

## Analisis Distribusi Tegangan Pada Dinding Tangki Penyimpan Akibat Cacat Ketidakbulatan (*Out of roundness*)

Kasda

Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Subang

Jalan Arief Rachman Hakim No. 8 Subang

[kasdakasdoels@gmail.com](mailto:kasdakasdoels@gmail.com)

### Abstrak

Pada suatu kasus rekonstruksi tangki berkapasitas 3000 kL dengan rancangan atap kubah ditopang sendiri (*self-supported dome roof*), ditemukan cacat geometri dalam bentuk ketidakbulatan yang melebihi toleransi standar. Salah satu alternatif penanganan, yaitu perbaikan terhadap cacat, dianggap memakan waktu dan biaya yang tidak sedikit, dan dikhawatirkan justru akan menurunkan sifat mekanik material pelat akibat perlakuan panas yang berlebih. Sebagaimana disarankan dalam API 579 *Fitness for Service*, evaluasi yang lebih rinci dapat dilakukan untuk memperkirakan dampak dari cacat tersebut pada integritas tangki saat beroperasi. Untuk itu, analisis tegangan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak elemen hingga dilakukan, dengan tujuan memperkirakan dampak ketidaksempurnaan geometri terhadap integritas tangki. Evaluasi dilakukan dengan cara membandingkan tingkat tegangan tangki yang memiliki cacat geometri dengan geometri tangki sempurna. Analisis elemen hingga melibatkan pemodelan tangki dengan geometri yang tidak sempurna, yang diperoleh dari pengukuran geometri akurat menggunakan Theodolit T16 Wild terhadap 336 titik pada dinding tangki, dan dimodelkan dengan bantuan perangkat lunak CAD, untuk digunakan dalam analisis elemen hingga. Dengan beban utama tekanan hidrostatik, diperoleh hasil tegangan sirkumferensial 117 MPa, yang meskipun lebih tinggi dibandingkan tangki dengan geometri sempurna, namun tetap lebih rendah dibandingkan tegangan ijin material (137,9 MPa). Dari observasi radius akhir setelah pembebanan tekanan hidrostatik, diperoleh hasil deformasi yang menyebabkan geometri yang cenderung lebih bulat dibandingkan geometri sebelumnya, meskipun tetap masih tidak sempurna jika geometri tangki sempurna. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tangki dengan kondisi ketidakbulatan geometri sebagaimana terukur dinilai masih **aman** untuk dioperasikan secara normal sesuai rancangannya.

Kata kunci: *Storage tank*, cacat ketidakbulatan, analisis elemen hingga

### Pendahuluan

Dalam suatu kilang minyak, tangki penyimpanan (*storage tank*) berfungsi sebagai penyimpanan hasil proses pengilangan sebelum dikapalkan, atau pada kasus lain bisa digunakan sebagai penyimpanan bahan baku yang dipakai dalam proses pengilangan minyak. Dalam suatu kilang minyak, biasanya terdapat lebih dari satu tangki penyimpanan,

yang terhimpun dalam suatu ladang tangki, atau *tank farm*. Produk dari proses disimpan dalam tangki tersebut dengan menggunakan pompa hingga mencapai tinggi yang diijinkan, sementara pada saat lain, produk tersebut akan diekspor dengan dipompa keluar menggunakan pompa ke kapal tanker. Demi menjamin kelancaran proses transfer tersebut, dan menjaga agar tidak terjadi tekanan berlebih atau tekanan vakum, maka

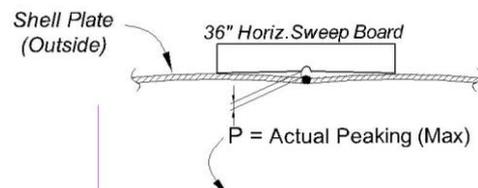
tangki dilengkapi dengan *breather valve* pada atapnya.

Tangki, di dalam fasilitas proses dan pengilangan minyak, dikategorisasikan sebagai peralatan statik, atau *static equipment*, karena pembebanan relatif konstan selama umur teknisnya. Untuk tangki semacam ini, perancangan dilakukan berdasarkan Standar API 650 *Welded Tanks for Oil Storage*[1], dengan beban utama adalah tekanan hidrostatik dan berat atap, jika relevan. Mode kegagalan yang biasanya dimonitor adalah korosi. Seiring dengan berjalannya waktu, korosi suatu tangki mengalami tingkat yang tidak dapat diterima, yang menyebabkan tebal pelat dinding tangki berkurang sampai pada tingkat yang dianggap tidak aman untuk dioperasikan. Salah satu kriteria yang dapat dipakai untuk mengevaluasi apakah tingkat korosi/penipisan pelat adalah API 579 *Fitness for Service (FFS)* dalam kategori *General Metal Loss*[2].

Pada suatu kasus di kilang minyak milik perusahaan migas nasional, diputuskan untuk merekonstruksi salah satu tangki yang berkapasitas 3000 kL, dengan rancangan atap kubah ditopang sendiri (*self-supported dome roof*). Rekonstruksi meliputi penggantian keseluruhan dinding tangki, pelat alas, dan atapnya. Sementara, fondasi beton dan instrumentasi dan peralatan seperti katup-katup tetap dipertahankan, dengan perbaikan kecil. Perbaikan dilakukan berdasarkan Standar API 653 *Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction*[3].

Selama fabrikasi tangki, ditemukan cacat geometri pada sambungan las antar pelat. Pada awalnya, disebutkan tipe cacat geometri adalah *peaking* dan *banding*. *Peaking* dan *Banding* adalah deviasi yang terjadi pada sambungan lasan, masing-masing arah vertikal dan horisontal. Gambar 1 menunjukkan ilustrasi pengukuran cacat *Peaking* berdasarkan Standar API 650. Dari inspeksi awal, diperoleh data cacat *Peaking* terbesar 21 mm, sementara besaran maksimum yang dibolehkan dalam Standar API 650/API 653 adalah 13 mm (1/2 inch).

Pembahasan untuk mengatasi kondisi ini sudah dilaksanakan antara pengelola kilang dengan kontraktor, dengan alternatif solusi: a) Perbaikan, dengan cara membongkar lasan dan penyambungan lasan kembali, b) Penggunaan *strongback*, yaitu semacam pemegang/*fixture*, secara permanen. Alternatif pertama akan memakan waktu dan biaya yang tidak sedikit, dan dikhawatirkan akan justru menurunkan sifat mekanik material pelat akibat perlakuan panas yang berlebih, sementara alternatif kedua memang akan memperbaiki cacat geometri, namun dengan memberikan beban tambahan pada pelat, yang tentu saja tidak diinginkan. Sebagai alternatif lain, sebagaimana disarankan dalam API 579, evaluasi yang lebih rinci dapat dilakukan untuk memperkirakan dampak dari cacat tersebut pada integritas tangki saat beroperasi. Untuk itu, analisis tegangan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak elemen hingga dilakukan, dengan tujuan memperkirakan dampak ketidaksempurnaan geometri terhadap integritas tangki. Evaluasi dilakukan dengan cara membandingkan tingkat tegangan tangki yang memiliki cacat geometri dengan geometri tangki sempurna.

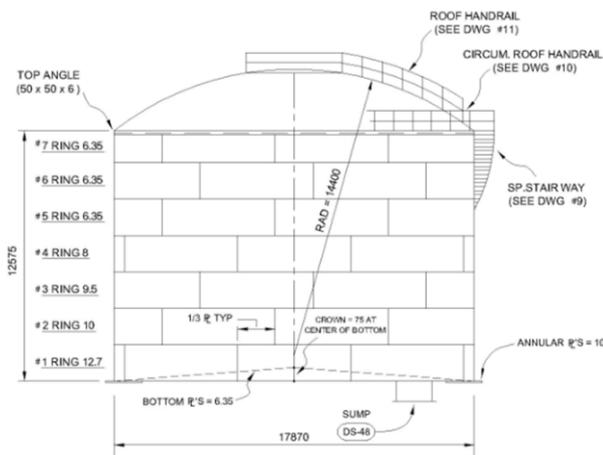


**Gambar 1** Ilustrasi pengukuran *peaking* berdasarkan API 650 [1]

## Data dan Informasi

Dari gambar rancangan Tangki 43T-101 [4], diperoleh data diameter tangki sebesar 17.870 mm, tinggi 12.575 mm *weld-to-weld*, dengan atap *self supported dome*. Perancangan tangki dilakukan berdasarkan API 650, dan rekonstruksi berdasarkan API 653. Tebal pelat dinding tangki sudah diganti dengan ketebalan yang lebih tinggi dari tebal tangki sebelumnya. Tangki terdiri dari 7 *ring/course* dengan tebal, berturut-turut dari

ring bawah ke atas: 12,7; 10; 9,5; 8; 6,35; 6,35;6,35mm, dari material ASTM A283C. Tebal tersebut, disebutkan dipilih lebih tinggi dibandingkan tebal pelat sebelum rekonstruksi. Dari API 650, diketahui bahwa Material A283 Grade C memiliki sifat Tegangan yang diijinkan (*Allowable Stress*) sebesar 137,9 MPa, [1]. Sementara data sifat mekanik lain diperoleh dari data generik ASTM, yaitu Kekuatan luluh (*Yield Strength*) sebesar 205 MPa, Kekuatan Tarik (*Tensile Strength*) terendah sebesar 380 MPa, Modulus Elastisitas 210 GPa, *elongation* 25%. Gambar 2 menunjukkan *General Plan* tangki yang dimaksud.



Gambar 2 Gambar keseluruhan tangki

**Metodologi Evaluasi**

Ketidaktepatan dalam proses fabrikasi menyebabkan terjadinya distorsi geometri dalam bentuk *out-of-roundness* (ketidakbulatan) pada geometri keseluruhan tangki atau pada daerah terbatas, dalam bentuk *peaking/banding*. Dari observasi lebih lanjut, disimpulkan bahwa cacat lebih dalam bentuk ketidakbulatan, oleh karena itu analisis dilakukan untuk melihat efek dari ketidakbulatan dengan menggunakan analisis elemen hingga.

Langkah awal dalam evaluasi adalah melakukan pengukuran yang lebih rinci terhadap ketidakbulatan dari keseluruhan tangki, dengan menggunakan *Theodolite T16 wild*. Berdasarkan hasil pengukuran,

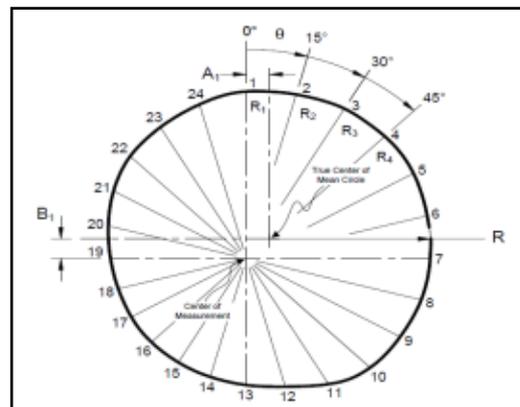
pemodelan geometri aktual yang mengandung cacat geometri ini dilakukan, sebagai *input* analisis elemen hingga. Efek ketidakbulatan ini dianalisis dengan membandingkan antara geometri yang mengandung cacat dengan tangki sempurna, yaitu tanpa ketidakbulatan. Untuk kedua kasus geometri tersebut, pembebanan dimodelkan untuk tekanan hidrostatik, gaya akibat berat ataptangki dan kemungkinan adanya kasus vakum akibat kegagalan pada *venting system/breather valve*. Analisis dilakukan membandingkan tegangan terhadap kekuatan material dalam bentuk tegangan ijin (*allowable stress*) dan tegangan luluh (*yield strength*).

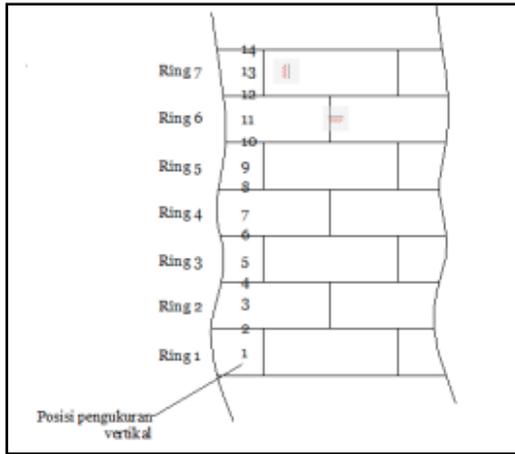
Analisis ini tidak memodelkan adanya tegangan sisa pada keseluruhan tangki, karena diasumsikan proses fabrikasi dan pengelasan telah memenuhi prosedur PQR, WPS dan inspeksi.

**Data Pengukuran Ketidakbulatan**

Prosedur pengukuran ketidakbulatan mengacu pada API 579, yaitu untuk mengukur posisi relatif sekeliling tangki dalam selang 15°, pada setiap ketinggian tertentu, seperti pada Gambar 3. Pengukuran dilakukan pada 14 posisi vertikal/ketinggian tangki, dan 24 titik di sekeliling tangki pada masing-masing posisi ketinggiannya, atau sebanyak 336 titik pengukuran.

Posisi titik hasil pengukuran ini, dipakai dalam rekonstruksi geometri secara digital sebagaimana dijelaskan dalam bagian berikut ini.

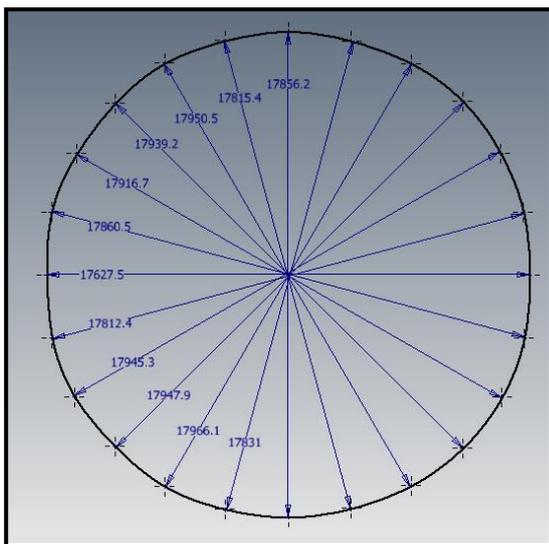




Gambar 3 Posisi pengukuran ketidakbulatan tangki

**Pemodelan Geometri**

Hasil pengukuran posisi diagonal tangki dilakukan hingga diperoleh koordinat titik-titik dinding tangki. Penyimpangan dari data hasil pengukuran terhadap geometri sempurna adalah dalam rentang 0,0 hingga 129,9 mm, relatif kecil jika dibandingkan dengan diameter tangki, yaitu 17.870 mm. Untuk memperlihatkan ketidakbulatan, maka Gambar 4 menunjukkan salah satu contoh hasil posisi pengukuran pada ring No. 6 yaitu di posisi vertikal ke-11, dengan penyimpangan yang diperbesar sebanyak 5 kali.



Gambar 4 Contoh hasil rekonstruksi geometri tangki pada posisi vertikal ke-11, menunjukkan beberapa diameter (skala pembesaran: 5).

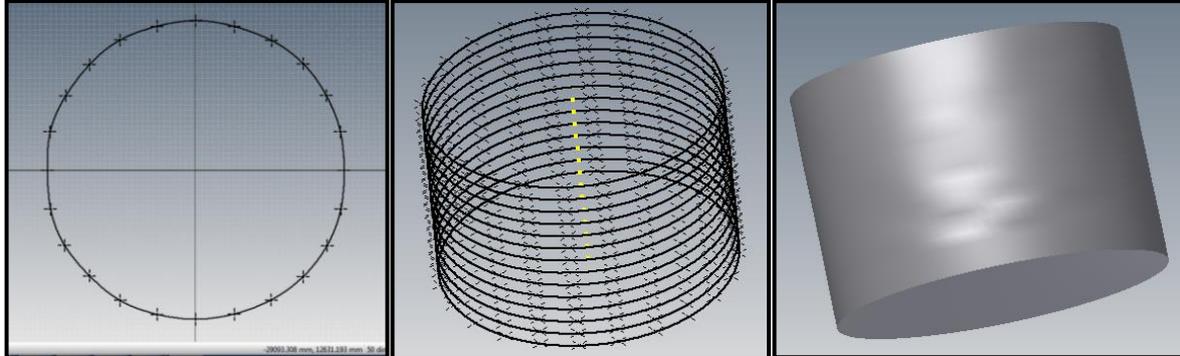
Selanjutnya, data koordinat tersebut di atas digunakan dalam rekonstruksi geometri menggunakan Autodesk Inventor 12. Input data parametrik di-impor menggunakan fasilitas “Import point” di perangkat lunak tsb, sebagai titik-titik dengan koordinat sesuai data aktual, yang kemudian dapat dihubungkan oleh garis spline sehingga membentuk lingkaran untuk suatu posisi vertikal tertentu, seperti pada Gambar 5a. Proses yang sama dilakukan untuk posisi vertikal/ketinggian lainnya, yang keseluruhan sebanyak 14 posisi ketinggian. Dengan menyatukan keseluruhan rekonstruksi masing-masing posisi ketinggian, maka diperoleh kumpulan titik sebagaimana terlihat pada Gambar 5b. Dengan menggunakan titik-titik tersebut, selanjutnya geometri surface dapat didefinisikan untuk berbagai ring tangki, sebagaimana terlihat pada Gambar 5c. Dari gambar tersebut, terlihat area dengan deviasi pelat yang paling besar, yang telah dimodelkan sedekat mungkin dengan kondisi aktual. Dalam pemodelan geometri, setiap ring sudah dimodelkan dalam surface yang berbeda, sehingga saat pemodelan elemen hingga masing-masing surface dapat dipakai untuk memodelkan pelat dengan ketebalan yang bervariasi sesuai dengan kondisi aktual.

**Pemodelan Elemen Hingga**

Analisis elemen hingga dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Ansys Workbench 13.0. Sifat material pelat dinding tangki dimodelkan sebagai material elastik –plastik biliner untuk memantau kemungkinan terjadinya deformasi plastis kegagalan akibat ketidakbulatan geometri tangki. Meshing dilakukan dengan memilih tipe elemen SHELL segiempat. Pemodelan elemen hingga dilakukan dalam sistem koordinat silindris, dengan sumbu-x untuk arah radial, sumbu-y untuk arah sirkumferensial, dan sumbu-z

untuk arah vertikal. Pembebanan didefinisikan sebagai: i) beban tekanan hidrostatik dengan input densitas fluida  $1000 \text{ kg/m}^3$ , bekerja pada permukaan dalam *surface*, ii) Beban atap dan struktur, sebesar

20 tonf bekerja secara merata pada bagian atas dinding tangki. Tumpuan tangki dimodelkan pada bagian bawah dinding sebagai kondisi batas translasi arah vertikal dan radial.



**Gambar 5** Proses pemodelan geometri tangki tak sempurna: a) titik pada posisi vertikal tertentu, b) rekonstruksi untuk seluruh posisi vertikal, c) hasil rekonstruksi *surface*

## Hasil dan Pembahasan

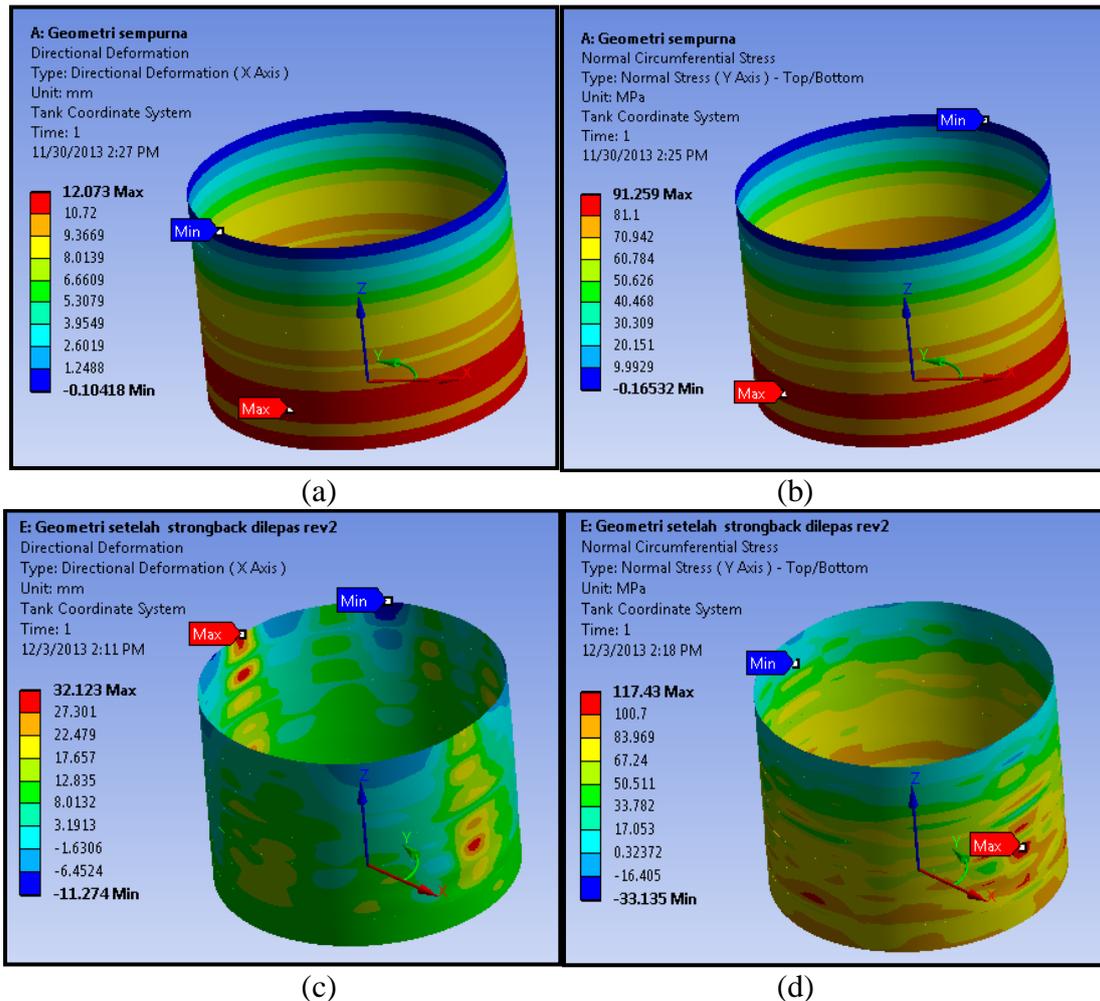
Pada kasus geometri bulat sempurna, sebagai pembanding, diperoleh hasil analisis distribusi perpindahan arah radial (Gambar 6a), dengan besaran maksimum pada *shell course* #2 akibat kombinasi tekanan termasuk terbesar, dan tebal pelat yang lebih rendah dibandingkan *shell course* terbawah. Bagian atas tangki memiliki besaran perpindahan terkecil, sebagai gabungan antara beban tekanan arah radial yang terkecil dan tekanan arah vertikal akibat atap. Sementara, tegangan arah sirkumferensial (*hoop stress*), seperti pada Gambar 6b, menunjukkan tegangan tertinggi sebesar 91,26 MPa pada lokasi yang sama dengan di atas, dengan penjelasan sama seperti di atas. Untuk validasi, pada posisi terbawah, tegangan sirkumferensial dapat dihitung menurut teori bejana berdinding tipis, sebesar 86,7 MPa. Sementara, hasil analisis elemen hingga adalah 85,7 MPa, galat sebesar 1,15%. Maka, pemodelan elemen hingga dengan strategi seperti dijelaskan di atas dapat diterima. Tegangan arah sirkumferensial sebesar 91,26 MPa tersebut masih lebih rendah dibandingkan tegangan ijin material ASTM A283 Grade C berdasarkan API 650, yaitu 137,9 MPa.

Sementara itu, untuk kasus tangki dengan ketidakbulatan sebagaimana terukur, sehingga tidak aksisimetrik, deformasi yang terjadi juga tidak aksisimetrik sebagaimana kasus geometri sempurna. Deformasi radial tertinggi terjadi ke arah luar sebesar 32 mm, sementara ke arah dalam sebesar 11 mm (Gambar 6c). Jika diamati, akibat pembebanan tekanan hidrostatik pada geometri taksempurna, tangki terdeformasi sedemikian sehingga radius akhircenderung menyebabkan geometri tangki mendekati lingkaran. Sebagaimana dapat dilihat di Tabel 1, deviasi setelah pembebanan (baris keempat) rata-rata lebih rendah dibandingkan dengan deviasi sebelum pembebanan, yaitu kondisi aktual (baris kedua).

Sementara itu, tegangan sirkumferensial meningkat, dengan tegangan tertinggi tercatat 117 MPa (Gambar 6d), naik sekitar 28% dibandingkan dengan kasus geometri sempurna. Meskipun demikian, tegangan tersebut masih lebih rendah dari tegangan ijin (137,9 MPa), sehingga dapat dikatakan bahwa tangki masih dalam kondisi aman. Lebih jauh, tegangan ijin tersebut di atas adalah didasarkan pada *Specified Minimum Yield Strength* sesuai standar, sementara berdasarkan *Mill Certificate*, spesifikasi material biasanya akan lebih tinggi,

sehingga menghasilkan kondisi yang lebih aman lagi meskipun dengan *safety factor* yang

tetap lebih rendah dibandingkan dengan geometri sempurna.



**Gambar 6** Hasil analisis elemen hingga: a) Distribusi deformasi radial untuk geometri sempurna, b) Distribusi tegangan sirkumferensial untuk geometri sempurna, c) Distribusi deformasi radial untuk geometri cacat, d) Distribusi tegangan sirkumferensial untuk geometri cacat

**Tabel 1** Perbandingan radius sebelum dan sesudah pembebanan

Posisi	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Radius aktual	8942,8	8914,2	8888,2	8948,0	8919,4	8971,4	8927,2	8935,0
Deviasi	7,8	-20,8	-46,8	13,0	-15,6	36,4	-7,8	0,0
Radius setelah pembebanan	8953,4	8928,8	8907,1	8954,5	8935,1	8979,2	8938,9	8944,2

Deviasi setelah pembebanan	7,6	-16,9	-38,6	8,8	-10,6	33,4	-6,8	-1,5
----------------------------	-----	-------	-------	-----	-------	------	------	------

## Kesimpulan dan Saran

Akibat cacat produksi, geometri tangki penyimpan mengalami ketidakbulatan, dengan variasi dibandingkan geometri sempurna hingga 13 cm. Analisis tegangan dengan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga dilakukan terhadap kasus dengan geometri yang tidak sempurna, untuk dibandingkan dengan geometri tangki yang sempurna. Pemodelan geometri dilakukan berdasarkan dengan hasil pengukuran geometri aktual tangki dengan menggunakan Theodolit T16 Wild. Hasil analisis elemen hingga menunjukkan bahwa tangki dengan ketidakbulatan geometri menghasilkan tegangan sirkumferensial tertinggi 28 % lebih tinggi daripada kasus geometri sempurna, meskipun lebih rendah dari tegangan ijin material, yaitu 137,9 MPa.

Dari observasi radius akhir akibat tekanan hidrostatik, diperoleh hasil yang cenderung lebih bulat dibandingkan geometri sebelumnya, atau dengan kata lain, ketidakbulatan akan terkoreksi dengan pembebanan tekanan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kondisi

ketidaksempurnaan geometri dinilai masih **aman** untuk dioperasikan secara normal sesuai rancangannya.

Meskipun demikian, kondisi cacat geometri ini tetap dipandang tidak seharusnya terjadi, maka disarankan untuk memperbaiki proses fabrikasi dan kontrol kualitas selama proses fabrikasi di masa depan.

## Daftar Pustaka

1. *API 650, Welded Oil Storage Tank*, ed. 11, American Petroleum Institute, 2007.
2. *API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service*, American Petroleum Institute - American Society of Mechanical Engineers, 2007
3. *API 653, Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction*, ed. 3, American Petroleum Institute, 2001.
4. *General Plan 17870 diam. × 12575 High Dome Roof Tank (Drawing No. 1, Rev. 1)*