



# Unjuk Kerja Pengangkutan Pneumatik Sistem *Small Adsorber Sphere Shutdown System* untuk Sistem Pemadaman Kedua RDE

Denissa Beauty Syahna<sup>\*1</sup>, Dedy Priambodo<sup>1</sup>, Guntur Eko Putro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir, Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta 12710

<sup>2</sup>Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir, Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gedung 71, Setu, Tangerang Selatan 15310.

## INFORMASI ARTIKEL

### Riwayat Artikel:

Diterima:

26 November 2018

Diterima dalam bentuk revisi:

03 Desember 2018

Disetujui:

04 Desember 2018

### Kata kunci:

Unjuk kerja

Pneumatik

SAS

RDE

Diameter

Waktu-pengangkutan

## ABSTRAK

**UNJUK KERJA PENGANGKUTAN PNEUMATIK SISTEM SMALL ADSORBER SPHERE SHUTDOWN SYSTEM UNTUK SISTEM PEMADAMAN KEDUA RDE.** Reaktor Daya Eksperimental (RDE) adalah reaktor berbendingin gas temperatur tinggi yang merupakan program unggulan BATAN untuk mempromosikan penggunaan energi nuklir, meningkatkan penerimaan masyarakat terhadap energi nuklir, membuktikan kehandalan sistem keselamatan dari teknologi reaktor maju, menguasai teknologi reaktor generasi IV dan mendorong kemampuan industri nuklir nasional. RDE menggunakan *Small Adsorber Sphere Shutdown system* (SAS) sebagai sistem kedua pemadaman reaktor. SAS terdiri atas elemen SAS (B4C) 5mm sebanyak 270.000 buah, sistem pengangkutan pneumatik dan bejana penyimpanan elemen SAS. Studi ini bertujuan untuk mengetahui unjuk kerja sistem pengangkutan pneumatik elemen SAS dengan parameter yang ditinjau adalah target waktu pengangkutan sebesar 100, 120, 140, 160, 180 dan 200 detik serta diameter pipa pengangkutan sebesar 40mm, 50mm, dan 60mm. Dari studi diketahui bahwa penurunan tekanan terbesar terjadi pada diameter pipa 40mm dan target waktu pengangkutan elemen SAS 100 detik yaitu sebesar 2.3psi; sedangkan penurunan tekanan terendah diperoleh pada diameter 60mm dan target waktu pengangkutan elemen SAS 200 detik yaitu sebesar 0.7 psi.

## ABSTRACT

**THE PERFORMANCE OF PNEUMATIC CONVEYER FOR SMALL ADSORBER SPHERE SHUTDOWN SYSTEM OF RDE SECOND SHUTDOWN SYSTEM.** Reaktor Daya Eksperimental (RDE)-Experimental Power Reactor, the High temperature gas cooled reactor type, is the BATAN priority programme for promoting the NPP development plan, increasing public acceptance on NPP National Program, proofing the safety level of the most advanced technology, owning the Gen 4th reactor technology and pursuing national capabilities on nuclear industries. RDE applied small adsorber sphere shutdown system for its secondary reactor shutdown system. SAS consist of 270.00 spheres SAS element of 5mm diameter B4C, pneumatic conveying system, and SAS element storage vessel. The objective of study is for identify the performance of SAS pneumatic conveying system as per selected parameters such as targeted conveying time: 100, 120, 140, 160, 180, and 200 second; then pipe diameter: 40, 50, and 60mm. From this study has shown that the highest pressure loss was 2.3 psicame from 40mm pipe diameter and targeted pneumatic conveying time of SAS element was 100 second; in other hand the lowest pressure loss was 0.7 psi came from and targeted pneumatic conveying time of SAS element was 200 second.

**Keywords:** performance, pneumatic, SAS, RDE, diameter, conveying time.

© 2018 Jurnal Pengembangan Energi Nuklir. All rights reserved

## 1. PENDAHULUAN

Reaktor Daya Eksperimental (RDE) merupakan program unggulan BATAN untuk mempromosikan penggunaan energi nuklir, meningkatkan penerimaan masyarakat terhadap energi nuklir, membuktikan kehandalan sistem keselamatan dari teknologi reaktor maju, menguasai teknologi reaktor generasi IV dan mendorong kemampuan

industri nuklir nasional. RDE menggunakan reaktor gas temperature tinggi (*High Temperature Gas Cooled Reactor-HTGR*) dengan kapasitas panas sebesar 10 MWth, menggunakan bahan bakar tipe bola (pebble), pendingin gas helium dan unit konversi daya tak langsung dengan siklus uap[1]-[5]. Pemilihan HTGR sebagai teknologi untuk RDE juga dimaksudkan untuk unjuk kemampuan reaktor melakukan kogenerasi sehingga

\*Penulis korespondensi.  
E-mail: denissabs@batan.go.id

kedepan BATAN atau Indonesia pada umumnya dapat mendesain dan memproduksi sendiri PLTN HTGR yang mampu untuk menyokong kebutuhan listrik nasional maupun listrik dan panas untuk industri.

RDE akan menggunakan dua buah sistem pemadaman reaktor yaitu batang kendali (*control rods*) dan sistem bola-bola pemadam (*Small Adsorber Spheres Shutdown System-SAS*)[6], [7]. SAS merupakan sistem unik yang pertama kali diadopsi oleh Siemens/Interatom pada reactor *pebble bed* HTGR yaitu HTR-Module[8],[9]. Sistem ini terdiri dari bola-bola kecil penyerap neutron-Elemen SAS ( $B_4C$  dalam grafit) yang dirancang jatuh dari tangki penyimpanannya secara gravitasi ke saluran dalam reflektor saat reaktor harus dipadamkan jika batang kendali tidak bisa beroperasi. Elemen SAS harus dikembalikan ke dalam tangki penyimpanan yang berada di atas *top thermal shield* secara pneumatik saat reaktor akan dihidupkan kembali/*start-up*.

Pengangkutan secara pneumatik untuk SAS menjadi hal yang sangat penting mengingat kecepatan pengangkutan ini menjadi salah satu faktor dapat segera dimulainya proses *start-up*. Beberapa penelitian terdahulu terkait pengangkutan pneumatik telah dilakukan, diantaranya studi terkait perhitungan penurunan tekanan dan pendinginan pada pengangkutan vertikal secara pneumatik, desain pengangkutan pneumatik, koefisien tahanan dan kecepatan terminal pada partikel bola dan non-bola[10]-[13]. Sedangkan studi terkait SAS masih terbatas pada studi karakteristik laju elemen SAS pada pipa vertical secara gravitasi[14].

Dari informasi di atas diketahui bahwa studi pengangkutan pneumatik sudah banyak dilakukan namun pengangkutan pneumatik untuk SAS masih belum banyak dilakukan. Maka studi ini akan membahas sistem pengangkutan pneumatik elemen SAS.

## 2. METODE

### 2.1. Spesifikasi Sistem SAS

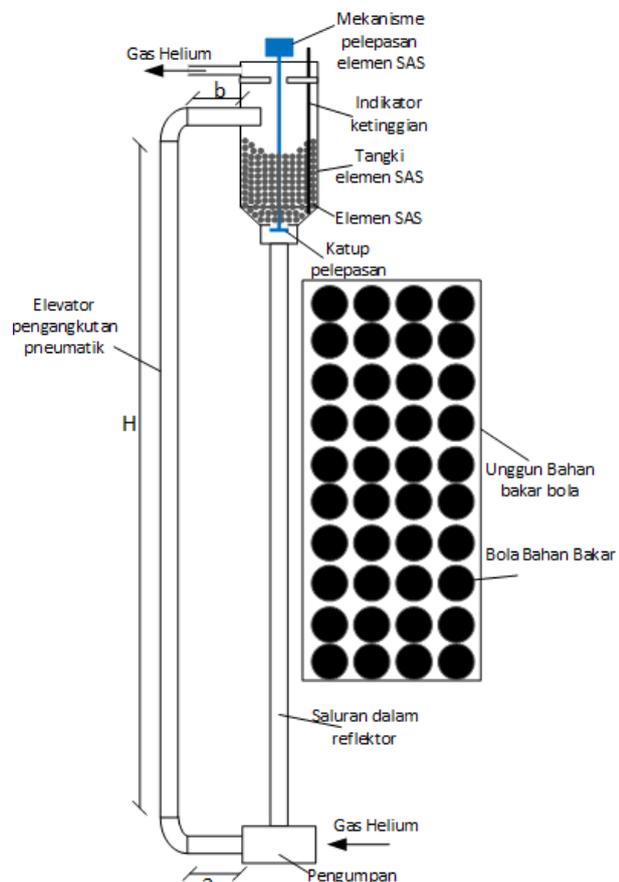
Spesifikasi sistem SAS yang akan dikaji dalam studi ini dapat dilihat pada Tabel 1,

sedangkan diagram sistem pengangkutan dapat dilihat pada Gambar 1.

Tabel 1. Spesifikasi Sistem SAS.

Diameter elemen SAS, mm	5
Komposisi elemen SAS, % berat	25% $B_4C$
Jumlah elemen SAS,	270.000
Pemipaan pneumatic	
- Panjang pipa horizontal (a & b), m	2x1.5
- Ketinggian pengangkutan (H), m	10

Sistem SAS disusun atas komponen penyimpanan SAS, saluran dalam reflektor, pengumpan dan elevator. Studi ini akan dibatasi pada pengaruh kecepatan pengangkutan elemen SAS terhadap sistem pengangkutan SAS. Kecepatan pengangkutan elemen SAS adalah waktu yang diperlukan oleh system pengangkutan pneumatik SAS untuk mengembalikan seluruh elemen SAS dari pengumpan menuju sistem penyimpanan elemen SAS. Pengaruh kecepatan pengangkutan SAS menjadi menarik untuk ditinjau mengingat kecepatan pengembalian elemen SAS ke sistem penyimpanan elemen SAS menentukan juga kecepatan dapat dimulainya proses *start-up* reaktor.



Gambar 1. Diagram Sistem SAS.

Oleh karenanya, sub-sistem yang ditinjau hanya pada perpipaan antara pengumpan hingga tangki elemen SAS (a-H-b).

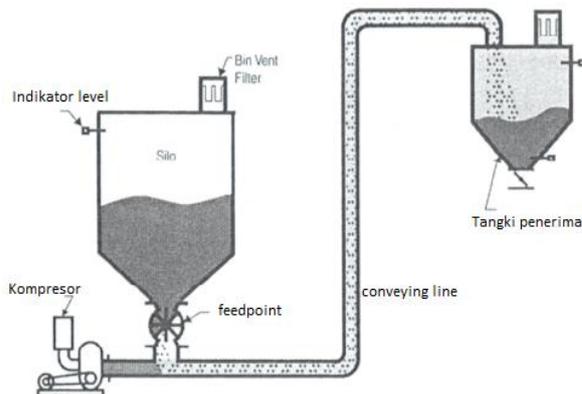
Pada studi ini disimulasikan waktu pengangkutan elemen SAS antara 100 – 200 detik. Range kecepatan ini diambil didasarkan pada data kecepatan pengangkutan elemen SAS HTR-modul dan HTR10[15]. Hal lainnya adalah diameter pemipaan pneumatik yang dipakai adalah 40 mm, 50 mm dan 60mm. penggunaan diameter pipa ini didasarkan pada data studi sebelumnya pada HTR10[14].

## 2.2. Teori Pengangkutan Pneumatik

Pengangkutan pneumatik dibagi menjadi dua yaitu *dilute* dan *dense* dimana keduanya dapat bekerja secara *under pressure*/material didorong atau *vacuum*/material disedot[16].

### 2.2.1. Dilute Phase

Sistem ini bergantung pada kecepatan aliran udara. Di awal sistem, kecepatan aliran udara (dimana material diambil, tertahan di *feedpoint*), umumnya dianggap sebagai daerah kritis karena udara pada kecepatan terendah dalam seluruh sistem terdapat pada titik ini. Material turun dari keadaan statis ke dalam aliran udara. Kecepatan udara yang dibutuhkan untuk mengambil bahan tergantung pada masing-masing partikel ukuran dan padatan, tetapi dapat berkisar 3,000 untuk 8.000 fpm (*feet per minute*). *Dilute phase* beroperasi pada kecepatan yang relatif tinggi di perbedaan tekanan. Diagram tipikal pengangkutan Pneumatik tipe *dilute* dapat dilihat pada Gambar 2.

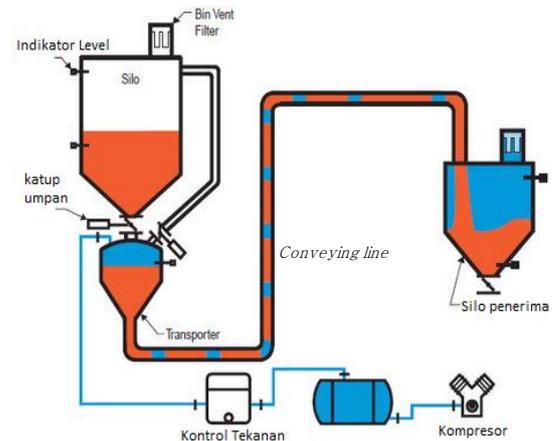


Gambar 2. Diagram Tipikal Pengangkutan Tipe *Dilute*.

### 2.2.2. Dense Phase

Dalam sistem ini, bahan dari penyimpanan dimuat oleh gravitasi ke transporter. Setelah transporter penuh, katup umpan bahan dan ventilasi katup ditutup dan udara dikompresi dicampurkan ke dalam transporter.

Udara terkompresi bersama material dalam transporter sedikit demi sedikit mengalirkan material ke *conveyor line* dan ketangka penerima. Saat *transporter* dan *conveyor line* kosong, udara terkompresi dimatikan dan transporter diisi ulang. Sistem ini terus terjadi sampai semua material yang dibutuhkan untuk proses tersebut telah ditransfer. Diagram tipikal pengangkutan tipe *Dense* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Tipikal Pengangkutan Tipe *Dense*.

## 2.3. Desain Pengangkutan Pneumatik Elemen SAS

Pada studi ini pengangkutan pneumatik elemen SAS diasumsikan sebagai fase pengangkutan tipe *dilute* [14].

Perhitungan untuk desain sistem pengangkutan elemen fase *dilute* didasarkan pada penentuan penurunan tekanan yang dihasilkan dalam sistem karena aliran gas dan zat padat. Penurunan tekanan ini, baik untuk pengangkutan tipe *dilute* maupun *dense*, diakibatkan oleh enam kekuatan/gaya yang efektif yaitu:

- Gaya gesekan gas dengan pipa;
- Gaya yang diperlukan untuk mengalirkan zat padat ada pipa horizontal;
- Gaya berat padatan pada pipa vertikal;
- Gaya berat gas pada pipa vertikal;

- e. Gaya yang dibutuhkan untuk mempercepat padatan;
- f. Gaya gesekan antara pipa dan padatan.

Berbeda pada pengangkutan padatan tipe *dense* (poin f) dalam pengangkutan tipe *dilute* biasanya dapat diabaikan.

Perhitungan penurunan tekanan pada sistem pengangkutan pneumatik elemen SAS dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta P_T = \Delta P_{acc} + \Delta P_g + \Delta P_s + \Delta H_g + \Delta H_s + \Delta P_{misc} \quad (1)$$

yang mana:

$\Delta P_T$  = penurunan tekanan total dalam sistem;

$\Delta P_{acc}$  = penurunan tekanan karena percepatan dari elemen SAS dari kondisi diam pada *feedpoint* ke kondisi kecepatan pengangkutan hingga keluar dari sistem pengangkutan (tangki penerima);

$\Delta P_g$  = penurunan tekanan karena gesekan antara gas dan dinding pipa;

$\Delta P_s$  = penurunan tekanan karena elemen SAS melewati *conveyor line*;

$\Delta H_g$  = penurunan tekanan karena elevasi gas pada pipa vertikal;

$\Delta H_s$  = penurunan tekanan karena elevasi elemen SAS pada pipa vertikal;

$\Delta P_{misc}$  = penurunan tekanan karena masuk ke peralatan.

Dengan masing-masing komponen penyumbang penurunan tekanan total adalah sebagai berikut:

$$\Delta P_{acc} = \frac{W \cdot V_p}{4640} \quad (2)$$

$$\Delta P_g = \frac{4f \cdot L \cdot \rho_g \cdot V_g^2}{4266 \cdot D} \quad (3)$$

$$\Delta P_s = \Delta P_g \cdot K \cdot R \quad (4)$$

$$\Delta H_g = \frac{\Delta Z \cdot \rho_g}{144 \cdot g_c} \quad (5)$$

$$\Delta H_s = \frac{\Delta Z \cdot W \cdot g}{144 \cdot V_p \cdot g_c} \quad (6)$$

$$\Delta P_{misc} = \Delta H_{misc} \quad (7)$$

keterangan dan satuan untuk persamaan di atas adalah:

- D = Diameter dalam pipa (ft)
- f = Faktor gesekan fanning
- g = Kecepatan gravitasi (32.2 ft/s<sup>2</sup>)
- g<sub>c</sub> = Konstanta (32.174 ft-lb/lb-s<sup>2</sup>)
- K = Faktor konstanta pengali gesekan *friction multiplier* pada pengangkutan zat padat
- L = Panjang ekuivalen pipa (ft)
- R = Rasio elemen SAS – Gas (lb/lb)
- V<sub>g</sub> = Kecepatan gas (ft/s)
- V<sub>p</sub> = Kecepatan elemen SAS
- W = *loading* elemen SAS (lbs/s.ft<sup>2</sup>)
- Z = Ketinggian pengangkutan (ft)
- ρ<sub>g</sub> = Kerapatan massa gas pengangkut (lbs/ft<sup>3</sup>)

Rasio elemen SAS – Gas dihitung dengan persamaan

$$R = \frac{W}{V_g \cdot \rho_g} \quad (8)$$

Sedangkan nilai K berbeda-beda untuk setiap material. Pada studi HTR10 China, disebutkan bahwa sistem perpipaan SAS dilapisi molybdenum disulfides (MoS<sub>2</sub>) sebagai pelumas. Pelapisan ini memberikan nilai K kurang dari 0,1.

Pada Gambar 1 terlihat bahwa sistem pengangkutan SAS (a-H-b) mempunyai pipa lengkung tipe *elbow* (90°) untuk menghubungkan pipa horizontal dengan pipa vertikal yang akan mempengaruhi panjang ekuivalen sistem pengangkutan SAS. Panjang ekuivalen pipa *elbow* akan dihitung berdasarkan literatur yang ada [17]. Pada sistem pengangkutan pneumatik SAS, gas pembawa adalah gas helium. Pada studi ini properti gas helium diambil dari Petersen [18].

Beberapa nomenklatur harus dihitung terlebih dahulu. Untuk mendapatkan faktor *fanning* diperlukan perhitungan bilangan Reynold (N<sub>Re</sub>). Faktor *Fanning* dan Bilangan Reynold dapat dihitung dengan persamaan 9 dan 10.

$$N_{Re} = \frac{D \cdot V_g \cdot \rho_g}{\mu_g} \quad (9)$$

$$f = 2 \left( \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-1.5} \right)^{\frac{1}{12}} \quad (10)$$

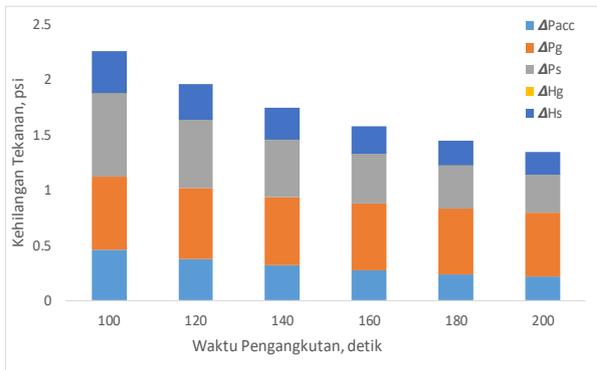
$$A = \left( 2.457 \ln \left( \left( \left( \frac{8}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{\epsilon}{D} \right)^{-1} \right) \right)^{16}$$

$$B = \frac{37530^{16}}{Re}$$

Konstanta G adalah kekasaran pipa, yang tergantung jenis pipa. Nilai untuk faktor ini dapat diambil  $\epsilon = 0,00015$  pipa dengan bagian dalam yang halus dan  $\epsilon = 0,0005$  untuk pipa tipe *shot-peened*.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

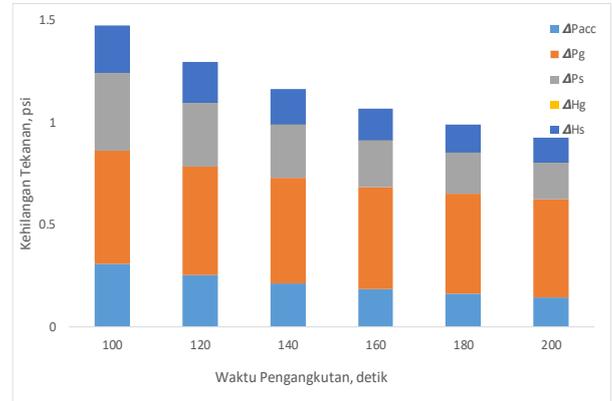
Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa waktu pengangkutan berpengaruh terhadap unjuk kerja sistem pneumatik elemen SAS. Pada semua diameter pipa yang ditinjau, menunjukkan tren yang konsisten antara waktu pengangkutan dengan kehilangan tekanan pada sistem pengangkutan pneumatik elemen SAS.



Gambar 4. Grafik Waktu Pengangkutan Vs. Kehilangan Tekanan Pada Sistem Pengangkutan Elemen SAS Dengan Diameter Pipa 40 mm.

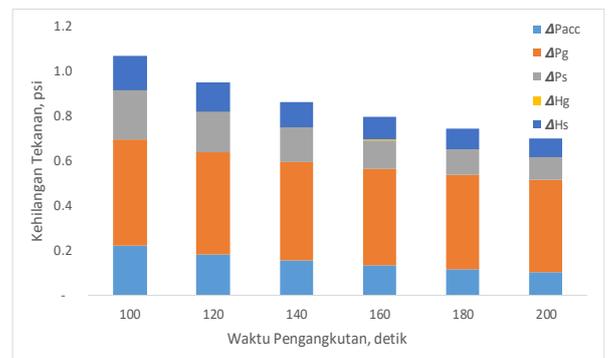
Selain itu diketahui bahwa diameter pipa juga berpengaruh pada kehilangan tekanan, seperti terlihat pada Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6. Diameter pipa 40mm memberikan kehilangan tekanan paling besar dibanding dengan diameter yang lain. Kehilangan tekanan pada sistem SAS dengan diameter pipa 40mm dan target waktu pengangkutan 100 detik mencapai 2.3 psi. Sedangkan kehilangan tekanan yang terendah diperoleh dari sistem SAS dengan diameter 60mm dengan target waktu pengangkutan 200 detik yaitu sebesar 0.7 psi. Hal ini relevan karena dengan mengecilnya diameter pipa maka

gesekan antara gas dengan perpipaan dan elemen dengan perpipaan semakin meningkat.



Gambar 5. Grafik Waktu Pengangkutan Vs. Kehilangan Tekanan Pada Sistem Pengangkutan Elemen SAS Dengan Diameter Pipa 50 mm.

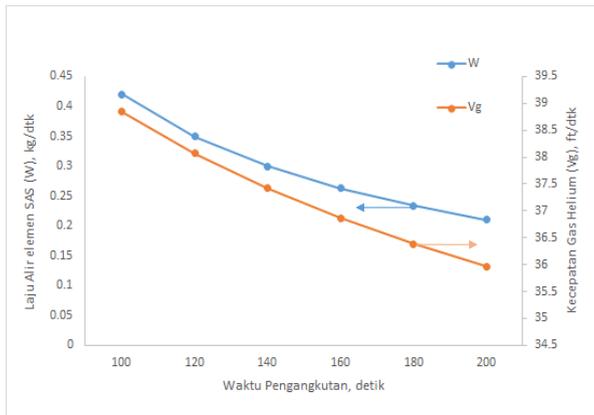
Dari total kehilangan tekanan sistem SAS terbesar disebabkan oleh kehilangan tekanan akibat dari gesekan antara perpipaan dengan gas helium ( $\Delta P_g$ ) dibandingkan dengan sebab kehilangan tekanan lainnya.  $\Delta P_g$  menyumbang sekitar 40% dari kehilangan total tekanan pada sistem SAS. Pada Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6 diperlihatkan pada sub-grafik warna coklat. Sistem perpipaan ini meliputi pipa horizontal, vertikal dan belokan-belokan pipa dalam sistem SAS.



Gambar 6. Grafik Waktu Pengangkutan Vs. Kehilangan Tekanan Pada Sistem Pengangkutan Elemen SAS Dengan Diameter Pipa 60 mm.

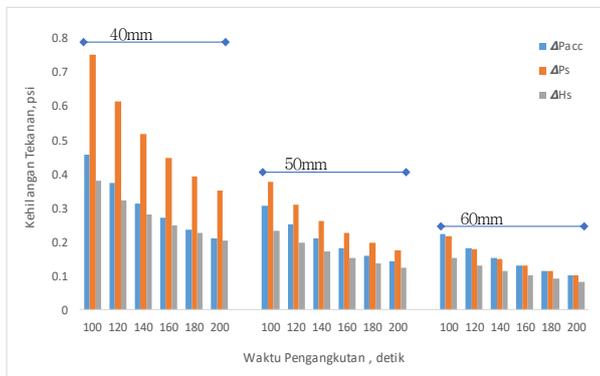
Dari perhitungan diketahui unjuk kerja sistem pengangkutan SAS memberikan tren laju alir elemen dan kecepatan gas helium yang menurun seiring dengan turunnya target waktu pengangkutan elemen SAS dari 100 menjadi 200 detik. Hal ini bisa dipahami karena untuk mempercepat pengangkutan maka laju alir elemen SAS harus ditingkatkan yang berakibat pada harus dipercepatnya

aliran gas helium sebagai gas pengangkut. Fenomena ini dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik Waktu Pengangkutan Vs. Laju Alir Elemen SAS Dan Kecepatan Gas Helium Dengan Diameter Pipa 40mm.

Dengan meningkatnya laju alir elemen SAS yang harus diangkat mengakibatkan penurunan tekanan yang diakibatkan oleh upaya mengangkat elemen SAS dari kondisi diam ( $\Delta P_{acc}$ ) juga meningkat. Fenomena ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Waktu Pengangkutan Vs. Kehilangan Tekanan Akibat Elemen SAS Pada Berbagai Diameter Pipa

Pada diameter pipa 40mm dan 50mm kehilangan tekanan akibat gesekan elemen SAS dengan pipa  $\Delta P_s$  lebih dominan dibanding yang lain ( $\Delta P_{acc}$  dan  $\Delta H_s$ ). Hal ini karena pada diameter yang kecil membuat luas penampang pipa menjadi kecil yang berakibat pada elemen SAS dan perpipaan semakin mudah bergesekan. Fenomena ditunjukkan pada Gambar 8.

#### 4. KESIMPULAN

Dari studi ini diketahui bahwa unjuk kerja sistem pengangkutan SAS sangat

dipengaruhi oleh waktu pengangkutan dan diameter pipa. Penurunan tekanan yang tertinggi adalah sebesar 2.3psi yang terjadi pada target waktu pengangkutan elemen SAS 100 detik dan diameter pipa 40mm. Sedangkan penurunan tekanan terendah adalah 0.7psi pada target waktu 200 detik dan diameter 60mm. Penyebab kehilangan tekanan tertinggi pada sistem pengangkutan SAS diakibatkan oleh gesekan antara perpipaan dengan gas helium.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Studi ini terlaksana atas program INSINAS Flagship 2018 Kemenristekdikti. Terima kasih penulis ucapkan kepada Dr. Suparman, Kepala Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir dan Dr. Mohammad Dhandhang Purwadi, Kepala Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir yang telah yang telah mendukung dalam pelaksanaan penelitian ini.

#### DAFTAR ACUAN

- [1] D. Priambodo, E. Dewita, and I. D. Irianto, "Analisis Energi dan Eksergi Pada Sistem HTR-10 Siklus Turbin Uap," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. 17, no. JUNE, pp. 33-43, 2015.
- [2] 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, p. 012034, Feb. 2018.
- [3] M. Subekti, S. Bakhri, and G. R. Sunaryo, "The Simulator Development for RDE Reactor," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 962, p. 012054, Feb. 2018.
- [4] M. Pancoko, A. Nugroho, D. Priambodo, and T. Setiadipura, "Design study of a straight tube bundle steam generator for Reaktor Daya Eksperimental," *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 5, pp. 531-540, 2018.
- [5] 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.
- [6] Sudarmono, "Investigation on Thermal-Flow Characteristics of HTGR Core Using Thermix-Konvek Module and VSOP'94 Code," *Tri Dasa Mega*, 2015.
- [7] E. Saragi, G. R. Sunaryo, and S. Bakhri, "PRELIMANARY STUDY TO PREDICTION OF OXIDATION GRAPHITE SHELL FUEL OF HTGRON ATWS CONDITION," in *Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir*, 2017, pp. 29-36.
- [8] R. H. Lohnert GH, "The modular HTR—a new

- design of high-temperature pebble-bed reactor,” *Nucl. Energy*; vol. 22, pp. 197–200, 1983.
- [9] G. H. Lohnert, “Technical design features and essential safety-related properties of the HTR-module,” *Nucl. Eng. Des.*, 1990.
- [10] B. H-, “PNEUMATIC CONVEYING IN THE VERTICAL,” vol. 42, pp. 89–102, 1998.
- [11] M. Scarlett, “Family values,” *Automot. Eng.*, vol. 24, no. 9, pp. 24–29, 1999.
- [12] A. R. P, A. Joseph, and E. T. Thomas, “Design of Pneumatic Conveying System,” vol. 3, no. 11, pp. 246–251, 2017.
- [13] A. Haider and O. Levenspiel, “Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles,” *Powder Technol.*, vol. 58, pp. 63–70, 1989.
- [14] T. Li, H. Zhang, M. Liu, Z. Huang, H. Bo, and Y. Dong, “DEM study of granular discharge rate through a vertical pipe with a bend outlet in small absorber sphere system,” *Nucl. Eng. Des.*, 2017.
- [15] H. Z. Zhou, Z. Y. Huang, and X. Z. Diao, “Design and verification test of the small absorber ball system of the HTR-10,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 218, no. 1–3, pp. 155–162, 2002.
- [16] D. Mills, M. G. Jones, and V. K. Agarwal, “Handbook of pneumatic conveying engineering,” *Mechanical engineering 165*. 2004.
- [17] A. T. Agarwal, “Theory and design of dilute phase pneumatic conveying systems,” *Powder Handl. Proc.*, vol. 17, no. 1, pp. 18–22, 2005.
- [18] H. Petersen, “The properties of helium: density, specific heats, viscosity, and thermal conductivity at pressures from 1 to 100 bar and from room temperature to about 1800 K,” *Danish At. Energy Com. Res. Establ. Risö, Risö*. 1970.