

ANALISA EKSERGI PADA PRODUKSI NITROGEN SISTEM *PRESSURE SWING ADSORPTION* (PSA)

EXERGY ANALYSIS OF NITROGEN PRODUCTION PRESSURE SWING ADSORPTION SYSTEM

Adi Syakdani^{1,a)}, Tahdid¹, Endah Dhita Pratiwi¹, Rizka Elvira Husni^{1,b)}

¹Teknik Energi / Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya

Jalan Sriwijaya Negara Bukit Besa, Palembang 30139, (0711)353414/(0711)355918

e-mail : ^{a)} adis@polsri.ac.id / ^{b)} rizkaelvira46@gmail.com

ABSTRACT

Nitrogen is staple compound in the chemical industry. Nitrogen demand continues to increase every year. Indonesia's nitrogen demand reaches 6% of world demand, and this number is expected to continue to increase. Increased nitrogen demand will also require high nitrogen production. In the production of nitrogen the most commonly used method is cryogenic systems. But in this way a lot of energy is wasted, especially in the conversion process. In an effort to use energy efficiently, non-cryogenic nitrogen production systems were developed. One of them is the Pressure Swing Adsorption (PSA) system, which applies the principle of adsorption.. Factors that may affect the purity of the product are the adsorbate pressure (air) and the adsorbate contact time and the adsorbent. Adsorbent used is Carbon Molecular Sieve (CMS). Compressed air is obtained from the compression process by a compressor that uses electricity as the primary power source. In an effort to optimize the use of energy used, the adsorbate pressure varied from 4.5.6 and 7 bar, while the contact time was varied 1.3. and 5 minutes. Based on the results of the study the most optimal operating conditions have been carried out to produce high nitrogen purity at 4 bar pressure and 5 minutes contact time and the resulting nitrogen purity is 96.2%.The optimum condition of exergy efficiency is 7 bar at 1 minute contact time with 97.079% exergy efficiency. While for the compressor the highest compressor efficiency and the lowest Irreversibility that is at the pressure of 7.1 bar that is efficiency 78.925% and I_c 14.951 kJ/kg.

Keyword : Nitrogen, PSA, Pressure, Contcat Time, Exergy

1. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Nitrogen merupakan senyawa pokok dalam industri kimia. Nitrogen merupakan senyawa inert sehingga cocok digunakan untuk berbagai aplikasi yang mencakup berbagai aspek pembuatan, pengolahan, penanganan, dan pengiriman bahan kimia (Ivanova dan Lewis, 2012). Permintaan nitrogen pada industri kimia di dunia terus meningkat setiap tahunnya khususnya pada industri pupuk. Diantara negara-negara asia permintaan nitrogen Indonesia yaitu sebesar 6% dari permintaan dunia (*World fertilizer trends and outlook to2018*). Selain digunakan dalam industri pupuk, nitrogen juga digunakan dalam berbagai industri lainnya seperti industri pangan, elektronik, manufaktur, medis, pertambangan dan transportasi.

Mengingat tingginya kebutuhan nitrogen pada berbagai industri, maka diperlukan produksi nitrogen yang tinggi pula. Nitrogen biasa diperoleh dari udara bebas, hal ini dikarenakan kandungan dalam udara sebagian besar terdiri dari nitrogen yaitu sebanyak 78%. (Schulte dkk, 1993). Pada umumnya nitrogen dipisahkan dari udara dengan menggunakan metode *cryogenic*. Metode ini dilakukan dengan cara penurunan temperatur hingga mencapai temperatur yang sangat rendah hingga

mencapai temperatur kritisnya. Kelemahan utama dalam distilasi *cryogenic* adalah penggunaan energi yang tidak efektif (Yogesh, 2016). Energi banyak terbuang dengan mengkonversi gas menjadi *liquid*, serta banyak gas murni yang terbuang saat proses berlangsung (Schulte dkk, 1993). Selain itu produk nitrogen yang berupa cairan membuat nitrogen tidak bisa digunakan secara langsung oleh publik (Yogesh, 2016). Penggunaan energi pada sistem *cryogenic* yaitu 2,56 kWh/kg *liquid* nitrogen (Shen dan Wolsky, 1980).

Seiring dengan berkembangnya teknologi, proses produksi nitrogen juga ikut berkembang. Hal ini dibuktikan dengan munculnya teknologi *non-cryogenic* berupa sistem membran dan sistem *Pressure Swing Adsorption* (Schulte dkk, 1993). Teknologi PSA merupakan teknologi yang memisahkan udara dengan metode adsorpsi. Pada teknologi ini komponen udara diadsorpsi berdasarkan perbedaan kesetimbangan adsorpsi dan perbedaan tingkat difusi (Schtoter, 1993). Produksi nitrogen dengan menggunakan sistem PSA menggunakan energi sebesar 0,31-0,63 kWh/kg gas nitrogen (Schulte dkk, 1993). Serta produk nitrogen dengan menggunakan metode PSA akan bisa dibeli dan dikirim dengan cepat (Ermani dkk, 2011).

Pada sistem PSA terdapat dua buah adsorber yang berisi adsorben berupa *Carbon Molecular Sieve* (CMS). Pada

tekanan tinggi CMS akan menyerap oksigen dan memungkinkan nitrogen melewati tingkat kemurnian yang diinginkan (Ivanova,2012). Dalam proses produksi nitrogen dengan metode PSA kemurnian nitrogen yang dihasilkan dipengaruhi oleh daya adsorpsi pada adsorben yang digunakan. Daya adsorpsi pada adsorben bergantung pada suhu, tekanan,waktu kontak, jenis adsorben dan karakteristik adsorben (Sofha,2012).

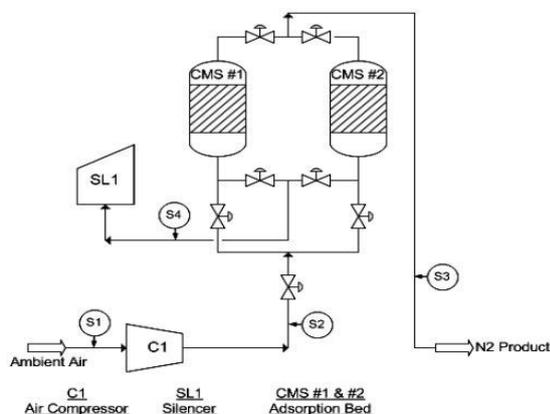
Pada sistem PSA operasi utama yang membutuhkan banyak biaya yaitu kebutuhan energi listrik (Banerjee dkk,1988). Hal ini dikarenakan konsumsi utama energi pada proses PSA ditentukan oleh energi kompresi (Schroter,1993). Oleh karena itu dibutuhkan pengoperasian yang optimal dalam proses produksi agar energi listrik yang digunakan dapat seminimal mungkin dan menghasilkan produk nitrogen dengan kemurnian yang tinggi. Salah satu cara yang dapat dilakukan dalam pemilihan parameter operasi yang optimal dapat dilakukan dengan menggunakan analisa eksergi (Banerjee dkk,1990). Berdasarkan kondisi tersebut maka penulis mengambil judul analisa eksergi pada produksi nitrogen dengan sistem *Pressure Swing Adsorption* (PSA).

Tinjauan Pustaka

Sistem PSA

Teknologi PSA pada awalnya berasal dari studi laboratorium dari Skarstom (1960), Montgareuil dan Domine (1964). Perubahan dari skala laboratorium ke skala industri cenderung melambat, namun semakin berkembang selama beberapa dekade terakhir.

PSA merupakan salah satu teknologi yang digunakan untuk memisahkan beberapa jenis gas dari campuran gas sesuai dengan jenis karakteristik molekuler dan afinitasnya dari bahan adsorben. Bahan adsorpsi khusus seperti karbon, digunakan sebagai *sieve* molekuler sehingga memudahkan penyerapan gas utama pada tekanan tinggi. Proses selanjutnya adalah proses *swing*, yaitu proses perubahan dari tekanan tinggi ke tekanan rendah untuk mendesorp atau melepas senyawa yang terserap oleh bahan adsorben (Thomas danCrittenden, 1998).



(Sumber :Ermani dkk,2011)

Gambar 1. Flowsheet Proses PSA

Menurut Ermani (2011) kelebihan dan kekurangan PSA dapat adalah sebagai berikut

Kelebihan Proses PSA, yaitu :

1. Jika nitrogen yang dibutuhkan kurang dari 560 m³/hr (20.000 SCFH) maka proses ini lebih ekonomis jika dibandingkan dengan proses *cryogenic*.
2. Selama proses shutdown, kehilangan pendapatnya lebih kecil dibandingkan dengan *cryogenic*.
3. Produk PSA bisa dikirim dan digunakan dengan cepat.

Kekurangan proses PSA, yaitu :

1. Jika laju alir meningkat menjadi 1120 m³/hr (40.000 SCFH), maka lebih murah jika diproduksi dengan proses *cryogenic*.
2. Sangat berisik jika digabung dengan proses lainnya.

Adsorpsi

Adsorpsi merupakan proses akumulasi adsorbat pada permukaan adsorben yang disebabkan oleh gaya tarik antar molekul atau suatu akibat dari medan gaya pada permukaan padatan (adsorben) yang menarik molekul-molekul gas,uap, atau cairan (Oscik,1982). Daya adsorpsi pada adsorben bergantung pada suhu, tekanan, jenis adsorbatn dan karakteristik adsorben (Sofha,2012).

a. Tekanan Adsorbat

Untuk setiap jenis adsorpsi berdasarkan interaksi molekular yang terjadi, tekanan adsorbat akan mempengaruhi jumlah molekul adsorbat. Pada adsorpsi fisika, bila tekanan adsorbat meningkat jumlah molekul adsorbat akan bertambah. Namun pada adsorpsi kimia, jumlah mol adsorbat akan berkurang jika tekanan adsorbat meningkat.

b. Temperatur

Temperatur yang dimaksud adalah temperatur adsorbat. Pada saat molekul-molekul gas atau adsorbat melekat pada permukaan adsorben akan terjadi pembebasan sejumlah energi yang dinamakan peristiwa eksotermis. Berkurangnya temperatur akan menambah jumlah adsorbat yang teradsorpsi demikian juga untuk peristiwa sebaliknya.

Pemanasan atau pengaktifan adsorben akan meningkatkan daya serap adsorben terhadap adsorbat menyebabkan pori-pori adsorben lebih terbuka pemanasan yang terlalu tinggi menyebabkan rusaknya adsorben sehingga kemampuan penyerapannya menurun (Syauqiah dkk, 2011).

c. Waktu Kontak

Penentuan waktu kontak yang menghasilkan kapasitas adsorpsi maksimum terjadi pada waktu kesetimbangan (Syauqiah dkk, 2011).

d. Jenis Adsorbat

Menurut Sofha (2012) jenis adsorbat yang dapat mempengaruhi daya penyerapan adsorpsi, yaitu :

1. Ukuran Molekul Adsorbat

Ukuran molekul yang sesuai merupakan hal penting agar proses adsorpsi dapat terjadi, karena molekul-molekul yang dapat diadsorpsi adalah molekul-

molekul yang diameternya lebih kecil atau sama dengan diameter pori adsorben.

2. Kepolaran Zat

Apabila berdiameter sama, molekul-molekul polar lebih kuat diadsorpsi daripada molekul-molekul tidak polar. Molekul-molekul yang lebih polar dapat menggantikan molekul-molekul yang kurang polar yang terlebih dahulu teradsorpsi.

e. Karakteristik Adsorben

Luas permukaan dan volume pori dai adsorben berpengaruh pada proses adsorpsi. Dimana jumlah molekul adsorbat yang teradsorpsi meningkat dengan bertambahnya luas permukaan dan volume pori adsorben.

Carbon Molecular Sieve (CMS)

CMS diproduksi melalui prosedur pembuatan khusus sehingga memiliki ukuran pori yang selektif dan sangat sempit. Bahan baku bisa berupa bahan kimia seperti *polyvinylidene dichloride* dan *phenolic resin*, atau menggunakan bahan dari alam berupa batubara antrasit dan batok kelapa. Permukaan CMS pada dasarnya non-polar dan sering digunakan dalam proses produksi nitrogen dengan kemurniaan tinggi dengan metode PSA (Thomas dan Crittenden, 1998).

CMS merupakan adsorben yang berperan penting dalam proses pemisahan gas. Berbagai jenis adsorben yang berasal dari karbon seperti karbon aktif, dan CMS memiliki ukuran pori yang berbeda. Hal ini dikarenakan masing-masing adsorben di produksi dengan cara yang berbeda. Secara umum sifat fisika CMS dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Sifat Fisik *Carbon Molecular Sieve*

Bentuk Partikel	: C
Internal Porosity	: 35 – 50%
Densitas	: 0,5 – 0,7 kg/L
Diameter pori	: 0,3 – 0,6 nm
<i>Sorptive capacity</i> kg/kg (dry)	: 0,5-0,2

(Poling dkk,2008)

CMS termasuk golongan *Molecular Sieve* 3A. *Molecular Sieve* tipe 3Å mempunyai komposisi 0,4 K₂O : 0,6 Na₂O : 1,0 Al₂O₃ : 2,0 SiO₂ : 4,5 H₂O, dibuat dengan cara mensubstitusi kation potassium dari ion sodium yang ada pada struktur 4A, sehingga mampu mereduksi porositas efektif sampai dengan 3Å (Siyono dan Sumijanto, 2012).

Ketika CMSN₂ digunakan dalam pemisahan pada proses PSA, molekul oksigen memiliki diameter lebih kecil dibandingkan dengan molekul nitrogen. Sehingga mengakibatkan molekul oksigen bisa menembus pori lebih cepat. Oleh karena itu nitrogen akan mencapai kemurnian yang lebih tinggi sementara hampir seluruh oksigen terserap (Juntgen dkk, 1981).

Analisa Eksergi

a. Eksergi Spesifik Udara, Nitrogen dan Oksigen Eksergi Gas

$$ex_a(T,P) = c_{pa} (T_a - T_o) - T_o \left(c_{pa} \ln \frac{T_a}{T_o} - R \ln \frac{P_a}{P_o} \right)$$

(Kotas, 1985)

b. Eksergi pada kompresor

Kompresor bisa dimodelkan sebagai kompresor adiabatik atau kompresor *isothermal*. Pada kompresor adiabatik, kerja kompresor per unit mol produk dapat ditentukan dengan persamaan :

$$W_c = \frac{N_F}{N_o} (h_2 - h_1) = \frac{N_F c_{pa} T_1}{N_o \eta_s} \left[(P_H/P_L)^{(k-1)/k} - 1 \right]$$

(Banerjee dkk, 1990)

Jika kompresor yang digunakan dimodelkan sebagai kompresor *isothermal*, maka kerja kompresor bisa dihitung menggunakan persamaan:

$$W_c = \frac{N_F R T_o \ln(P_H/P_L)}{\eta_s N_o} \text{ (Banerjee dkk, 1990)}$$

$$\eta_s = \frac{L_{ad}}{L_s}$$

$$L_{ad} = \frac{mk P_L Q_s}{k-1} \left[\left(\frac{P_H}{P_L} \right)^{(k-1)/mk} - 1 \right]$$

(Sularso dan Tahara, 2000)

Irreversibilitas kompresor per mol produk dapat di hitung menggunakan :

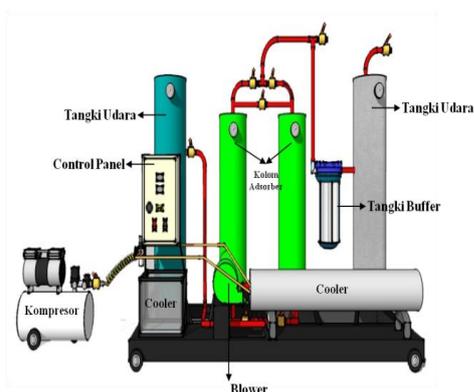
$$I_c = W_c - \frac{N_F}{N_o} (ex_2 - ex_1) \text{ (Banerjee dkk, 1990)}$$

c. Efisiensi exergetic (η_{ex})

$$\eta_{ex} = \frac{ex_{produk}}{ex_{feed}} \text{ (Banerjee dkk, 1990)}$$

2. METODE PENELITIAN

Desain alat produksi nitrogen dapat dilihat pada Gambar 2. Secara umum rancangan ini terdiri dari 5 bagian yaitu, kompresor, tangki udara, kolom adsorber, tangki buffer, dan tangki nitrogen. Kompresor dengan kapasitas 7 bar dipasang pada bagian awal proses untuk meningkatkan tekanan udara atmosfer. Udara bertekanan ini kemudian disaring dengan menggunakan *filter*, serta dilakukan proses pengurangan kadar air dengan penyerapan oleh *silica gel*.



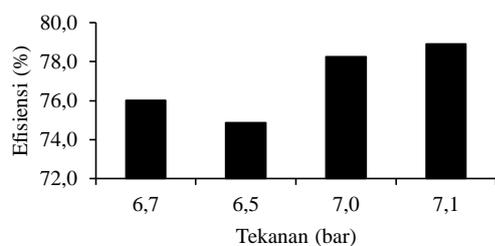
Gambar 2. Desain Alat Produksi Nitrogen

Tangki udara yang digunakan terbuat dari berkapasitas 20,10 L. Kolom adsorber terdiri dari 2 buah kolom dengan kapasitas masing-masing 14,62 L. Kolom adsorber dibuat dengan bahan stainless steel, pemilihan bahan ini dikarenakan tekanan pada kolom adsorber akan mencapai tekanan maksimum 7 bar. Pada masing-masing kolom adsorber terdapat bed adsorben. Didalam bed adsorben dengan kapasitas 10 L berisi adsorben berupa CMS masing-masing sebanyak 8 kg.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Tekanan Terhadap Analisa Eksergi Kompresor

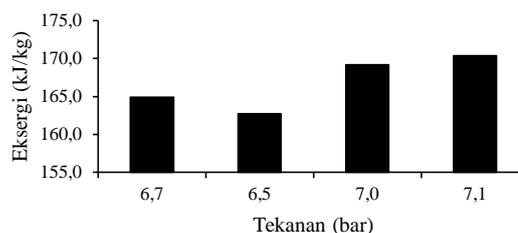
Pada Gambar 3 dapat terlihat bahwa perbandingan tekanan kompresor dan efisiensi kompresor berbanding lurus. Apabila tekanan kompresor meningkat maka efisiensi kompresor juga akan meningkat. Hal ini dikarenakan efisiensi kompresor merupakan perbandingan daya yang berguna dan daya pada poros kompresor.



Gambar 3. Grafik Pengaruh Tekanan dengan Efisiensi Kompresor Aktual

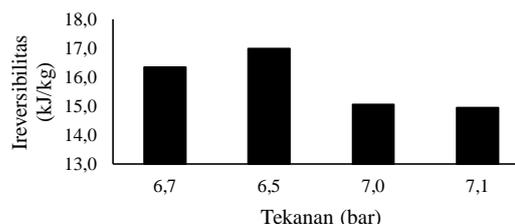
Kompresor yang digunakan merupakan kompresor jenis *reciprocating*. Menurut McCabe dkk (1993) kompresor jenis ini memiliki efisiensi berkisar antara 80-85%. Daya pada poros kompresor yang digunakan pada penelitian ini yaitu 750W. Jika tekanan pada udara keluar kompresor besar maka itu menandakan daya pada poros terpakai dengan baik dalam proses kompresi, sehingga efisiensinya meningkat. Apabila tekanan udara keluar kompresor lebih rendah maka daya pada poros kompresor tidak sepenuhnya digunakan dalam proses kompresi, sehingga efisiensi kompresor pun akan menurun karena penggunaan daya yang tidak efisien.

Pada Gambar 4 terlihat bahwa selain berbanding lurus dengan efisiensi, tekanan udara keluar kompresor juga berpengaruh pada eksergi. Apabila tekanan semakin tinggi maka eksergi udara juga akan semakin tinggi. Hal ini dikarenakan eksergi merupakan kerja maksimal yang di peroleh dalam bentuk energi yang dihasilkan oleh sistem bila sistem tersebut berinteraksi dengan suatu lingkungan referensi tertentu. Sehingga apabila tekanan meningkat maka energi pada udara juga akan meningkat. Peningkatan energi pada udara ini akan meningkatkan energi yang berguna untuk proses selanjutnya dalam produksi nitrogen. Semakin tinggi energi yang dapat dimanfaatkan maka eksergi akan meningkat.



Gambar 4. Grafik Pengaruh Tekanan Terhadap Eksergi Udara Keluar Kompresor

Pada Gambar 5 terlihat bahwa semakin tinggi tekanan udara maka ireversibilitas kompresor semakin kecil. Hal ini dikarenakan pada tekanan yang tinggi pemanfaatan daya pada poros kompresor lebih efisien dibandingkan pada tekanan rendah. Semakin besar panas yang digunakan maka kemungkinan terbentuknya entropi juga semakin besar. Entropi merupakan tingkat ketidakteraturan suatu zat, yang dapat menimbulkan ireversibilitas.



Gambar 5. Grafik Pengaruh Tekanan Terhadap Ireversibilitas Kompresor

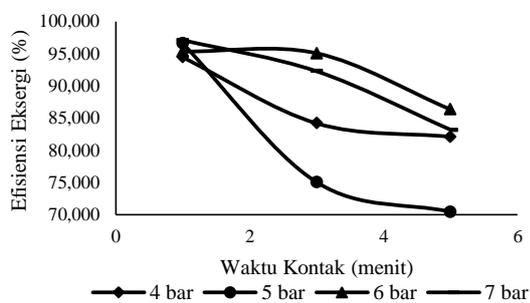
Dalam usaha kompresor untuk melakukan kompresi secara maksimal maka kompresor tersebut memerlukan kerja. Menurut Banerjee kerja kompresor dapat dipengaruhi oleh efisiensi kompresor tersebut. Dalam penelitian ini efisiensi kompresor berbanding terbalik dengan kerja yang dihasilkan kompresor. Semakin tinggi efisiensi kompresor maka kerja kompresor akan semakin kecil. Kerja kompresor yang besar maka akan membutuhkan panas yang besar pula.

Pada penelitian Banerjee dkk (1990) ireversibilitas kompresor mencapai 2,30-5,329 kJ/kg lebih kecil jika di bandingkan dengan dengan penelitian ini yaitu mencapai 14,951-17,5 kJ/kg. Hal ini bisa terjadi karena pada

penelitian Banerjee kompresor yang digunakan memiliki kapasitas tekanan yang lebih besar yaitu mencapai 15,6 bar.

Pengaruh Tekanan dan Waktu Terhadap Efisiensi Eksergi

Pengaruh tekanan dan waktu kontak pada kolom adsorber terhadap efisiensi eksergi dapat dilihat di grafik pada Gambar 6. Pada grafik dapat terlihat bahwa pengaruh tekanan terhadap kemurnian produk nitrogen dan efisiensi eksergi sangat besar. Jumlah komponen yang diadsorpsi dapat ditingkatkan dengan menaikkan tekanan adsorben. Hal ini sesuai dengan data yang didapatkan pada penelitian ini, semakin besar tekanan adsorbat dalam hal ini udara maka persen nitrogen pada produk juga semakin besar. Sama halnya dengan persen nitrogen nilai efisiensi eksergi juga meningkat dengan meningkatnya tekanan.



Gambar 6. Grafik Pengaruh Tekanan Terhadap Efisiensi Eksergi

Semakin tinggi kemurnian produk yang dihasilkan maka akan menghasilkan eksergi yang tinggi pula. Hal ini dikarenakan nilai eksergi berbanding lurus dengan tekanan. Semakin tinggi tekanan maka eksergi yang dihasilkan akan semakin besar pada kondisi lingkungan yang sama. Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Banerjee dkk (1990) semakin tinggi tekanan maka efisiensi eksergi yang dihasilkan juga semakin tinggi. Pada penelitian Banerjee dkk (1990) efisiensi eksergi tertinggi yaitu sebesar 18,4% untuk proses tanpa waktu kontak dan 20,9% untuk proses dengan waktu kontak.

Kemurnian produk yang semakin tinggi akan membuat massa nitrogen pada produk akan lebih besar, hal ini juga dapat meningkatkan efisiensi eksergi. Efisiensi eksergi merupakan perbandingan antara eksergi produk dan eksergi umpan, sehingga apabila kualitas produk meningkat maka efisiensi akan meningkat pula. Dalam penelitian ini dapat diketahui bahwa kemurnian dan efisiensi tertinggi pada tekanan 7 bar yaitu sebesar 93,97% dengan waktu kontak 1 menit. Efisiensi eksergi akan membuat energi yang terkandung dalam produk nitrogen juga tinggi. Sehingga nitrogen akan dapat digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan tekanan tinggi tanpa menggunakan kompresor.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian alat produksi nitrogen dengan metode PSA serta hasil pengolahan data, maka dapat disimpulkan :

1. Dari penelitian didapatkan satu unit alat produksi nitrogen dengan metode PSA yang dapat menghasilkan nitrogen yang berasal dari udara.
2. Pengaruh tekanan dan waktu kontak terhadap kemurnian nitrogen yang dihasilkan yaitu semakin tinggi tekanan maka semakin tinggi kemurnian nitrogen dan efisiensi eksergi, sedangkan untuk waktu kontak pada tekanan tinggi semakin lama waktu kontak maka kemurnian nitrogen dan eksergi akan menurun.
3. Dari hasil pengolahan data, kondisi efisiensi eksergi maksimum didapat dengan menggunakan tekanan 7 bar waktu kontak 1 menit 97,097% dan kemurnian nitrogen tertinggi yaitu pada 4 bar waktu kontak 5 menit yaitu 96,2%. Sedangkan untuk kompresor efisiensi kompresor tertinggi dan irreversibilitas terendah yaitu pada tekanan 7,1 bar yaitu efisiensi 78,925% dan I_c 14,951 kJ/kg.

DAFTAR PUSTAKA

- Banerjee.R, Narayankhedkar.K.G, dan Sukhatme S.P. 1990. *Exergy Analysis of Pressure Swing Adsorption Process for Air Separation*. India : Departement of Mechanical Energy. Indian Institute of Technology.
- Food and Agriculture Organization of The United Nations. (n.d.). *World Fertilizer Trends and Outlook to 2018* (hal. 9). Rome.
- Ermani.A.S, Saber, M., dan Farhadi, F. 2011 . *A Decision Tree for Technology Selection of Nitrogen Production Plant*,45. Iran : Sharif University of Technology
- Ivanova.S, & Lewis.R. 2012 . *Producing Nitrogen via Pressure Swing Adsorption*. American Institute of Chemical Engineering (AIChE).
- Juntgen, H., Knblauch, K., & Klaus, H. 1981 . *Carbon Molecular Sieve: Production from Coal and Application in Gas Separation*, 60.Germany : Butterworth-Heinemann Ltd.
- Kotas,T. 1985. *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*. London : Department of Mechanical Engineering. Queen Mary College. University of London.

- McCabe, W., Smith, J., dan Harriot, P. 1993. *Unit Operations of Chemical Engineering* (5 ed.). Singapore : McGraw Hill
- Poling.E.B, Thomshon.G.H, Friend D.G, Rowley.L.R, Wilding.V.2008. *Perry's Chemical Engineering's Handbook* (8 ed.). United State of America : McGraw Hill.
- Schroter, H.J. 1993 . *Carbon Molecular Sieve for Gas Separation, 7 No 4*(Gas Separation & Purification), 247–251. Germany : Butterworth-Heinemann Ltd.
- Schulte.A, Berndt.S dan Krabiell.K. 1993 . *Nitrogen Generation by Pressure Swing Adsorption on Carbon Molecular Sieve*. Germany : Butterworth-Heinemann Ltd.
- Shen.S.Y, dan Wolsky.A.M. (1980). *Energy and Materials Flows in the Production of Liquid and Gaseous Oxygen*. United State of America : U.S Department of Energy.
- Shofa. (2012, Juli). *Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Baku Ampas Tebu Dengan Aktivasi Kalium Hidroksida*. Depok : Universitas Indonesia.
- Siyono, A., dan Sumijanto. (2012). *Analisis Pengaruh Tekanan Dan Temperatur Terhadap Proses Penyaringan CO₂ Dan H₂O Pada Molecular Sieve, 16*. Bidang Pengembangan Reaktor, Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir.
- Sularso, dan Tahara, H. (2000). *Pompa & Kompresor Pemilihan, Pemakaian dan pemeliharaan*. Jakarta: PT Pradnya.
- Syauqiah, I., Amalia, M., dan Hetty A, K. (2011). *Analisis Variasi Waktu Dan Kecepatan Pengaduk Pada Proses Adsorpsi Limbah Logam Berat Dengan Arang Aktif, 12*. Banjarmasin : Fakultas Teknik Unlam Banjarmasin
- Thomas, W. dan Crittenden, B. (1998). *Adsorption Technology and Design*. Elsevier Sciene & Technology Books.
- Yogesh.K J. (2016). *Cryogenic Liquid Nitrogen Vehicles (ZEV'S)*. Belagavi : Department of Mechanical Engineering. Jain ENgineering Collage.
- (kJ/kmol)
- ex_{N_2} =Spesifik eksergi Nitrogen (kJ/kg)
- I_c =Ireversibilitas pada kompresor (kJ/kmol)
- k, γ =Isentropic exponent
- Lad =Daya yang masuk pada poros kompresor (kW)
- L_s = Daya adiabatik teoritis (kW)
- M =Jumlah Stage Kompresor
- N_F =Mol Feed (kmol)
- N_o =Mol Produk (kmol)
- P_a =Tekanan Udara (bar)
- P_H =*High Pressure* (bar)
- P_L =*Low Pressure* (bar)
- P_{N_2} =TekananNitrogen (bar)
- P_{O_2} =Tekanan Oksigen (bar)
- P_o =Tekanan Lingkungan (bar)
- Q_s =Jumlah volume gas yang keluar dari tingkat terakhir (m³/min)
- R = Konstanta gas (kJ/kmol.K)
- T_a =Temperatur Udara (K)
- T_{N_2} =Temperatur Nitrogen (K)
- T_o =Temperatur Lingkungan (K)
- W_c =Kerja Kompresor (kJ/kmol)

DAFTAR SIMBOL

- η_s =Efisiensi isentropik kompresor
- η_T =Efisiensi isothermal kompresor
- c_{p_a} =Spesifik *molar heat capacities* udara (kJ/kmol)
- $c_{p_{N_2}}$ =Spesifik *molar heat capacities* nitrogen (kJ/kmol)
- $c_{p_{O_2}}$ =Spesifik *molar heat capacities* oksigen