

Analisis Beban Buckling Dan Perilaku Post-Buckling Tanki Separator Dua Fasa Pada Sistem Pembangkit Tenaga Geothermal

A Lubis¹, J Akmal¹, B Prabowo²

¹Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung

²Program Studi S2 Teknik Mesin, Universitas Lampung

Jalan Professor Soemantri Brojonegoro No.1 Bandar Lampung, 35145

E-mail: asnawi.lubis@eng.unila.ac.id

Abstrak

Tanki separator dua fasa merupakan komponen yang sangat penting pada sistem pembangkit daya geothermal. Fungsi utama separator pada sistem pembangkit daya geothermal adalah untuk menghilangkan liquid dari campuran fluida geothermal dengan cara memisahkan air yang membawa garam dan benda-benda padat yang dapat menyebabkan scalling dan korosi pada peralatan, terutama pada turbin. Separator berguna untuk memastikan bahwa uap yang masuk ke turbin untuk memutar turbin benar-benar kering dan bersih. Tanki separator umumnya berbentuk silinder (*cylindrical shell*). Ada dua type design separator yang biasa digunakan, yaitu separator cyclone vertikal dan separator silinder horizontal. Makalah ini menyajikan hasil analisis beban buckling dan perilaku post buckling separator cyclone vertikal dengan beban tekanan eksternal seragam. Dimensi separator ditentukan dengan metoda perancangan Lazalde-Crabtree. Diameter pipa inlet dua fasa D_t merupakan parameter utama dalam menentukan dimensi separator yang dapat ditentukan berdasarkan kapasitas separator serta kondisi desain tekanan dan temperatur. Beban buckling dan perilaku post buckling diperoleh dengan ANSYS post-processor hasil dari solusi nonlinear menggunakan metode arc-length. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beban buckling adalah 2,649 kali tekanan atmosfer.

Kata kunci: Limi point, metode arc-length, pembangkit daya geothermal, post buckling, separator dua fasa

PENDAHULUAN

Shell silinder dipakai secara luas dalam aplikasi engineering, khususnya pada struktur mekanik, seperti bejana tekan dan perpipaan pada industri proses, separator dua fasa pada pembangkit daya geothermal, dan lain-lain.

Separator merupakan komponen utama pada sistem pembangkit daya geothermal. Setelah melewati kepala sumur geothermal, fluida geothermal dua fasa dipisahkan pada separator dengan tekanan yang tergantung pada pressure drop antara kepala sumur dan separator. Jika stasiun separator dekat dengan sumur geothermal, pressure drop dapat diabaikan. Sebaliknya pressure drop harus diperhitungkan jika stasiun separator jauh dari sumur geothermal. Jika geothermal dari beberapa sumur menuju satu stasiun separator yang sama, maka sumur dengan tekanan terendah merupakan maksimum tekanan pemisahan (*separation pressure*). Separation pressure untuk geothermal dengan liquid-dominated adalah 4 bar (Minoli, et.al., 2017).

Pada umumnya separator berbentuk silinder dengan *dished end* berupa setengah ellip atau *hemispherical*. Separator biasanya dikonstruksi dengan silinder horizontal (*horizontal gravity separator*) atau silinder vertikal (*vertical cyclone separator*). Type separator vertikal lebih banyak dipakai dalam sistem pembangkit tenaga geothermal. Disisi lain, silinder vertikal lebih besar kemungkinan untuk mengalami buckling ketika tekanan dalam silinder menjadi vacuum seketika. Beban buckling adalah beban kritis yang akan menyebabkan shell silinder berdingding tipis menjadi tidak stabil, dan merupakan mode kegagalan struktur yang

harus dihindari.

Ring atau cylindrical bodies dengan annular cross-sections dapat mengalami collapse akibat dari kombinasi beban tekan (*compression*) seragam dan bending akibat external pressure jika kekakuan bending tidak memenuhi. Dan juga, struktur collapse bisa terjadi pada nilai stress di bawah tegangan yield dari material. Pressure dimana bentuk annular menjadi tidak stabil dan mulai buckle dan defleksi meningkat secara indefinit, disebut critical pressure (Timoshenko and Goodier, 1970).

Tekanan eksternal yang menyebabkan circular ring menjadi tidak stabil (buckle) menurut Timoshenko dan Goodier (1970) adalah:

$$P_{cr} = \frac{E}{4} \left(\frac{t}{r_0} \right)^3 \quad (1)$$

dimana, E adalah moduus elastisitas, t adalah tebal dinding silinder, dan r_0 adalah jari-jari luar silinder.

Persamaan (1) mendefinisikan nilai teoritis tekanan eksternal (diasumsikan seragam) yang diperlukan untuk menjaga ring dalam keseimbangan netral tanpa memperhatikan adanya sedikit deformasi. Ketika nilai kritis ini dilewati, struktur shell silinder akan collapse seketika.

Jika tekanan eksternal relative kecil, aksi momen pengembali (*restoring moment*) akan dominan terhadap aksi tekanan eksternal dan annular beam akan kembali ke posisi awal sebagai circular centerline. Di bawah kondisi ini, struktur dikatakan dalam keadaan stable (*in stable*

equilibrium). Tetapi, jika external pressure besar, radial displacements akan bertambah sampai structure collapses. Di bawah kondisi ini, struktur dikatakan unstable (*in unstable equilibrium*) dan gagal karena buckling.

Tegangan kritis (*critical stress*) dalam hubungannya dengan beban (tekanan eksternal) kritis diberikan oleh persamaan:

$$\sigma_{cr} = \frac{E}{4} \left(\frac{t}{r_0} \right)^2 \tag{2}$$

Persamaan (2) berlaku untuk material linear elastis sepanjang stress kritis akibat beban kritis tidak melewati batas tegangan proporsional material.

Perlakuan yang dijelaskan di atas untuk instabilitas ring berdinding tipis dapat juga berlaku untuk silinder panjang berdinding tipis (*thin-walled circular cylindrical shells* atau *thin-walled circular cylindrical tubes*). Dengan asumsi bahwa radial

stress dapat diabaikan dibandingkan dengan hoop dan axial stresses, diperoleh persamaan berikut untuk beban kritis dan tegangan kritis sebagai berikut:

$$P_{cr} = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{r_0} \right)^3 \tag{3}$$

$$\sigma_{cr} = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{r_0} \right)^2 \tag{4}$$

Dapat dilihat bahwa efek bi-axiality adalah meningkatkan tekanan kritis dan tegangan kritis dengan faktor $1/(1-\nu^2)$, dibandingkan dengan struktur ring berdinding tipis uni-axial. Hal ini disebabkan oleh karena biaxiality adalah konstrain terhadap strain longitudinal. Dua persamaan terakhir ini berlaku asalkan stress kritis tidak melewati batas tegangan proporsional material.

METODOLOGI

Beban buckling pada shell silinder vertikal yang digunakan sebagai separator pada sistim pembangkit tenaga geothermal dianalisis dengan metode elemen hingga menggunakan ANSYS APDL program (2018). Secara umum langkah-langkah analisis dengan ANSYS terdiri dari tiga tahap utama, yaitu (1) pre-processing, (2) solution, dan (3) post-processing.

1.1. Geometry modeling

Geometry separator yang dimodelkan adalah type separator cyclone vertical dengan bottom outlet, seperti ditunjukkan pada Gambar 1 (Santoso and Zarrouk, 2017). Ada tiga pendekatan yang biasa digunakan untuk menentukan dimensi separator: Lalalde-Crabtree (1984), Bangma (1961) dan spiral inlet guidelines (Munggang, 2012). Tekanan pemisahan (*Separation pressure*), dan laju aliran massa di dalam separator merupakan parameter utama dalam menentukan dimensi separator. Tabel 1 merupakan kecepatan yang direkomendasikan pada perancangan separator cyclone vertikal.

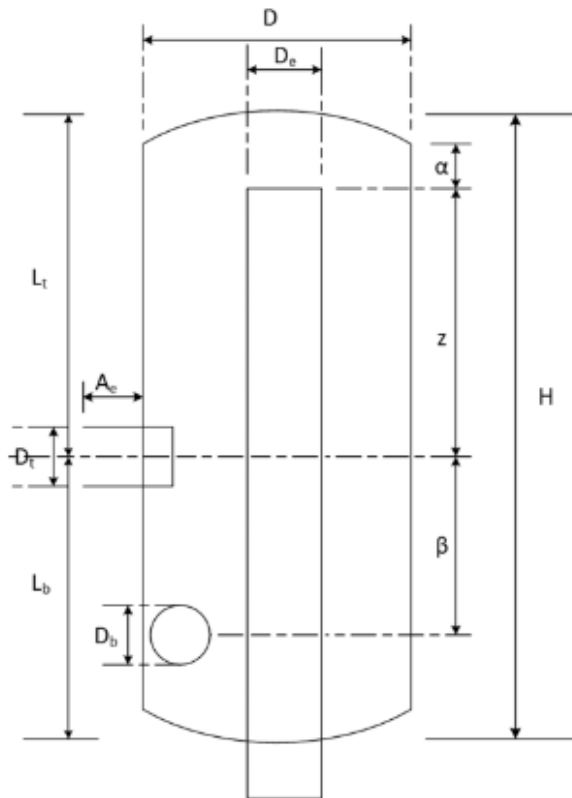
Tabel 1. Cyclone separator design guidelines (DiPippo, 2007)

Paramater kecepatan	Kecepatan
Maximum steam velocity at 2-phase inlet pipe	45 m/s
Recommended range of steam velocity at the 2-phase inlet pipe	25 – 40 m/s
Maximum upward annular steam velocity inside cyclone	4.5 m/s
Recommended range of upward annular steam velocity inside cyclone	2.5 – 4.0 m/s

Table 2 menunjukkan ringkasan design guidelines menurut Bangma, Lalalde-Crabtree dan spiral-inlet design untuk dimensi separator. Gambar 1 menunjukkan sketsa sebuah separator cyclone vertikal.

Tabel 2. Petunjuk perancangan seprator vertikal (Zarrouk and Purnanto, 2014)

Parameter	Bangma Design	Lalalde-Crabtree Design	Spiral-inlet design
D	3 D _t	3.3 D _t	2.95 D _t
D _c	0.8 D _t	1 D _t	1 D _t
D _b	1 D _t	1 D _t	0.7 D _t
α	3.25 D _t	0.15 D _t	0.28 D _t
β	3 D _t	3.5 D _t	3.2 D _t
Z	3 D _t	5.5 D _t	5.8 D _t
L _T	7 D _t	6.475 D _t	6.8 D _t
L _B	4.5 D _t	4.975 D _t	4.9 D _t



Gambar 1. Sketsa separator vertikal pada pembangkit tenaga geotermal

Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa diameter pipa inlet aliran 2-phase D_t merupakan parameter tunggal untuk menentukan dimensi lainnya dari sebuah separator vertikal. Diameter ini ditentukan dari luas penampang inlet aliran 2-phase, sedangkan luas penampang inlet aliran 2-phase ditentukan dari laju aliran volume seperti persamaan di bawah ini:

$$A = \frac{Q_{vs}}{v_t} \tag{5}$$

$$D_t = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \tag{6}$$

Separator dirancang mempunyai kapasitas 40 ton/h (88 kips/h) untuk steam dan 4 ton/h (9 kips/h) untuk air panas. Design pressure dan temperature masing-masing adalah 1 MPa dan 200°C. Dari Tabel Uap superpanas (text book Termodinamika Teknik), massa jenis steam pada tekanan 1 MPa dan temperature 200°C adalah 4.8539 kg/m³. Dengan demikian laju aliran volume uap pada pipa inlet 2-phase adalah:

$$Q_{vs} = \frac{40000 \text{ kg/jam}}{4.8539 \text{ kg/m}^3} = 8240.8 \text{ m}^3/\text{jam} = 2.289 \text{ m}^3/\text{s}$$

Dengan mengambil kecepatan aliran $v_t = 30 \text{ m/s}$ dari Tabel 1 (DiPippo, 2012), maka luas penampang pipa inlet

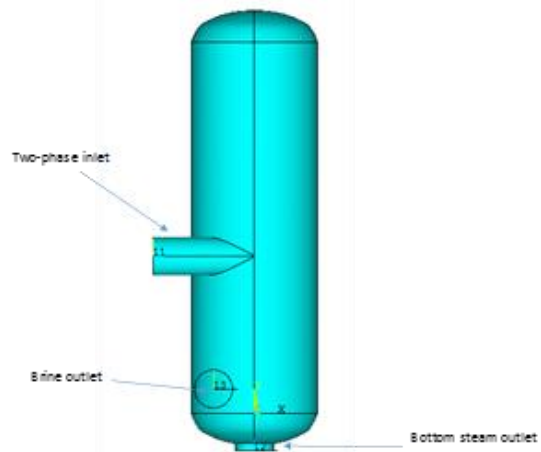
dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (5)

$$A = \frac{2.289 \text{ m}^3/\text{s}}{30 \text{ m/s}} = 0.0763 \text{ m}^2$$

Selanjutnya diameter pipa inlet dihitung dengan persamaan (6):

$$D_t = \sqrt{\frac{4(0.0763 \text{ m}^2)}{\pi}} = 0.312 \text{ m} = 312 \text{ mm}$$

Selanjutnya dengan menggunakan metode perancangan Lalalde-Crabtree (Tabel 2), typical geometri separator yang dimodelkan ditunjukkan pada Gambar 2 di bawah ini:



Gambar 2. Pemodelan geometri separator

1.2. Material Properties

Material untuk separator yang dipilih adalah SA-106 Gr.B dengan design (allowable) stress sebesar 14400 psi. Tebal dinding separator dihitung menggunakan persamaan untuk shell silinder dengan beban internal pressure (ASME Boiler and PV Code Section VIII Div.1, paragraf UG.27):

$$t = \frac{pD_t}{2SE - 1.2p}, \text{ berdasarkan diameter dalam} \tag{7}$$

$$t = \frac{pD_o}{2SE + 0.8p}, \text{ berdasarkan diameter luar} \tag{8}$$

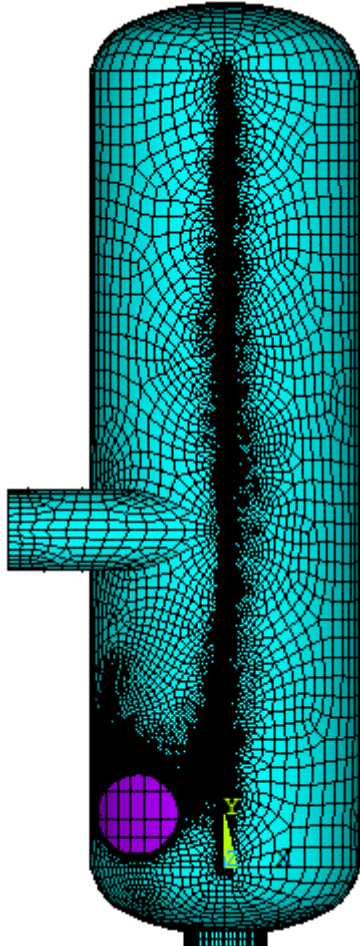
Untuk tekanan 1 MPa (145.038 psi), dan diameter luar 3.3 Dt (menggunakan metode perancangan Lalalde-Crabtree), tebal dinding yang diperlukan (belum termasuk corrosion allowance) adalah:

$$t = \frac{(145.038 \text{ psi})(40.535 \text{ in})}{2(14400 \text{ psi}) + 0.8(145.038 \text{ psi})} = 0.203 \text{ in}$$

Untuk corrosion allowance CA = 0.125 in, maka tebal separator adalah 0.328 in (8.33 mm)

1.3. Element Type dan Meshing

Untuk studi beban buckling pada penelitian ini digunakan type elemen SHELL281 dari ANSYS element library. Elemen ini mempunyai 8 node dengan 6 derajat kebebasan (6 DOF) pada setiap node, yaity translasi pada arah sumbu x, y, dan z, serta rotasi terhadap sumbu x, y, dan z. Typical finite element modeling ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Typical model elemen hingga sebuah separator pada pembangkit tenaga geothermal

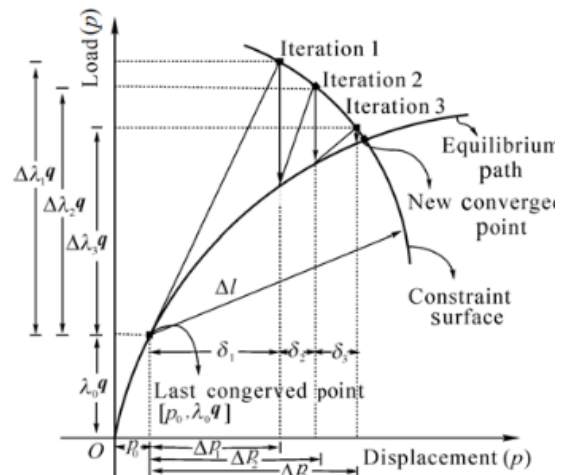
1.4. Solusi Nonlinear

Sebelum running solution (ANSYS SOLVE command), terlebih dahulu diberikan kondisi batas dan pembebanan pada model

Kondisi batas (*boundary conditions*) yang diterapkan pada pemodelan ini adalah sebagai simulasi dari leg support untuk silinder vertical. Sedangkan beban yang bekerja adalah berat separator dan tekanan external sebesar 1 atm (separator vacuum).

Beban buckling dan juga perilaku post-buckling diperoleh dengan solusi ANSYS nonlinear dengan metode arc-length. Interpretasi geometric dari metode arc-length untuk solusi nonlinear telah dijelaskan oleh Fafard and Massicotte (1993). Ada dua versi metode arc-length, yaitu metode Crisfield dan metode Ramm. Banyak peneliti menemukan bahwa kedua metode ini paling efisien untuk analisis buckling di dekat limit point. Perbaikan terhadap

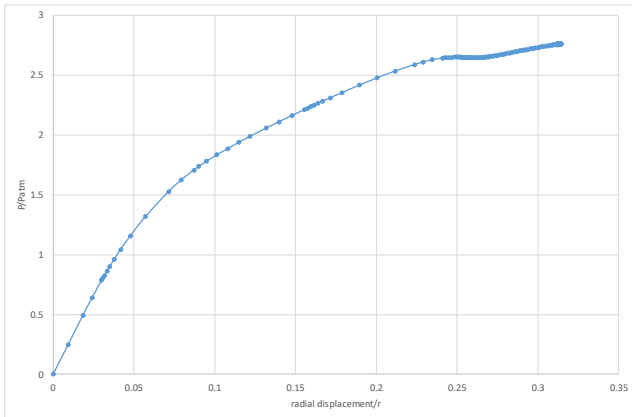
kedua metode ini yang disebut Modifikasi Crisfield-Ramm telah diusulkan oleh Fafard and Massicotte (1993). Perkembangan metode arc-length pada tahun 1980an dan 1990an telah dibahas secara detail oleh Bashir-Ahmad dan Xiao-zu (2014). Gambar 4 menunjukkan prosedur iteratif dengan metode arc-length untuk analisis elemen hingga hingga nonlinear



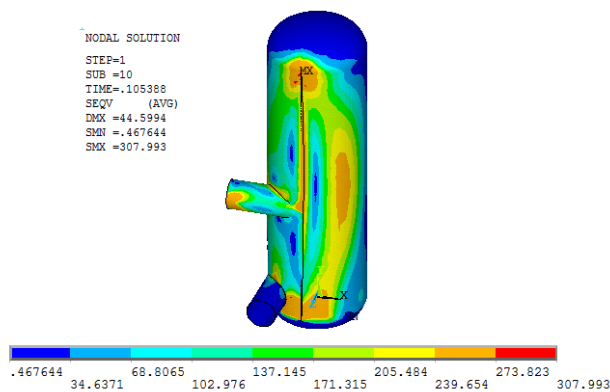
Gambar 4. Metode arc-length untuk analisis nonlinear

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 5 menunjukkan kurva beban-radial displacement salah satu node dengan displacement terbesar. Ada tiga point yang menjadi perhatian utama pada kurva ini, yaitu tekanan eksternal 1 atm, tekanan eksternal untuk limit point (beban buckling) dan tekanan eksternal untuk collapse (limit load). Dari Gambar 5 dapat dilihat bahwa struktur separator tidak mengalami buckling pada tekanan eksternal 1 atm. Ini menunjukkan bahwa dinding separator cukup tebal untuk mencegah kegagalan buckling ketika vacuum. Tebal dinding yang digunakan ditentukan berdasarkan tekanan pemisahan (*separation pressure*), dan ditambah dengan allowance untuk korosi sesuai dengan ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Divisi 1 (ASME, 2017). Gambar 6 menunjukkan plot contour stress pada tekanan external 1 atm dengan maksimum stress 1.14 kali tegangan luluh material.

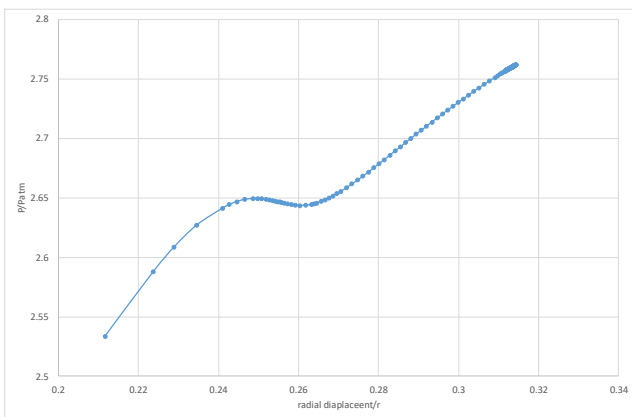


Gambar 5. Kurva beban (tekanan eksternal) vs. radial displacement



Gambar 6. Stress contour plot pada tekanan eksternal 1 atm

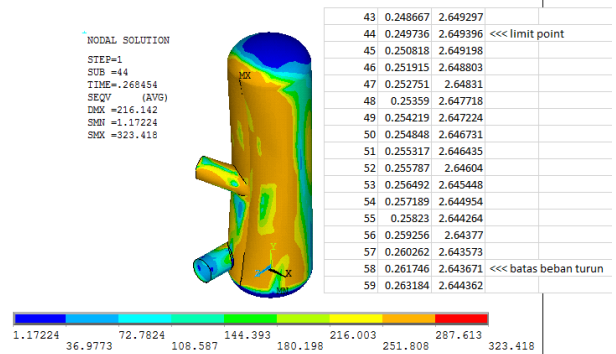
Hasil solusi nonlinear menunjukkan bahwa beban buckling (limit point) adalah 2.649 atm seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Beban buckling adalah beban tertinggi yang kemudian turun dengan radial displacement yang terus bertambah. Gambar 7 menunjukkan bahwa setelah limit point, beban kemudian turun sampai dengan 2.643 atm, kemudian naik lagi sampai struktur collapse pada tekanan eksternal 2.762 atm.



Gambar 7. Kurva tekanan eksternal vs. radial displacement menunjukkan limit point pada $p_{ext} = 2.649$ atm

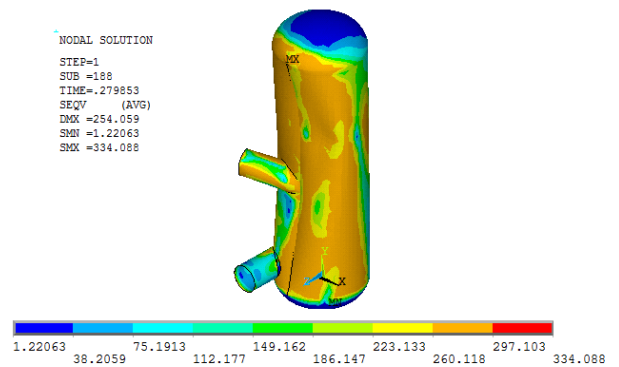
Gambar 8 menunjukkan stress contour plot pada saat tekanan eksternal mencapai limit point. Dapat dilihat bahwa struktur separator mengalami buckling sepanjang dinding

pada garis yang melalui interseksi pipa inlet dua fasa dengan main shell. Pada Gambar 8 juga dapat dilihat bahwa maksimum stress terjadi pada bagian shell sepanjang garis ini dengan nilai 1.20 kali tegangan luluh material.



Gambar 8. Keadaan stress pada limit point

Gambar 9 menunjukkan contour stress plot pada kondisi limit load (sebelum collapse). Limit load merupakan beban terakhir yang konvergen dari solusi nonlinear. Maksimum stress yang terjadi pada kondisi limit load adalah 1.237 kali tegangan luluh material.



Gambar 9. Keadaan stress pada kondisi limit load

KESIMPULAN

Beban buckling dan perilaku postbuckling struktur tanki separator dua fasa diperoleh dengan analisis nonlinear menggunakan opsi nonlinear arc-length dari ANSYS nonlinear capability. Solusi nonlinear menunjukkan bahwa struktur separator yang dirancang dengan metode Lazalde-Crabtree tidak mengalami buckling pada tekanan eksternal 1 atm. Beban buckling (limit point) yang terdeteksi adalah 2.649 atm. Setelah mencapai limit point, beban turun sampai dengan 2.643 atm untuk kemudian naik lagi hingga struktur collapse pada tekanan 2.762 atm.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Minoli, F., Snaidero, M., and Frassinetty, M., (2017), Selection criteria of optimal separation pressure of liquid dominated geothermal resources. IV International Seminar on URC Power Systems, 13 – 15 September 2017, Milano, Itali.

[2] Timoshenko, S.P., and Goodier, J.N., (1970), Theory of Elastic Stability. McGraw-Hill Book Co., New York.

[3] ANSYS R18.1, 2018, ANSYS Inc., N.J. USA.

- [4] Santoso, Y.A., dan Zarrouk, S.J., (2017), Geothermal Steam Water Separation Sizing for Optimum Powerplant Cost. Proceeding 39th New Zealand Geothermal Workshop, 22 - 24 November, Rotorua, New Zealand.
- [5] Lazalde-Craptree, H., (1984), Design approach of steam-water separator and steam sryers for geothermal application. Geothermal Resources Council Bulletin, September, pp. 11 – 20.
- [6] Bangma, P., (1961), The development and performance of a steam-water separator for use on geothermal bores. Proceeding of the U.N. Conference on New Sources of energy, Rome, vol.3 (Issue G/13), pp. 60 – 77.
- [7] Zarrouk, S.J., and Purnanto, M.H., (2014), Geothermal steam-water separators: design Overview. Geothermic, Vol.53, pp. 236 – 254.
- [8] DiPippo, R., (2015), Geothermal Power Plants, 4th Edition. Elsevier.
- [9] ASME Boiler and Pressre Vessel Code, Section VII, Division 1, (2017), ASME, New York.
- [10] Fafard, M., and Massicotte, B., (1993), Geometrical Interpretaion of the Arc-Length Methods. Computers and Structures, Vol. 46 No.4, pp. 603 – 615.
- [11] Bashir-Ahmad, M., and Xiao-zu. S., 2004, Arc-length technique for Nonlinear Finite element Analysis. Journal of Zhajiag University Science, Vol.5 No.5, pp. 618 – 628.