

HUBUNGAN ANTARA TEKANAN TERHADAP EFISIENSI EKSERGI PADA PROSES PEMBUATAN NITROGEN DENGAN METODE *PRESSURE SWING ADSORPTION* (PSA) DI PT. XYZ

Nina Mudji Kusumaningrum^{1*}, Ripal Agus Setiawan¹, Budi Sulistyo Nugroho¹

¹Teknik Pengolahan Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jalan Gajah Mada 38, Cepu 58315, Blora, Jawa Tengah

*E-mail: ninamudjik@gmail.com

ABSTRAK

Studi ini dilakukan untuk memantau proses pembuatan nitrogen melalui teknik *Pressure Swing Adsorption* (PSA) di PT.XYZ. Nitrogen adalah gas yang vital dalam berbagai sektor industri, dan teknik PSA telah diperkenalkan sebagai metode efisien dan ekonomis untuk produksi nitrogen. Penelitian ini melibatkan pengamatan langsung pada proses produksi nitrogen di PT.XYZ, dengan menggunakan teknik diskusi, studi literatur, observasi lapangan, dan analisis. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa teknik PSA digunakan di untuk produksi nitrogen. Teknik ini menggunakan prinsip perbedaan adsorpsi dan difusi untuk memisahkan nitrogen dari udara. Dalam proses produksi nitrogen menggunakan teknik PSA, ada dua vessel adsorben yang menghasilkan nitrogen dengan tingkat kemurnian yang tinggi. *Carbon Molecular Sieve* (CMS) digunakan sebagai adsorben, karena memiliki pori-pori sempit dan selektif, yang mampu menangkap oksigen dan membiarkan nitrogen melewati adsorben karena pori lebih besar. Hasil pengamatan tekanan dan efisiensi eksergi selama periode Juli hingga September 2025 menunjukkan bahwa tekanan produk nitrogen berada pada kisaran 75–81 psig dengan efisiensi eksergi antara 71–75%. Tekanan tertinggi tercatat pada 2 Agustus 2025 sebesar 81,11 psig yang bertepatan dengan efisiensi maksimum 74,63%, sedangkan tekanan terendah terjadi pada 3 September 2025 sebesar 75,50 psig dengan efisiensi minimum 71,50%. Analisis menunjukkan bahwa terdapat korelasi positif antara peningkatan tekanan operasi dengan peningkatan efisiensi eksergi. Secara termodinamika, peningkatan tekanan menyebabkan bertambahnya energi potensial dalam fluida kerja, sehingga energi maksimum (eksergi) yang dapat dimanfaatkan sistem meningkat. Dengan demikian, kondisi operasi pada tekanan yang lebih tinggi memberikan performa termodinamika terbaik, menghasilkan kemurnian nitrogen yang lebih tinggi, serta meningkatkan efisiensi eksergi secara keseluruhan.

Kata kunci: *Carbon Molecular Sieve*, Eksergi, Energi, Nitrogen, *Pressure Swing Adsorption*

1. PENDAHULUAN

Nitrogen adalah senyawa penting dalam industri karena merupakan senyawa *inert*, sehingga dapat digunakan untuk berbagai tujuan, seperti penanganan, pengiriman, pembuatan, dan pengolahan bahan kimia [1]. Khusus untuk industri pupuk, permintaan nitrogen global terus meningkat. Permintaan nitrogen di Indonesia sebesar 6% dari permintaan global [2]. Nitrogen diperlukan pada banyak sektor lain, seperti makanan, elektronik, manufaktur, kesehatan, pertambangan, dan transportasi, selain dalam industri pupuk. Jumlah nitrogen yang sangat besar diperlukan karena berbagai industri sangat membutuhkannya. Nitrogen biasa diperoleh dari udara bebas, hal ini dikarenakan kandungan dalam udara sebagian besar terdiri dari nitrogen yaitu sebanyak 78%. Nitrogen merupakan suatu unsur kimia yang memiliki lambang N dan nomor atom 7 dan unsur yang paling melimpah di atmosfer bumi, mencakup sekitar 78% volume dan 75,5% berat atmosfer seperti tampak pada Tabel 1. Unsur ini juga merupakan salah

satu unsur yang paling melimpah di alam , diperkirakan berada di urutan ketujuh dalam hal ke-limpahan total di dunia.

Tabel 1. Sifat Nitrogen

Rumus Kimia	N ₂
Berat Molekul	28,01
Densitas pada 70°F	0,072 lb/ft ³
<i>Spesific gravity</i> (70°F, 1 atm)	0,967
<i>Spesific volume</i> (70°F, 1 atm)	13,89 ft ³
Boiling point	-320,4°F
Melting point	-345,8°F
Temperatur kritis	-232,4°F
Tekanan kritis	493 psia
<i>Critical density</i>	19,60 lb/ft ³
<i>Laten heat of vaporization at boiling point</i>	85,6 Btu/lb
<i>Laten heat of fusion at melting point</i>	11,1 Btu/lb
Molekul	0,30Å

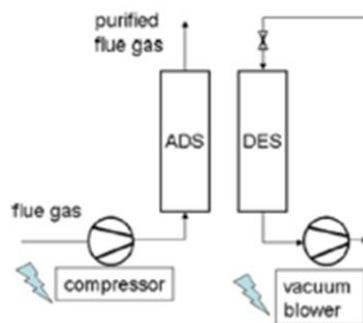
Plant pemisahan udara dirancang untuk menghasilkan nitrogen dari udara melalui proses kompresi, pendinginan, likuifaksi, dan distilasi udara. Produk yang dihasilkan bisa berupa gas yang didistribusikan melalui pipa atau cairan dari proses kriogenik yang didistribusikan menggunakan transportasi darat [3]. Udara dapat dipisahkan menjadi komponen-komponennya melalui proses kriogenik di unit khusus. Proses ini dikenal sebagai rektifikasi kriogenik, sebuah proses termal yang digunakan dalam metode fraksionasi pemisahan udara untuk memisahkan setiap komponen satu sama lain dan menghasilkan produk nitrogen, oksigen, dan argon dalam bentuk cair dan gas dengan tingkat kemurnian yang tinggi.

Ada beberapa jenis teknologi pemisahan udara yang telah dikembangkan, yaitu kriogenik, membrane, dan *Pressure Swing Adsorption* (PSA). Secara umum, nitrogen dipisahkan dari udara menggunakan metode kriogenik, yang melibatkan penurunan suhu hingga mencapai tingkat yang sangat rendah. Namun, metode ini memiliki beberapa kekurangan, seperti membuang banyak energi dalam proses konversi gas menjadi cairan dan banyak gas murni yang terbuang selama proses berlangsung. Seiring perkembangan teknologi, proses produksi nitrogen juga telah berkembang, seperti ditunjukkan oleh munculnya teknologi non-kriogenik seperti sistem membran dan sistem *Pressure Swing Adsorption* [4].

Teknologi *Pressure Swing Adsorption* (PSA) adalah suatu teknologi yang memanfaatkan proses adsorpsi untuk memisahkan komponen dalam udara. Teknologi ini beroperasi berdasarkan perbedaan dalam kesetimbangan adsorpsi dan laju difusi. Dalam proses adsorpsi, bahan adsorben biasanya dibentuk menjadi tabung atau bola. Aliran masukan berinteraksi dengan bahan adsorben dalam *fixed bed*. Untuk mencapai pemisahan, aliran masukan harus dihentikan sebelum melewati *vessel* dan bahan adsorben harus diregenerasi dengan melakukan desorpsi molekul aliran masukan yang telah diserap. Regenerasi bahan adsorben dapat dilakukan dengan mengubah salah satu parameter operasi (komposisi, suhu, dan tekanan) [5].

Regenerasi bahan adsorben dalam teknologi PSA tampak pada Gambar 1, dilakukan dengan mengurangi tekanan total sistem, sehingga tekanan total sistem "berayun" antara tekanan tinggi saat penyerapan aliran masukan dan tekanan rendah saat regenerasi. Konsep ini dipatenkan pada tahun 1932, namun aplikasi pertamanya baru dilakukan tiga puluh tahun

kemudian. Dalam proses penangkapan karbon dioksida menggunakan teknologi PSA, proses dibagi menjadi proses adsorpsi dan desorpsi. Pada proses adsorpsi, tekanan ditingkatkan agar bahan adsorben dapat menyerap karbon dioksida dari aliran gas campuran. Setelah tekanan mencapai tekanan optimal bahan adsorben, molekul yang diinginkan (dalam hal ini karbon dioksida) akan terserap oleh bahan adsorben. Proses desorpsi karbon dioksida dilakukan pada tekanan rendah, yang diperlukan oleh bahan adsorben untuk melepaskan karbon dioksida yang telah diserap (regenerasi bahan adsorben). Hasil akhir dari proses ini adalah gas karbon dioksida dengan tingkat kemurnian tertentu [6].



Gambar 1. Sistem *Pressure Swing Adsorption* Untuk Produksi Pemurnian Nitrogen

Adsorpsi adalah proses penumpukan adsorbat pada permukaan bahan adsorben, yang disebabkan oleh gaya tarik antar molekul atau akibat dari medan gaya pada permukaan padatan (bahan adsorben) yang menarik molekul-molekul gas, uap, atau cairan. Daya adsorpsi pada bahan adsorben bergantung pada suhu, tekanan, jenis adsorbat, dan karakteristik bahan adsorben [7].

a. Tekanan Adsorbat

Interaksi molekular yang terjadi dalam setiap jenis adsorpsi menentukan bagaimana tekanan adsorbat mempengaruhi jumlah molekul adsorbat. Dalam adsorpsi fisika, peningkatan tekanan adsorbat berarti peningkatan jumlah molekul adsorbat. Sebaliknya, dalam adsorpsi kimia, peningkatan tekanan adsorbat mengakibatkan penurunan jumlah mol adsorbat.

b. Temperatur

Temperatur yang dibicarakan di sini adalah temperatur adsorbat. Saat molekul-molekul gas atau adsorbat menempel pada permukaan adsorben, energi tertentu dilepaskan, yang dikenal sebagai proses eksotermis. Penurunan temperatur akan meningkatkan jumlah adsorbat yang teradsorpsi dan sebaliknya. Pemanasan atau pengaktifan adsorben akan meningkatkan daya serap adsorben terhadap adsorbat, yang membuat pori-pori adsorben lebih terbuka. Namun, pemanasan yang berlebihan dapat merusak adsorben, sehingga kemampuan penyerapannya menurun [8].

c. Waktu Kontak

Waktu kontak yang menghasilkan kapasitas adsorpsi maksimum terjadi pada waktu keseimbangan [8].

d. Tipe Adsorbat

Tipe adsorbat memiliki pengaruh terhadap kapasitas penyerapan dalam proses adsorpsi, yaitu dimensi molekul adsorbat dan polaritas substansi. Dimensi molekul yang sesuai sangat krusial dalam proses adsorpsi, sebab molekul-molekul yang bisa diadsorpsi adalah molekul-molekul yang diameternya lebih kecil atau setara dengan diameter pori adsorben. Sedangkan pada polaritas substansi, apabila memiliki diameter yang sama, molekul-molekul yang bersifat polar lebih gampang diadsorpsi dibandingkan dengan molekul-molekul yang nonpolar. Mole-

kul-molekul yang memiliki polaritas lebih tinggi dapat menggantikan molekul-molekul yang polaritasnya lebih rendah yang telah teradsorpsi sebelumnya.

e. Atribut Adsorben

Area permukaan dan volume pori dari adsorben berpengaruh terhadap proses adsorpsi. Jumlah molekul adsorbat yang teradsorpsi bertambah sejalan dengan peningkatan area permukaan dan volume pori adsorben. Partikel yang berfungsi sebagai adsorben memiliki batas dalam menyerap molekul dari fase cair atau gas. Dalam beberapa situasi, mungkin lebih ekonomis untuk membuang adsorben setelah digunakan. Hal ini biasanya dilakukan jika adsorben murah, sulit diregenerasi, dan produk yang dihasilkan memiliki nilai yang sangat tinggi. Namun, pembuangan adsorben ini seringkali tidak ekonomis, sehingga regenerasi biasanya dilakukan, baik secara langsung di tempat atau di luar wadah adsorpsi, hingga adsorben dapat digunakan kembali.

Ada beberapa metode yang umum digunakan dalam proses desorpsi dan regenerasi, termasuk salah satu atau biasanya kombinasi dari metode meningkatkan suhu, mengurangi tekanan, dan menurunkan konsentrasi. *Carbon molecular sieve* dibuat melalui proses produksi spesifik yang menghasilkan ukuran pori yang selektif dan sangat terbatas. Bahan dasarnya dapat berupa bahan kimia seperti polyvinylidene dichloride dan phenolic resin, atau bahan alami seperti batu bara antrasit dan tempurung kelapa. Permukaan *carbon molecular sieve* pada dasarnya bersifat non-polar dan seringkali digunakan dalam proses produksi nitrogen dengan tingkat kemurnian yang tinggi melalui metode PSA. *Carbon Molecular Sieve* adalah jenis adsorben yang memiliki pori-pori sangat kecil dan selektif. Proses produksinya dirancang sedemikian rupa sehingga dapat menghasilkan ukuran pori yang sangat spesifik. bahan dasar yang digunakan dalam produksi *carbon molecular sieve* bisa beragam, mulai dari bahan kimia seperti polyvinylidene dichloride dan phenolic resin, hingga bahan alami seperti batu bara antrasit dan tempurung kelapa.

Permukaan *carbon molecular sieve* yang non-polar membuatnya ideal untuk digunakan dalam proses produksi nitrogen. Metode PSA adalah teknik yang umum digunakan dalam proses ini. Teknik ini memanfaatkan perbedaan tekanan untuk memisahkan komponen dalam campuran gas. Dalam hal ini, *carbon molecular sieve* digunakan untuk menyerap oksigen dan komponen lainnya dari udara, sehingga yang tersisa adalah nitrogen dengan tingkat kemurnian yang tinggi. [9]. oleh karena itu, *carbon molecular sieve* dapat digunakan dalam berbagai aplikasi pemisahan gas, di mana molekul-molekul yang lebih besar atau polar dapat diadsorpsi, sementara molekul-molekul yang lebih kecil atau non-polar dapat dilewatkan. *carbon molecular sieve* sering digunakan dalam metode PSA untuk memisahkan nitrogen dari campuran gas lainnya, seperti oksigen dan argon. Ketika campuran gas tersebut dialirkan melalui *vessel* adsorpsi yang berisi *carbon molecular sieve*, molekul-molekul oksigen dan argon akan teradsorpsi oleh *carbon molecular sieve*, sedangkan molekul nitrogen dapat melewati *vessel* dan dikumpulkan sebagai produk murni.

Efisiensi energi dan eksergi dari suatu sistem menunjukkan karakteristik yang beragam, yang dipengaruhi oleh faktor iklim dan kondisi operasional. Secara fundamental, analisis eksergi, ketika dibandingkan dengan analisis energi, memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang mekanisme kerja proses fisik. Untuk menjelaskan lebih rinci, efisiensi energi merujuk pada sejauh mana energi yang digunakan dalam suatu sistem dapat dikonversi menjadi hasil yang diinginkan. Semakin tinggi efisiensi energi, semakin sedikit energi yang terbuang dalam proses tersebut. Sementara itu, eksergi adalah ukuran energi yang dapat digunakan dalam suatu sistem. Analisis eksergi mempertimbangkan baik energi yang digunakan maupun energi yang terbuang dalam suatu proses. Ini memberikan gambaran yang lebih holistik tentang efisiensi suatu sistem, karena mempertimbangkan tidak hanya energi yang digunakan, tetapi juga bagaimana energi tersebut didistribusikan dan digunakan. Kondisi iklim dan operasional

dapat mempengaruhi baik efisiensi energi maupun eksergi. Misalnya, suhu dan tekanan lingkungan dapat mempengaruhi seberapa efisien suatu proses dapat berjalan, atau berapa banyak energi yang dapat digunakan dalam suatu sistem. Dengan membandingkan analisis eksergi dengan analisis energi, kita dapat mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang bagaimana proses fisik bekerja dan bagaimana efisiensi dapat ditingkatkan. Ini penting dalam berbagai bidang, mulai dari teknik mesin hingga ilmu lingkungan [10].

$$ex_a(T, P) = cp_a(T_a - T_o) - T_o (cp_a \ln \frac{T_a}{T_o} - R \ln \frac{p_a}{p_o}) \quad (1)$$

$$\eta_{ex} = \frac{ex_{produk}}{ex_{feed}} \quad (2)$$

2. METODE

Dalam penyusunan jurnal di PT. XYZ yang dilaksanakan selama dua minggu, mulai tanggal 1 Juli hingga 30 September 2025, dengan beberapa metode penelitian seperti digambarkan pada Gambar 1. Tahapan studi literatur dilakukan dengan mempelajari berbagai referensi seperti buku, jurnal, standar operasional perusahaan, serta sumber literatur lain yang berkaitan dengan proses kerja dan sistem yang digunakan di PT. XYZ. Tujuannya adalah untuk memperoleh landasan teori yang relevan sebagai acuan dalam pelaksanaan dan analisis hasil penelitian. Pengamatan langsung terhadap kegiatan operasional di lapangan dilakukan sekaligus untuk melakukan pengumpulan data primer maupun sekunder yang mendukung topik penelitian. Observasi dilakukan untuk memahami alur kerja, peralatan yang digunakan, dan prosedur yang diterapkan di perusahaan.

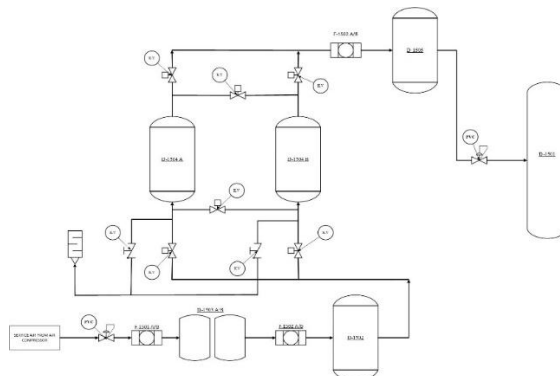
Data yang diperoleh kemudian dievaluasi untuk menilai kesesuaian antara teori dan kondisi aktual di lapangan. Tahap ini bertujuan untuk mengidentifikasi faktor pendukung maupun kendala yang terjadi selama proses kerja. Kemudian dilakukan analisis terhadap data dan hasil evaluasi yang telah dilakukan sebelumnya. Analisa bertujuan untuk menemukan pola, penyebab, serta solusi dari permasalahan yang ditemukan selama observasi. Tahap akhir penelitian berupa penarikan kesimpulan berdasarkan hasil analisis yang dilakukan, serta memberikan saran yang dapat menjadi bahan pertimbangan bagi pihak perusahaan maupun penelitian selanjutnya.



Gambar 2. Flowchart Metode Penelitian

3. PEMBAHASAN

Nitrogen Generation System merupakan salah satu bagian penting pada PT. XYZ. Fungsi utamanya sebagai produk yang akan dijual ke pembeli sebagai selimut atau blanketing bagi tangki dan *purging system*. Blanketing pada tangki ini diperlukan bagi tangki yang berisi hidrokarbon, fungsinya nitrogen ini mampu menjadi selimut agar hidrokarbon tidak tercampur dengan oksigen dari udara. Proses produksi nitrogen pada PT. XYZ ini dapat dilihat pada Gambar 3. Pada proses produksi nitrogen ini udara awal berasal dari *service air* dari *compressor air unit*. *Service air* ini berada dalam kondisi temperatur ambient (25°C) pada tekanan 145 psig dan *flow* sebesar 153,63 SCFM.



Gambar 3. Proses Flow Diagram dari *Nitrogen Generation System*

Feed berasal dari *service air* ini termasuk pada udara basah, udara ini lalu diumpankan ke *coalescing filter* yang berfungsi untuk memisahkan campuran fluida menjadi individu dengan menggunakan prinsip koalesensi. Koalesensi adalah proses di mana molekul fluida menggumpal (berkumpul) untuk membentuk keseluruhan yang lebih besar. Gas basah ke dalam inlet *coalescer*, melewati elemen filter, dan keluar melalui port outlet sebagai gas yang telah di-dehidrasi. Molekul air yang lebih padat akan bergabung dan jatuh ke bagian bawah tangki untuk pembuangan. Selanjutnya gas ini diumpankan ke *desiccant dryers*. Fungsi utama dari *desiccant dryers* adalah untuk menghilangkan kelembaban dari udara yang dialirkan melaluinya. Kelembaban berlebih dalam udara terkompresi dapat mempengaruhi kualitas udara proses dan merusak mesin yang sensitif terhadap kelembaban.

Desiccant dryers bekerja dengan dua tabung yang bekerja secara bersamaan tetapi dengan fungsi yang berbeda. Sementara satu pipa mengeringkan udara bertekanan, pipa lainnya meregenerasinya. Hal tersebut memastikan siklus pengeringan udara yang terus menerus. Selanjutnya gas yang sudah kering ini diumpankan ke dalam air storage tank. Pada air storage tank ini udara sudah kering dan siap diumpankan ke *adsorption vessel*. Vessel adsorpsi ini memanfaatkan metode PSA dengan *Carbon Molecular Sieve* sebagai adsorben. Udara kering dari vessel penyimpanan air dialirkan secara bergiliran ke dalam dua vessel yang berisi bahan adsorben dan beroperasi pada tekanan tinggi. Ketika komposisi O_2 dalam aliran hampir mencapai nilai yang ditentukan 1% (terjadi saat *bed* jenuh), setpoint telah dicapai. Pada titik ini, aliran masuk dialihkan ke vessel adsorpsi lainnya (D-1504 B) dan pada saat yang sama, tekanan pada vessel adsorpsi pertama (D-1504 A) menurun karena proses desorpsi. Begitu lapisan kedua jenuh, aliran masuk diarahkan kembali ke lapisan pertama (D-1504 A). Pada tahap ini, O_2 dipisahkan dari lapisan adsorpsi (D-1504 A) dan (D-1504 B) dan dialirkan ke silencer. Hasil pada aliran produk yaitu sekitar $26,67^{\circ}\text{C}$ dan tekanan sekitar 6,89 bar.

Pada proses adsorpsi, pemisahan terjadi karena beberapa molekul memiliki afinitas lebih besar pada permukaan adsorben dibandingkan molekul lainnya, atau karena pori-pori yang sempit ketika menampung molekul yang lebih besar, akibat perbedaan ukuran atau polaritas molekul. dalam konteks ini, ukuran molekul pada oksigen lebih kecil dibandingkan nitrogen, yaitu 0,29 Å dan 0,30 Å. sementara itu, diameter pori *carbon molecular sieve* adalah 0,30 Å. syarat untuk terjadinya adsorpsi adalah ukuran molekul adsorben harus lebih besar dari ukuran molekul yang akan diadsorpsi, sehingga hanya oksigen yang dapat menembus pori-pori *carbon molecular sieve*.

Proses pemisahan ini berlangsung karena dimensi kinetik oksigen lebih kecil 0,46 nm dibandingkan nitrogen yaitu 0,64 nm, sehingga oksigen dapat berdifusi ke mikropori lebih cepat dibandingkan nitrogen. Difusi adalah proses di mana suatu zat dalam suatu pelarut bergerak dari daerah dengan konsentrasi tinggi ke daerah dengan konsentrasi rendah. Dalam konteks ini, oksigen atmosfer dengan tekanan lebih tinggi bergerak ke pori-pori *carbon molecular sieve* dengan tekanan lebih rendah. Selain faktor-faktor di atas, penyerapan gas oksigen juga dipengaruhi oleh adanya SiO₂ dalam komposisi *carbon molecular sieve*. Silikon dioksida terbentuk oleh ikatan kovalen yang kuat dan memiliki struktur lokal yang terdefinisi dengan baik yang terdiri dari empat atom oksigen yang terikat pada posisi sudut tetrahedron di sekitar atom pusat, atau silikon. Kandungan oksigen pada *carbon molecular sieve* menarik molekul oksigen dari udara, dan oksigen atmosfer menempel pada permukaan *carbon molecular sieve*, memungkinkan nitrogen mengalir. Bentuk *vessel* yang vertikal memungkinkan lebih banyak oksigen yang terserap seiring bertambahnya ketinggian *vessel*, sehingga meningkatkan kemurnian nitrogen yang keluar dari *vessel* adsorpsi. Setelah penyerapan, *carbon molecular sieve* jenuh diregenerasi.

Proses regenerasi berlangsung melalui proses pelepas tekanan atau dekompresi. Proses ini dilakukan dengan membuka katup *blow-off* pada bagian bawah *vessel* adsorpsi. Pada proses adsorpsi, zat-zat yang akan dipisahkan hanya menempel pada adsorben dan tidak menempel pada adsorben. akibatnya, ketika tekanan menurun, oksigen yang terikat pada *carbon molecular sieve* dilepaskan ke udara bebas, sehingga *carbon molecular sieve* dapat digunakan kembali pada proses selanjutnya. Secara teoritis, ketika gas menembus ke dalam rongga adsorber (*carbon molecular sieve*) selama proses adsorpsi, senyawa mengendap di dalam pori-pori adsorber seiring dengan bertambahnya waktu kontak hingga terjadi kejenuhan. Karena pori-pori terisi penuh, maka *carbon molecular sieve* tidak dapat menyerap oksigen dan melepaskan oksigen. Ketika kondisi ini terjadi, oksigen yang tidak terserap akan bercampur kembali dengan nitrogen. Penyerapan *carbon molecular sieve* terjadi lebih cepat pada tekanan tinggi, sehingga saturasi *carbon molecular sieve* terjadi lebih cepat pada tekanan tinggi dibandingkan saat beroperasi pada tekanan rendah. Oleh karena itu, pada saat adsorpsi pada tekanan tinggi, kandungan nitrogen yang dihasilkan semakin menurun seiring bertambahnya waktu kontak. Hal ini sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa peningkatan tekanan adsorbat dapat meningkatkan jumlah adsorpsi dan data pada unit PSA seperti dipaparkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Pengamatan Unit PSA

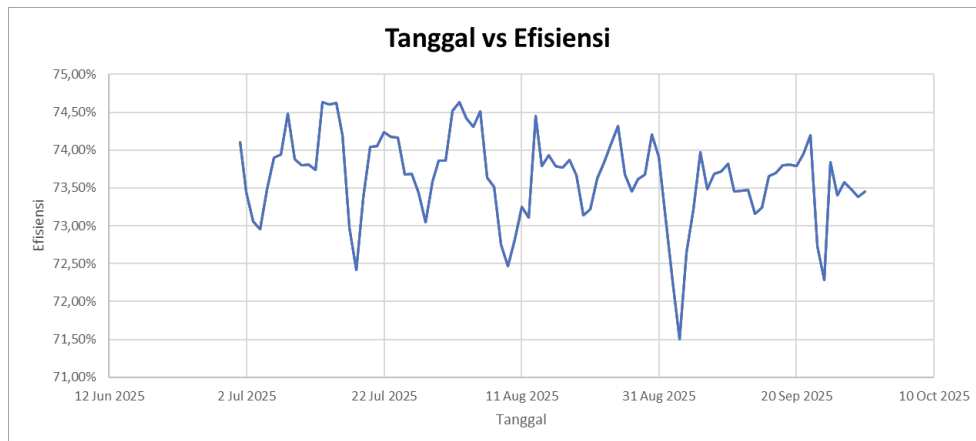
<i>Date</i>	Tekanan (psig)	<i>Date</i>	Tekanan (psig)
01-Jul-25	80,14	16-Aug-25	79,56
02-Jul-25	78,94	17-Aug-25	79,52
03-Jul-25	78,24	18-Aug-25	79,71
04-Jul-25	78,05	19-Aug-25	79,34
05-Jul-25	79	20-Aug-25	78,38
06-Jul-25	79,76	21-Aug-25	78,52

07-Jul-25	79,83	22-Aug-25	79,26
08-Jul-25	80,83	23-Aug-25	79,66
09-Jul-25	79,72	24-Aug-25	80,1
10-Jul-25	79,57	25-Aug-25	80,53
11-Jul-25	79,59	26-Aug-25	79,35
12-Jul-25	79,46	27-Aug-25	78,95
13-Jul-25	81,1	28-Aug-25	79,24
14-Jul-25	81,05	29-Aug-25	79,36
15-Jul-25	81,09	30-Aug-25	80,32
16-Jul-25	80,3	31-Aug-25	79,78
17-Jul-25	78,09	01-Sep-25	78,3
18-Jul-25	77,1	02-Sep-25	76,82
19-Jul-25	78,8	03-Sep-25	75,5
20-Jul-25	80,03	04-Sep-25	77,52
21-Jul-25	80,05	05-Sep-25	78,53
22-Jul-25	80,38	06-Sep-25	79,9
23-Jul-25	80,27	07-Sep-25	79,01
24-Jul-25	80,25	08-Sep-25	79,38
25-Jul-25	79,36	09-Sep-25	79,42
26-Jul-25	79,38	10-Sep-25	79,61
27-Jul-25	78,91	11-Sep-25	78,95
28-Jul-25	78,21	12-Sep-25	78,97
29-Jul-25	79,19	13-Sep-25	78,98
30-Jul-25	79,68	14-Sep-25	78,41
31-Jul-25	79,68	15-Sep-25	78,56
01-Aug-25	80,91	16-Sep-25	79,31
02-Aug-25	81,11	17-Sep-25	79,4
03-Aug-25	80,72	18-Sep-25	79,58
04-Aug-25	80,51	19-Sep-25	79,6
05-Aug-25	80,88	20-Sep-25	79,56
06-Aug-25	79,27	21-Sep-25	79,85
07-Aug-25	79,05	22-Sep-25	80,29
08-Aug-25	77,69	23-Sep-25	77,65
09-Aug-25	77,19	24-Sep-25	76,85
10-Aug-25	77,81	25-Sep-25	79,66
11-Aug-25	78,58	26-Sep-25	78,85
12-Aug-25	78,33	27-Sep-25	79,18
13-Aug-25	80,78	28-Sep-25	79,01
14-Aug-25	79,56	29-Sep-25	78,83
15-Aug-25	79,81	30-Sep-25	78,95

Pada Gambar 4 dapat dilihat hasil pengamatan tekanan pada tangki D-1505 yang merupakan Nitrogen *Surge Tank* yaitu tempat produk hasil adsorpsi. Pada pengamatan yang dilakukan selama periode 1 Juli 2025 hingga 30 September 2025, diperoleh data tekanan harian dengan satuan psig. Pada bulan Juli 2025, hasil tekanan tertinggi terjadi pada tanggal 13 Juli 2025 yaitu

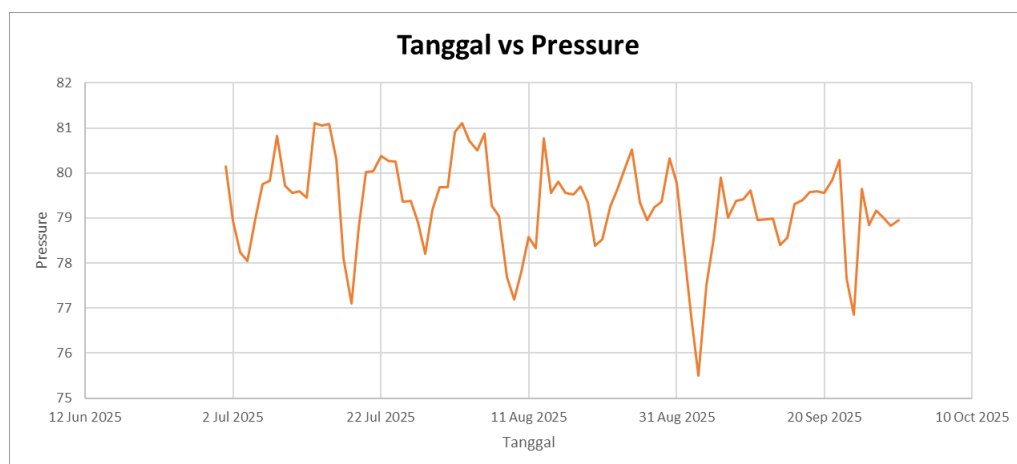
sebesar 81,10 psig. Sedangkan tekanan terendah pada bulan Juli tercatat pada tanggal 18 Juli 2025 sebesar 77,10 psig.

Selanjutnya, pada bulan Agustus 2025, tekanan tertinggi tercatat pada tanggal 2 Agustus 2025 sebesar 81,11 psig, sedangkan tekanan terendah terjadi pada tanggal 9 Agustus 2025 dengan nilai 77,19 psig. Secara umum, tekanan selama bulan Agustus berada dalam kisaran 77–81 psig, menunjukkan kondisi operasi yang relatif stabil. Pada bulan September 2025, nilai tekanan mengalami sedikit penurunan dibandingkan dua bulan sebelumnya. Tekanan tertinggi tercatat pada tanggal 6 September 2025 sebesar 79,90 psig, sementara tekanan terendah terjadi pada tanggal 3 September 2025 sebesar 75,50 psig. Meskipun demikian, tekanan cenderung kembali stabil menjelang akhir bulan dengan nilai rata-rata mendekati 79 psig.



Gambar 4. Hasil Tekanan pada Produk di PT. XYZ

Berdasarkan keseluruhan data pengamatan selama tiga bulan, tekanan paling tinggi tercatat pada tanggal 2 Agustus 2025 sebesar 81,11 psig, sedangkan tekanan terendah terjadi pada tanggal 3 September 2025 sebesar 75,50 psig. Hal ini menunjukkan bahwa selama periode Juli–September 2025, tekanan sistem relatif stabil dengan fluktuasi kecil, menandakan kondisi operasi masih dalam batas normal. Pada Gambar 5 dapat dilihat hasil perhitungan efisiensi energi eksergi berdasarkan tekanan feed dan tekanan produk. Tekanan pada feed sebesar 145 psig atau 9,997 bar dengan energi eksergi sebesar 5865,54 J/g. Pada tekanan produk setiap jamnya maka didapatkan energi eksergi yang berbeda-beda maka didapatkan nilai efisiensi eksergi berikut.



Gambar 5. Hasil Efisiensi Energi Eksergi di PT. XYZ

Pada hasil perhitungan yang telah dilakukan, didapatkan hasil efisiensi harian selama periode 1 Juli 2025 hingga 30 September 2025. Pada bulan Juli 2025, efisiensi tertinggi terjadi pada tanggal 13 Juli 2025 yaitu sebesar 74,63%, diikuti oleh tanggal 15 Juli 2025 sebesar 74,62% dan tanggal 14 Juli 2025 sebesar 74,60%. Sementara itu, efisiensi terendah tercatat pada tanggal 18 Juli 2025 yaitu sebesar 72,42%. Secara umum, efisiensi pada bulan Juli berada di kisaran 72–74% dengan kondisi operasi yang relatif stabil. Selanjutnya, pada bulan Agustus 2025, efisiensi tertinggi tercatat pada tanggal 2 Agustus 2025 sebesar 74,63%, sedangkan nilai terendah terjadi pada tanggal 9 Agustus 2025 yaitu 72,47%. Nilai efisiensi pada bulan ini menunjukkan adanya fluktuasi kecil namun tetap berada dalam kisaran yang aman dan stabil.

Pada bulan September 2025, efisiensi tertinggi terjadi pada tanggal 6 September 2025 sebesar 73,98%, sedangkan efisiensi terendah tercatat pada tanggal 3 September 2025 yaitu sebesar 71,50%. Meskipun terdapat sedikit penurunan pada awal bulan September, efisiensi kembali meningkat dan stabil hingga akhir bulan dengan rata-rata sekitar 73%. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, efisiensi paling tinggi selama periode Juli–September 2025 tercatat pada tanggal 2 Agustus 2025 dengan nilai sebesar 74,63%, sedangkan efisiensi paling rendah terjadi pada tanggal 3 September 2025 dengan nilai sebesar 71,50%. Hasil ini menunjukkan bahwa secara keseluruhan kinerja sistem berada dalam kondisi yang baik dengan tingkat efisiensi yang stabil di atas 70%.

Berdasarkan hasil analisis data tekanan dan efisiensi selama periode Juli hingga September 2025, diperoleh bahwa terdapat korelasi positif antara peningkatan tekanan udara dengan kenaikan nilai efisiensi eksergi sistem. Secara termodinamika, peningkatan tekanan udara pada sistem adsorpsi menyebabkan peningkatan energi potensial yang tersimpan dalam fluida kerja, sehingga jumlah energi maksimum (eksergi) yang dapat diperoleh dari sistem juga meningkat.

Data pengamatan menunjukkan bahwa tekanan tertinggi sebesar 81,11 psig yang terjadi pada tanggal 2 Agustus 2025 bertepatan dengan efisiensi maksimum sebesar 74,63%. Hal ini mengindikasikan bahwa pada tekanan operasi yang lebih tinggi, kapasitas adsorpsi meningkat, sehingga jumlah molekul nitrogen yang terperangkap pada media adsorben juga bertambah. Akibatnya, kemurnian produk nitrogen menjadi lebih tinggi dan energi yang dapat dimanfaatkan dari sistem meningkat secara signifikan.

Peningkatan tekanan berbanding lurus dengan peningkatan eksergi karena besarnya kerja yang dapat dilakukan oleh sistem juga meningkat seiring bertambahnya tekanan operasi. Efisiensi eksergi, yang didefinisikan sebagai rasio antara eksergi produk terhadap eksergi umpan, juga meningkat ketika energi termanfaatkan lebih besar daripada energi yang hilang ke lingkungan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kondisi operasi dengan tekanan tinggi memberikan performa termodinamika terbaik, ditunjukkan oleh meningkatnya efisiensi sistem dan eksergi yang dihasilkan.

4. SIMPULAN

Berdasarkan pengamatan mengenai produksi nitrogen di PT. XYZ didapatkan bahwa produksi nitrogen PT. XYZ menggunakan metode *Pressure Swing Adsorption* (PSA) dengan *Carbon Molecular Sieve* untuk menyerap oksigen. Sistem PSA memakai dua vessel adsorben yang bekerja bergantian yaitu satu dalam fase adsorpsi, satu dalam fase desorpsi. Kenaikan tekanan udara meningkatkan eksergi maksimum yang dapat dimanfaatkan untuk proses produksi berikutnya. Tekanan berpengaruh signifikan terhadap kemurnian nitrogen dan efisiensi eksergi semakin tinggi tekanan, semakin tinggi keduanya. Efisiensi eksergi tertinggi tercatat 74,63% pada tekanan 81,11 psig, menunjukkan energi dalam produk nitrogen berada pada kondisi optimal.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Ivanova dan R. Lewis, "Producing Nitrogen via Pressure Swing Adsorption," dalam American Institute of Chemical Engineering (AIChE), 2012.
- [2] Food and Agriculture Organization of The United Nations, "World Fertilizer Trends and Outlook to 2018," hal. 9, Roma, n.d.
- [3] K. Krabiell dan A. Schulte Schulze Berndt, "Nitrogen Separation by Pressure Swing Adsorption on Carbon Molecular Sieve," dalam *Gas Separation & Purification*, Vol. 7, No. 4, hal. 253-257, 1993.
- [4] H.J. Schroter, "Carbon Molecular Sieve for Gas Separation," dalam *Gas Separation & Purification*, Vol. 7, No. 4, hal. 247-251, 1993.
- [5] D. Tondeur dan P.C. Wankat, "Gas purification by pressure swing adsorption," 1985.
- [6] D. Ko, R. Siriwardane, dan L.T. Biegler, "Optimization of Pressure Swing Adsorption and fractionated vacuum Pressure Swing Adsorption processes for CO₂ capture," 2005.
- [7] T.W. John dan B. Crittenden, *Adsorption Technology and Design*, Oxford: Butterworth Heineman, 1998.
- [8] S. Farahat, F. Sarhaddi, dan H. Ajam, "Exergetic optimization of flat plate solar collectors," dalam *Renew. Energy*, Vol. 34, hal. 1169-1174, 2009.
- [9] Shofa, "Pembuatan Karbon Aktif Berbahan Baku Ampas Tebu Dengan Aktivasi Kalium Hidroksida," Depok: Universitas Indonesia, 2012.
- [10] I. Syauqiah, M. Amalia, dan K. Hetty A, "Analisis Variasi Waktu Dan Kecepatan Pengaduk Pada Proses Adsorpsi Limbah Logam Berat Dengan Arang Aktif," Banjarmasin: Fakultas Teknik Unlam Banjarmasin, Vol. 12, 2011.

Daftar Simbol

η_{ex}	= Efisiensi Exergetic
ex_a	= Energi Exergetic
C_{pa}	= Spesifik molar heat capacities udara (J/mol)
P_a	= Tekanan Udara (bar)
P_o	= Tekanan Lingkungan (bar)
R	= Konstanta gas (kJ/kmol.K)
T_a	= Temperature Udara (K)
T_o	= Temperature Lingkungan (K)