baik dan umur yang diharapkan dari peralatan dapat ditentukan. Akan tetapi berkurangnya logam tidak selalu bersifat konstan, karena adanya banyak faktor yang mempengaruhi antara lain kandungan garam, sulfur, zat kimia, basa, asam anorganik, asam organik, air yang digunakan pada refiner dan temperatur operasi serta tekanan. Gambar 2.3 menunjukkan *stress corrosion cracking* yang disebabkan oleh basa.



Gambar 2.3 Stress Corrosion Cracking^[4]

b) *Perubahan Secara Metalurgi dan Fisik*

Logam pada *pressure vessel* akan terarahkan pada kondisi operasi yang akan menyebabkan perubahan secara mikrostruktur ataupun metalurgi. Perubahan ini akan menyebabkan efek pada sifat mekanik dari logam dan juga merupakan faktor yang menyebabkan retak atau kerusakan yang lainnya. Perubahan mikrostruktur dihasilkan dari proses pemanasan dan pendinginan yang kurang sempurna pada logam atau perubahan kimia metalurgi dari logam. Contoh dari perubahan tersebut antara lain grafitisasi, *hydrogen-attack* temperatur tinggi, pengendapan karbida, korosi intergranular, dan penggetasan.

c) *Kesalahan Material*

Banyak masalah yang berkembang pada *pressure vessel*, namun jika diurut penyebabnya ternyata yang sering terjadi adalah karena kesalahan dalam material dan fabrikasi. Beberapa masalah dari kesalahan material atau fabrikasi antara lain adalah seperti retak, bocor, atau tersumbat.

Material yang digunakan untuk mengkonstruksi bejana dapat mengandung laminasi. Setelah bejana bekerja, laminasi akan terbuka menjadi retak permukaan atau pengelupasan internal.

Pengecoran juga biasanya mengandung cacat yang tidak terlihat pada permukaan. Setelah terjadinya korosi, cacat tersebut dapat membantu terjadinya kebocoran. Jika bocor tersebut cukup besar maka akan menyebabkan terjadinya kegagalan.

d) *Kesalahan Fabrikasi*

Kesalahan fabrikasi adalah seperti pengelasan yang buruk, perlakuan panas yang kurang baik, fabrikasi dengan dimensi diluar toleransi yang diizinkan oleh ASME, instalasi/pemasangan yang kurang baik dari peralatan internal, dan material yang kurang sesuai.

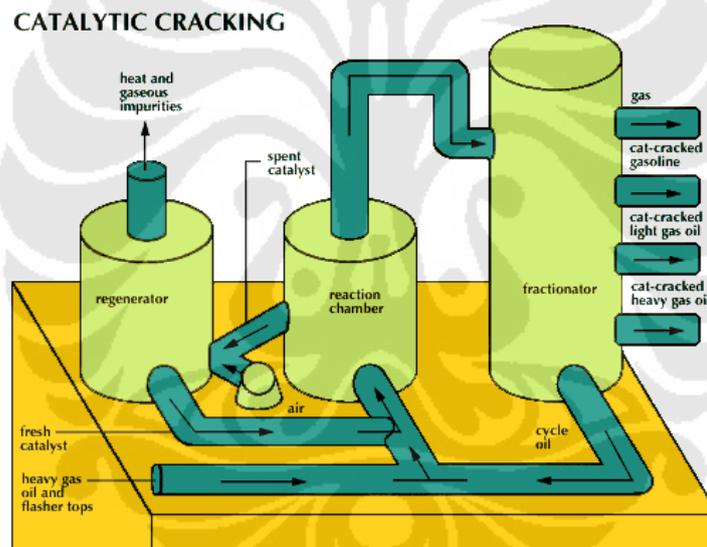
Pengelasan yang buruk akan dapat menghasilkan penetrasi logam yang kurang sempurna, kurang melebur, *undercutting*, inklusi *slag* pada lasan, dan perkembangan poros pada lasan. Kondisi tersebut merupakan faktor yang akan menyebabkan retak atau kegagalan.

Perlakuan panas yang kurang baik akan meninggalkan *residual stress* yang tinggi didekat lasan dan akan mempengaruhi sifat fisik dan ketahanan korosi dari logam. Hal tersebut akan menghasilkan retak ketika adanya beban kejut pada material keras. Pada kondisi korosif, *residual stress* yang tinggi akan menyebabkan terjadinya *stress corrosion cracking (scc)*. Material yang dipanaskan diatas temperatur perlakuan panas yang seharusnya atau dipanaskan terlalu lama pada temperatur tinggi biasanya juga akan merusak sifat fisik dari material tersebut.

Fabrikasi yang buruk dapat menyebabkan toleransi diluar yang diizinkan oleh kode ASME, yang akan mengarahkan material tersebut pada terjadinya *stress concentration* dan akan menyebabkan kegagalan. Pemasangan / instalasi peralatan yang kurang baik menyebabkan ketidakefisienan operasi, tersumbatnya lintasan, dan pemindahan dari peralatan internal. Dan kesalahan penggunaan material juga dapat menyebabkan kegagalan yang disebabkan korosi yang berlebihan.

2.4. FLUID CATALYTIC CRACKING

Pada *Fluid Catalytic Cracking* (FCC) merupakan tempat dimana dilakukan proses pemutusan rantai karbon pada minyak mentah dengan menggunakan katalis pembagi (*fluid cracker*) yang sempurna yang dijaga pada bagian aerasi dengan uap dengan minyak. *Fluid cracker* tersebut terdapat pada bagian katalis dan bagian fraksinasi yang digunakan bersamaan dalam unit proses pada tempat yang sama. Pada bagian katalis terdapat reaktor dan regenerator, dengan pipa hidran dan riser membentuk unit sirkulasi katalis. Cairan katalis secara berkelanjutan bersirkulasi antara reaktor dan regenerator menggunakan udara, uap minyak, dan uap air sebagai media transportasinya. Skema dari FCC dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Skematis Komponen Fluid Catalytic Cracking Unit^[5]

Pada FCC terdapat proses pencampuran hidrokarbon dengan panas, katalis yang telah diperbaharui ketika masuk kedalam riser menuju reaktor. Muatan dikombinasikan dengan aliran *recycle* dalam riser, diuapkan dan dinaikkan menjadi temperatur reaktor ($900^{\circ} - 1000^{\circ}$ F) dengan katalis panas. Sebagai campuran melewati riser, muatan diputus pada tekanan 10-30 psi. Pada unit FCC modern, semua pemutusan ikatan dilakukan pada riser. "Reaktor" bukan lagi berfungsi sebagai *reactor*, namun sebagai *holding vessel* untuk *cyclone*. Pemutusan berlanjut sampai uap minyak (*oil*) terpisah dari katalis pada *reactor*

cyclone. Produk hasil lalu diarahkan menuju kolom fraksinasi dimana hasil tersebut akan dipisahkan menjadi fraksi dan beberapa minyak berat yang akan di daur ulang menuju riser.

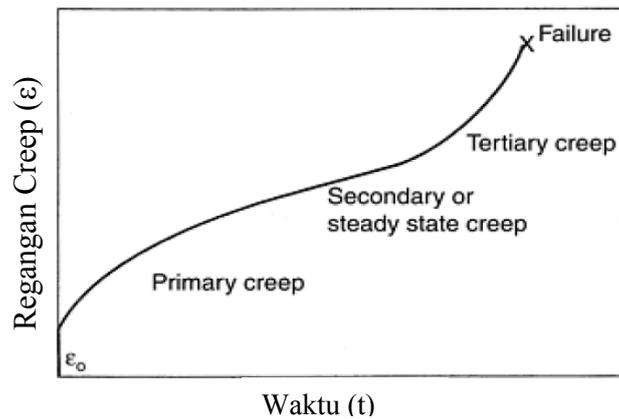
Katalis bekas selanjutnya akan diperbaharui untuk dibersihkan dari arang yang terambil dari katalis selama proses. Aliran katalis bekas tersebut melewati pemanas katalis menuju regenerator, dimana hampir semua deposit arang dibakar pada bagian bawah dimana air yang dipanaskan dan katalis bekas dicampur. Katalis baru ditambahkan dan katalis bekas dipindahkan untuk mengoptimalkan proses pemutusan (*cracking*).

2.5. CREEP

Creep merupakan istilah yang digunakan untuk mendeskripsikan kecenderungan suatu logam untuk secara perlahan bergerak atau berdeformasi secara permanen yang sebenarnya tujuannya adalah menghilangkan tegangan. Hal tersebut terjadi sebagai hasil dari adanya tegangan pada waktu yang lama dimana berada pada kondisi dibawah yield strength dari material. Creep akan lebih mudah terjadi pada material yang dikenakan pengaruh panas pada waktu yang lama dan dekat dengan temperature leburnya. Umumnya pada logam, temperatur yang memungkinkan untuk terjadinya creep adalah sekitar 40% dari temperatur leburnya ($0.4 T_m$).

2.5.1. Tahapan Creep

Proses creep terdiri dari 3 tahap. Pada tahap awal yang lebih dikenal dengan *primary creep*, laju regangan relatif tinggi, namun peningkatan laju regangannya rendah. Laju regangan secepatnya mencapai minimum dan mendekati konstan. Pada tahap selanjutnya dikenal dengan *secondary* atau *steady-state creep*. Tahap ini adalah tahap yang paling mudah dimengerti. Karakterisasi laju regangan creep biasanya adalah hasil dari pengukuran dari tahap ini. Sedangkan tahap yang terakhir adalah *tertiary creep* dengan laju regangan yang secara eksponensial akan meningkat dengan regangan. Untuk lebih jelasnya kurva creep dapat dilihat pada Gambar 2.5.



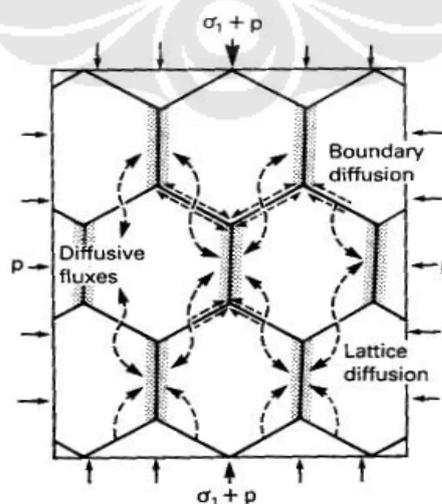
Gambar 2.5 Kurva creep yang menunjukkan tahapan terjadinya creep^[6]

2.5.2. Mekanisme Creep

Secara umum creep dapat di golongan menjadi 2 jenis yaitu *Dislocation Creep* dan *Diffusion Creep*^[6]. Untuk lebih jelasnya akan dijelaskan sebagai berikut.

a) *Creep Diffusion*

Creep diffusion dibagi menjadi 2 yaitu *Nabarro dan Herring Creep* dan *Coble Creep*^[7]. Creep difusi jenis pertama adalah *Nabarro-Herring creep*. Pada creep N-H atom berdifusi melewati kisi yang menyebabkan butir memanjang sepanjang tegangan axis. Untuk creep N-H ini merupakan jenis creep dengan tegangan yang rendah dan mempunyai besar butir yang rendah. Selain itu creep jenis ini merupakan creep yang tergantung dengan temperatur.

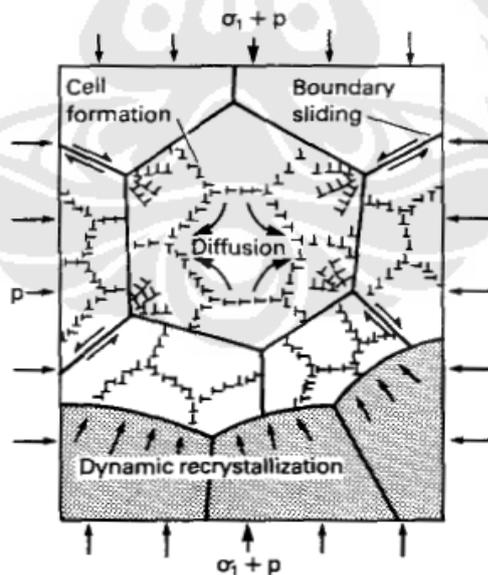


Gambar 2.6 Mekanisme Diffusion Creep^[8]

Selanjutnya creep difusi jenis kedua adalah *Coble Creep*. Pada creep jenis ini atom berdifusi sepanjang batas butir untuk memperpanjang butir pada sepanjang sumbu tegangan^[7] (Lihat gambar 2.6). Hal ini menyebabkan *coble creep* mempunyai ketergantungan yang lebih terhadap besar butir daripada N-H creep. Untuk Coble Creep ini terjadi pada temperatur yang lebih rendah daripada N-H creep. Coble creep merupakan creep yang juga tergantung pada temperatur, sebagaimana meningkatnya temperatur maka meningkat pula difusi batas butirnya. Namun creep jenis ini ketergantungan pada temperaturnya tidak sekuat creep Nabarro-Herring

b) *Creep Dislokasi*

Pada tegangan tinggi (relatif terhadap modulus geser), creep dikontrol dengan pergerakan dislokasi. Ketika tegangan diaplikasikan pada material, deformasi plastik terjadi pada pergerakan dislokasi pada bidang geser. Material biasanya mengandung berbagai jenis cacat, sebagai contoh adanya atom yang terlarut, dapat bertindak sebagai penghambat pada pergerakan dislokasi. Creep yang tumbuh dari hal yang seperti ini yaitu karena fenomena dari dislokasi panjat.



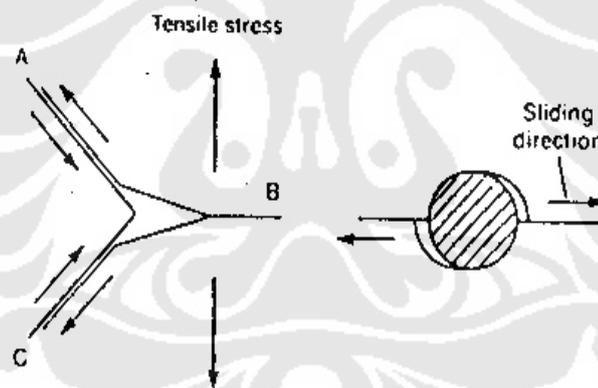
Gambar 2.7 Mekanisme Dislocation Creep^[8]

Pada temperatur tinggi *vacancy* pada kristal dapat berdifusi menuju lokasi dislokasi dan menyebabkan dislokasi pindah ke *slip plane* yang berdekatan. Dengan berpindah pada bidang geser yang bersebelahan, dislokasi akan

mendapatkan hambatan, yang akan menyebabkan terjadinya deformasi (Lihat Gambar 2.7). Karena tersebut akan membutuhkan waktu untuk *vacancy* berdifusi ke lokasi dislokasi, hal ini terjadi pada regangan yang bergantung terhadap waktu.

2.5.3. Creep Fracture

Patah Creep terjadi seperti pada tipe patahan yang lain. Dimulai dengan adanya nukleasi, dan pertumbuhan crack yang stabil, lalu diikuti dengan pertumbuhan retak yang tidak stabil dan akhirnya membawa ke arah terjadinya patah. Khusus pada patah creep, nukleasi dan pertumbuhan retak yang stabil merupakan sesuatu yang tergantung pada waktu dan terjadi dengan tegangan yang konstan. Retak yang dapat terjadi yaitu transgranular pada tegangan tinggi dan intergranular pada tegangan sedang dan rendah. Dua katagori dari retak intergranular yaitu *cavitation* dan *wedge cracking*. Nukleasi dari *cavitation* ataupun *wedge cracks* biasanya terjadi dengan sliding batas butir (Gambar 2.8).

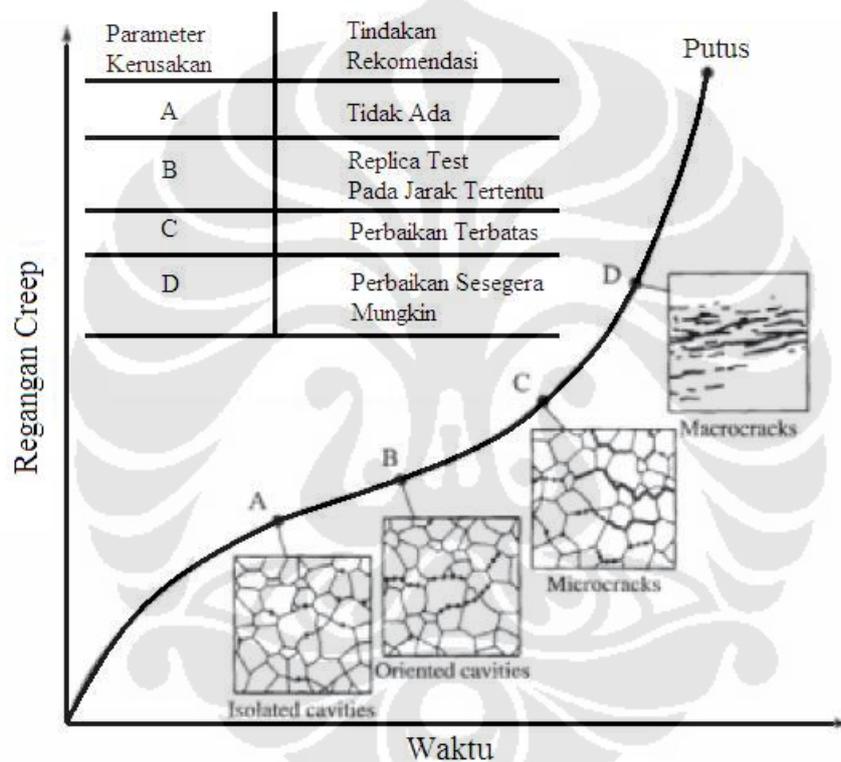


Gambar 2.8 Mekanisme retak pada batas butir: (a) retak *triple-junction* (b) void pada partikel^[3]

Sliding antar batas butir akan mengakibatkan adanya *stress concentration* pada ujung butir dan ketidakraturan sepanjang butir. Ketidakraturan tersebut yang akan berperan terjadinya nukleasi *cavity*. Hal utama yang menyebabkan *wedge crack* adalah sliding batas butir. Pada umumnya *wedge cracking* ditemukan pada tingkat tegangan yang sedang dan *cavitation* pada tegangan yang rendah. Observasi ini yang membedakan antara *stress-relief cracking* dan *in-service creep failure*.

2.5.4. Penentuan Umur Sisa Berdasarkan Klasifikasi Void

Penentuan umur sisa berdasarkan sisa umur creep pada komponen digunakan dengan melihat struktur mikro dengan metoda metalografi sehingga dapat diklasifikasikan berdasarkan void yang telah berada pada material komponen tersebut. Metoda penentuan umur sisa creep ini pertama kali dipublikasikan oleh penelitian Neuber dan Wedel^[3]. Perubahan void pada proses creep dibagi menjadi 4 tahap yaitu *isolated cavities*, *oriented cavities*, *linked cavities (microcracks)* dan *macrocracks*.



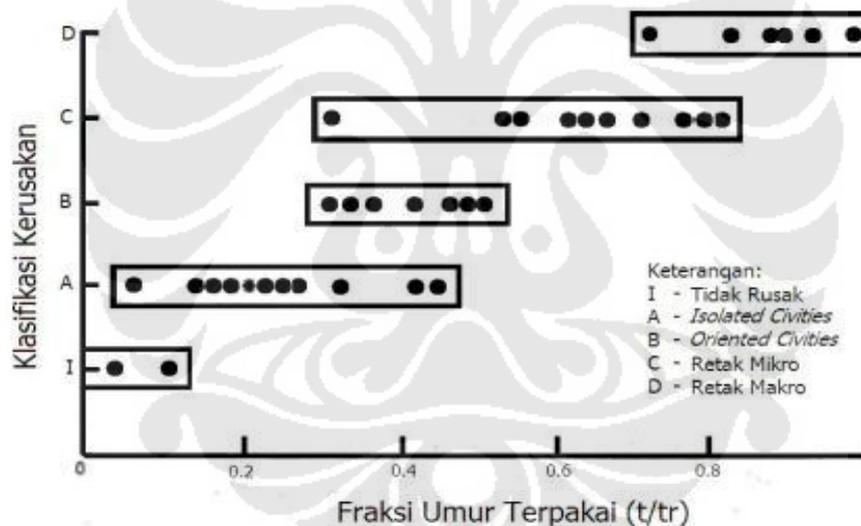
Gambar 2.9 Penentuan umur creep berdasarkan klasifikasi void^[3]

Penelitian tersebut dilakukan pada *steam pipe* di pembangkit listrik Jerman, mereka mengestimasi waktu yang dibutuhkan untuk terjadinya peningkatan kerusakan dari tahap satu ke tahap selanjutnya terlihat pada Gambar 2.9. Dari penelitian ini mereka merumuskan rekomendasi yang berhubungan dengan 4 tahap dari terjadinya void tersebut.

Pada kelas A tidak ada tindakan perbaikan yang perlu dilakukan. Untuk kelas B yang mengandung *oriented cavities*, perlu dilakukan tindakan inspeksi antara 1,5 sampai 3 tahun selanjutnya. Pada kelas C, perlu dilakukan tindakan

perbaikan atau tindakan pergantian akan dibutuhkan dalam waktu 6 bulan selanjutnya. Dan untuk kerusakan pada kelas D perbaikan sesegera mungkin perlu dilakukan untuk menghindari terjadi hal yang tidak diinginkan. Karena metoda ini merupakan metoda konservatif, biasanya metoda ini digunakan sebagai teknik monitoring. Namun karena penggunaannya yang mudah, metoda ini digunakan secara luas oleh operator *power plant* diseluruh dunia.

Klasifikasi diatas dilakukan bertujuan untuk mempermudah kita untuk melakukan pengamatan dan tindakan seperti yang telah dijelaskan diatas. Karena klasifikasi kerusakan tersebut juga akan berhubungan dengan *life fraction*, dengan bertambahnya *life fraction* maka akan mengurangi umur sisa dari komponen. Gambar 2.10 merupakan hubungan klasifikasi kerusakan dengan *life fraction* yang teliti oleh Shammass^[3]



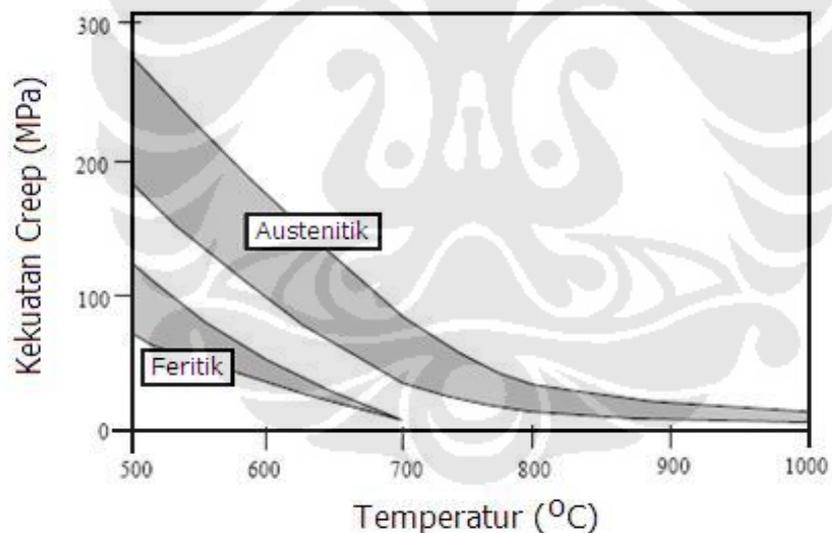
Gambar 2.10 Hubungan antara klasifikasi kerusakan dengan creep-life fraction untuk Baja 1/4Cr-1/2Mo^[3]

2.6. AUSTENITIC STAINLESS STEEL

Austenitic Stainless Steel merupakan baja tahan karat yang sering digunakan pada temperatur tinggi (diatas 538 °C) karena dari sifat kekuatan pada temperatur tinggi yang baik, ketahanan oksidasi, dan kestabilan struktur yang baik. Ketangguhan austenitik stainless steel memiliki ketangguhan yang paling baik dibandingkan dengan baja tahan karat yang lain, baik pada temperatur tinggi

maupun rendah^[9]. Pada baja komersial, dengan adanya penambahan kromium akan mengurangi terjadinya oksidasi, karena paduan tersebut dibutuhkan untuk sifat pasifitas baja pada kondisi temperatur dan lingkungan yang spesifik^[10]. Ketahanan terhadap creep terjadi karena adanya kehadiran dari karbida dan sedikitnya keberadaan butir yang berukuran besar yang dihubungkan temperatur annealing yang lebih tinggi. Namun terkadang dengan adanya kandungan karbon yang relatif tinggi dapat mempermudah terjadinya sensitasi.

Austenitik Stainless Steel mempunyai kekuatan creep yang lebih baik dari stainless steel yang lain pada temperatur diatas 500^oC. Kekuatan tertinggi pada temperatur tinggi tersebut terjadi pada baja dengan paduan nitrogen dan juga mengandung titanium dan niobium. Pada Gambar 2.11 dibawah terlihat bahwa kekuatan pada temperatur tinggi baja tahan karat austenitik terjadi pada daerah yang ditandai. Baja tahan karat austenitik mempunyai ketahanan creep yang lebih baik dari baja tahan karat yang lain.



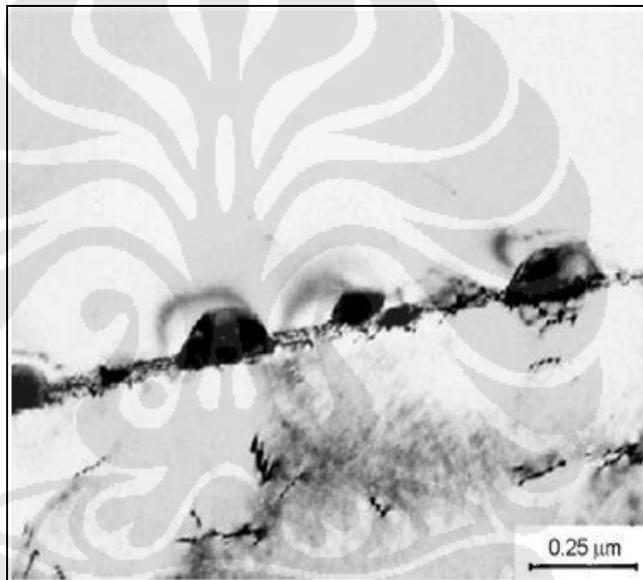
Gambar 2.11 Perbandingan ketahanan creep dari *austenitic stainless steel*^[10]

2.6.1. Fenomena Perlakuan pada Temperatur Tinggi pada *Austenitic Stainless Steel*

Stainless steel mempunyai karakteristik dari segi metalurgi yang dapat menimbulkan efek yang berpengaruh pada sifat material karena proses perlakuan pada temperatur tinggi / pemanasan. Fenomena tersebut antara lain adalah :

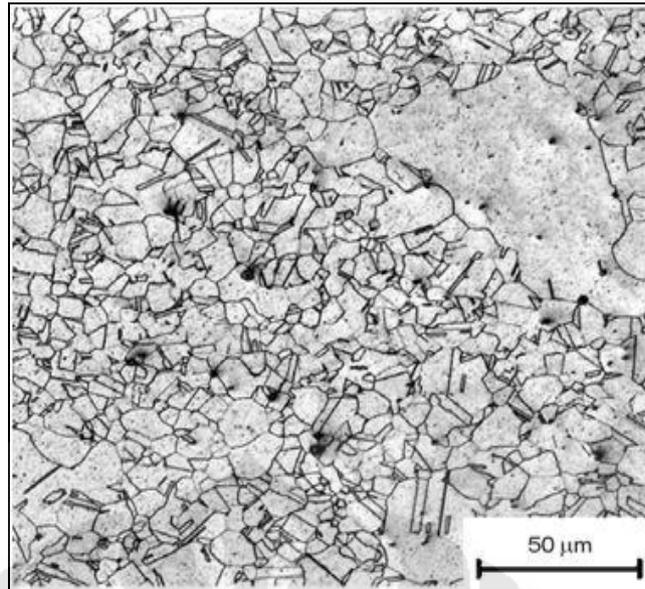
a) Austenitic Stainless Steel Annealing

Pada stainless steel dapat terjadi pengendapan (*precipitation*) $M_{23}C_6$, dimana M adalah Cr, Fe, Mo (Lihat Gambar 2.12). Pengendapan ini biasa terjadi pada temperatur antara 450 - 900 °C. Pada proses perlakuan panas terhadap baja tahan karat Austenitik, proses annealing mempunyai batasan minimal temperature adalah 900 °C. Dalam keadaan tertentu pertumbuhan butir yang abnormal dikenal sebagai *secondary recrystallization*^[11] (Lihat Gambar 2.13). Dimana rekristalisasi tersebut harus dihindari.



Gambar 2.12 Batas butir endapan $M_{23}C_6$ di austenitic stainless steel, didapat dengan *transmission electron microscopy*, TEM^[11]

Selain itu diketahui pula bahwa pemanasan pada jangkauan temperatur antara 480 - 815 °C (900 - 1500 °F) karbida kromium akan mengendap pada batas butir pada keseluruhan austenitik yang tidak stabil^[12]. Setelah dilakukan pemanasan yang cukup panjang pada batas butir terjadi pengendapan karbida. Pada kondisi ini akan memungkinkan terjadinya korosi intergranular. Untuk jenis baja tahan karat yang mempunyai kadar karbon yang sangat rendah, hal ini dapat dihindari.



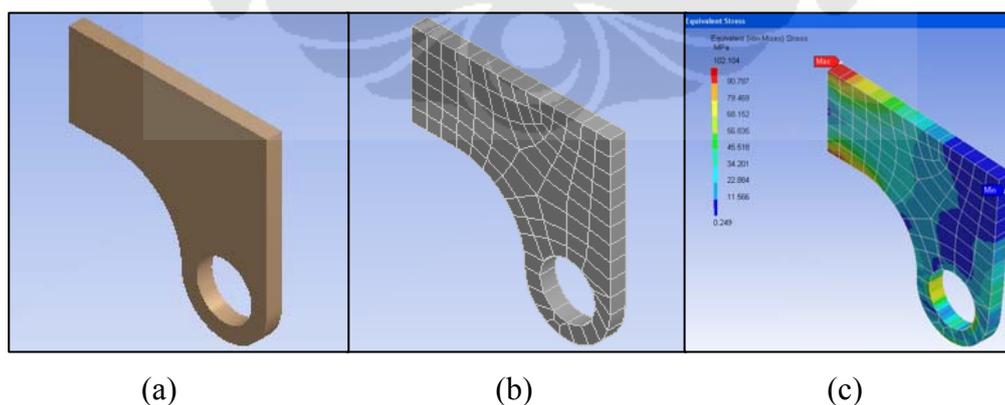
Gambar 2.13 *Secondary Recrystallization* dilihat dengan mikroskop optik pada austenitic stainless steel setelah annealing. Etsa : V2A-Beize. ^[11]

- b) **Pemanasan pada temperatur 815 – 925 °C.** Dalam hal ini yang dapat terjadi adalah penggumpalan endapan karbida kromium, yang dapat menyebabkan penurunan terhadap ketahanan korosi dan sifat material^[12].
- c) **Pemanasan pada temperatur 955 – 1120 °C.** Proses perlakuan annealing ini menyebabkan semua batas butir endapan karbida kromium terurai dan akan terjadi proses yang serupa dengan proses softening pada baja.
- d) **Stress relief untuk meningkatkan ketangguhan notch.** Tidak seperti karbon dan baja paduan, austenitik tidak sensitif terhadap stress konsentrasi. Akibatnya, stress relief yang biasanya untuk baja jenis lain bertujuan untuk meningkatkan ketangguhan terhadap adanya stress konsentrasi namun pada austenitik stainless steel tidak akan memberikan pengaruh yang signifikan karena austenitik stainless steel memang sudah ketangguhan yang cukup^[12].

2.7. FINITE ELEMENT ANALYSIS (FEA)

Finite Element Analysis (FEA) merupakan gabungan dari permodelan komputer dari sebuah material atau desain yang diberi beban dan selanjutnya akan dilakukan analisa untuk menghasilkan hasil yang spesifik. Dengan FEA kita dapat melakukan modifikasi pada struktur atau produk yang telah ada yang akan digunakan pada kondisi operasi yang baru.

Terdapat 2 tipe analisa yang biasa digunakan di industri yaitu : permodelan 2-D dan permodelan 3-D^[13]. Ketika menggunakan permodelan 2-D maka kita akan menemukan kemudahan dan akan membuat analisis dijalankan dengan kondisi computer yang normal, akan tetapi permodelan menggunakan 2-D ini akan menghasilkan hasil yang kurang akurat. Sedangkan jika kita menggunakan permodelan 3-D, maka hasil yang akan didapatkan akan lebih akurat, namun akan mengorbankan kemampuan *running* pada komputer, oleh karena itu pada permodelan jenis ini lebih efektif menggunakan komputer yang mempunyai kemampuan *running* yang lebih cepat. Dengan menggunakan skema permodelan ini, programmer akan dapat memasukkan fungsi alogaritma yang akan dapat membuat sistem berjalan linear atau non-linear. Sistem linear jauh lebih rumit dan biasanya tidak memperhitungkan deformasi plastis. Sedangkan pada sistem non-linear mengikutsertakan deformasi plastis pada perhitungannya, dan juga akan dapat menguji material pada semua jenis perpatahan.



Gambar 2.14 a) model asli komponen b) komponen yang dilakukan meshing c) komponen diperhitungkan dengan metoda *finite element*^[13]

FEA menjadi solusi untuk memprediksi kegagalan dari tegangan dari permasalahan yang tidak diketahui tegangannya. Dengan menunjukkan daerah

permasalahan pada material dan membuat perancang dapat melihat semua tegangan secara teoritis yang berada pada komponen (Lihat gambar 2.14c). Metoda perancangan desain ini juga akan sangat berguna jika digunakan sebagai permodelan sebelum dilakukan produksi pada proses manufaktur^[13].

2.7.1 Prinsip Kerja Finite Element Analysis

FEA menggunakan sistem rumit yaitu dengan menggunakan titik (*point*) yang biasa disebut *node*, dan yang akan membuat jaringan biasa disebut *mesh* (Gambar 2.14b). Mesh ini diprogram untuk mengandung sifat material dan sifat struktural yang akan mendefinisikan bagaimana struktur akan bereaksi ketika dihadapkan dengan kondisi pembebanan tertentu^[13]. *Node* berfungsi sebagai pengukur tegangan pada area tertentu dengan cara diposisikan sepanjang material dengan jumlah tertentu. Daerah yang menerima tegangan yang besar biasanya akan mempunyai jumlah *node* yang lebih banyak daripada daerah yang mengalami tegangan yang lebih sedikit. *Mesh* berfungsi sebagai jaring yang terbentuk (terhubung) dari masing-masing *node*, dimana *node* yang berdekatan akan selalu berhubungan. Jaring ini adalah yang akan membentuk elemen yang sangat banyak dalam bentuk yang kecil, dan perhitungan sifat material akan dilakukan pada elemen-elemen tersebut^[13].

Metoda ini mempunyai fungsi yang luas untuk melakukan pemaksimalan dan meminimalisasian dari:

- Massa, Volume, Temperatur
- *Strain energy*, *Strain stress*
- Gaya, kecepatan, percepatan

Untuk dilakukannya analisa *finite elemen* ini, diperlukan data yang digunakan untuk dimasukkan pada sistem analisa. Data-data yang dibutuhkan tersebut adalah:

- Titik, tekanan, temperatur, gravitasi, dan gaya sentrifugal beban statis.
- Pembebanan panas dari persamaan analisa perpindahan panas.
- Mekanisme penguatan
- Fluks kalor dan konveksi
- Titik, tekanan, temperatur, gravitasi, dan gaya sentrifugal beban dinamis.

2.8. FAILURE ASSESSMENT DIAGRAM (FAD)

2.8.1. Parameter FAD

Pendekatan *Failure Assessment Diagram* telah secara luas digunakan untuk menentukan keamanan dari cacat pada komponen teknis. *United Kingdom Central Electricity Generating Board* (CEGB) merupakan yang pertama kali mengajukan penggunaan *Failure Assessment Diagram* ini berdasarkan dua kriteria pendekatan Dowling dan Townley^[14]. Pendekatan CEGB menunjukan pada *post-yield fracture* dengan formula interpolasi antara dua kasus batasan *linear elastic fracture* dan *plastic collapse*. Formula interpolasi diketahui sebagai *failure assessment* atau juga biasa disebut kurva R6 (lihat Gambar 2.15), dikembangkan dari persamaan Dugdale untuk adanya retak, pada plat tanpa batas:

$$K_r = \frac{S_r}{\sqrt{\frac{8}{\pi^2} \ln[\sec(0.5\pi S_r)]}} \quad (2.1)$$

Pada sisi kanan persamaan diatas dapat dilihat sebagai hubungan plastisitas yang hanya prediksi skala kecil. Dari persamaan (2.1) diatas maka *Fracture Ratio* (K_r):

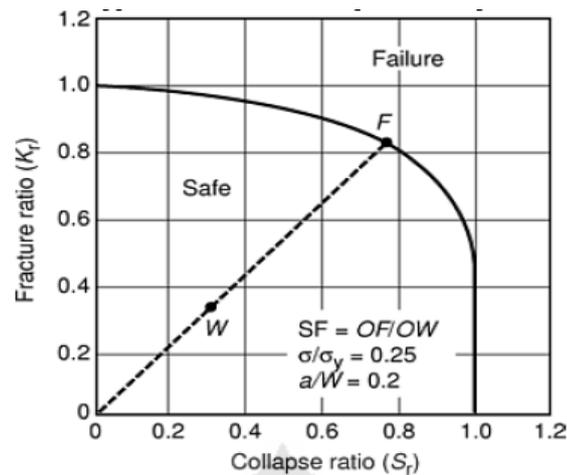
$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} \quad (2.2)$$

Dan nilai *collapse ratio* (S_r) adalah :

$$S_r = \frac{\sigma}{\sigma_c} \quad (2.3)$$

Pada persamaan (2.2), nilai K_I merupakan nilai *stress intensity factor* pada komponen yang retak. *stress intensity factor* merupakan fungsi dari tegangan nominal σ , ukuran retak a dan geometri, dan K_{mat} merupakan nilai *linear elastic-fracture toughness* dari komponen. K_{mat} merupakan nilai K_I pada saat terjadinya retak dan untuk kondisi aktual, yang merupakan fungsi dari ketebalan dan temperatur. Pada persamaan (2.3), σ merupakan tegangan yang diaplikasikan pada komponen yang terdapat retak, sedangkan σ_c merupakan tegangan pada saat putus plastis pada komponen retak.

Collapse ratio S_r atau L_r , merupakan rasio dari gaya dorong retak terhadap ketangguhan material. Sedangkan K_r , Rasio Retak (*Fracture Ratio*) merupakan rasio dari gaya dorong (*driving-force*) terhadap ketangguhan material^[14].



Gambar 2.15 FAD (kurva R6) yang diajukan oleh United Kingdom Central Electricity Generating Board (CEGB)^[14]

FAD saat ini telah digunakan secara luas, utamanya sebagai model grafis yang merefleksikan kurva stress-strain dari material. FAD intinya terdiri dari 2 elemen, yaitu^[14]:

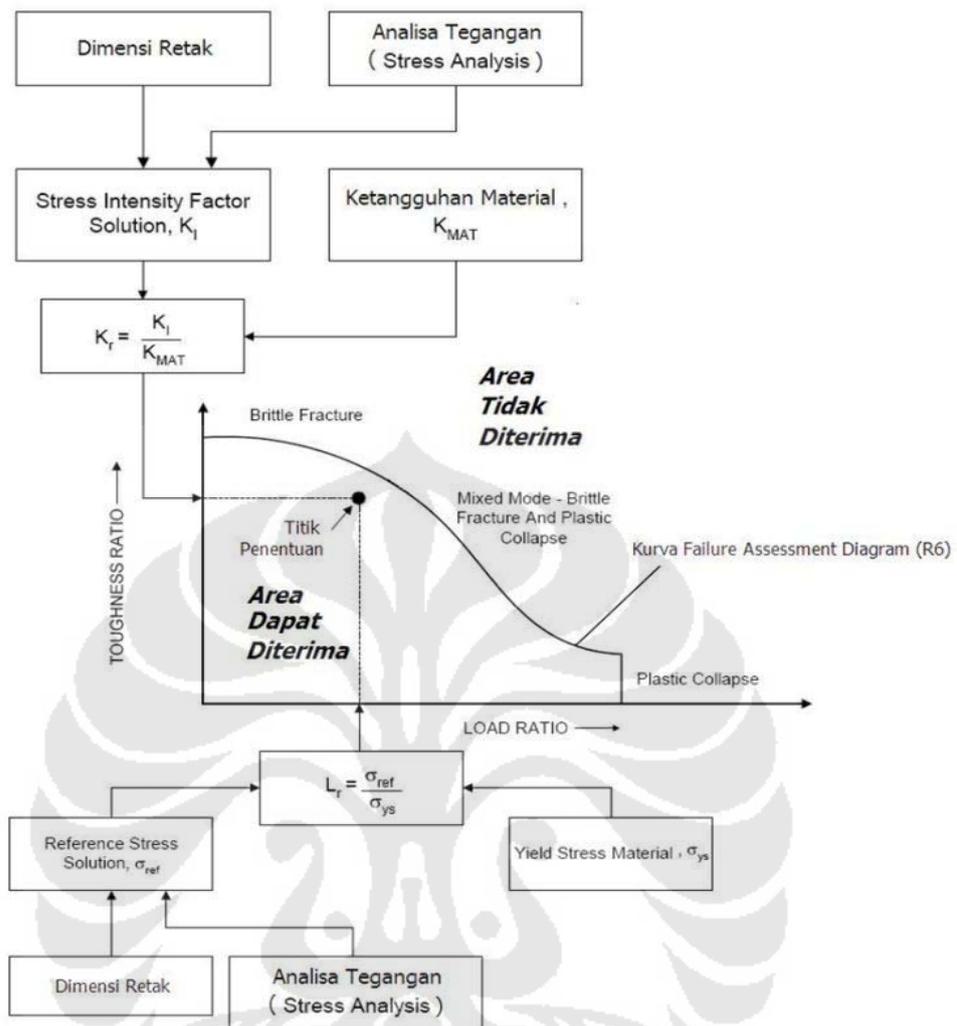
- *Failure Assessment Curve* (FAC)
- *Failure Assessment Point* (FAP)

FAC didefinisikan sebagai kombinasi kritis dari pembebanan operasi, sifat tegang-regang material, dan geometri dari bagian retak. Sedangkan FAP didefinisikan sebagai keadaan ketika mengandung retak dengan ukuran tertentu dan juga dibawah pembebanan tekanan tertentu.

Selanjutnya akan dilakukan pengkajian terhadap FAP pada diagram FAD tersebut. Jika titik yang mendeskripsikan keadaan komponen retak tersebut berada dibawah kurva R6, maka struktur tersebut dapat dikatakan aman. Namun jika ditemukan bahwa titik tersebut berada diatas kurva R6 tersebut maka akan merepresentasikan keadaan yang tidak aman.

2.8.2. Konstruksi dan Aplikasi diagram FAD

Prosedur pengkajian untuk mengevaluasi cacat retak di klasifikasikan menjadi 3 level. Tiga level assessment tersebut digunakan berdasarkan data detail yang dibutuhkan untuk analisis, derajat kerumitan yang dibutuhkan untuk kondisi yang terjadi, dan resiko yang terlihat. Namun secara umum untuk mengkonstruksi FAD dapat dilihat pada skematis pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Skeme alur *Fitness For Service* untuk cacat retak dengan menggunakan *Failure Assessment Diagram* (FAD)

Pengkajian Level 1 dibatasi dengan retak dalam kondisi silinder, *sphere* atau plat bertekanan pada semua diskontinu struktural. Lalu pengkajian level 2 digunakan untuk *shell* umum yang mengandung cacat retak yang berlokasi pada semua struktural. Pada level 2 ini dibutuhkan informasi detail tentang sifat material dan kondisi pembebanan. Dan analisa tegangan biasanya digunakan untuk menentukan tegangan setempat pada lokasi cacat retak. Analisa tegangan pada level ini akan menggunakan persamaan rumus atau analisa numerik. Sedangkan untuk level 3 digunakan untuk mengevaluasi kasus yang tidak memenuhi persyaratan yang dibutuhkan oleh level 1 dan level 2. Pengkajian level

3 ini juga dibutuhkan untuk cacat yang tumbuh pada kondisi operasi karena pembebanan atau kondisi lingkungan.

Persyaratan yang dibutuhkan untuk level 1 dan level 2 adalah^[1]:

- Memenuhi kriteria desain yang didesain dan disusun oleh kode:
 - *ASME B&PV Code, Section VIII, Division 1*
 - *ASME B&PV Code, Section VIII, Division 2*
 - *ASME B&PV Code, Section 1*
 - *ASME B31.3 Piping Code*
 - *ASME B31.1 Piping Code*
 - *API 650*
 - *API 620*
- Komponen tidak beroperasi pada kondisi yang memungkinkan terjadinya mulur (*creep*).
- Efek pembebanan dinamik tidak akan mempengaruhi komponen
- Retak yang berada pada kondisi operasi tidak akan menghasilkan pertumbuhan retak (*crack growth*)
- Untuk Level 1 kondisi yang cocok untuk diterapkan pengkajian pada level ini adalah:
 - Batasan geometri:
 - Komponen plat, silinder, atau bola (*sphere*)
 - Untuk silinder dan bola terbatas pada ukuran $R/t \leq 5$ dimana R adalah jari-jari dalam dan t adalah ketebalan komponen.
 - Ketebalan dinding komponen aktual pada daerah retak tidak boleh kurang dari 38 mm.
 - Tipe retak bisa pada permukaan atau menembus permukaan sehingga menghasilkan lubang.
 - Untuk silinder dan bola (*sphere*) retak cacat harus berorientasi searah dengan sumbu atau arah melintang dan berlokasi dengan jarak lebih besar dari atau sama dengan $1.8\sqrt{Dt}$ dari semua jenis struktur diskontinuitas utama, dimana D adalah diameter dalam dan t adalah ketebalan

komponen. Untuk plat lurus cacat retak harus berorientasi pada arah tegangan maksimum tegak lurus terhadap bidang retak.

- Batasan pada pembebanan komponen
 - Pembebanan komponen berasal dari tekanan yang banyak berasal dari daerah tegangan membrane. Komponen bertekanan yang mempunyai tegangan bending harus dievaluasi dengan menggunakan pengkajian Level 2 atau Level 3.
- Batasan material
 - Material komponen adalah harus baja karbon dengan *allowable stress* berdasarkan kode konstruksi asli yaitu tidak melebihi 172 MPa.
 - Nilai minimal untuk *yield strength* untuk material dasar kurang dari atau sama dengan 276 MPa. Dan nilai minimum *Ultimate Tensile Strength* (UTS) tidak lebih atau sama dengan 483 MPa.
 - *Fracture Toughness* tidak lebih dari atau sama dengan *lower bound toughness* (K_{IC}).

Dari semua persyaratan di atas jika terdapat satu hal saja yang tidak terpenuhi, maka langkah yang dilakukan selanjutnya adalah melakukan pengkajian Level 3. Kondisi yang biasanya dibutuhkan pada pengkajian level ini adalah yang termasuk dibawah ini:

- Teknik analisa tegangan tingkat tinggi dibutuhkan untuk mendefinisikan tegangan setempat pada lokasi beradanya retak karena kondisi pembebanan dan geometri yang rumit.
- Retak ditentukan atau dianggap sebagai fasa *subcritical growth* yang aktif dikarenakan kondisi pembebanannya dan kondisi lingkungan. Dan diperlukan metoda penentuan umur sisa terhadap komponen.
- Gradien tegangan yang tinggi, nilai *fracture toughness* material, atau nilai *yield* atau *tensile strength* ada pada lokasi dari cacat.

Dari semua penjelasan diatas dapat terlihat bahwa komponen yang beroperasi pada temperatur tinggi pengkajian terhadap *fitness-for-sevice*-nya akan langsung menggunakan *assessment* level 3 tanpa melakukan *assessment* pada Level 1 dan Level 2 .

Pengkajian Level 3 (*Level 3 Assessment*)

Pada *assessment* level 3 ini pada dasarnya adalah pengkajian yang menggunakan *Failure Assessment Diagram* (FAD) sebagai dasar pengkajian. Penentuan FAD tersebut berdasarkan persamaan^[1]:

$$K_T = \left[\frac{E s_{ref}}{L_r \sigma_{ys}} + \frac{L_r^3 \sigma_{ys}}{2E s_{ref}} \right]^{-1/2} \quad L_r \leq L_r^{max} \quad (2.4)$$

$$K_T = 0 \quad L_r \leq L_r^{max} \quad (2.5)$$

Dimana :

- E = Modulus Young (MPa)
- s_{ref} = Regangan referensi (*Referance Strain*) atau sama dengan $L_r \sigma_{ys}$ (mm)
- σ_{ys} = Tegangan luluh (*Yield stress*) (MPa)
- L_r = Rasio pembebanan / *Load ratio* / *Collapse Ratio*
- L_r^{max} = nilai maksimum dari L_r

Diagram FAD pada level 3 ini merupakan diagram yang dibuat berdasarkan sifat material aktual. Maksud dibuat berdasarkan sifat material aktual tersebut adalah bahwa nilai σ_{ys} , s_{ref} , dan E didapatkan dari kurva tegangan-regangan (*stress-strain curve*) dari hasil uji tarik terhadap material aktual yang mengandung retak dan akan dilakukan pengkajian kelayakan. Namun jika material aktual yang mengandung retak tersebut tidak ada, maka dapat digunakan material dengan spesifikasi yang sama dan respon yang sama terhadap tegang-regangnya.

Nilai L_r^{max} merupakan batas yang digunakan untuk menentukan akhir dari kurva R6. Nilai untuk masing-masing material mempunyai nilai yang berbeda. Nilai tersebut didapatkan dari persamaan^[14]:

$$L_r^{\max} = \frac{\sigma_f}{\sigma_{ys}} \quad (2.6)$$

σ_f merupakan tegangan alir (*flow stress*) didapatkan dari persamaan^[14]:

$$\sigma_f = \frac{(\sigma_{ys} + \sigma_{UTS})}{2} \quad (2.7)$$

Namun *flow stress* untuk baja tahan karat austenitik adalah^[14]:

$$\sigma_f = \frac{1.15 (\sigma_{ys} + \sigma_{UTS})}{2} \quad (2.8)$$

Hasil dari uji tarik akan menghasilkan akan menghasilkan kurva tegang-regang rekayasa (*engineering stress-strain*). Namun nilai sifat material (σ_{ys} , σ_{UTS} , dan E) yang akan dimasukkan pada persamaan (2.4) harus sudah merupakan nilai dari *true stress-strain curve*. Oleh karena itu nilai hasil uji tarik tersebut (*engineering stress-strain*) harus dikonversi terlebih dahulu menjadi *true stress-strain curve*. Konversi dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan:

$$\sigma = (1 + \epsilon) \sigma_e \quad (2.9)$$

$$\epsilon = \ln(1 + \epsilon_e) \quad (2.10)$$

σ = *true stress* (MPa)

σ_e = tegangan rekayasa/ *engineering stress* (MPa)

ϵ = *true strain* (mm)

ϵ_e = regangan rekayasa/ *engineering strain* (mm)

Setelah dilakukan konversi maka pembuatan diagram FAD dapat dilakukan dengan memasukkan nilai *true stress strain curve* kedalam persamaan (2.4).