



Penyerapan Karbondioksida Oleh Kolom *Molecular Sieve* Pada Sistem Pemurnian Helium Dalam Peluit

Sriyono^{1*}, Rahayu Kusumastuti¹, Djati H. Salimy¹, Ign. Djoko Irianto¹, Sofia L. Butar Butar, A. Hafid¹, M. Subekti¹, Topan Setiadipura¹, Geni Rina Sunaryo¹

¹Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN)-BATAN, Gedung 80, Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Diterima:

03 Februari 2021

Diterima dalam bentuk revisi:

06 Mei 2021

Disetujui:

10 Mei 2021

Kata kunci:

Penyerapan
Karbondioksida
Molecular sieve
Pemurnian
Helium
Peluit

ABSTRAK

PENYERAPAN KARBONDIOKSIDA OLEH KOLOM *MOLECULAR SIEVE* PADA SISTEM PEMURNIAN HELIUM DALAM PELUIT. Peluit adalah desain konseptual reaktor daya yang dirancang berdasar teknologi *High Temperature Gas-cooled Reactor* (HTGR), dengan siklus konversi daya tidak langsung. Pendingin primer Peluit adalah gas helium dan harus dijaga kemurniannya dari pengotor CO₂ dibawah 0,6 *parts per million by volume* (ppmv) berdasarkan persyaratannya. CO₂ terbentuk karena reaksi oksigen atau air dengan karbon di teras pada saat kejadian *water/air ingress*. Dampak CO₂ terhadap sistem, struktur dan komponen (SSK) adalah terjadinya reaksi dekarburisasi pada tabung *steam generator*. Dalam sistem pemurnian helium Peluit, komponen penyerap CO₂ adalah kolom *molecular sieve* jenis 5A. Penelitian ini bertujuan mendemonstrasikan simulasi proses penyerapan pengotor CO₂ pada kolom *molecular sieve* sepanjang ketinggian kolom yang dirancang sehingga hasil penyerapan menghasilkan konsentrasi batas maksimal pada pendingin primer tidak terlampaui. Metodologi yang digunakan adalah pemodelan perhitungan dengan *software* Matlab dengan metode penyerapan adalah metode Henry. Tinggi kolom diasumsikan 200 cm, diameter kolom 50 cm, laju aliran gas helium adalah 5% dari aliran utama pendingin primer setara dengan 3,0 kg/s, dan konsentrasi pengotor CO₂ adalah 40 ppmv. Berdasarkan simulasi diketahui bahwa setelah 5 detik, gas helium bersih sudah keluar dari ujung kolom dengan konsentrasi pengotor CO₂ tersisa 4×10^{-5} ppmv. Dengan hasil ini menunjukkan bahwa kolom *molecular sieve* mampu membersihkan pengotor CO₂ dengan efisiensi 99,99% dan dapat disimpulkan bahwa *molecular sieve* tipe 5A cocok digunakan pada sistem pemurnian helium Peluit.

ABSTRACT

CARBON DIOXIDE ADSORPTION AT MOLECULAR SIEVE BED OF HELIUM PURIFICATION SYSTEM IN THE PELUIT. The Peluit is a conceptual design of a power reactor based on High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) with indirect power conversion. The primary coolant of Peluit is helium and its purity must be maintained from CO₂ below 0.6 parts per million by volume (ppmv) by its requirements. CO₂ is formed due to the reaction of oxygen or water with a carbon in the core during the water/air ingress. The impact of CO₂ to systems, structures and components (SSC) is steam generator tubes decarburization. In the helium purification system (HPS) of Peluit, the CO₂ removal component is a 5A type molecular sieve bed. This research aims to demonstrate the simulation of CO₂ adsorption in the molecular sieve bed along its design to achieve below its requirement limits. The Matlab software is used to simulate the adsorption process with the Henry method. The height of the column bed is assumed to be 200 cm, the diameter of the column is 50 cm, the flow rate of helium gas is 5% of the main primary coolant mass flow rate equivalent to 3.0 kg/s, and the concentration of CO₂ is 40 ppmv. Based on the simulation it is known that after 5 seconds, the pure helium has come out at the end of the column with the remaining CO₂ concentration of 4.0×10^{-5} ppmv. These results indicate that the molecular sieve bed is capable of removing CO₂ with an efficiency of 99.99% and it concluded that molecular sieve 5A suitable for helium purification of Peluit.

Keywords: adsorption, carbon dioxide, molecular sieve, purification, helium, Peluit.

© 2021 Jurnal Pengembangan Energi Nuklir. All rights reserved

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki banyak penduduk dan membutuhkan pasokan energi yang besar. Untuk mendorong peningkatan ekonomi masyarakat, selain energi listrik, dibutuhkan pula energi panas yang dapat digunakan untuk

mengolah sumber daya alam mentah menjadi produk yang lebih bernilai ekonomis [1]. Pada Tahun 2019, Batan bekerjasama dengan Tsing Hua University China membuat desain konseptual reaktor daya yang dinamakan

*Penulis Korespondensi:

Email: sriyono@batan.go.id

Pembangkit Uap Untuk Industri (Peluit). Peluit didesain berdasarkan teknologi *pebble reactor* [2]. Peluit berdaya 150 MW thermal, bersifat modular, mempunyai keselamatan pasif [3], dan mampu untuk kogenerasi [4]. Reaktor ini didesain dengan siklus konversi daya tak langsung (*indirect cycle*), dengan gas helium sebagai pendingin primer sedangkan air sebagai pendingin sekunder. Peluit menggunakan bahan bakar bola (*pebble*), dengan skema pengisian bahan bakar *multipass* [2].

Pendingin primer helium adalah salah satu sistem yang sangat penting dalam Peluit. Kemurnian helium pada sistem primer harus dijaga dari berbagai gas pengotor CO, CH₄, CO₂, H₂, H₂O, O₂, N₂ dan gas-gas mulia produk fisi agar dampak buruk terhadap pekerja dan sistem, struktur & komponen (SSK) dapat dicegah [5]. Dampak buruk tersebut adalah reaksi oksidasi grafit, deposisi karbon, dekarburisasi, dan peningkatan paparan radiasi pada SSK [6][7]. Timbulnya pengotor pada pendingin primer diakibatkan adanya reaksi antara air atau udara yang masuk ke teras dengan material SSK primer yang mayoritas terbuat dari bahan karbon, seperti bahan bakar *pebble*, reflektor dan *absorber pebble* [8].

Desain konseptual Sistem Pemurnian Helium (SPH) pada Peluit dirancang dengan 3 buah rangkaian (*train*), 2 *train* dioperasikan pada saat operasi normal secara bergantian atau *redundancy*, sedangkan 1 *train* dioperasikan pada saat kondisi kecelakaan (*accident*). Pengotor pada pendingin primer Peluit dikategorikan menjadi 2 macam yaitu pengotor partikel padat (*particulate impurities*) dan pengotor gas (*gaseous impurities*) [9][10]. Selama reaktor beroperasi gas-gas pengotor akan terbentuk dan SPH dirancang untuk memisahkan berbagai pengotor agar kualitas helium selalu terjaga dengan konsentrasi pengotor selalu dibawah batas yang dipersyaratkan [3], [11]. Beberapa tahapan pada proses pemisahan pengotor yaitu penyaringan debu karbon, oksidasi dengan oksidator CuO, kondensasi air, adsorpsi atau penyaringan molekuler, dan adsorpsi karbon aktif pada kondisi temperatur kriogenik [12]. Filtrasi debu karbon dilakukan dengan *cartridge filter* HEPA [9]. Proses oksidasi berfungsi mengkonversi CO menjadi CO₂ dan H₂ menjadi H₂O dengan oksidator CuO [13]. Air atau H₂O

yang terbentuk dikondensasi dengan *water trap*, sedangkan CO₂ ditangkap dengan *molecular sieve*. Oksigen (O₂), nitrogen (N₂) dan gas-gas mulia produk fisi (Xe, Kr) [14] dihilangkan dengan penyerap karbon pada kondisi temperatur kriogenik [15].

Gas CO₂ yang terkandung dalam pendingin helium dapat mempengaruhi penurunan kekuatan mekanik tabung *steam generator* yang disebabkan oleh proses dekarburisasi suhu tinggi [16]. Dengan adanya deposisi karbon pada permukaan tabung juga akan mengakibatkan penurunan efisiensi perpindahan panasnya [17]. Kerusakan-kerusakan tersebut akan memperpendek usia komponen [16]. Pengendalian kimia pada pendingin primer ataupun sekunder reaktor Peluit harus dilakukan secara ketat agar keandalan SSK terjamin. Selain mencegah adanya korosi grafit di teras reaktor, pengendalian berbagai pengotor pada pendingin primer juga akan mempertahankan keandalan dan kekuatan SSK [18].

Salah satu komponen utama SPH adalah kolom/*bed molecular sieve*. Kolom ini berfungsi menyerap gas CO₂. Proses penyerapan gas CO₂ pada *molecular sieve* menggunakan prinsip *pressure swing adsorption* (PSA). Hasil penelitian sebelumnya telah diketahui bahwa tekanan optimum untuk proses PSA pada kolom *molecular sieve* adalah 30 bar [7]. Sedangkan temperatur optimalnya adalah temperatur kamar, 30 °C. Pada perancangan kolom *molecular sieve*, faktor ketinggian kolom menjadi hal yang sangat penting. Semakin tinggi kolom efisiensi pemisahan semakin baik, karena interaksi gas helium dengan *molecular sieve* semakin lama, sehingga gas helium dengan kemurnian tinggi akan didapatkan. Akan tetapi secara ekonomi, kolom *molecular sieve* yang tinggi tidak menguntungkan. Oleh sebab itu pada penelitian ini akan dilakukan pemodelan dan simulasi proses penyerapan pada kolom *molecular sieve* secara *pressure swing adsorption* (PSA) dengan metode Henry [19]. *Molecular sieve* yang digunakan adalah tipe 5A. Tujuan simulasi adalah untuk mendapatkan hasil pemurnian gas helium dari pengotor gas CO₂ pada berbagai variasi ketinggian kolom. Metodologi yang digunakan adalah perhitungan dan pemodelan kolom *molecular sieve* dengan perangkat lunak Matlab. Rancangan ketinggian kolom sangat

menentukan waktu kontak gas helium kotor dengan *molecular sieve*. Dengan mengetahui karakteristik proses penyerapan pada berbagai ketinggian kolom dapat ditentukan rancangan tinggi optimum kolom sehingga secara ekonomi lebih menguntungkan.

2. TEORI

2.1. Sistem Pemurnian Helium Reaktor Peluit

Desain konseptual Sistem Pemurnian Helium (SPH) pada Peluit dirancang dengan 3 buah rangkaian (*train*), 2 *train* dioperasikan pada saat operasi normal, sedangkan 1 *train* dioperasikan pada saat kondisi kecelakaan (*accident*). Dua *train* memiliki 5 komponen utama seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Spesifikasi teknis pendingin primer dan sekunder Peluit ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Pendingin Peluit.

Parameter	Nilai	Satuan
Pendingin Primer		
Laju alir pendingin primer	57	kg/s
Tekanan operasi	7	MPa
Temperatur <i>inlet</i> teras	250	°C
Temperatur <i>outlet</i> teras	750	°C
Rata-rata Temperatur Bahan Bakar (<i>normal operation</i>)	540,8	°C
Temperatur maksimum bahan bakar (<i>normal operation</i>)	903,7	°C
Temperatur maksimum bahan bakar pada saat DLOFC	1450	°C
Waktu untuk mencapai temperatur maksimum bahan bakar pada saat DLOFC	30	jam
Pendingin Sekunder		
Media	<i>steam</i>	
Laju alir pada kondisi nominal	59,5	kg/s
Tekanan (<i>Steam Generator/SG outlet</i>)	14	MPa
Temperatur (<i>Steam Generator outlet</i>)	540	°C
Temperatur <i>feedwater</i> (masuk ke <i>steam generator</i>)	200	°C
Tekanan <i>feedwater</i> (masuk ke SG)	~14,9	MPa
Laju alir <i>feedwater</i>	59,5	kg/s

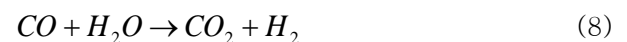
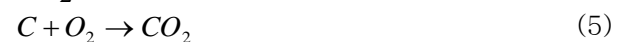
Komponen-komponen utama tersebut adalah *cartridge filter*, *bed* oksidator CuO, *condenser/cooler*, *bed molecular sieve*, dan *bed* karbon aktif kondisi kriogenik. Setiap komponen mempunyai fungsi membersihkan pengotor yang spesifik sesuai dengan kapasitasnya. *Cartridge filter HEPA* membersihkan debu karbon, *bed* oksidator CuO

mengkonversi H₂ menjadi H₂O dan CO menjadi CO₂, *condenser* memisahkan air dari pendingin helium, *bed molecular sieve* menyerap CO₂ dan CH₄, sedangkan karbon aktif menyerap oksigen dan nitrogen yang beroperasi pada kondisi kriogenik [20].

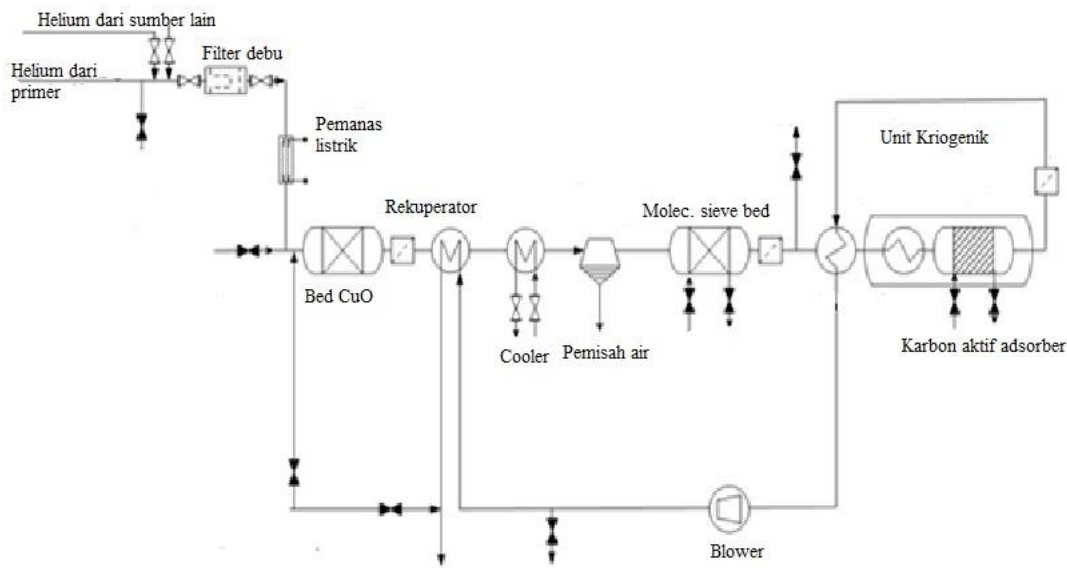
Aliran pendingin primer Peluit adalah 57 kg/detik, sedangkan aliran masuk ke SPH didesain 5% dari aliran utama yaitu 3,0 kg/detik.

2.2. Interaksi Udara dan Air Terhadap Material Karbon di Teras Peluit

Udara dan air yang masuk ke pendingin primer Peluit terbawa oleh aliran sehingga di dalam teras akan berinteraksi dengan material teras reaktor yang sebagian besar terbuat dari material karbon (seperti bahan bakar, *reflector*, *absorber ball*, dll.). Air dan udara dapat masuk ke pendingin primer dimungkinkan pada saat kejadian *water/air ingress* [21]. *Water ingress* terjadi ketika ada kebocoran (*leakage*) sisi pendingin primer yang masuk ke pendingin primer. Kebocoran terjadi akibat kerusakan tabung-tabung *steam generator* [18], [21], [22]. Sedangkan udara masuk ke pendingin primer dimungkinkan pada saat perawatan tahunan [23], [24]. Reaksi-reaksi yang mungkin terjadi ditunjukkan pada persamaan-persamaan (1-8) dibawah ini [9].



Dari keseluruhan reaksi di atas, diketahui bahwa di aliran pendingin helium akan terbentuk pengotor antara lain CO, CH₄, CO₂, H₂, H₂O, dan O₂ [16]. Sedangkan pengotor N₂ timbul karena adanya udara yang masuk ke pendingin primer, dan secara alamiah udara telah mengandung N₂ [25].



Gambar 1. Komponen utama satu buah rangkaian (*train*) Sistem Pemurnian Helium Peluit..

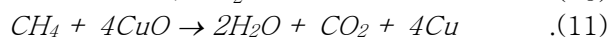
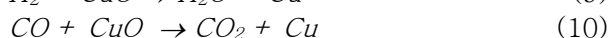
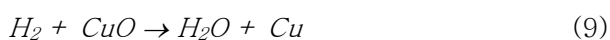
Batasan konsentrasi pengotor di dalam pendingin primer Peluit telah ditetapkan dan mengadopsi pada desain RDE [26] dan HTR-10 China [27] ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Konsentrasi pengotor yang diijinkan di dalam pendingin primer Peluit.

Pengotor	Batas maksimum (ppmv*)
H ₂ O	≤ 0,2
O ₂	≤ 0,02
N ₂	≤ 1,0
CO ₂	≤ 0,6
CO	≤ 3,0
CH ₄	≤ 1,0
H ₂	≤ 5,0

*ppmv = part per millions by volume

Karena pengotor gas H₂ dan CO sulit untuk diserap maka kedua gas ini harus dikonversi terlebih dahulu menjadi H₂O dan CO₂ yang mempunyai ukuran molekul lebih besar sehingga mudah dipisahkan. Gas H₂ dan CO dikonversi menjadi H₂O dan CO₂ dengan menggunakan oksidator CuO (reaktor CuO) pada temperatur 350°C [28]–[31]. Reaksi konversi ditunjukkan pada persamaan (9), (10) dan (11). Dalam proses ini CH₄ juga akan mengalami oksidasi menghasilkan H₂O dan CO₂.



Dengan demikian maka seluruh senyawa yang sulit untuk diserap dapat dihilangkan. Jika oksidator jenuh maka dilakukan regenerasi

menggunakan Oksigen pada suhu 300 °C. Setelah proses konversi gas H₂ dan CO menjadi H₂O dan CO₂ dilakukan maka selanjutnya gas helium pendingin primer dilewatkan melalui kolom penyaring molekuler (*molecular sieve*) yang beroperasi pada temperatur kamar (30°C) dan tekanan tertentu. Pada kolom ini akan terjadi adsorpsi gas CO₂, dan H₂O.

2.3 Proses Adsorpsi pada *Molecular Sieve*

Proses pemisahan antara adsorbat dalam media tertentu oleh zat padat (adsorben) disebut dengan adsorpsi. Adsorbat akan terikat pada permukaan adsorben, jumlah atau besarnya adsorbat yang terserap ditentukan oleh daya adsorpsi suatu adsorben. Proses adsorpsi tergantung pada konsentrasi keseimbangan zat terlarut atau tekanan adsorpsi gas, temperatur proses, luas spesifik padatan atau luas permukaan adsorben, dan sifat adsorbat/adsorben itu sendiri [30], [32]. Makin kecil ukuran butir adsorben maka makin besar pula luas permukaannya, sehingga daya adsorpsi semakin kuat. Sifat adsorpsi pada permukaan zat padat sangat selektif artinya pada campuran zat hanya satu komponen yang diadsorpsi oleh zat padat tertentu. Metode yang digunakan pada proses adsorpsi ada beberapa antara lain : metode *Langmuir*, metode *Henry*, dan metode *Freundlich*.

Metode adsorpsi *Langmuir* pada kondisi isothermal didasarkan atas beberapa asumsi, yaitu (a) adsorpsi hanya terjadi pada lapisan

tunggal (*monolayer*), (b) panas adsorpsi tidak tergantung pada penutupan permukaan, dan (c) seluruh permukaan adsorben bersifat homogen. Jenis *molecular sieve* sangat bermacam-macam, penggunaannya sangat tergantung pada jenis pengotor yang akan dibersihkan. Untuk pengotor CO₂ jenis yang digunakan adalah tipe 5A. Spesifikasi teknis *molecular sieve* 5A ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Spesifikasi *molecular sieve* tipe 5A. [33]

Parameter	Nilai
Luas permukaan per gram	700 s/d 800 m ²
Diameter pori	5 Å
Porositas internal	0,7
Volume pori per gram	0,3 cm ³
Ukuran partikel	1,6 mm

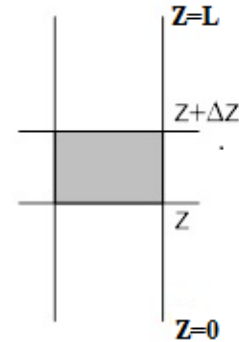
3. METODOLOGI

Proses adsorpsi pada kolom *molecular sieve* dimodelkan dan disimulasi menggunakan *software Matlab*. Penyerapan gas pengotor CO₂ pada *molecular sieve* bekerja berdasarkan prinsip *Pressure Swing Adsorption* (PSA). PSA adalah proses adsorpsi berdasarkan pada kecenderungan gas untuk tertangkap pada tekanan tinggi dan terdesorpsi (terlepas kembali) pada tekanan yang lebih rendah. Proses PSA berguna untuk memurnikan produk yang diinginkan hingga tingkat yang sangat kecil bergantung dengan adsorben (bahan penyerap) yang digunakan. Adsorben yang digunakan untuk PSA sangat tergantung dengan jenis dan konsentrasi pengotor yang ingin dibersihkan. Pada perhitungan ini, ditentukan tinggi kolom, diameter kolom, porositas adsorben, dan konsentrasi awal pengotor. Ketinggian kolom dimodelkan seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Pada penelitian kali ini CO₂ sebagai adsorbat dan *molecular sieve* tipe 5A sebagai adsorben.

Proses adsorpsi pada kolom *molecular sieve* diasumsikan sebagai sebuah tabung dengan ketinggian L, dan diameter d, dengan zeolit di dalam tabung. Aliran gas pengotor masuk ke tabung dengan konsentrasi tertentu. Ada beberapa asumsi yang digunakan dalam simulasi menggunakan Matlab yaitu antara lain:

- Jumlah pengotor sangat kecil yaitu 40 ppmv sehingga pengurangan gas karena adsorpsi diabaikan, semua sifat gas helium yang digunakan sebagai acuan dasar perhitungan.

- CO₂ sebagai adsorbat terserap dalam pori-pori *molecular sieve*
- Ukuran partikel adsorben (*molecular sieve*) kecil mempunyai komposisi yang seragam



Gambar 2. Model kolom *molecular sieve* dengan perubahan ketinggian.

Secara umum, neraca massa adsorbat pada elemen volume gas dapat ditentukan menggunakan persamaan dasar bahwa : *laju akumulasi = laju input - laju keluar - laju adsorpsi*. Persamaan transfer massa adsorbat dari gas ke adsorben ditentukan dengan persamaan (12) [34], yaitu:

$$F_A = k_y a \frac{\rho_g}{M r_g} (y_A - y_A^*) S \Delta z \varepsilon \quad (12)$$

Dari persamaan (12) dapat dihitung keseimbangan padat-gas yang ditentukan dengan berbagai hukum keseimbangan yaitu hukum Henry (persamaan 13), Freundlich (persamaan 14), dan Langmuir (persamaan 15).

$$y_A^* = H_A \cdot x_A \quad (2)$$

$$y_A^* = K_f \cdot x_A^{n_f} \quad (3)$$

$$y_A^* = \frac{ax_A}{1 + bx_A} \quad (4)$$

dengan: F_A adalah konsentrasi adsorbat yang ditransfer per satuan waktu (mol/s), k_y adalah koefisien transfer massa pada fase gas (m²/s), a adalah luas per satuan volume (m²/m³), y_A adalah fraksi mol adsorbat pada gas, y_A^* adalah fraksi mol adsorbat di permukaan adsorben, S adalah luas penampang kolom (m²), Δz adalah pertambahan panjang (m), ε adalah porositas kolom (*bed*), H_A adalah konstanta Henry, K_f dan n_f adalah konstanta kesetimbangan Freundlich, A dan b adalah konstanta kesetimbangan

Langmuir, x_A adalah fraksi mol adsorbat per massa adsorben.

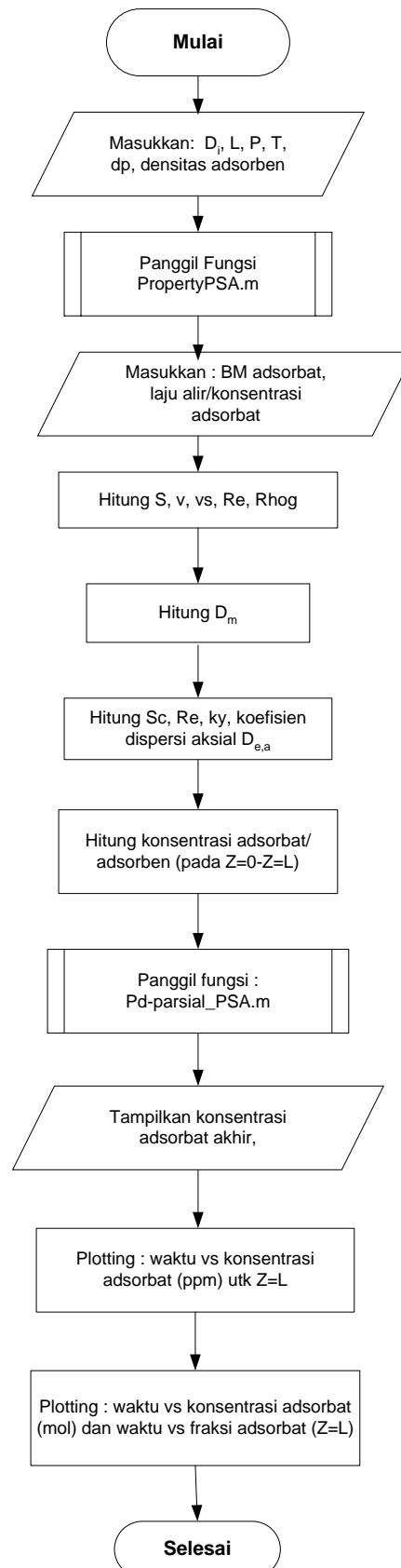
Pengotor dapat didefinisikan di awal program. Diagram alir (*flow chart*) proses adsorpsi dengan PSA ditunjukkan pada Gambar 3, 4 dan 5. Diagram alir tersebut secara berturut-turut menjelaskan program utama, fungsi tekanan parsial dan fungsi properties *adsorbat*.

Data-data *properties* pengotor yang harus dimasukkan (diinput) adalah berat molekul (BM). Metode adsorpsi yang menjadi pilihan adalah metode Henry. Metode adsorpsi linier Henry cocok digunakan untuk pengotor dengan konsentrasi yang sangat kecil dibandingkan medianya (fluida yang sangat encer) [35]. Program utama memanggil fungsi tekanan parsial, dan fungsi properties dari gas helium, dan pengotor CO₂ kemudian menghitung proses adsorpsi sepanjang *increment* panjang, dan menampilkan hasil perhitungan berupa konsentrasi sisa CO₂ dan *plotting* grafik yang dibutuhkan.

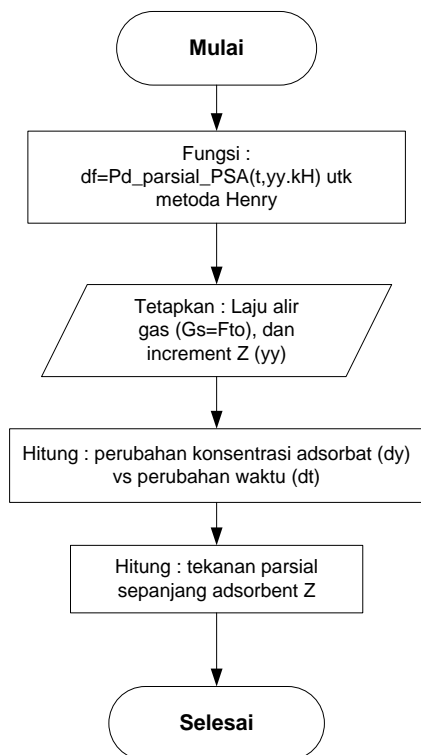
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan persyaratan desain, pengotor CO₂ dalam pendingin primer harus dihilangkan sampai dengan batas maksimalnya yaitu < 0,6 ppmv. Dalam pendingin primer Peluit, gas CO₂ terbentuk karena reaksi oksidasi karbon yaitu interaksi Oksigen dengan unsur Karbon di dalam teras. Selain CO₂ (karbon dioksida) ada pengotor CO (karbon monoksida) yang harus dibersihkan dengan proses konversi terdahulu dari CO menjadi CO₂ menggunakan oksidator CuO. Oksidasi gas H₂ dan CO menggunakan CuO mengubah H₂ menjadi H₂O sedangkan CO menjadi CO₂. Kedua senyawa ini akan lebih mudah dipisahkan dibandingkan dalam bentuk H₂ dan CO karena mempunyai ukuran molekul yang lebih besar. H₂O dipisahkan dari gas helium dengan proses kondensasi sedangkan CO₂ dipisahkan dengan adsorpsi molekuler/*molecular sieve*. Proses kondensasi akan menghasilkan air dan akan diolah sebagai limbah cair, sedangkan CO₂ yang terserap dalam matriks zeolit akan diregenerasi dan gas CO₂ akan diolah sebagai limbah gas. Struktur molekul zeolit 5A adalah Na₁₂[(AlO₂)₁₂(SiO₂)₁₂].27H₂O dengan kapasitas adsorpsi terhadap CO₂ pada rentang temperatur

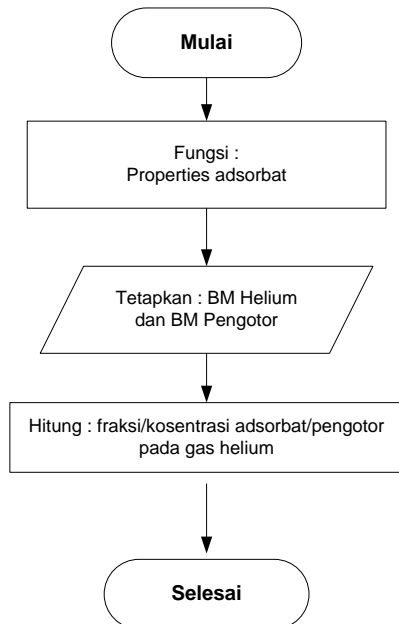
100–200 °C adalah adalah 0,056 – 1,033 mmol/g [36].



Gambar 3. Diagram Alir Program Utama Perhitungan Adsorpsi pada *Molecular Sieve* Metode PSA dengan Matlab.



Gambar 4. Diagram Alir Fungsi Perhitungan Tekanan Parsial Metode PSA dengan Matlab.

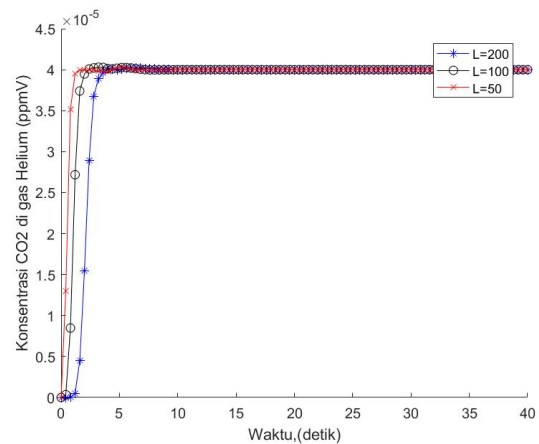


Gambar 5. Diagram Alir Fungsi Perhitungan Parameter/Properties Adsorbat pada *molecular sieve* dengan Matlab.

Pada sisi masukan kolom, konsentrasi awal CO₂ ditentukan 40 ppmv. Metode adsorpsi yang disimulasikan adalah metode Henry karena konsentrasi pengotor sangat kecil dibandingkan fluida heliumnya. Ketinggian

kolom diasumsikan dengan L=200 cm, dan diameter bed/kolom *molecular sieve* adalah 50 cm. dengan konsentrasi pengotor CO₂ awal adalah 40 ppmv. Konsentrasi ini nilainya jauh melebihi dari batas maksimum 0,6 ppmv dalam pendingin primer, yaitu 60 kalinya.

Pada simulasi diamati, konsentrasi pengotor/adsorbat pada tiga titik area ketinggian kolom yaitu ketinggian L=50 cm (seperempat panjang kolom), L=100 cm (setengah panjang kolom) dan L=200 cm (satu kolom penuh). Gambar 6 menunjukkan hubungan antara waktu dan konsentrasi pengotor CO₂ yang terdeteksi (tersisa) pada aliran gas helium di ketinggian kolom 50 cm, 100 cm dan 200 cm.



Gambar 6. Hubungan konsentrasi CO₂ di gas helium dengan waktu pada ketinggian kolom *molecular sieve*.

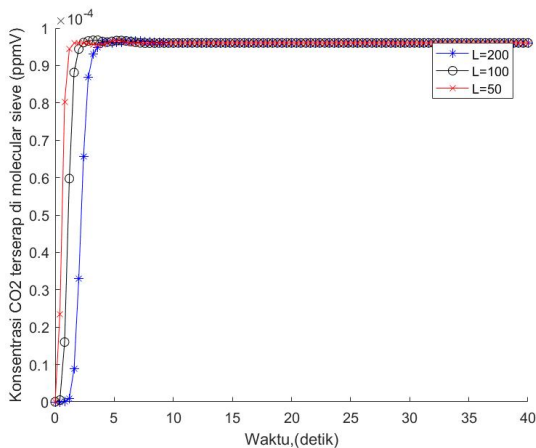
Berdasarkan Gambar 6 pula dapat dijelaskan bahwa titik L=0 cm, adalah titik awal *input* gas helium kotor yang masuk ke kolom *molecular sieve*. Pada ketinggian L=50 cm, konsentrasi pengotor mulai terdeteksi pada 0,5 detik pertama dan kemudian konsentrasi pengotor selalu tetap pada 4×10^{-5} ppmv pada detik ke 2. Hal ini menunjukkan bahwa pada detik ke 2, pada ketinggian 50 cm, konsentrasi pengotor tersisa pada gas helium adalah 4×10^{-5} ppmv, sedangkan sebanyak 39,99996 ppmv atau 99,99% terserap di dalam adsorben zeolit di sepanjang L=0–50 cm.

Pada titik pengamatan L=100 cm, diketahui bahwa konsentrasi pengotor CO₂ keluar pada ujung L=100 cm mulai terdeteksi pada t=2,5 detik, dan akan mencapai kestabilan pada t=4,5 detik dengan konsentrasi pengotor tersisa 4×10^{-5} ppmv.

Pada titik pengamatan L=200 cm, diketahui bahwa konsentrasi pengotor CO₂

keluar pada ujung $L=200$ cm mulai terdeteksi pada $t=5$ detik, dan akan mencapai kestabilan pada $t=8,5$ detik dengan konsentrasi pengotor tersisa 4×10^{-5} ppmv. Konsentrasi sisa pengotor pada titik-titik tersebut akan mengalami peningkatan setelah durasi waktu tertentu, hal ini dikarenakan adsorben/zeolit mengalami kejenuhan sehingga pengotor CO_2 tidak mampu diserap lagi. Jika hal ini terjadi maka perlu dilakukan proses regenerasi terhadap zeolit, dengan menaikkan temperatur proses/pemanasan sehingga CO_2 akan terlepas dan matriks zeolit menjadi bersih kembali untuk siap digunakan sebagai adsorben.

Hasil simulasi jumlah CO_2 terserap pada matriks *molecular sieve* ditunjukkan pada Gambar 7. Jumlah adsorbat (CO_2) yang terserap pada adsorben (*molecular sieve* tipe 5A) pada mencapai konsentrasi yang tetap yaitu 1×10^{-4} ppmv menunjukkan pada capaian waktu yang berbeda karena proses penyerapan CO_2 ke matriks *molecular sieve* membutuhkan waktu kontak tertentu. Pada ketinggian $L=50$ cm mencapai jumlah konsentrasi tetap tersebut dicapai pada 1,5 detik, untuk $L=100$ cm pada 2 detik, sedangkan pada $L=200$ cm tercapai pada 3,5 detik. Konsentrasi tetap tercapai pada waktu yang pendek disebabkan karena konsentrasi pengotor diasumsikan sangat kecil berdasarkan pengalaman operasi HTGR [16].

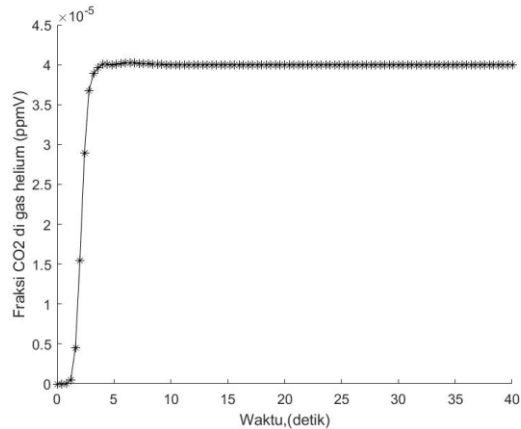


Gambar 7. Hubungan konsentrasi CO_2 terserap dengan waktu pada ketinggian kolom *molecular sieve*.

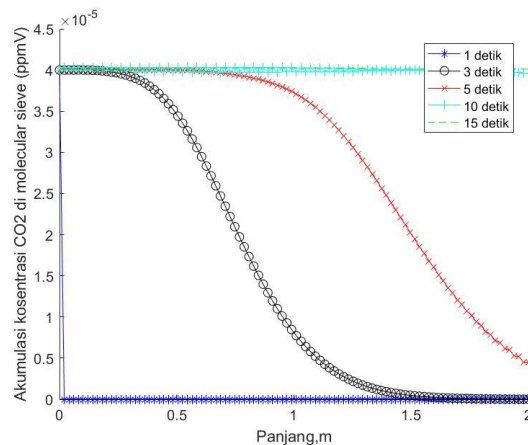
Hasil simulasi jumlah fraksi adsorbat di dalam gas helium ditunjukkan pada Gambar 8, dalam simulasi menunjukkan bahwa fraksi adsorbat 4×10^{-5} ppmv pada kesetimbangan konsentrasi setelah proses 5 detik.

Gambar 9 menjelaskan hasil simulasi jumlah mol adsorbat terserap dalam matriks

molecular sieve selama perubahan waktu $t_1=1$ detik, $t_2=3$ detik, $t_3=5$ detik, $t_4=10$ detik dan $t_5=15$ detik di variasi panjang kolom. Jumlah adsorbat terserap pada matriks *molecular sieve* adalah ditunjukkan sebagai luasan area dibawah masing masing garis grafik yang terbentuk.



Gambar 8. Hubungan pengotor CO_2 terdeteksi pada ujung kolom dengan waktu.



Gambar 9. Akumulasi CO_2 terserap terhadap ketinggian pada kolom *molecular sieve*.

Proses penyerapan CO_2 pada *molecular sieve* sangat tergantung dengan waktu kontak antara adsorbat (pengotor) dengan matriks *molecular sieve*. Semakin lama waktu kontak gas helium yang akan dibersihkan dengan material *molecular sieve* maka akan semakin baik proses pemurniannya. Hal ini dapat ditunjukkan pada Tabel 4, dengan memvariasikan ketinggian kolom *molecular sieve* maka didapatkan kemurnian helium yang semakin tinggi pula. Tabel 4 menunjukkan hubungan ketinggian kolom (L) dan konsentrasi CO_2 tersisa pada aliran ujung kolom *molecular sieve*. Dengan menggunakan spesifikasi teknis disain kolom *molecular sieve* yang sama baik

itu konsentrasi input pengotor, temperatur, tekanan, dan diameter tetapi ketinggian kolom (L) divariasikan dari 2,0 m, sampai 7,0 m maka didapatkan sisa adsorbat pada ujung kolom yang semakin kecil. Hal ini membuktikan bahwa waktu kontak adsorbat (gas helium kotor) dengan adsorben (*molecular sieve* 5A) sangat menentukan efisiensi pemisahannya.

Tabel 4. Hubungan tinggi kolom dengan konsentrasi CO₂ tersisa pada ujung kolom *molecular sieve*.

Ketinggian kolom (m)	Konsentrasi CO ₂ pada input L=0 (ppmv)	Konsentrasi CO ₂ tersisa pada ujung kolom Z=L (ppmv)
2,00	40	$4,0000 \times 10^{-5}$
3,00	40	$4,0000 \times 10^{-5}$
4,00	40	$4,0000 \times 10^{-5}$
5,00	40	$3,9999 \times 10^{-5}$
6,00	40	$3,9996 \times 10^{-5}$
7,00	40	$3,9994 \times 10^{-5}$

5. KESIMPULAN

Proses adsorpsi pada *molecular sieve* telah disimulasikan dengan *software* Matlab. Tinggi kolom diasumsikan 200 cm, diameter kolom 50 cm, laju aliran gas helium adalah 5% dari aliran utama pendingin primer setara dengan 3,0 kg/s, dan konsentrasi pengotor CO₂ adalah 40 ppmv. Berdasarkan simulasi diketahui bahwa setelah 5 detik, gas helium bersih sudah keluar dari ujung kolom dengan konsentrasi pengotor CO₂ tersisa 4×10^{-5} ppmv. Dengan hasil ini menunjukkan bahwa kolom *molecular sieve* mampu membersihkan pengotor CO₂ dengan efisiensi 99,99%. Penelitian penyerapan pengotor CO₂ menggunakan *molecular sieve* 5A ini berhasil membuktikan bahwa sisa pengotor pada gas helium memenuhi syarat batas maksimum yang diijinkan dalam pendingin primer reaktor Peluit.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN)-Batan atas dukungan fasilitas laboratorium dan perangkat lunak yang diberikan.

DAFTAR ACUAN

- [1] BPPT, *Outlook Energi Indonesia 2017*. 2017.
- [2] T. Setiadipura, J. S. Pane, and Z. Basjemeleh, "Studi Awal Desain Pebble Bed Reactor Berbasis HTR-PM Dengan Resirkulasi Bahan Bakar Once-Through-Then-Out," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. 18, no. 1, pp. 59–65, 2016.
- [3] Sriyono Sriyono, R. Kusmastuti, S. Bakhri, and G. R. Sunaryo, "Analysis of helium purification system capability during water ingress accident in RDE," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 962, no. 1, 2018.
- [4] D. H. Salimy *et al.*, "The assessment of nuclear hydrogen cogeneration system application for steel industry," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2180, no. December, 2019.
- [5] S. Sriyono, R. Kusumastuti, A. Hafid, and D. H. Salimy, "Temperature profile analysis on cryogenic activated carbon column of helium purification testing facility," *AIP Conf. Proc. 2180, 020046*, vol. 020046, no. December, 2019.
- [6] X. Yu and S. Yu, "Analysis of fuel element matrix graphite corrosion in HTR-PM for normal operating conditions," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 240, no. 4, pp. 738–743, 2010.
- [7] S. Sriyono, I. Karliana, S. Sumijanto, and R. Kusumastuti, "Analisis Pressure Swing Adsorption Pada Proses Penyerapan Gas Pengotor Oleh Molecular sieve Pada Sistem Pemurnian Helium RGTT200K," in *Semnas TKPFN-19*, 2013, pp. 200–209.
- [8] W. Peng, T. Zhang, Y. Zhen, and S. Yu, "Graphite dust resuspension in an HTR-10 steam generator," *Particuology*, vol. 17, pp. 149–157, 2014.
- [9] S. Sriyono, T. Setiadipura, and G. R. Sunaryo, "Carbon dust in primary coolant of RDE: its problem and solution," *Tri Dasa Mega*, vol. 22, no. 3, 2018.
- [10] S. Sriyono *et al.*, "The Temperature Dependence Analysis of Carbon Monoxide Conversion on CuO Bed of RDE Helium Purification System," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1493, no. 1, 2020.
- [11] D. Priambodo, M. Pancoko, Sriyono, and T. Setiadipura, "Design of Helium Purification System for Indonesia Experimental Power Reactor-Reaktor Daya Eksperimental," *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 7, pp. 1–7, 2018.
- [12] R. NIEDER, "Predictions on an HTR Coolant Composition after Operational Experience With Experimental Reactors," in *Specialists Meeting on Coolant Chemistry, Plate-out and Decontamination in Gas-cooled Reactors*, 1980, pp. 144–152.
- [13] S. Sumijanto, N. Huda, and S. Sriyono, "Optimasi Laju Konversi Molekuler CO Pada Sistem Pemurnian Helium RGTT200K," *Pros. Semin. Nas. Teknol. Energi Nukl.*, 2015.
- [14] J. J. van der Merwe and P. P. Coetzee, "Development of a model to predict fission product behaviour in spherical fuel elements during water ingress events," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 237, no. 1, pp. 47–53, 2007.
- [15] S. Sriyono *et al.*, "Temperature profile analysis on cryogenic activated carbon column of helium purification testing facility," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2180, no. December, 2019.
- [16] K. Natesan, A. Purohit, and S. W. Tam, "Materials

- Behavior in HTGR Environments,” *NUREG/CR-6824*, p. 85, 2003.
- [17] I. Mutoh, Y. Nakasone, K. Hiraga, and T. Tanabe, “Corrosion behavior of Ni-base superalloys at 1373 K in simulated HTGR impure helium gas environment,” *J. Nucl. Mater.*, vol. 207, no. C, pp. 212–220, 1993.
- [18] Sriyono, R. Kusmastuti, S. Bakhri, and G. R. Sunaryo, “Analysis of helium purification system capability during water ingress accident in RDE,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 962, no. 1.
- [19] P. Sinha and N. Padhiyar, “Optimal startup operation of a pressure swing adsorption,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 1, pp. 130–135, 2019.
- [20] I. D. Irianto, Sriyono, S. Bakhri, S. Dibyo, R. Kusumastuti, and P. Kadarno, “Performance Analysis of the Helium Purification System in the Indonesia Experimental Power Reactor,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1772, no. 1, 2021.
- [21] Y. Zheng, L. Shi, and Y. Wang, “Water-ingress analysis for the 200 MWe pebble-bed modular high temperature gas-cooled reactor,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 240, no. 10, pp. 3095–3107, 2010.
- [22] Y. Wang, L. Shi, and Y. Zheng, “Influence of protective actions on ingress-water mass in Steam generator tube rupture of HTGR,” in *International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, HTR 2016*, 2016, pp. 439–445.
- [23] R. C. Martineau and R. A. Berry, “A preliminary investigation of rapid depressurization phenomena following a sudden DLOFC in a VHTR,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 240, no. 5, pp. 1013–1021, 2010.
- [24] G. Zuying and S. Lei, “Thermal hydraulic transient analysis of the HTR-10,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 218, no. 1–3, pp. 65–80, 2002.
- [25] A. Kurniawan, “Pengukuran Parameter Kualitas Udara (CO, NO₂, SO₂, O₃ dan PM₁₀) Di Bukit Kototabang Berbasis Ispu,” *J. Teknosains*, vol. 7, no. 1, p. 1, 2018.
- [26] D. Priambodo, M. Pancoko, and T. Setiadipura, “Design of Helium Purification System for Indonesia Experimental Power Reactor- Reaktor Daya Eksperimental,” vol. 6, no. 7, pp. 1–7, 2018.
- [27] Z. Wu, D. Lin, and D. Zhong, “The design features of the HTR-10,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 218, no. 1–3, pp. 25–32, 2002.
- [28] S. Sriyono, A. M. Hilda, and M. Kamayani, “Pemodelan dan Simulasi Proses Adsorpsi Gas Pengotor oleh Molecular Sieve pada Pendingin Rde dengan Software Chemcad,” *Pros. Semin. Nas. Teknoka*, 2019.
- [29] R. V. Siriwardane, M.-S. Shen, E. P. Fisher, and J. A. Poston, “Adsorption of CO₂ on Molecular Sieves and Activated Carbon,” *Energy & Fuels*, vol. 15, no. 2, pp. 279–284, Mar. 2001.
- [30] A. Wahby, J. Silvestre-Albero, A. Sepúlveda-Escribano, and F. Rodríguez-Reinoso, “CO₂ adsorption on carbon molecular sieves,” *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 164, pp. 280–287, 2012.
- [31] M. S. Yao, R. P. Wang, Z. Y. Liu, X. D. He, and J. Li, “The helium purification system of the HTR-10,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 218, no. 1–3, pp. 163–167, 2002.
- [32] L. M. Mulloth, “Carbon Dioxide Adsorption in Spacecraft on a 5A Zeolite Cabins Designed for CO₂ Removal,” no. November, 1998.
- [33] C. Hua, W. Zong-xin, Y. Mei-sheng, and G. Shi-yi, “Experimental Investigation and Modeling of Adsorption of Carbon Dioxide on 5A Molecular Sieve for Helium Purification of High-Temperature Gas-cooled Reactor,” *Energy Procedia*, vol. 39, pp. 208–226, 2013.
- [34] D. W. Green and R. H. Perry, *Perry's Chemical Engineers Handbook*, 8th ed. Mc. Graw-Hill, 2008.
- [35] J. B. Utami, W. B. Sediawan, B. Murachman, and G. S. Wijaya, “Prediksi Kesetimbangan Adsorpsi Uranium pada Air dan berbagai sedimen,” *J. Forum Nukl.*, vol. 9, no. 2, pp. 29–37, 2015.
- [36] C. Megias-Sayago, R. Bingre, L. Huang, G. Lutzweiler, Q. Wang, and B. Louis, “CO₂ Adsorption Capacities in Zeolites and Layered Double Hydroxide Materials,” *Front. Chem.*, vol. 7, 2019.