

## Analisis Integritas Bejana Tekan Dengan Cacat Retak Semi Eliptikal Dengan Beban Tekanan Internal

Musthafa Akbar dan Rachman Setiawan

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung  
Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132  
E-mail: rachmans@edc.ms.itb.ac.id

### Abstrak

Bejana tekan adalah peralatan yang umum digunakan dalam dunia industri untuk menampung fluida dengan temperatur maupun tekanan tertentu. Selama beroperasi menjalankan fungsinya, terkadang suatu bejana tekan mengalami kondisi yang di luar rancangan sehingga mengalami kerusakan yang berpotensi menimbulkan bahaya terhadap lingkungan operasi maupun kerugian yang lebih besar. Untuk menurunkan resiko tersebut, prosedur analisis integritas telah disusun dan dituangkan antara lain dalam Code API 579-1/ASME-FFS-1 2007. Analisis terdiri dari 3 Tingkat/Level, yaitu Level 1 yang memerlukan penilaian ahli untuk menentukan tindakan pencegahan atas kerusakan, Level 2 melibatkan prosedur sistematis yang dapat disusun oleh insinyur dalam industri tersebut, serta Level 3 yang memerlukan analisis mendalam, dengan menggunakan simulasi numerik, antara lain dengan metode elemen hingga. Pada penelitian ini analisis integritas dilakukan terhadap kasus cacat retak berbentuk semi eliptikal pada bagian dalam bejana tekan silindris menggunakan analisis elemen hingga. Analisis elemen hingga dilakukan dengan asumsi *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM) dan *Elastic Plastic Fracture Mechanics* (EPFM) untuk menghasilkan *Failure Assessment Diagram* (FAD). Diagram ini menyediakan batasan yang akan membedakan antara kondisi aman dan tidak aman dari suatu cacat pada bejana tekan serta mode kegagalan yang akan terjadi berdasarkan posisi *assessment point* dalam FAD. Dengan menggunakan diagram ini, berbagai variasi ukuran cacat dan besar tekanan internal juga disimulasikan sehingga didapatkan posisi retak dan tekanan internal maksimum yang diizinkan dalam pengoperasian bejana tekan. Berdasarkan simulasi, bejana tekan akan gagal pada tekanan 0,589 ksi atau jika rasio  $c/a$  dari retak mencapai nilai 0,85. Diagram hasil analisis elemen hingga ini selanjutnya dibandingkan dengan prosedur analisis integritas berdasarkan Code API 579-1/ASME-FFS-1 2007. Dari penelitian ini disimpulkan sementara bahwa analisis Level 1 dan 2 memberikan hasil yang lebih konservatif jika dibandingkan dengan analisis level 3 yang menggunakan metode elemen hingga.

**Keywords:** Bejana Tekan, FAD, Assessment Point, Cacat Retak, Analisis integritas

### Pendahuluan

Analisis integritas merupakan serangkaian prosedur kuantitatif untuk menentukan kelayakan pengoperasian peralatan mekanikal statis bertekanan yang mengacu kepada code atau standard tertentu. Secara umum, hasil akhir yang diharapkan dalam analisis integritas adalah kesimpulan dan rekomendasi kepada pengguna apakah komponen tersebut layak untuk terus dioperasikan dengan kondisi operasi normal, diturunkan tekanan atau temperatur operasinya (*derating*), diperbaiki dulu sebelum dioperasikan lagi, atau harus dilakukan penggantian komponen. Bejana tekan merupakan salah satu peralatan statik bertekanan yang digunakan secara luas di dunia industri untuk menampung fluida dengan tekanan dan temperature tertentu. Beberapa hal

yang menjadi ancaman terhadap integritas struktur bejana tekan antara lain adanya cacat seperti retak, penyok (*dent*), penipisan dinding lokal maupun global akibat korosi, mulur (*creep*) akibat temperatur tinggi dan perubahan geometry akibat deformasi plastis seperti *out of roundness*, *misalignment*, *bulging* dan *buckling*. Untuk menurunkan resiko tersebut, prosedur analisis integritas telah disusun dan dituangkan dalam beberapa code atau standard. Beberapa code atau standard yang mengatur tentang prosedur penilaian integritas terhadap peralatan statik bertekanan antara lain BS7910, R6 method, PD6493, SINTAP, ASME section XI article H400, dan API 579. API 579 merupakan salah satu code yang digunakan secara luas di industri dewasa ini. API 579 pertama kali dirilis pada tahun 2000 dan disempurnakan pada edisi terakhir pada tahun 2007 melalui komite bersama antara API dan ASME. Analisis integritas pada code ini terdiri dari 3 tingkat/level, yaitu

level 1 yang memerlukan penilaian ahli untuk menentukan tindakan pencegahan atas kerusakan, Level 2 melibatkan prosedur sistematis yang dapat disusun oleh insinyur dalam industri tersebut, serta Level 3 yang memerlukan analisis mendalam, dengan menggunakan simulasi numerik, antara lain dengan metode elemen hingga. Analisis setiap level tergantung kepada kekonservatifan, kompleksitas analisis, data yang tersedia atau yang ingin didapatkan, serta kemampuan assessor yang melakukan penilaian.

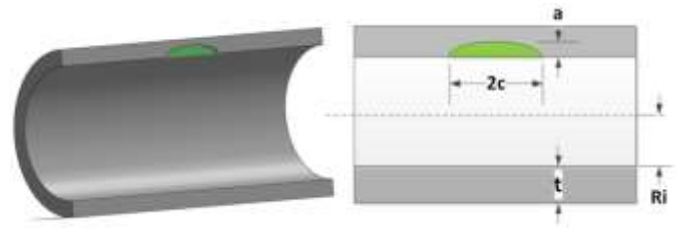
Penelitian mengenai integritas mekanikal bejana tekan sudah banyak dilakukan peneliti sebelumnya. Di antara penelitian yang dilaporkan akhir-akhir ini adalah Grabulov (2007), yang melakukan penelitian mengenai analisis kelayakan komponen yang memiliki cacat retak pada daerah sambungan las dengan metode elemen hingga berdasarkan Code PD6493. Kemudian Hakimi (2010) mengkaji integritas bejana tekan secara teoritis dan numerik dengan bermacam variasi jenis retak dengan mengacu pada kriteria A16 dan R6. Liu (2012) melakukan penelitian menggunakan metode *Extended Finite Element Method (XFEM)* untuk mengetahui perilaku kegagalan plastis bejana tekan yang memiliki retak. Kriteria kegagalan yang dipakai didasarkan kepada *Failure Assessment Diagram (FAD)* yang diterapkan pada struktur dengan takikan dan retak diteliti oleh Cicero (2011). Tipple (2012) menggunakan kriteria *Failure Assessment Diagram (FAD)* untuk menentukan kelayakan operasi bejana tekan yang memiliki cacat retak pada daerah sambungan antara *nozzle* dan *shell*.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kelayakan operasional bejana tekan yang memiliki cacat retak berbentuk semi eliptikal pada bagian dalam silinder dengan ukuran cacat dan kondisi operasi tertentu berdasarkan kriteria kegagalan *Failure Assessment Diagram (FAD)*. Di samping itu, penelitian ini juga membandingkan antara hasil analisis elemen hingga (level 3) dengan analisis level 1&2 berdasarkan prosedur menurut Code.

### Metode Penelitian

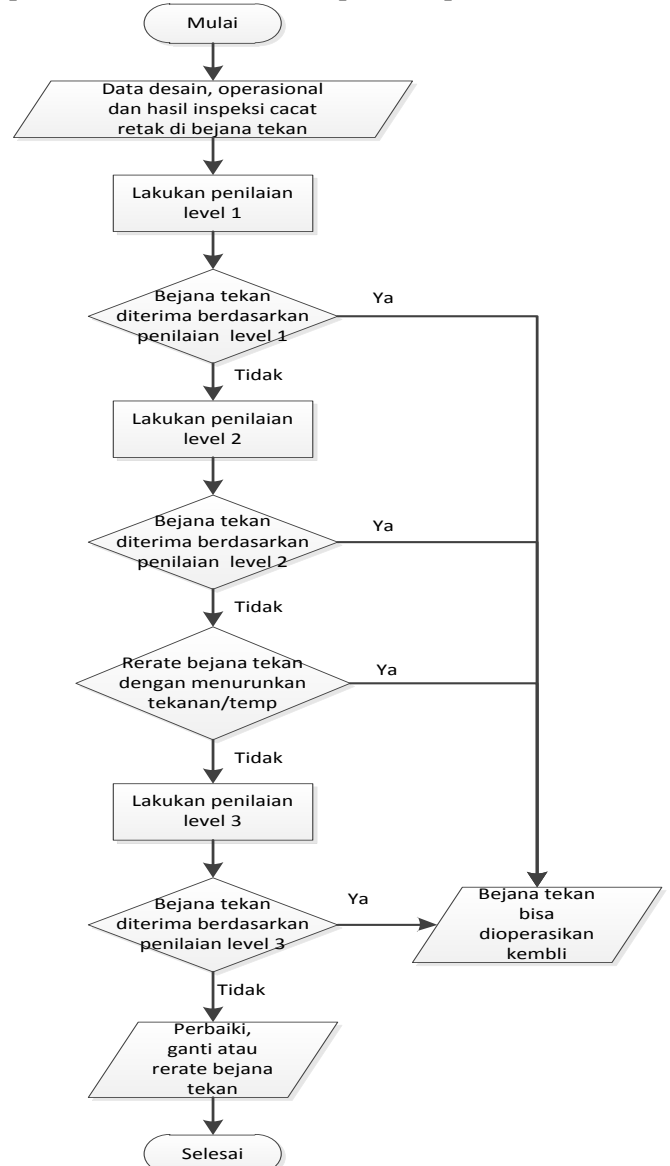
Sebagai studi kasus, analisis integritas diterapkan pada bejana tekan silindris dengan jari-jari dalam ( $R_i$ ) 60 in, tebal dinding 1 in dan panjang silinder 200 in. Retak dimodelkan berbentuk semi eliptikal dengan panjang sumbu mayor,  $2c$ , sebesar 3,2 in dan panjang sumbu minor,  $a$ , sebesar 0,2 in. Posisi retak berada pada bagian permukaan dalam silinder dengan arah memanjang atau longitudinal. Bejana dibebani tekanan internal sebesar 200 psi. Material silinder adalah ASTM SA-516 Grade 70 dengan *Specified Minimum Yield Strength (SMYS)*

38 ksi. Posisi dan dimensi retak pada bagian silinder ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Posisi retak di permukaan dalam silinder (non-proporsional)

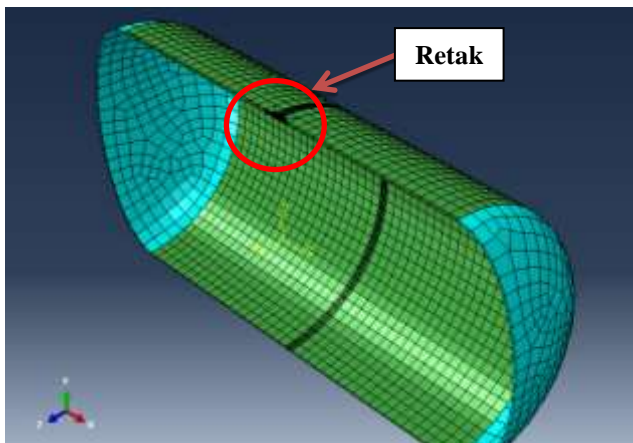
Secara umum, analisis integritas berdasarkan code API 579 terdiri dari 3 tingkat/level penilaian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Pada setiap tingkatan, penilai dan pengguna bisa memilih apakah akan melanjutkan analisis ke level yang lebih tinggi atau komponen tetap dioperasikan tetapi dengan konsekuensi penurunan tekanan atau temperatur operasi.



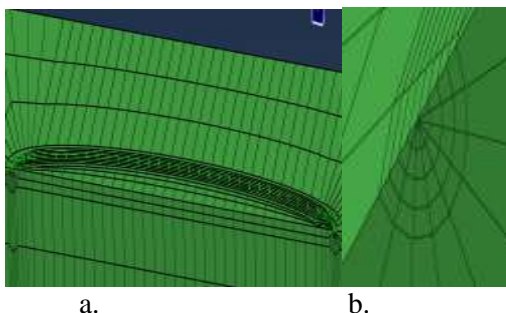
**Gambar 2.** Diagram alir analisis integritas berdasarkan Code API 579-1/ASME-FFS-1

Pada penelitian ini, analisis integritas bejana tekan dilakukan berdasarkan level 1 dan 2 untuk berbagai kasus dalam suatu studi parametrik dengan me-variasikan parameter dimensi bejana tekan, cacat retak, tekanan, temperatur maupun parameter lainnya.

Selanjutnya, metode elemen hingga digunakan pada level 3 untuk mendapatkan nilai faktor intensitas tegangan dan laju pelepasan energi sepanjang *crack front*. Garis eliptikal retak tersebut dibagi menjadi 45 nodal dengan sudut retak antar nodal sebesar 4 derajat. Analisis dengan metode elemen hingga dilakukan menggunakan software ABAQUS/CAE dengan menggunakan tipe elemen hexahedral *8 node linear brick* (C3D8R) dengan jumlah elemen sebanyak 7098 elemen. Bejana tekan dimodelkan setengah simetri dengan posisi retak pada arah longitudinal seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Titik-titik nodal yang akan ditentukan nilai faktor intensitas tegangannya ditunjukkan pada Gambar 4.

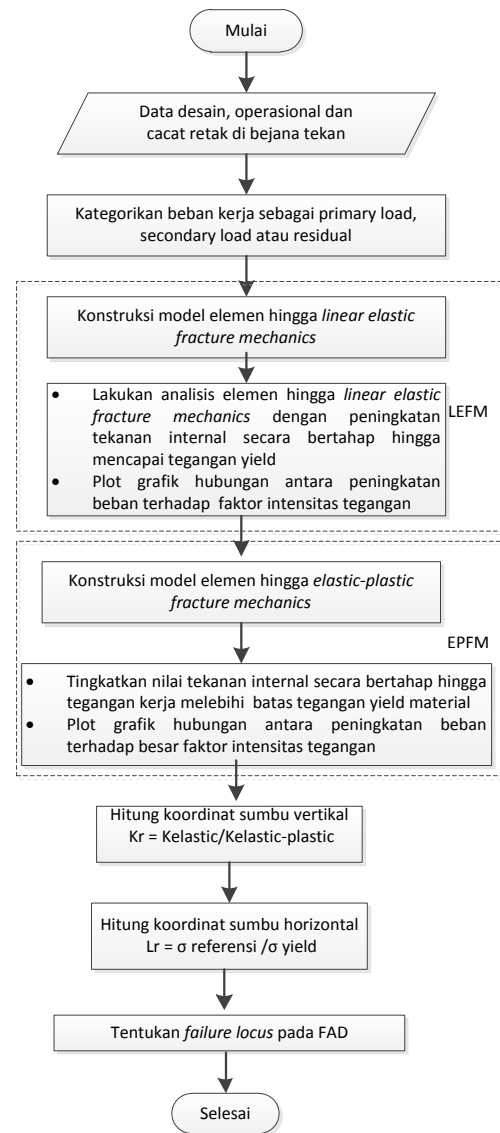


**Gambar 3.** Pemodelan elemen hingga model setengah simetri silinder



**Gambar 4.** (a) nodal sepanjang garis semi eliptikal *crack front* (b) *spider web mesh* pada *crack front* permukaan dalam silinder

Diagram alir analisis integritas menggunakan metode elemen hingga (level 3) ditampilkan pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Diagram alir analisis integritas bejana tekan level 3 berdasarkan Code API 579-1/ ASME-FFS-1

### Hasil dan Pembahasan

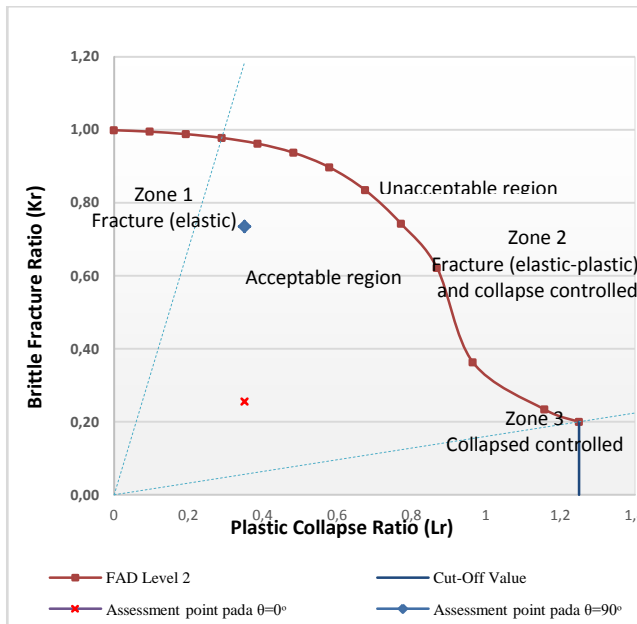
Berdasarkan hasil analisis level 1, panjang cacat retak maksimum yang diizinkan hanya sebesar 0,2 in, sehingga disimpulkan bahwa bejana tekan tidak layak beroperasi, atau jika tetap ingin dioperasikan, pengguna harus menurunkan tekanan atau temperatur operasinya terlebih dahulu.

Dari analisis level 2 menggunakan kriteria Failure Assessment Diagram (FAD) didapatkan nilai brittle fracture ratio ( $K_r$ ) dan plastic collapse ratio ( $L_r$ ) sbb:

- Pada  $\theta = 0^\circ$  :  $L_r = 0,352$ ,  $K_r = 0,255$
- Pada  $\theta = 90^\circ$  :  $L_r = 0,352$ ,  $K_r = 0,734$

Sedangkan batas maksimum diizinkan untuk  $K_r$  dan  $L_r$ , masing – masing adalah 0,96 dan 1,25.

Berdasarkan data di atas, disimpulkan bejana tekan masih layak untuk dioperasikan karena masih berada di dalam daerah aman pada FAD.

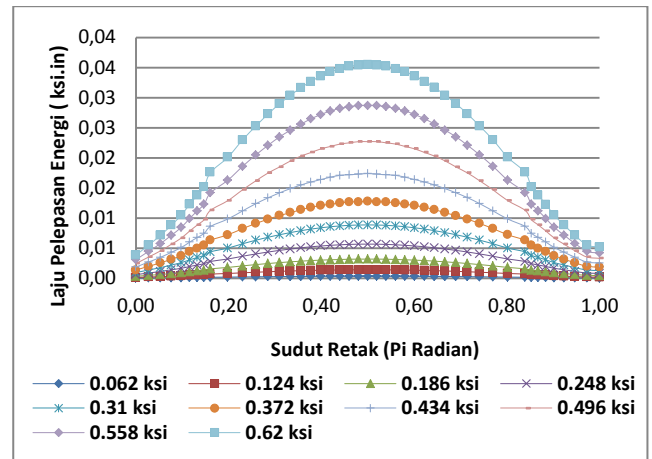


**Gambar 6.** Failure Assessment Diagram (FAD) hasil analisis level 2 untuk posisi retak terluar ( $0^\circ$ ) dan terdalam ( $90^\circ$ )

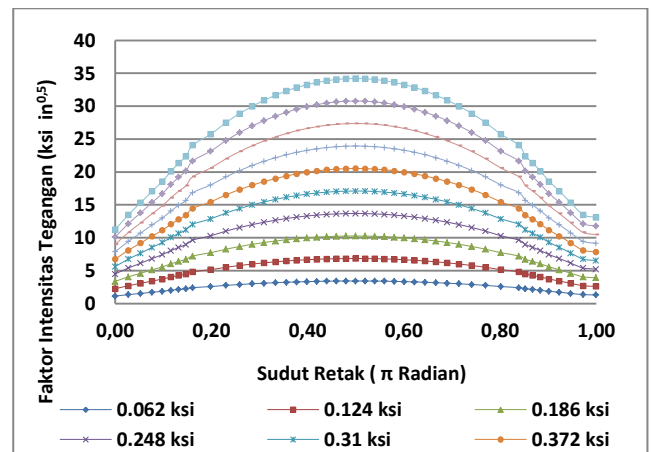
Hasil analisis level 2 di atas kemudian dibandingkan dengan analisis level 3 menggunakan metode elemen hingga. Sebelumnya, model elemen hingga divalidasi terlebih dahulu dengan membandingkan nilai faktor intensitas tegangan hasil simulasi FEM dengan nilai faktor intensitas tegangan yang dihitung menggunakan persamaan yang dikembangkan oleh Raju dan Newman (1982). Persamaan ini juga digunakan secara luas di Code API 579-1/ASME FFS-1 pada Appendix C persamaan C.175. Hasil validasi menunjukkan terdapat selisih kesalahan sebesar 1,91 % antara hasil simulasi elemen hingga dengan perhitungan manual.

Hasil simulasi menggunakan metode elemen hingga adalah nilai laju pelepasan energi ( $J$ -Integral) dan faktor intensitas tegangan ( $K_I$ ) sepanjang crack front dengan variasi peningkatan tekanan dari 0,062 ksi sampai dengan 0,62 ksi. Asumsi linear elastic fracture mechanics digunakan pada tahap ini. Nilai laju pelepasan energi dan faktor intensitas tegangan sepanjang crack front dengan variasi peningkatan tekanan internal ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8.

Dari Gambar 8 terlihat bahwa untuk semua variasi tekanan internal nilai faktor intensitas tegangan terbesar adalah terletak pada sudut retak  $90^\circ$  derajat, sehingga titik tersebut adalah titik yang paling kritis. Titik kritis tersebut akan dievaluasi menggunakan FAD yang dibentuk menggunakan data faktor intensitas tegangan hasil simulasi elemen hingga.



**Gambar 7.** Nilai laju pelepasan energi sepanjang crack front hasil analisis elemen hingga

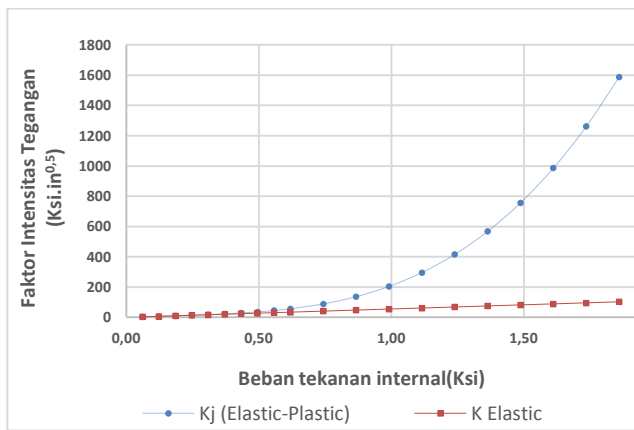


**Gambar 8.** Nilai faktor intensitas tegangan sepanjang crack front hasil analisis elemen hingga

Untuk dapat membentuk FAD dilakukan pula simulasi elemen hingga dengan asumsi elastic-plastic fracture mechanic dengan mevariasikan 20 titik tekanan dari 62 psi sampai 1860 psi, yang diperkirakan menyebabkan nilai tegangan pada bejana sudah melewati batas yield material. Material plastis dimodelkan menggunakan persamaan Ramberg - Osgood. Hasil simulasi elemen hingga dengan asumsi EPFM dan LEFM untuk titik kritis ditampilkan pada Gambar 9.

Pada grafik tersebut, nilai faktor intensitas tegangan elastik untuk nilai tekanan besar dari 0,62 ksi digambarkan secara ekstrapolasi terhadap data elastik, dengan hubungan sbb.  $K_{elastik} = 55,15 p + 0,0047$ .

Dengan menggunakan data hasil simulasi elemen hingga bisa dibentuk kurva FAD spesifik yang bergantung kepada geometri bejana tekan, dimensi cacat dan parameter operasional lainnya.



**Gambar 9.** Nilai faktor intensitas tegangan hasil analisis elemen hingga dengan asumsi LEFM dan EPFM

Dari Gambar 10 terlihat bahwa kurva FAD hasil simulasi elemen hingga (level 3) cenderung memiliki batas yang lebih konservatif, yaitu area aman yang lebih sempit dibandingkan FAD level 2, hingga harga *plastic collapse ratio*,  $L_r$ , sebesar 0,84. Untuk  $L_r$  yang lebih besar, level 3 menjadi lebih optimis dibandingkan dengan FAD level 2. Hasil evaluasi titik kondisi cacat berdasarkan level 3 dapat disimpulkan sbb:

- Brittle fracture ratio ( $K_r$ ) = 0,728
- Plastic collapse ratio ( $L_r$ ) = 0,311

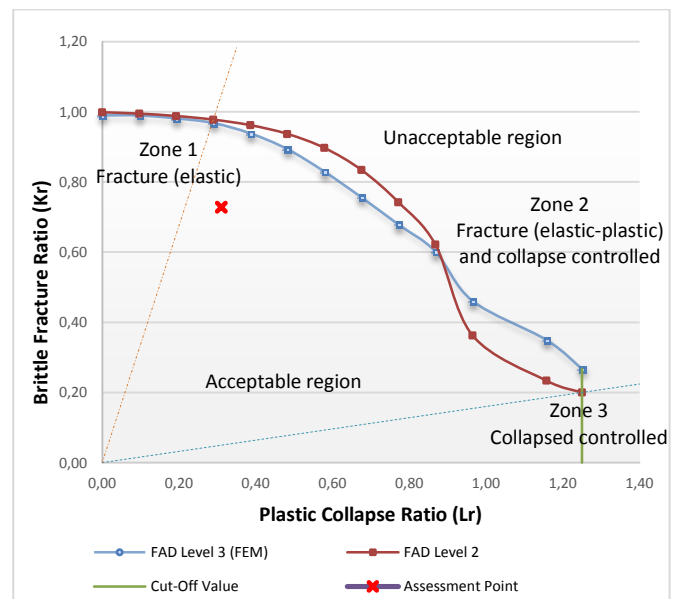
Sedangkan batas maksimum diizinkan untuk  $K_r$  dan  $L_r$ , masing – masing adalah 0,989 dan 1,25.

Selanjutnya dilakukan studi parametrik dengan mevariasikan besar tekanan internal pada bejana tekan sehingga *assessment point* akan bergeser menuju ke arah daerah tidak aman melalui batas kriteria kegagalannya, membentuk kurva yang disebut sebagai *load line*. Berdasarkan studi parametrik didapatkan bahwa bejana tekan diperkirakan akan gagal pada tekanan internal sebesar 589 psi. Sebagaimana dapat diamati, bahwa pada daerah dengan beban tekanan internal 589 psi, kriteria kegagalan menurut level 2 dan 3 ternyata cukup bersesuaian. Hal ini memberikan keyakinan yang tinggi akan akurasi analisis integritas. Selain itu, dapat dilihat bahwa peningkatan tekanan akan menyebabkan bejana tekan mengalami modus kegagalan akibat deformasi plastis, hal ini terjadi karena tekanan kerja menghasilkan tegangan yang lebih besar dari tegangan luluh material. FAD untuk studi parametrik ini ditampilkan pada Gambar 11. Dari studi parametrik dengan mevariasikan dimensi retak (Gambar 12) juga akan menyebabkan *assessment point* bergeser ke luar menuju daerah tidak aman. Bejana tekan akan mengalami kegagalan jika panjang retak,  $2c$ , menjadi 3,4 in dengan kedalaman menjadi 0,3 in.

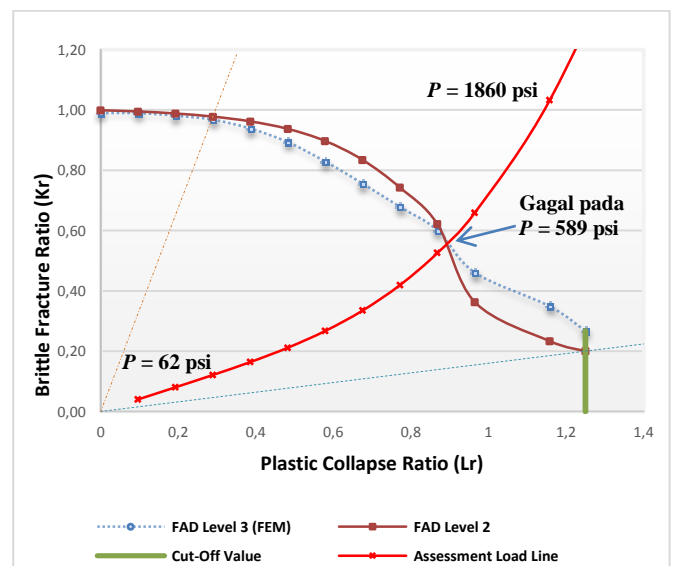
Dengan penggabungan kedua parameter retak ini, diperoleh hasil kondisi kritis terjadi pada rasio  $a/c = 0,18$ .

Hasil yang didapatkan ini sejalan dengan aturan yang terdapat pada Code API 579-1/ASME FFS-1 2007 Para 9.1.2.2 yang menyatakan bahwa standar referensi cacat yang diizinkan adalah 25 % dari ketebalan dan dengan panjang cacat 6 kali kedalamannya.

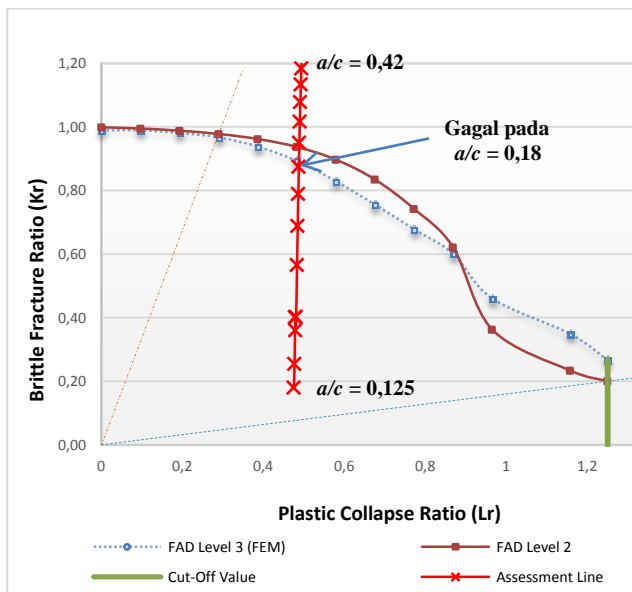
Dilihat dari mode kegagalan, berbeda dari kasus peningkatan tekanan internal, peningkatan ukuran cacat akan cenderung menyebabkan bejana tekan mengalami kegagalan patah getas, yang disebabkan nilai faktor intensitas tegangannya telah melewati ambang batas nilai ketangguhan material.



**Gambar 10.** Failure Assessment Diagram (FAD) Level 2 & 3 beserta *assessment point* hasil simulasi FEM.



**Gambar 11.** Failure Assessment Diagram (FAD) pengaruh peningkatan tekanan terhadap *assessment point* dengan metode elemen hingga



**Gambar 12.** Failure Assessment Diagram (FAD) pengaruh peningkatan dimensi retak,  $a/c$ , terhadap assessment point dengan metode elemen hingga

### Kesimpulan

Analisis integritas bejana tekan level 1, level 2 dan level 3 telah dilakukan untuk kasus retak internal pada bejana tekan beradius dalam 60 in., panjang 200 in., tebal 1 in. dengan beban tekanan internal. Dari hasil analisis, diperoleh kesimpulan sbb;

1. Analisis integritas berdasarkan level 1 menunjukkan bahwa kondisi retak berbentuk eliptik berukuran sumbu mayor 1,6 in dan sumbu minor 0,2 in., **tidak dapat diterima**. Dengan kata lain, bejana tidak layak beroperasi atau perlu dilakukan penurunan temperatur dan tekanan operasi (*derating*).
2. Sebaliknya, hasil analisis level 2 (prosedur sesuai *Code*) dan level 3 (metode elemen hingga) menghasilkan *Failure Assessment Diagram* (FAD) untuk bentuk retak sebagaimana dianalisis dan berdasarkan tipe material dan geometri sebagaimana dalam studi kasus. Berdasarkan FAD tersebut, kasus retak pada bejana ternyata dianggap masih **dapat diterima**, bertolak belakang dengan hasil analisis level 1. Hal ini sesuai dengan hasil pada umumnya, yaitu hasil analisis integritas level 1 pada umumnya memberikan hasil yang lebih konservatif dibandingkan hasil level 2.
3. Lebih lanjut, dengan membandingkan FAD level 3 dengan level 2, diperoleh hasil bahwa kurva FAD hasil simulasi elemen hingga (level 3) cenderung memiliki batas yang lebih konservatif, yaitu area aman yang lebih sempit dibandingkan FAD level 2, hingga harga *plastic collapse ratio*,  $L_r$ , sebesar 0,84. Untuk

$L_r$  yang lebih besar, level 3 menjadi lebih optimis dibandingkan dengan FAD level 2.

4. Dari studi parametrik, masing-masing terhadap tekanan internal,  $p$ , dan ukuran retak,  $a/c$ , diperoleh hasil tekanan kritis mulai gagal terjadi pada tekanan 589 psi., atau rasio ukuran retak 0,18.
5. Dari dua hasil studi parametrik terlihat bahwa peningkatan tekanan akan menyebabkan bejana tekan mengalami modulus kegagalan deformasi plastis, Sementara peningkatan ukuran cacat akan cenderung menyebabkan bejana tekan mengalami kegagalan patah getas.

### Saran

Analisis integritas bejana tekan dengan suatu kasus cacat retak telah dilakukan. Untuk kasus yang berbeda, diperlukan analisis serupa. Akan sangat bermanfaat jika analisis integritas level 3 dapat ditampilkan dalam suatu hubungan yang lebih general. Sehingga untuk kasus serupa namun dengan ukuran retak yang bervariasi, analisis yang melibatkan analisis elemen hingga tidak perlukan lagi. Hal ini dapat dilakukan dengan cara studi parametrik yang lebih ekstensif dengan mevariasikan berbagai parameter yang relevan, sehingga didapatkan suatu persamaan umum yang bisa digunakan untuk analisis integritas level 3 untuk berbagai kasus.

### Referensi

- Anderson, T.L, Fracture Mechanics Fundamentals and Applications, ed.2005, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- API 579-1/ASME FFS-1, June 5 2007, Fitness for Service, The American Society of Mechanical Engineers and American Petroleum Institute
- Cicero, S, V.Madrazo, L.A Carrascal & R.Cicero, Assessment of Notched Structural Components using Failure Assessment Diagrams and the Theory of Critical Distances, Elsevier Journal of Engineering Fracture Mechanics, Vol 78 2809-2825 (2011)
- Grabulov, Vencislav, Stojan Sedmak, Aleksandar Sedmak & Zijah Burzic, Structural Integrity Assessment of Pressure Vessels with Defect in Welded Joints, Scientific Technical Review, Vol. LVII, No.3-4 (2007)
- Hakimi, Abdelhadi El, Philippe Le Grogneq & Said Hariri, Numerical and Analytical Study of Severity of Cracks in Cylindrical and Spherical Shells, ScienceDirect Journal of Engineering Fracture Mechanics Vol. 75, pp1027-1044 (2007)
- Liu, P.F., B.J. Zhang & J.Y. Zeng, Finite Element

Analysis of Plastic Collapse and Crack Behaviour of Steel Pressure Vessels and Piping Using XFEM, Journal of Failure Analysis and Prevention, Vol. 12, pp 707-718 (2012)

Raju, I.S., and Newman, J.C., Stress Intensity Factors for Internal and External Surface Cracks in Cylindrical Vessels, Journal Pressure Vessel Technology, Vol. 104, (1982)

Tipple, C and G. Thorwald, Using the Failure Assessment Diagram with Fatigue Crack Growth to Determine Leak-Before-Rupture. Simulia Customer Conference (2012)