

Perancangan Konstruksi Tabung Sistem *Pressure Swing Adsorption* (PSA) Oksigen Konsentrator

Adrian Syawaludin^{1*)}, Dwi Yuliaji¹⁾, Roy Waluyo¹⁾

¹⁾Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Ibn Khaldun Bogor

*e-mail: adrian.sywldn@gmail.com

ABSTRAK

Tabung *Pressure Swing Adsorption* (PSA) merupakan struktur utama yang mendukung kerja sistem PSA. Tabung ini berfungsi sebagai wadah *zeolite* untuk melakukan proses penyerapan udara bebas menjadi oksigen murni dengan diberi tekanan dari dalam. Agar tidak terjadi kebocoran, maka desain serta material yang dipilih harus tahan terhadap tekanan dan juga kebocoran. Penelitian ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui detail desain dari sistem PSA. Kemudian dilakukan pengujian untuk mengetahui ketahanan produk terhadap pengaruh tekanan, serta mengetahui tingkat kebocoran akibat pengaruh tekanan pada tabung PSA. Perancangan konstruksi dari tabung PSA dilakukan dengan desain menggunakan prinsip bejana tekan serta material menggunakan *stainless steel* 304. Tabung PSA yang dirancang memiliki spesifikasi tegangan izin material $8,4 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, volume tabung 1,3 liter, tebal tabung 0,003 m, serta tekanan perencanaan $4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. Hasil analisa menunjukkan bahwa tebal tabung *shell* $2,6 \times 10^{-4} \text{ m}$ dan *flat head* $1,1 \times 10^{-3} \text{ m}$. Tekanan maksimum tabung hasil analisa sebesar $4,3 \times 10^6 \text{ N/m}^2$. Tegangan longitudinal $2,7 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, tegangan tangensial $5,5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, tegangan hidrostatik $5,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, tegangan longitudinal akibat tekanan hidrostatik $3,5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, dan tegangan tangensial akibat tekanan hidrostatik $7,1 \times 10^6 \text{ N/m}^2$. Hasil analisa sambungan las menunjukkan tegangan izin kawat las $9,8 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ dan tegangan sambungan las $7,1 \times 10^3 \text{ N/m}^2$. Hasil analisa pada sambungan ulir mencatat tegangan izin material ulir $8,4 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, tegangan aksial pada badan ulir $6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, tegangan bending pada akar ulir $3,3 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, dan tegangan geser melintang pada pusat akar ulir $1,6 \times 10^6 \text{ N/m}^2$. Dari hasil analisa struktur desain tabung PSA menunjukkan bahwa sambungan las serta sambungan ulir telah memenuhi persyaratan. Hal ini dikarenakan tegangan hasil analisa tidak melebihi tegangan izin material.

Kata kunci : analisa; bejana tekan; material; *pressure swing adsorption*; tabung PSA; tegangan

ABSTRACT

The Pressure Swing Adsorption (PSA) tube is the main structure that supports the work of the PSA system. This tube functions as a zeolite container to absorb free air into pure oxygen by being pressured from within. The design and material selected must be resistant to pressure and leakage to prevent leakage. This research was conducted to know the design details of the PSA system. Then a test was carried out to determine the product's resistance to the influence of pressure and the level of leakage due to the effect of pressure on the PSA tube. The design of the construction of the PSA tube is carried out using the principle of a pressure vessel, and the material uses stainless steel 304. The designed PSA tube had a material allowable stress specification of $8.4 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, the volume of the tube was 1.3 litres, the thickness of the tube was 0.003 m, and a design pressure of $4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. The analysis results show that the shell tube thickness is $2.6 \times 10^{-4} \text{ m}$ and the flat head is $1.1 \times 10^{-3} \text{ m}$. The maximum pressure of the analyzed tube is $4.3 \times 10^6 \text{ N/m}^2$. Longitudinal stress $2.7 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, tangential stress $5.5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, hydrostatic stress $5.2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, longitudinal stress due to hydrostatic pressure $3.5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, and tangential stress due to hydrostatic pressure of $7.1 \times 10^6 \text{ N/m}^2$. The analysis of the welded joints shows that the allowable stress of the welding wire is $9.8 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, and the tension in the welded joints is $7.1 \times 10^3 \text{ N/m}^2$. The results of the analysis on the threaded connection recorded the allowable stress on the screw material of $8.4 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, the axial stress on the screw body of $6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, the bending stress on the screw root of $3.3 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, and the transverse shear stress on screw root centre $1.6 \times 10^6 \text{ N/m}^2$. The results of the PSA tube design's structural analysis show that the welded and threaded joints have met the requirements. It is because the analysis's stress does not exceed the allowable stress of the material.

Keywords : analyze; material; PSA tube; *pressure swing adsorption*; pressure vessel; stress

PENDAHULUAN

Gas oksigen (O_2) merupakan komponen gas dan unsur vital dalam proses metabolisme. Oksigen memegang peranan penting dalam semua proses tubuh secara fungsional serta kebutuhan oksigen merupakan kebutuhan yang paling utama dan sangat vital bagi tubuh (Imelda, 2009). Kekurangan oksigen dapat menyebabkan metabolisme berlangsung tidak sempurna. Adanya kekurangan O_2 ditandai dengan hipoksia, yang dalam proses lanjut dapat menyebabkan kematian jaringan bahkan dapat mengancam kehidupan (Harahap, 2005). Oksigen merupakan kebutuhan utama untuk keberlangsungan kehidupan manusia. Kebutuhan akan oksigen sempat mengalami kenaikan hingga membuat kelangkaan tabung oksigen. Hal tersebut disebabkan karena adanya peningkatan kasus virus Covid-19 yang terjadi di beberapa daerah khususnya di Indonesia (Ismail et al., 2022).

Solusi alternatif berdasarkan dari kelangkaan tabung oksigen adalah dengan rancang bangun konsentrator oksigen atau dalam bahasa asing disebut dengan *oxygen concentrator*. Oksigen konsentrator sendiri dikenal sebagai perangkat medis yang digunakan untuk mengirim oksigen kepada seseorang yang mengalami gangguan pernapasan tanpa perlu melakukan pengisian ulang tabung (Nurrahmawati, 2017). Dengan adanya alat ini, diharapkan dapat memenuhi kebutuhan oksigen pada masyarakat yang mengidap gangguan pernapasan.

Dalam oksigen konsentrator terdapat proses yang bernama *Pressure Swing Adsorption* (PSA) (A. Putra, Tri Bowo Indarto, dan Liliek Soetjiatie, 2019). Penerapan atau implementasi PSA pada alat oksigen konsentrator adalah dengan melakukan proses pemisahan campuran udara ruangan yang berisi 78% nitrogen, 21% oksigen, dan 1% gas lain menjadi oksigen murni yang siap diterima oleh pengguna (S. Sriyono, I. Karlina, S. Sumijanto, dan R Kusumastuti, 2013) PSA terdiri dari satu atau lebih kolom/tabung *adsorpsi*, kompresor dan beberapa katup untuk mengontrol siklus tekanan dan urutan aliran udara atmosfer yang diumpankan ke sistem. Udara yang dikompres melalui kompresor akan melewati silikat alumunium sintesis yang biasa dikenal dengan *zeolite* yang berada di dalam tabung sistem PSA, yang kemudian udara hasil penyaringan tersebut disimpan pada tangki oksigen (Randy Ismail Akhirul Permana, Andhika Nadhif Zukhrufi, 2022).

Prinsip kerja dari tabung PSA sama dengan bejana tekan yaitu tabung tertutup berbentuk silinder sebagai wadah dan diberi tekanan dari dalam. Tabung PSA merupakan struktur utama yang mendukung kerja dari sistem PSA ini. Agar tidak terjadi kebocoran pada tabung PSA, maka material yang dipilih harus tahan terhadap tekanan dan juga kebocoran. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui detail desain dari sistem *Pressure Swing Adsorption* pada oksigen konsentrator yaitu tabung PSA. Kemudian melakukan pengujian untuk mengetahui ketahanan produk terhadap pengaruh tekanan, serta mengetahui tingkat kebocoran akibat pengaruh tekanan pada tabung PSA.

METODE PENELITIAN

Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat pelaksanaan penelitian ini adalah di laboratorium manufaktur dan workshop, program studi teknik mesin universitas Ibn Khaldun Bogor. Waktu penelitian dimulai bulan Maret hingga bulan Agustus 2022.

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian sistem PSA oksigen konsentrator diantaranya ditunjukkan pada tabel 1, sementara peralatan yang digunakan dirangkum dalam tabel 2.

Tabel 1. Spesifikasi bahan tabung PSA

Deskripsi	Spesifikasi
Pipa	<i>Stainless Steel</i> 304 (3 inchi, 3 mm)
<i>Flat Head</i>	<i>Stainless Steel</i> 304 (3 mm)
Ulir BSPT	<i>Stainless Steel</i> 304 (2.5 inchi)

Tabel 2. Spesifikasi alat tabung PSA

Deskripsi	Spesifikasi
Mesin Lasan	Redbo TIG
Mesin Gerinda	Bosch
<i>Pressure Gauge</i>	Tekiro Variasi 16 Bar
Mesin Bor	Makita
Kompresor	Oiless $\frac{3}{4}$ HP, Lakoni Basic 95

Tahapan Penelitian

Tahapan dalam penelitian ini diawali dengan melakukan spesifikasi persyaratan produk dan studi literatur untuk menentukan desain yang

akan diimplementasikan. Spesifikasi persyaratan yang dipenuhi yaitu dimulai dari pengecekan model, dimensi, material, serta tekanan. Jika keseluruhan spesifikasi sudah terpenuhi maka tahapan dilanjutkan dengan melakukan proses produksi serta pengujian tekanan tabung PSA oksigen konsentrator.

Pengujian validasi juga dilakukan dengan melakukan validasi pengujian tekanan serta kebocoran. Jika validasi tekanan serta kebocoran sudah sesuai dengan standar (tidak ditemukan kebocoran) maka pengujian selesai dan dilanjutkan dengan *review* hasil dan pembahasan serta pembuatan kesimpulan.

Persyaratan Produk

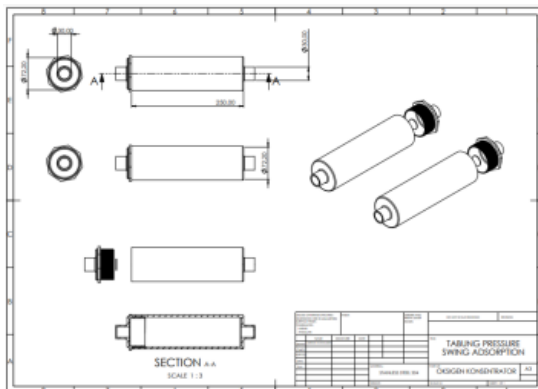
Syarat produk (*requirement product*) tabung PSA oksigen konsentrator ditunjukkan pada tabel 3.

Tabel 3. Spesifikasi persyaratan produk

<i>Deskripsi</i>	<i>Spesifikasi</i>
Model	<i>Knock Down</i>
Volume	0.0013 m ³
Material	<i>Stainless Steel 304</i>
Temperatur Kerja	-20° - 60°
Laju aliran maksimal	10 Lpm
Tekanan Perencanaan	4 bar

Desain

Berdasarkan dari persyaratan produk yang diketahui dengan ukuran panjang 25 cm dan tebal 3 mm menggunakan material *Stainless Steel 304*. Desain Tabung PSA Oksigen Konsentrator dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Desain tabung PSA

Proses Produksi

Proses produksi atau pengerjaan pada rancang bangun tabung PSA oksigen konsentrator diawali dengan pemilihan bahan/material *Stainless Steel 304*. Dilanjutkan dengan tahapan proses berikut:

1. Proses Pemotongan
Pemotongan dilakukan dengan mesin gerinda tangan dengan ukuran panjang pipa 25cm dan tebal 3mm.
2. Proses Pengelasan
Dengan menggunakan mesin las TIG argon (GTAW) dengan arus las 40A elektroda tungsten.
3. Proses Pengeboran
Proses pembuatan 4 lubang dan mesin yang digunakan adalah mesin bor dengan ukuran diameter mata bor M10.
4. Proses penyambungan
Menggunkan sambungan ulir dengan konsep *knock down*

Pengujian

Berdasarkan produk tabung PSA oksigen konsentrator yang dibuat, maka pengujian yang dilakukan untuk mengetahui seberapa besar ketahanan tabung PSA oksigen konsentrator hingga mencapai batas kebocoran. Caranya yaitu dengan memberikan tekanan udara yang berasal dari hidrostatis hingga mencapai tekanan sebesar 7 Bar dan mengukurnya menggunakan *Pressure Gauge*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Teknis Tabung PSA

Data Teknis Tabung PSA oksigen konsentrator tabung *Pressure Swing Adsorption* (PSA) merupakan struktur utama yang mendukung kerja dari sistem oksigen konsentrator tersebut, dan sistem PSA sendiri terdiri dari satu atau lebih kolom/tabung adsorpsi yang berisikan zeolite, yang dimana prinsip kerja dari tabung PSA itu sama dengan bejana tekan (*pressure vessel*) yaitu sama-sama tabung tertutup berbentuk silinder sebagai wadah dan diberi tekanan udara dari dalam.



Gambar 2. Tabung *Pressure Swing Adsorption* (PSA)

Penjelasan mengenai data-data teknis dalam proses pembuatan tabung PSA oksigen konsentrator berdasarkan referensi yang diperoleh, dapat dilihat pada tabel 4 berikut.

Tabel 4. Spesifikasi data teknis tabung PSA

Uraian	Spesifikasi
Material Tabung PSA	<i>Stainless Steel</i> 304
Tegangan Tarik Material	$5.05 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
Tegangan Tarik Izin Material	$8.4 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
Diameter Dalam	0.0829 m
Diameter Luar	0.0889 m
Diameter Rata-Rata	0.0859 m
Jari-Jari Dalam Silinder	0.04145 m
Jari-Jari Rata-Rata	0.04295 m
Panjang Bejana	0.25 m
Volume	0.0013 m ³
Tekanan Perencanaan	4 bar (0.4 MPa)
Corrosion Allowance	N/a
<i>Joint Efficiency</i>	0.75
Sambungan Las	Tipe Fillet
Kawat Las	ER308L 2 mm
Faktor Keamanan	6
Jenis Sambungan Ulir	<i>British Pipe Thread</i>
Material Sambungan Ulir	<i>Stainless Steel</i> 304
Diameter Mayor	75 mm
Diameter Minor	72 mm
Diameter Tusuk	73 mm
Jarak Gang atau Pitch	2 mm
Jumlah Ulir	10
Cap Area	6243 mm ²

Hasil Analisa Tabung PSA

Tabung PSA oksigen konsentrator merupakan suatu tabung tertutup berbentuk silinder yang digunakan sebagai wadah pasir zeolite dan diberi tekanan udara dari dalam. Tabung PSA ini mempunyai dua saluran yaitu lubang masuk udara dan lubang masuk keluar udara. Untuk mengetahui suatu hasil perancangan konstruksi pada tabung PSA diperlukan analisa mengenai kekuatan material, sambungan las serta sambungan ulir pada tabung tersebut. Hasil analisa konstruksi pada tabung PSA dijelaskan sebagai berikut:

Analisa Kapasitas Tabung PSA

Volume zeolite yang dapat ditampung oleh tabung PSA berdasarkan ukurannya adalah mengikut hasil perhitungan kapasitas tabung PSA:

$$V = \pi \times r^2 \times t$$

$$= 3,14 \times 0,04145^2 \text{ m} \times 0,25 \text{ m} = 1,3 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 0,0013 \text{ m}^3$$

Keterangan:

V = Volume

r = Jari-jari tabung

t = Tinggi tabung

Menurut hasil perhitungan di atas, maka 2 tabung PSA memiliki masing-masing volume atau dapat menampung *zeolite* sebesar atau sama dengan 1,3 liter.

Analisa Ketebalan Tabung PSA

Ketebalan *shell* dan *flathead* Tabung PSA yang akan mendapatkan tekanan tidak boleh lebih tipis dari nilai yang didapatkan dari persamaan berikut:

1. Hasil perhitungan ketebalan dinding Tabung PSA:

$$t_d = \frac{p \times r}{(s \times E) - (0,6 \times p)}$$

$$t_d = \frac{4 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \times 0,04145 \text{ m}}{(8,4 \times 10^7 \text{ N/m}^2 \times 0,75) - (0,6 \times 4 \times 10^5 \text{ N/m}^2)}$$

$$t_d = \frac{16580}{62760000}$$

$$t_d = 2,6 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Keterangan:

- p = Tekanan perencanaan
- s = Tegangan maksimum izin material
- E = *Joint efficiency*
- r = Jari-jari diameter dalam

2. Hasil perhitungan ketebalan pelat *flathead* Tabung PSA:

$$t_h = d_d \sqrt{\frac{c \times p}{s \times E}}$$

$$t_h = 0,0829 \times \sqrt{\frac{0,0286 \times 4 \times 10^5 \text{ N/m}^2}{8,4 \times 10^7 \text{ N/m}^2 \times 0,75}}$$

$$t_h = 0,0829 \times \sqrt{\frac{11440}{63000000}}$$

$$t_h = 0,0829 \times \sqrt{1,8 \times 10^{-4} \text{ N/m}^2}$$

$$t_h = 0,0829 \times 0,0134$$

$$t_h = 1,1 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Keterangan:

- p = Tekanan perencanaan
- s = Tegangan maksimum izin material
- E = *Joint efficiency*
- c = Faktor tambahan
- t_h = Tebal *flat head*
- d_d = Diameter

Dari hasil perhitungan di atas maka diperoleh tebal *shell* $2,6 \times 10^{-4} \text{ m}$ dan tebal *flathead* tabung PSA sebesar $1,1 \times 10^{-3} \text{ m}$. Dari hasil perhitungan mengenai ketebalan dinding tabung PSA belum tentu ada dipasaran. Oleh karena itu pada penelitian ini diputuskan untuk menggunakan material dengan tebal 3 mm.

Analisa Tekanan Kerja Maksimum

Tabung PSA mempunyai batas maksimal menerima tekanan kerja. Untuk mengetahui batas maksimal tekanan kerja pada tabung PSA dapat dilihat pada perhitungan berikut:

$$P_{maks} = \frac{s \times E \times t}{r + (0,6 \times t)}$$

$$P_{maks} = \frac{8,4 \times 10^7 \text{ N/m}^2 \times 0,75 \times 0,003}{0,04145 \text{ m} + (0,6 \times 0,003)}$$

$$P_{maks} = \frac{189000}{0,04325 \text{ m}}$$

$$P_{maks} = 4,3 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

Keterangan:

- s = Tegangan izin material
- t_d = Tebal
- r = Jari-jari diameter dalam
- E = *Joint efficiency*
- P_{maks} = Tekanan maksimal

Tekanan maksimal dinding tabung PSA adalah $4,3 \times 10^6 \text{ N/m}^2$. Dari hasil perhitungan tersebut nilai tekanan maksimal dinding lebih besar dari nilai tekanan perencanaan, yaitu $4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. Maka tekanan perancangan dikatakan aman.

Tegangan Longitudinal Pada Tabung PSA

Tegangan longitudinal yang terjadi pada tabung PSA dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$\sigma_l = \frac{p \times r}{2 \times t}$$

$$\sigma_l = \frac{4 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \times 0,04145 \text{ m}}{2 \times 0,003 \text{ m}}$$

$$\sigma_l = \frac{16580}{0,006}$$

$$\sigma_l = 2,7 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

Keterangan:

- σ_l = Tegangan longitudinal
- p = Tekanan perencanaan
- r = Jari-jari diameter dalam
- t = Tebal

Dari hasil perhitungan tersebut dapat diketahui untuk nilai tegangan longitudinal sebesar $2,7 \times 10^6 \text{ N/m}^2$.

Tegangan Tangensial Pada Tabung PSA

Tegangan tangensial yang terjadi pada tabung PSA dapat dicari menggunakan persamaan berikut:

$$\sigma_t = \frac{p \times r}{t}$$

$$\sigma_t = \frac{4 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \times 0,04145 \text{ m}}{0,003 \text{ m}}$$

$$\sigma_t = \frac{16580 \text{ N/m}^2}{0,003 \text{ m}}$$

$$\sigma_t = 5,5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

Keterangan:

- σ_t = Tegangan tangensial
- p = Tekanan perencanaan
- r = Jari-jari diameter dalam
- t = Tebal

Dari hasil perhitungan tersebut dapat diketahui untuk nilai tegangan tangensial pada dinding tabung PSA sebesar $5,5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$.

Tegangan Hidrostatik Pada Tabung PSA

Sesuai ASME bagian VIII-1, UG-99, bejana tekan yang dirancang untuk tekanan internal harus dikenai tekanan uji hidrostatik. Setiap titik pada bejana, setidaknya sama dengan 1,3 kali tekanan kerja maksimum yang diizinkan (MAWP). Tekanan hidrostatik pada tabung PSA dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_h = 1,3 \times P_d$$

$$P_h = 1,3 \times 4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$P_h = 5,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

Keterangan:

- P_h = Tekanan hidrostatik
- P_d = Tekanan perencanaan

Dari hasil perhitungan tersebut dapat diketahui tekanan hidrostatik pada dinding tabung PSA sebesar $5,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.

Tegangan Longitudinal Akibat Tekanan Hidrostatik

Tegangan longitudinal akibat adanya tekanan hidrostatik pada tabung PSA dapat dicari menggunakan persamaan berikut:

$$\sigma_{lh} = \frac{p_h \times r}{2 \times t}$$

$$\sigma_{lh} = \frac{5,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \times 0,04145 \text{ m}}{2 \times 0,003 \text{ m}}$$

$$\sigma_{lh} = \frac{21554 \text{ N/m}^2}{0,006 \text{ m}}$$

$$\sigma_{lh} = 3,5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

Keterangan:

- σ_{lh} = Tegangan longitudinal
- P_h = Tekanan hidrostatik
- r = Jari-jari diameter dalam
- t = Tebal

Hasil perhitungan dari tegangan longitudinal akibat tekanan hidrostatik pada tabung PSA sebesar $3,5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$.

Tegangan Tangensial Akibat Tekanan Hidrostatik

Tegangan tangensial akibat adanya tekanan hidrostatik pada tabung PSA dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$\sigma_{th} = \frac{P_h \times r}{t}$$

$$\sigma_{th} = \frac{5,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \times 0,04145 \text{ m}}{0,003 \text{ m}}$$

$$\sigma_{th} = \frac{21554 \text{ N/m}^2}{0,003 \text{ m}}$$

$$\sigma_{th} = 7,1 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

Keterangan:

- σ_{th} = Tegangan tangensial
- P_h = Tekanan hidrostatik
- r = Jari-jari diameter dalam
- t = Tebal

Hasil perhitungan dari tegangan longitudinal akibat tekanan hidrostatik pada tabung PSA sebesar $7,1 \times 10^7 \text{ N/m}^2$.

Hasil Analisa Kekuatan Sambungan Las

Untuk mengetahui seberapa kuat sambungan las pada tabung PSA, maka perlu dilakukan perhitungan, guna mengetahui kekuatan sambungan las pada tabung PSA dapat dicari menggunakan persamaan berikut:

$$\sigma = \frac{P \times 0,785 \times (d_d)^2}{d_l \times 0,707 \times sf}$$

$$\sigma = \frac{4 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \times 0,785 \times (0,0829 \text{ m})^2}{0,0889 \times 0,707 \times 6}$$

$$\sigma = \frac{2157}{0,3}$$

$$\sigma = 7,1 \times 10^3 \text{ N/m}^2$$

Keterangan:

- σ = Tegangan
- p = Tekanan
- d_d = Diameter dalam
- d_l = Diameter luar
- sf = Safety factor

Hasil perhitungan dari kekuatan sambungan las pada tabung PSA yaitu $7,1 \times 10^3 \text{ N/m}^2$.

Hasil Analisa Kekuatan Sambungan Ulir

Untuk mengetahui kekuatan sambungan ulir pada tabung PSA, maka dapat ditentukan dengan mencari tiga jenis tegangan yang ditimbulkan dari Gaya Aksial (F), yaitu tegangan aksial (σ) pada badan ulir, tegangan bending (σ_b) pada akar ulir, dan tegangan geser melintang (τ) pada pusat akar ulir.

Tegangan Aksial Badan Ulir

Tegangan aksial pada badan sambungan ulir tabung PSA dapat dicari menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{4F}{\pi \times d_r^2}$$

$$\sigma = \frac{4 \times 2497 \text{ N}}{3,14 \times 5184 \text{ mm}}$$

$$\sigma = \frac{9988}{16277}$$

$$\sigma = 0,6 \text{ MPa} = 6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

Keterangan:

- σ = Tegangan aksial
- F = Gaya aksial
- d_r = Diameter minor

Hasil perhitungan dari tegangan aksial pada badan sambungan ulir tabung PSA yaitu $6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.

Tegangan Bending Akar Ulir

Tegangan bending pada akar sambungan ulir tabung PSA dapat dicari menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_b = \frac{6F}{\pi \times d_r \times n_t \times p}$$

$$\sigma_b = \frac{6 \times 2497}{3,14 \times 72 \times 10 \times 2}$$

$$\sigma_b = \frac{14982}{4522}$$

$$\sigma_b = 3,3 \text{ MPa} = 3,3 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

Keterangan:

- σ_b = Tegangan bending
- F = Gaya aksial
- d_r = Diameter minor
- n_t = Jumlah ulir
- p = Pitch

Hasil perhitungan dari tegangan bending pada akar sambungan ulir tabung PSA yaitu $3,3 \times 10^6 \text{ N/m}^2$.

Tegangan Geser Melintang Pusat Akar Ulir

Tegangan geser melintang pada pusat akar sambungan ulir tabung PSA dapat dicari menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\tau = \frac{3F}{\pi \times d_r \times n_t \times p}$$

$$\tau = \frac{3 \times 2497}{3,14 \times 72 \times 10 \times 2}$$

$$\tau = \frac{7491}{4522}$$

$$\tau = 1,6 \text{ MPa} = 1,6 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

Keterangan:

- τ = Tegangan geser
- F = Gaya aksial
- d_r = Diameter minor
- n_t = Jumlah ulir
- p = Pitch

Hasil perhitungan dari tegangan geser melintang pada pusat akar sambungan ulir tabung PSA yaitu $1,6 \times 10^6 \text{ N/m}^2$.

Pembahasan Analisa Tabung PSA

Perhitungan yang digunakan pada penelitian ini menggunakan metode analisis, yaitu dengan membandingkan data material dengan data aktual.

Pembahasan Hasil Analisa Tabung PSA

Dari hasil analisa mengenai perhitungan yang telah dibuat untuk tabung PSA ini, diperoleh hasil sebagai berikut:

1. Volume atau kapasitas yang dapat ditampung tabung PSA yaitu $1,3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ atau setara dengan 1,3 liter.
2. Tebal tabung PSA tidak boleh lebih tipis agar dapat menerima tekanan internal. Maka diperoleh tebal *shell* $2,6 \times 10^{-4} \text{ m}$ dan tebal *flathead* $1,1 \times 10^{-3} \text{ m}$. Dan data tebal aktual masing-masing komponen sebesar 0,003 m.
3. Tekanan kerja maksimum pada tabung PSA tidak boleh lebih kecil dari tekanan perencanaan, maka diperoleh $4,3 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ dengan tekanan perencanaan $4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.
4. Tegangan yang terjadi pada tabung PSA tidak boleh lebih besar dari tegangan maksimum material yang diizinkan. Tegangan longitudinal yang terjadi $2,7 \times 10^6 \text{ N/m}^2$. Tegangan tangensial yang terjadi $5,5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$. Tegangan hidrostatik yang terjadi $5,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. Tegangan longitudinal akibat tekanan hidrostatik yang terjadi $3,5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$. Tegangan tangensial akibat tekanan hidrostatik yang terjadi $7,1 \times 10^6 \text{ N/m}^2$. Tegangan tarik izin material $8,4 \times 10^7 \text{ N/m}^2$.

Pembahasan Hasil Analisa Sambungan Las

Hasil analisa mengenai perhitungan kekuatan sambungan las menggunakan kawat las ER306L, diperoleh tegangan pengelasan yaitu

$7,1 \times 10^3 \text{ N/m}^2$, dengan tegangan tarik izin kawat las $9,8 \times 10^7 \text{ N/m}^2$.

Pembahasan Hasil Analisa Sambungan Ulir

Hasil analisa mengenai perhitungan yang telah dilakukan untuk kekuatan sambungan ulir menggunakan material *Stainless Steel* 304, maka diperoleh hasil tegangan aksial sebesar $6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, tegangan bending $3,3 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, dan tegangan geser $1,6 \times 10^6 \text{ N/m}^2$.

Hasil Pengujian Tekanan Tabung PSA

Untuk pengujian Tabung PSA oksigen konsentrator ini dilakukan dengan memberikan tekanan udara menggunakan kompresor, dengan variasi tekanan pada saat pengujian dilakukan dan pengujian dilakukan selama 1 menit menggunakan timer pada setiap variasi tekanan lalu dilakukan pengambilan data.

Tekanan perencanaan pada tabung PSA yaitu sebesar 1 bar hingga mencapai 7 bar. Tekanan dinaikkan secara perlahan, jika tidak ada kebocoran serta deformasi maka tekanan dinaikkan. Data hasil pengujian terdapat pada tabel di bawah ini:

Tabel 5. Data Hasil Pengujian

Tekanan (bar)	Waktu (menit)	Hasil Pengamatan Visual <i>Pressure Gauge</i>
1 bar	1 Menit	Tetap 1 bar
2 bar	1 Menit	Tetap 2 bar
3 bar	1 Menit	Tetap 3 bar
4 bar	1 Menit	Tetap 4 bar
5 bar	1 Menit	Tetap 5 bar
6 bar	1 Menit	Tetap 6 bar
7 bar	1 Menit	Terjadi penurunan sebesar 0,25 bar menjadi 6,75 bar

Hasil pengamatan visual dapat dilihat pada tabel 5 hasil pengujian tabung PSA dengan penahanan waktu 1 menit menggunakan kompresor. Nilai tekanan yang ada pada *pressure gauge* mengalami penurunan tekanan. Grafik mengenai pengujian tabung PSA dengan penahanan waktu 1 menit dapat dilihat pada gambar 3 berikut:



Gambar 3. Grafik hasil pengujian

Dari Gambar di atas menjelaskan bahwa tekanan udara yang dimasukkan ke dalam tabung PSA menggunakan kompresor dan ditahan selama 1 menit mengalami penurunan ketika berada di titik 7 bar sebesar 0,25 bar. Penurunan tekanan yang terjadi akibat kebocoran pada sambungan ulir. Hal ini dapat terjadi karena jenis sambungan ulir yang digunakan memerlukan *thread sealant*, maka nilai kekuatan *seal* mempengaruhi kekuatan sambungan terhadap tekanan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Tabung *Pressure Swing Adsorption* (PSA) oksigen konsentrator merupakan struktur utama yang mendukung kerja dari sistem PSA, dan sistem PSA terdiri dari satu atau lebih kolom/tabung adsorpsi yang berisikan *zeolite*, dimana prinsip kerja dari tabung PSA itu sama dengan bejana tekan (*pressure vessel*) yaitu sama-sama tabung tertutup berbentuk silinder sebagai wadah dan diberi tekanan udara dari dalam.

Material yang digunakan yaitu *stainless steel* 304 dengan diameter 0,0829 m serta panjang tabung 0,25 m. Tekanan operasional pada tabung yaitu 4 bar. Volume yang dapat ditampung oleh tabung yaitu 0,0013 m³ atau setara dengan 1,3 liter. Ketebalan *shell*, *flat head* serta *nozzle* hasil dari analisa pada tabung yaitu tebal *shell* $2,6 \times 10^{-4}$ m, tebal *flat head* $1,1 \times 10^{-3}$ m. Tekanan kerja maksimal hasil dari analisa pada tabung yaitu $4,3 \times 10^6$ N/m², sedangkan tekanan perencanaan 4×10^5 N/m². Tegangan longitudinal yang terjadi $2,7 \times 10^6$ N/m². Tegangan tangensial yang terjadi $5,5 \times 10^6$ N/m². Tegangan hidrostatik

yang terjadi $5,2 \times 10^5$ N/m². Tegangan longitudinal akibat tekanan hidrostatik yang terjadi $3,5 \times 10^6$ N/m². Tegangan tangensial akibat tekanan hidrostatik yang terjadi $7,1 \times 10^6$ N/m². Tegangan tarik izin material $8,4 \times 10^7$ N/m², sehingga desain/struktur perancangan pada tabung PSA dapat dikatakan aman karena tebal aktual pada tabung lebih besar dari tebal hasil analisa, tekanan perencanaan tidak lebih besar dari tekanan kerja maksimal hasil analisa, serta tegangan-tegangan yang terjadi tidak lebih besar dari tegangan maksimal material yang diizinkan.

Sambungan las dengan tipe *fillet* dan menggunakan kawat las ER308L 2 mm, tegangan tarik pengelasan hasil dari analisa yaitu $7,1 \times 10^3$ N/m², dan tegangan izin kawat las yaitu $9,8 \times 10^7$ N/m², sehingga sambungan las dapat dikatakan aman karena tegangan hasil analisa tidak lebih dari tegangan maksimum kawat las yang diizinkan.

Sambungan ulir dengan tipe BSP/BSPT, menggunakan material *Stainless Steel* 304, tegangan izin material sambungan ulir yaitu $8,4 \times 10^7$ N/m² diperoleh hasil tegangan aksial pada badan ulir yaitu 6×10^5 N/m², tegangan bending pada akar ulir yaitu $3,3 \times 10^6$ N/m², tegangan geser melintang pada pusat akar ulir yaitu $1,6 \times 10^6$ N/m², sehingga sambungan ulir dikatakan aman karena tegangan-tegangan hasil analisa tidak melebihi tegangan maksimum material yang diizinkan.

Saran

Pengembangan perancangan dan konstruksi tabung *Pressure Swing Adsorption* (PSA) oksigen konsentrator supaya jauh lebih baik lagi maka dapat menggunakan variasi jenis sambungan ulir untuk mengetahui variasi nilai kekuatan sambungan akibat pengaruh tekanan.

REFERENSI

- Atacak, I., Korkusuz, M., & Bay, O. F. (2012). Design and Implementation of an Oxygen Concentrator with GPRS-Based Fault Transfer System. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 12(04), 1250060.
- Boiler, A. S. M. E. (2017). Pressure Vessel Committee on Materials, 2017, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II, Materials, Part D Properties

- (Metric),". *American Society of Mechanical Engineers, New York, Standard No. BPVC-IID-2017.*
- Habsya, S. A., & Satrijo, D. (2012). Perancangan dan Analisa Tegangan Pada Bejana Tekan Horizontal Dengan Metode Elemen Hingga (*Doctoral dissertation, Mechanical Engineering Department, Faculty Engineering of Diponegoro University*).
- Ismail, R., Permana, A., Zukhrufi, A. N., & Aji, A. D. (2022). Desain Pressure Swing Adsorption pada Oksigen Konsentrator *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro*, Volume 7 Tahun 2022, 7, 2–5.
- Nurrahmawati, A., & Harmadi, H. (2017). Rancang Bangun Alat Ukur Konsentrasi Oksigen yang Dihasilkan oleh Fotobioreaktor Mikroalga *Chlorella vulgaris* Menggunakan Sensor SK-25F. *Jurnal Fisika Unand*, 6(3), 255-262.
- Pitanova, T., Juarsa, M., & Yuliaji, D. (2022). Rancangan Dan Kontruksi Water-Jacket Cooler Pada Alat Eksperimen Ussa-Fts01. *ALMIKANIKA*, 4(2), 52-57.
- Setiadi, S., Sanjaya, A. B., & Fitroh, A. J. (2019). Optimization of Threaded Joint Design on Motor Rocket Tube of Rx1220 Rocket and Its Correlation to Hydrostatic Test Result. 32–39.