

Analisis *Limit Load* dengan *Finite Element Methode* pada Desain Separator Dua Fasa Menurut Lazalde-Crabtree

Bagas Prabowo¹, Asnawi Lubis², Jamiatul Akmal³, Atik Pramono⁴

¹ Perawatan Alat Berat, Politeknik Tunas Garuda, Lampung, Indonesia

^{2,3} Teknik Mesin, Universitas Lampung, Lampung, Indonesia

⁴ Teknologi Rekayasa Mesin Pertanian, Politeknik Tunas Garuda, Lampung, Indonesia
bagasprabw@gmail.com

Abstract

This study analyzes the limit load of a two-phase separator design based on the Lazalde-Crabtree method using the Finite Element Method (FEM). As a type of pressure vessel, a two-phase separator is highly susceptible to structural failure due to internal pressure. The analysis includes geometric modelling of a Bottom Outlet Cyclone (BOC) separator, dimension determination based on the Lazalde-Crabtree approach, application of SA-106 Gr.B material properties, and nonlinear loading analysis using ANSYS Mechanical APDL. The results indicate that the elastic limit of the separator structure occurs at an internal pressure of 1.283 MPa (0.947 P_D), while the Limit Load is reached at 1.734 MPa (1.280 P_D). The study also reveals that structural failure occurs at the separator inlet, suggesting that additional reinforcement is required in this area to ensure safe operation. These findings provide essential evaluation insights for the fabrication of two-phase separators in geothermal power plant applications.

Keyword: Two Phase Separator, Limit Load, Finite Element Methode, Pressure Vessel.

Abstrak

Penelitian ini menganalisis limit load pada desain separator dua fasa berdasarkan metode Lazalde-Crabtree menggunakan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*/FEM). Separator dua fasa sebagai salah satu jenis bejana tekan sangat rentan mengalami kegagalan struktur akibat pengaruh tekanan internal. Studi dilakukan melalui pemodelan geometri separator tipe Bottom Outlet Cyclone (BOC), penentuan dimensi berdasarkan pendekatan Lazalde-Crabtree, penerapan material SA-106 Gr.B, serta analisis pembebanan nonlinier menggunakan ANSYS Mechanical APDL. Hasil penelitian menunjukkan bahwa batas elastis struktur separator terjadi pada tekanan 1,283 MPa (0,947 P_D), sedangkan *Limit Load* tercapai pada tekanan 1,734 MPa (1,280 P_D). Analisis juga mengungkap bahwa kegagalan struktur terjadi pada bagian inlet separator, sehingga diperlukan perkuatan khusus pada area tersebut untuk meningkatkan keamanan desain. Temuan ini memberikan dasar evaluasi penting untuk fabrikasi separator dua fasa pada aplikasi pembangkit listrik tenaga panas bumi.

Kata Kunci: Separator Dua Fasa, *Limit Load*, Metode Elemen Hingga, Bejana Tekan

1. PENDAHULUAN

Silinder berdinding tipis sangat rentan akan ketidaksempurnaan hal tersebut dikarenakan mengalami berbagai macam pembebanan. Ketidakpastian struktur berdinding tipis di dunia nyata tidak dapat dihindari sehingga sangat berpengaruh dalam pengaruh kapasitas daya dukung strukturnya. Salah satu contoh aplikasi dinding tipis adalah

separator silinder dua fasa. Sehingga separator sangat rentan untuk mengalami kegagalan struktur. [1]

Separator merupakan salah satu jenis bejana tekan. Bejana tekan sendiri merupakan suatu bejana yang digunakan dalam penyimpanan fluida bertekanan [2]. Metode awal pemisahan antara fasa gas dengan fasa cair adalah dengan cara melewati campuran tersebut ke dalam tabung besar, yang disebut knock out drum. Kemudian memberikan tekanan pada fluida tersebut sehingga fasa gas dengan densitas yang kurang akan naik dan fasa cair yang memiliki densitas yang lebih padat akan turun ke dasar drum [3]. Fluida yang disimpan pada bejana tekan dapat mengalami perubahan kondisi saat berada di dalam bejana tersebut. Perubahan kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh perbedaan tekanan di dalam bejana dan di luar bejana. Akibat dari perbedaan kondisi tersebut mengakibatkan bejana tekan sangat rentan terhadap kegagalan struktur yang berupa kebocoran pada bejana tekan. Kebocoran tersebut dapat mengakibatkan ledakan akibat fluida yang ada di dalam bejana tekan tersebut [4].

Ada tiga metode perancangan separator yang biasa digunakan untuk menentukan dimensi dan geometri separator vertikal, yaitu metode Lazalde-Crabtree, metode Bangma, dan metode Spiral-inlet. Pada desain konstruksi dari ketiga metode tersebut secara garis besar berbeda pada konstruksi inlet dua fasa pada separator. Ketiga metode tersebut merupakan metode yang digunakan untuk mendapatkan efisiensi pemisahan secara maksimum. Namun pada ketiga metode tersebut tidak melihat ataupun mempertimbangan stress yang terjadi pada desain separator tersebut. Sehingga pada penelitian ini membahas tentang stress yang terjadi pada salah satu desain separator yaitu desain separator berdasarkan pada metode Lazalde-Crabtree. Stress yang dimaksud adalah limit load akibat internal pressure yang mampu ditahan metode desain tersebut dan maksimum stress yang terjadi pada separator dengan menggunakan metode elemen hingga.

Berbagai metode perancangan separator seperti metode Lazalde-Crabtree, Bangma, dan Spiral-inlet telah banyak digunakan untuk memperoleh efisiensi pemisahan dua fasa yang optimal. Namun, metode-metode tersebut pada umumnya dikembangkan dengan fokus utama pada kinerja proses pemisahan fluida, tanpa mempertimbangkan secara mendalam respon struktural separator sebagai bejana tekan ber dinding tipis. Hingga saat ini, kajian yang secara khusus mengevaluasi limit load akibat tekanan internal serta distribusi tegangan maksimum pada desain separator berdasarkan metode Lazalde-Crabtree masih sangat terbatas. Oleh karena itu, pada penelitian ini membahas analisis ketahanan struktural separator dua fasa yang dirancang menggunakan metode Lazalde-Crabtree, khususnya terhadap pengaruh tekanan internal.

2. METODE PENELITIAN

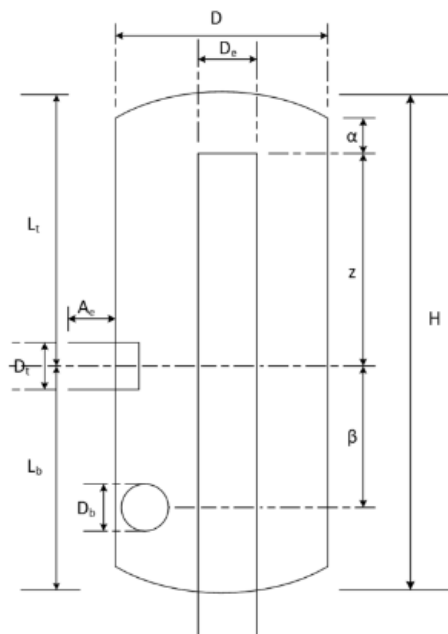
Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan Metode Elemen Hingga (Finite Element Method/FEM) untuk menganalisis limit load pada desain separator dua fasa berdasarkan desain menurut Lazalde-Crabtree. Analisis numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS Mechanical APDL dengan tahapan utama meliputi pemodelan geometri, penentuan properti material, penerapan kondisi batas dan pembebanan, serta analisis nonlinier.

Geometri separator dimodelkan berdasarkan dimensi hasil perancangan desain menurut Lazalde-Crabtree. Desain kapasitas separator dua fasa pada penelitian ini berdasarkan pada data dari PGE Ulu Belu unit 3 dan 4 yang ada di Lampung dengan kapasitas uap maximum adalah 375,270 ton/h. Separator didesain untuk mampu menahan tekanan sebesar 0,97 MPa (140 psi g) pada temperature 195°C (383°F), dengan material

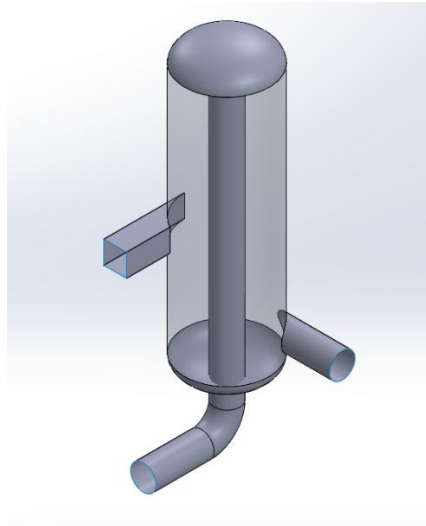
SA-106 Gr.B. Ketebalan dinding ditentukan sesuai dengan ketentuan ASME Section VIII Division 1. Adapun geometri desain ditunjukkan seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Dimensi Desain Separator

Parameter	Lazalde-Crabtree Design	
	(mm)	
D	$3,3 D_t$	2907,31
D_c	$1 D_t$	881,00
D_b	$1 D_t$	881,00
α	$0,15 D_t$	132,15
β	$3,5 D_t$	3083,51
Z	$5,5 D_t$	4845,52
L_T	$6,475 D_t$	5704,50
L_B	$4,975 D_t$	4382,99



Gambar 1. Dimensi Separator Dua Fasa



Gambar 2. Desain Separator Dua Fasa Lazalde-Crabtree

Pemilihan tipe elemen menggunakan SHELL281, dikarenakan sifat dari elemen tersebut sesuai untuk struktur berdinding tipis dan Kondisi batas yang diterapkan berupa fixed support pada bagian inlet, outlet, dan brine outlet, sedangkan bagian bawah shell dibatasi sebagai simulasi leg support dengan pembatasan perpindahan arah sumbu vertikal.

Pada tahap pembebanan diberikan berupa tekanan internal yang meningkat secara bertahap (ramped loading) hingga mencapai kondisi kegagalan numerik. Analisis dilakukan secara nonlinier menggunakan algoritma Newton–Raphson. Penentuan nilai limit load dilakukan melalui analisis hubungan antara tekanan internal dan perpindahan radial menggunakan Time History Postprocessor (POST26).

3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Analisis tegangan dengan menggunakan Time History Postprocessor (POST26) pada ANSYS Mechanical APDL adalah untuk mendapatkan nilai limit load pada desain separator dua fasa menurut Lazalde-Crabtree. Adapun nilai Limit Load pada desain separator dua fasa pada ketiga metode desain tersebut berupa sebuah perbandingan antara P dan P_D .

Hasil analisis limit load yang didapat dengan menggunakan Time History Postprocessor (POST26) pada desain separator dua fasa menurut Lazalde-Crabtree adalah sebagai berikut.

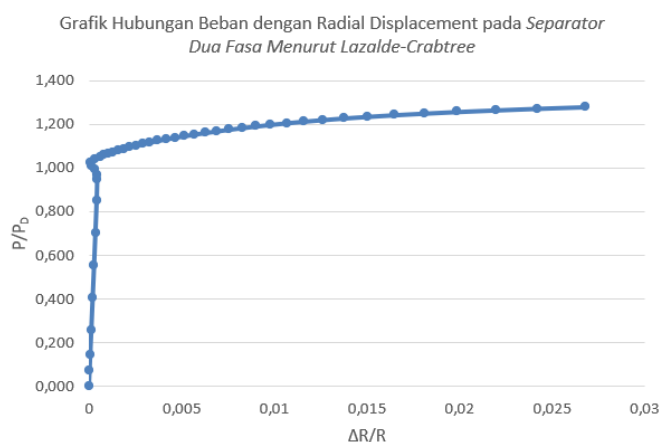
Tabel 2. Hasil Analisis *Limit Load*

No	P (MPa)	ΔR (mm)	$\frac{P}{P_D}$	$\frac{\Delta R}{R}$
1	0,000	0,000	0,000	0,00
2	0,100	0,055	0,074	$3,760 \times 10^{-05}$
3	0,200	0,109	0,148	$7,520 \times 10^{-05}$

4	0,350	0,191	0,258	$1,316 \times 10^{-04}$
5	0,550	0,300	0,406	$2,064 \times 10^{-04}$
6	0,750	0,409	0,554	$2,814 \times 10^{-04}$
7	0,950	0,511	0,701	$3,516 \times 10^{-04}$
8	1,150	0,612	0,849	$4,211 \times 10^{-04}$
9	1,283	0,653	0,947	$4,491 \times 10^{-04}$
10	1,314	0,626	0,970	$4,304 \times 10^{-04}$
11	1,345	0,480	0,992	$3,303 \times 10^{-04}$
12	1,369	0,237	1,011	$1,631 \times 10^{-04}$
13	1,391	0,093	1,026	$6,421 \times 10^{-05}$
14	1,408	0,458	1,039	$3,151 \times 10^{-04}$
15	1,424	0,874	1,051	$6,013 \times 10^{-04}$
16	1,434	1,174	1,058	$8,073 \times 10^{-04}$
17	1,444	1,506	1,066	$1,036 \times 10^{-03}$
18	1,454	1,874	1,073	$1,289 \times 10^{-03}$
19	1,464	2,276	1,081	$1,565 \times 10^{-03}$
20	1,474	2,709	1,088	$1,864 \times 10^{-03}$
21	1,484	3,174	1,095	$2,183 \times 10^{-03}$
22	1,494	3,668	1,103	$2,523 \times 10^{-03}$
23	1,504	4,194	1,110	$2,885 \times 10^{-03}$
24	1,514	4,759	1,117	$3,274 \times 10^{-03}$
25	1,524	5,366	1,125	$3,691 \times 10^{-03}$
26	1,534	6,033	1,132	$4,150 \times 10^{-03}$
27	1,544	6,737	1,140	$4,634 \times 10^{-03}$
28	1,554	7,496	1,147	$5,156 \times 10^{-03}$
29	1,564	8,295	1,154	$5,706 \times 10^{-03}$

30	1,574	9,154	1,162	$6,297 \times 10^{-03}$
31	1,584	10,050	1,169	$6,914 \times 10^{-03}$
32	1,594	11,014	1,177	$7,577 \times 10^{-03}$
33	1,604	12,018	1,184	$8,267 \times 10^{-03}$
34	1,614	13,109	1,191	$9,018 \times 10^{-03}$
35	1,624	14,254	1,199	$9,806 \times 10^{-03}$
36	1,634	15,515	1,206	$1,067 \times 10^{-02}$
37	1,644	16,864	1,213	$1,160 \times 10^{-02}$
38	1,654	18,382	1,221	$1,265 \times 10^{-02}$
39	1,664	20,018	1,228	$1,377 \times 10^{-02}$
40	1,674	21,899	1,236	$1,506 \times 10^{-02}$
41	1,684	23,942	1,243	$1,647 \times 10^{-02}$
42	1,694	26,319	1,250	$1,811 \times 10^{-02}$
43	1,704	28,903	1,258	$1,988 \times 10^{-02}$
44	1,714	31,922	1,265	$2,196 \times 10^{-02}$
45	1,724	35,210	1,272	$2,422 \times 10^{-02}$
46	1,734	39,005	1,280	$2,683 \times 10^{-02}$
47	3,000	9999 (Error)		

Berdasarkan pada Tabel diatas didapatkan grafik hubungan beban dengan Radial Displacement.

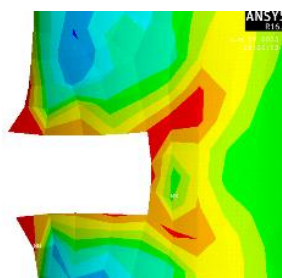


Gambar 3. Grafik Hubungan Beban dengan Radial Displacement

Dari hasil analisis menggunakan metode elemen hingga didapatkan hasil pada awal pembebanan terjadi perpindahan radial yang relatif linier seiring dengan bertambahnya tekanan pada separator tersebut. Batas elastis pada desain separator dua fasa menurut Lazalde-Crabtree berada pada tegangan 1,283 MPa (0,947 P_D). Setelah tekanan tersebut terlampaui separator dua fasa memasuki fase plastis yang ditandai dengan peningkatan perpindahan radial yang tidak lagi linier terhadap kenaikan tekanan. Perilaku ini sesuai dengan teori plastic collapse pada bejana tekan berdinding tipis, di mana redistribusi tegangan terjadi akibat terbentuknya zona plastis lokal [2], [9]

Limit load merepresentasikan kondisi di mana struktur tidak lagi mampu menahan beban tambahan tanpa mengalami deformasi permanen yang signifikan. Limit load yang terjadi pada desain separator dua fasa dengan desain menurut Lazalde-Crabtree adalah 1,734 MPa (1,280 P_D). Nilai tersebut menunjukkan bahwa kapasitas maksimum struktur dalam menahan tekanan internal yang terjadi pada separator sebelum akhirnya mengalami ketidakstabilan struktur.

Pada hasil simulasi menunjukkan bahwa letak dari kegagalan struktur yang terjadi pada desain separator dua fasa menurut Lazalde-Crabtree adalah berada pada Inlet Separator seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Konsentrasi tegangan yang tinggi pada area inlet disebabkan oleh adanya perubahan geometri secara mendadak serta interaksi antara silinder utama dan pipa inlet. Fenomena ini konsisten dengan penelitian Lubis dan Akmal [8], yang menyatakan bahwa daerah pertemuan dua silinder pada bejana tekan merupakan lokasi kritis terjadinya konsentrasi tegangan maksimum akibat tekanan internal.



Gambar 4. Kegagalan Struktur pada Inlet

Hal tersebut menunjukkan bahwa perlu adanya perhatian khusus jika akan dilakukan proses fabrikasi separator Dua Fasa dengan desain menurut Lazalde-Crabtree pada bagian Inlet. Karena berdasarkan analisis tersebut kegagalan struktur terjadi pada Inlet Separator, sehingga pada bagian tersebut perlu diberi perkuatan agar dapat menahan kegagalan struktur.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan dari hasil analisis menggunakan metode elemen hingga didapatkan struktur separator berperilaku elastis hingga tekanan 1,283 MPa (0,947 P_D) dan memasuki fase plastis setelah melewati batas tersebut, sesuai dengan teori *plastic collapse* pada bejana tekan berdinding tipis. Nilai limit load diperoleh sebesar 1,734 MPa (1,280 P_D), yang merepresentasikan kapasitas maksimum struktur sebelum mengalami ketidakstabilan dan distribusi tegangan yang terjadi menunjukkan bahwa kegagalan struktur terkonsentrasi pada bagian inlet separator akibat konsentrasi tegangan yang dipicu oleh perubahan geometri.

Distribusi tegangan hasil simulasi menunjukkan bahwa kegagalan struktur terkonsentrasi pada bagian inlet separator, yang disebabkan oleh konsentrasi tegangan

akibat perubahan geometri dan pertemuan antara silinder utama dan pipa inlet. Temuan ini menegaskan bahwa desain separator dua fasa berdasarkan metode Lazalde-Crabtree, meskipun efektif dari sisi efisiensi pemisahan fluida, memerlukan evaluasi dan perhatian khusus dari sisi ketahanan struktur terutama pada bagian pertemuan Inlet Separator dengan struktur utama separator. Pada penelitian selanjutnya diharapkan dapat memperdalam *study* tentang keamanan struktur pada separator dengan mempertimbangkan pengaruh variasi tekanan operasi dan pembebanan termal. Hal tersebut dilakukan dengan tujuan agar mendapatkan Gambaran ketahanan dan keamanan struktur separator yang lebih komprehensif.

5. REFERENSI

- [1] O. Ifayefunmi, M. S. Ismail, and M. Z. A. Othman, "Buckling of unstiffened cone-cylinder shells subjected to axial compression and thermal loading," *Ocean Engineering*, vol. 225, Jan. 2021, Art. no. 108601, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108601.
- [2] R. D. Moss, *Pressure Vessel Design Manual*, 3rd ed. USA: Gulf Professional Publishing, 2004.
- [3] K. C. Foong, "Design concept for a more efficient steam–water separator," in *Proceedings of the World Geothermal Congress*, Antalya, Turkey, 2005.
- [4] S. J. Zarrouk and M. H. Purnanto, "Geothermal steam-water separators: Design overview," *Geothermics*, vol. 53, pp. 236–254, 2014.
- [5] Y. A. Çengel, M. A. Boles, and M. Kanoglu, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 9th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2019.
- [6] H. Lazalde-Crabtree, "Design approach of steam-water separators and steam dryers for geothermal applications," *Geothermal Resources Council Bulletin*, pp. 11–20, Sep. 1984.
- [7] ASME, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessels*. New York, NY, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2019.
- [8] A. Lubis and J. Akmal, "An assessment of the maximum stresses in the intersecting cylinders subjected to internal pressure," in *Proceedings of the National Seminar on Machine and Industry*, 2005.
- [9] E. F. Megyesy, *Pressure Vessel Handbook*, 12th ed. Tulsa, OK, USA: Library of Congress Control, 2001.
- [10] F. Minoli, M. Snaidero, and M. Frassinetti, "Selection criteria of optimal separation pressure of liquid-dominated geothermal resources," in *Proc. IV Int. Seminar on URC Power Systems*, Milan, Italy, Sep. 13–15, 2017, pp. 13–15.