

# ANALISIS ALIRAN GAS HELIUM DALAM NOSEL TURBIN UNTUK REAKTOR DAYA GARAM CAIR

Sri Sudadiyo

PTRKN-BATAN, Kawasan PUSPIPTEK Gd. 80, Serpong, Tangerang, 15310

## ABSTRAK

**ANALISIS ALIRAN GAS HELIUM DALAM NOSEL TURBIN UNTUK REAKTOR DAYA GARAM CAIR.** Dari sudut pandang sistem energi dan lingkungan, konsep Reaktor Garam Cair (Molten Salt Reactor / MSR) adalah salah satu jenis reaktor daya nuklir generasi lanjut yang mempunyai kemampuan baik untuk alat pembangkit listrik. Dalam MSR, bahan bakar garam cair mengalir melalui kanal-kanal dengan inti grafit, untuk memproduksi neutron panas. Panas yang diperoleh dari bahan bakar nuklir dipindahkan ke sistem pendingin sekunder melalui penukar kalor menggunakan siklus tertutup turbin helium. Gas helium panas yang dihasilkan dialirkan melalui nosel untuk memutar blade pada rotor turbin. Pada nosel, luas penampang merupakan bagian yang sangat kritis, jika luas penampang terlalu kecil maka aliran helium akan tercekik, dan jika luas penampang terlalu besar maka turbin tidak akan menghasilkan efisiensi terbaiknya. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik aliran helium dengan kecepatan supersonik melewati nosel sebagai komponen terpenting dalam sistem turbin gas pada siklus pendingin sekunder untuk menjamin keselamatan operasi instalasi MSR. Metode penyelesaian yang dipakai adalah dengan menerapkan persamaan-persamaan energi, massa, momentum, keadaan, dan proses. Dari hasil yang diperoleh, dapat diketahui bahwa laju alir helium pada luas penampang kritis mempunyai kecepatan 1 M, rasio tekanan kritis 0,49, dan rasio temperatur kritis 0,75, sehingga aliran melalui nosel memiliki karakteristik baik dan dapat diaplikasikan untuk turbin helium pada siklus pendingin sekunder dalam instalasi MSR.

Katakunci : Turbin, nosel, helium

## ABSTRACT

**ANALYSIS OF HELIUM GAS FLOW THROUGH TURBINE NOZZLE FOR MOLTEN SALT POWER REACTOR.** From the viewpoint of energy system and environment, concept for Molten Salt Reactor (MSR) is one type of advanced generation nuclear power reactors which have good potential for electricity generation device. Within MSR, molten salt fuel flows through graphite core channels, to produce thermal neutron. The obtained heat of nuclear fuel was transferred to secondary coolant system through the heat exchanger using closed cycle of helium turbine. The resulted hot helium gas was expanded to the nozzle for running blade at turbine rotor. At the nozzle, crossed area constitutes very critical section, if crossed area was too small then the helium flow will be choked, and if crossed area was too large then turbine cannot yield its best efficiency. This study purposed to determine the characteristic of helium flow with speed of supersonic through nozzle as most important component within gas turbine system in secondary coolant cycle for giving safety on MSR installation operation. The applied solution method was by employed the equations of energy, mass, momentum, state, process. From the obtained results, it can be known that helium flow rate on critical crossed area had the speed of 1 M, critical pressure ratio of 0,49, and critical temperature ratio of 0,75, so that the flow via nozzle had the good characteristic and it could be used to helium turbine at secondary coolant cycle in MSR installation.

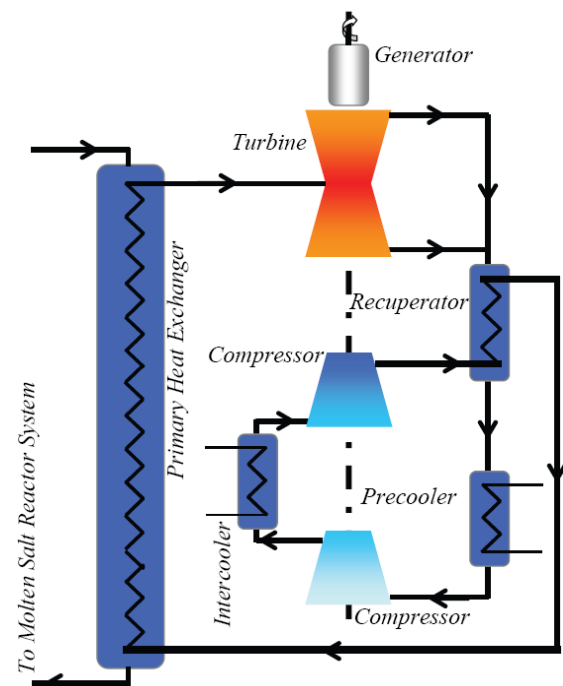
Keywords : Turbine, nozzle, helium

## 1. PENDAHULUAN

Dari sudut pandang sistem energi dan lingkungan, sangat penting bagi kita untuk meningkatkan pendayagunaan sistem energi dengan memanfaatkan sumber energi baru dan terbarukan termasuk energi nuklir seperti reaktor daya nuklir generasi lanjut (generasi ke IV). Konsep Reaktor Garam Cair (*Molten Salt Reactor/MSR*)<sup>[1]</sup> yang merupakan salah satu dari enam jenis teknologi reaktor nuklir generasi yang dikembangkan oleh Forum Internasional Generasi ke IV mempunyai kemampuan sebagai alat pembangkit listrik. Konsep Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) dengan sistem MSR, seperti diperlihatkan dalam Gambar 1<sup>[2]</sup>, mempunyai sistem pendingin sekunder yang mengaplikasikan helium sebagai media penyerap panas yang mengalir melalui siklus tertutup turbin gas. Jadi, panas yang dihasilkan oleh bahan bakar nuklir diserap oleh garam cair yang bersirkulasi melalui kanal-kanal struktur teras dengan inti grafit yang kemudian dipindahkan ke pendingin sekunder melalui alat penukar kalor.

Komponen utama dari siklus tertutup turbin gas helium ini adalah kompresor dan turbin yang diletakkan pada poros tunggal dan ditumpu oleh bantalan pada kedua ujungnya. Turbin mengekstrak energi kinetik dari helium yang berekspansi yang mengalir dari alat penukar kalor. Gas helium panas yang telah melewati alat penukar kalor dialirkan melalui nosel untuk memutar *blade* pada rotor turbin. Putaran rotor bisa dimanfaatkan untuk memutar poros sehingga dapat menghasilkan daya yang berguna untuk menggerakkan kompresor. Pada nosel, luas penampang merupakan bagian yang sangat kritis,

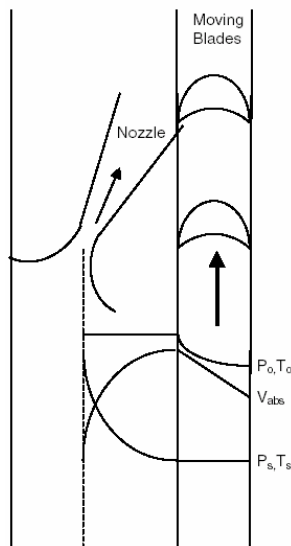
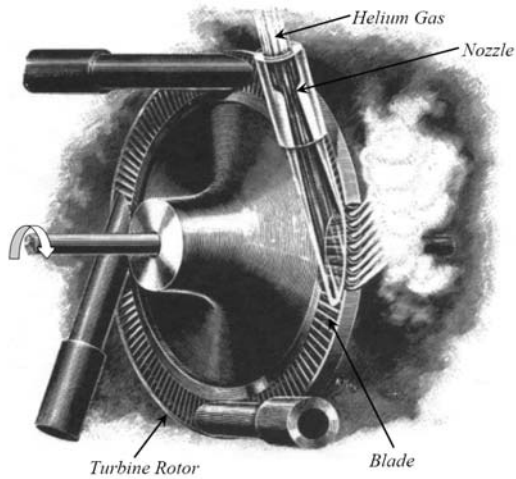
jika luas penampang terlalu kecil maka aliran helium akan tercekik (*choked*), dan jika luas penampang terlalu besar maka turbin tidak akan menghasilkan efisiensi terbaiknya. Secara garis besar prinsip kerja dari turbin helium dapat diilustrasikan seperti terlihat dalam Gambar 2<sup>[3,4]</sup>.



Gambar 1. Skematik dari siklus pendingin sekunder pada Reaktor Garam Cair<sup>[2]</sup>

Dalam makalah ini, penelitian difokuskan pada analisis karakteristik aliran helium dalam nosel yang bertujuan untuk mendapatkan kecepatan tinggi (supersonik) pada kondisi keluar nosel dengan tipe *converging-diverging* yang merupakan komponen terpenting dalam sistem turbin gas pada siklus pendingin sekunder untuk menjamin keselamatan dalam pengoperasian instalasi PLTN jenis MSR. Parameter yang digunakan adalah tekanan, perbandingan panas spesifik, temperature, kecepatan, dan luas

penampang nosel. Metode penyelesaian yang dipakai yaitu penerapan persamaan-persamaan energi, massa, momentum, keadaan, dan proses.



**Gambar 2. Ilustrasi dari cara kerja turbin gas helium** <sup>[3,4]</sup>

## 2. TEORI

Dalam melakukan analisa karakteristik aliran helium melalui nosel, maka pemahaman tentang sifat-sifat (*properties*) gas helium tersebut mutlak diperlukan. Setiap sifat helium (seperti

massa jenis, temperatur, tekanan, kecepatan, dan lain sebagainya) merupakan fungsi terhadap posisi dan waktu pada setiap titik dalam nosel. Secara matematis sifat helium ( $\eta$ ) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\eta = \eta(x, y, z, t) \quad (1)$$

Untuk aliran stasioner (*steady flow*), maka persamaan (1) diatas secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Jadi pada aliran stasioner, sifat gas helium dapat berubah dari satu titik ke titik lainnya di dalam nosel, tetapi sifat tersebut harus tetap besarnya di titik yang sama disetiap saat. Aliran helium yang mengalir melalui nosel adalah merupakan aliran kompresibel (*compressible flow*) karena massa jenisnya terjadi perubahan besar pada perubahan kecepatan yang tinggi. Dalam aliran satu dimensi, maka besaran-besaran yang menyatakan karakteristik aliran helium merupakan fungsi dari satu dimensi yang umumnya diambil searah dengan aliran atau garis lurus, dan tidak merupakan fungsi dari dimensi yang melintang. Apabila aliran helium dalam nosel adalah aliran tak stasioner dan searah sumbu  $x$  (satu dimensi), maka dapat dituliskan kecepatan aliran  $u = u(x, t)$ , massa jenis  $\rho = \rho(x, t)$ , tekanan  $P = P(x, t)$ , dan luas penampang  $A = A(x, t)$ .

Persamaan-persamaan dasar yang diaplikasikan untuk menganalisa karakteristik aliran kompresibel dari gas helium yang melewati

nosel yang dianggap sebagai aliran stasioner, satu dimensi, isentropis yaitu :

- Persamaan massa :

$$\rho u A = \text{konstan} \quad (3)$$

- Persamaan momentum :

$$\rho u \frac{d u}{d x} + \frac{d P}{d x} = 0 \quad (4)$$

- Persamaan energi :

$$\frac{d h}{d x} + u \frac{d u}{d x} = 0 \quad (5)$$

- Persamaan keadaan :

$$P = \rho R T \quad (6)$$

- Persamaan proses :

$$P \rho^{-k} = \text{konstan} \quad (7)$$

dimana :  $h$  adalah enthalpi,  $R$  adalah konstanta gas (untuk helium = 2077 Nm/(kg.K)), dan  $k$  adalah perbandingan panas spesifik (untuk helium = 1,66).

Sedangkan bilangan Mach ( $M$ ) didefinisikan sebagai perbandingan antara kecepatan gas helium ( $u$ ) dan kecepatan rambat suara ( $c$ ), dan dapat dituliskan sebagai :

$$M = \frac{u}{c} \quad (8)$$

dengan :

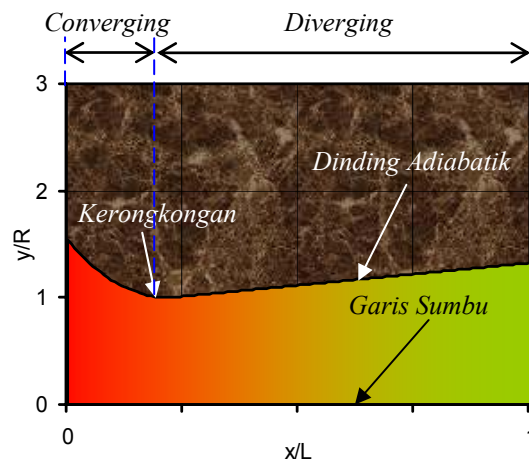
$$c = \sqrt{k R T} \quad (9)$$

### 3. METODOLOGI

Metode yang digunakan dalam penyelesaian masalah dilakukan dengan menentukan sifat gas helium yang diuji pada kondisi masuk (*inlet condition*) nosel seperti tekanan, temperatur, massa jenis dan perbandingan panas spesifik. Parameter ini digunakan untuk menentukan kondisi kerja dari setiap lokasi medan aliran dalam nosel dengan tipe *converging-diverging* sehingga karakteristik aliran helium dapat diketahui. Temperatur masuk nosel ditentukan sesuai dengan temperatur keluar teras reaktor sebesar 973 K pada tekanan 0,5 MPa. Dengan mengaplikasikan persamaan (1) sampai dengan persamaan (9), maka angka perbandingan tekanan, angka perbandingan temperatur, angka perbandingan massa jenis, dan angka perbandingan luas penampang nosel dapat ditentukan sehingga sifat aliran helium pada kondisi kerongkongan (*throat condition*) dan pada kondisi keluar (*outlet condition*) nosel dapat diketahui. Pada kondisi keluar nosel, gas helium mempunyai kecepatan supersonik atau mempunyai bilangan Mach lebih besar daripada satu agar dapat memproduksi gaya dorong yang tinggi untuk selanjutnya dipakai untuk memutar rotor turbin dalam memperoleh kerja poros yang sangat bermanfaat untuk memutar kompresor dan generator listrik.

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penyelesaian dalam penelitian ini dimulai dari kondisi masuk nosel hingga ke kondisi kritis dari penampang nosel yaitu pada kerongkongan yang disebut bagian *converging*. Sedangkan bagian *diverging* dimulai dari kerongkongan hingga kondisi keluar nosel. Setelah diperoleh sifat helium pada kondisi kerongkongan ini, maka sifat aliran helium pada kondisi keluar nosel dapat dihitung. Geometri dari nosel yang dipakai dalam penelitian ini ditampilkan pada Gambar 3. Selanjutnya, dalam pembahasan ini didefinisikan keadaan stagnasi pada aliran helium dalam nosel berupa aliran kompresibel yaitu keadaan aliran yang diperlambat sampai berhenti dengan proses tanpa gesekan dan adiabatik atau aliran diperlambat sampai berhenti dengan proses isentropis. Untuk memperoleh hubungan antara sifat aliran helium selama proses perlambatan isentropis, dapat dipakai persamaan (1) sampai dengan persamaan (9) sehingga dapat diperoleh rasio antara tekanan pada titik tertentu dan tekanan stagnasi, rasio antara temperatur pada titik tertentu dan temperatur stagnasi, dan rasio antara massa jenis aliran helium pada titik tertentu dalam nosel dan massa jenis stagnasi yang merupakan fungsi dari bilangan Mach dan perbandingan panas spesifik.

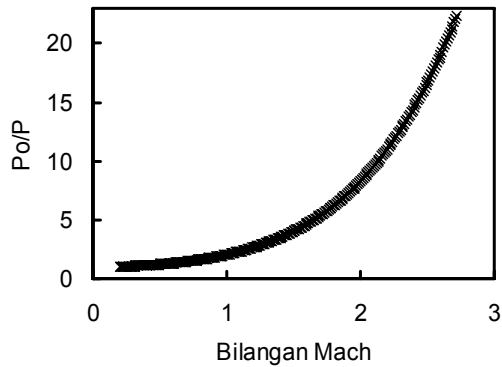


**Gambar 3. Kontur dari nosel tipe *converging-diverging* yang digunakan**

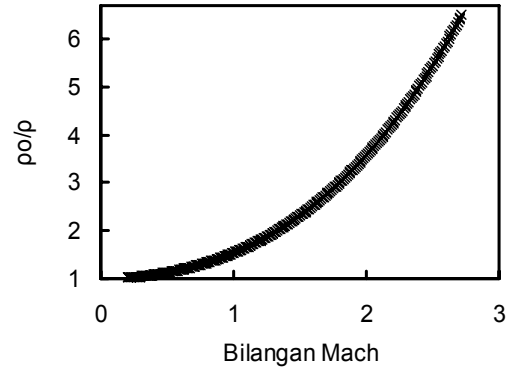
Pada kondisi kritis di kerongkongan, perbandingan dari sifat aliran helium tersebut dapat dihitung dan mempunyai harga sebagai berikut :

- Rasio tekanan ( $P/P_0$ ) sebesar 0,49
- Rasio temperatur ( $T/T_0$ ) sebesar 0,75
- Rasio massa jenis ( $\rho/\rho_0$ ) sebesar 0,65

Dengan menjabarkan lebih lanjut hubungan-hubungan dari harga rasio tekanan ( $P/P_0$ ), harga rasio temperatur ( $T/T_0$ ) dan harga rasio massa jenis ( $\rho/\rho_0$ ) pada setiap titik pada kontur nosel untuk gas helium dapat diplotkan dalam bentuk grafik dengan interval bilangan Mach antara 0 dan 3. Gambar 4 menampilkan harga perbandingan tekanan terhadap bilangan Mach dari aliran helium yang mengalir melalui nosel tipe *converging-diverging* pada sistem turbin gas. Pada kondisi masuk diperoleh harga ( $P_0/P$ ) = 1,034 dan  $M = 0,2$ , sedang pada kondisi keluar nosel didapat harga ( $P_0/P$ ) = 22,387 dan  $M = 2,72$ .

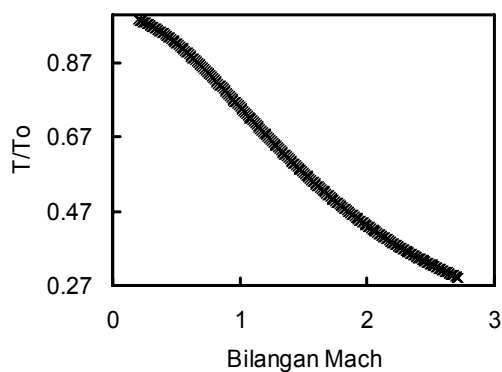


**Gambar 4. Kurva besaran isentropik  $Po/P$  terhadap bilangan Mach untuk gas helium dalam nosel**



**Gambar 6. Diagram dari besaran isentropik ( $\rho/\rho_0$ ) versus bilangan Mach**

Gambar 5 menampilkan diagram perbandingan temperatur *versus* bilangan Mach untuk aliran helium melalui nosel. Pada kondisi masuk diperoleh harga  $(T/T_0) = 0,987$  dan  $M = 0,2$ , sedang pada kondisi keluar nosel didapat harga  $(T/T_0) = 0,291$  dan  $M = 2,72$ . Dengan mengaplikasikan persamaan (6), maka harga rasio temperatur  $(T/T_0)$  dibagi dengan harga rasio tekanan  $(P/P_0)$  atau diagram  $(Po/P)$  *versus*  $M$  pada Gambar 4 dikalikan dengan diagram  $(T/T_0)$  *versus*  $M$  pada Gambar 5 diperoleh harga sama dengan satu per rasio massa jenis  $(\rho/\rho_0)$  untuk aliran helium melalui nosel dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 6.

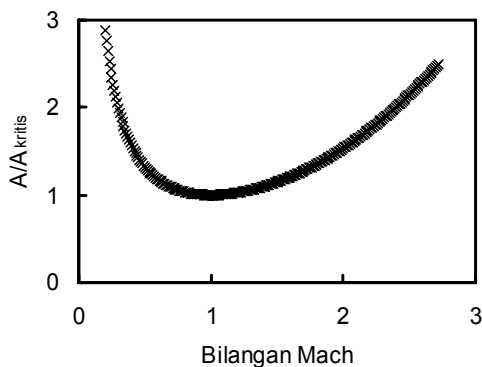


**Gambar 5. Kurva dari besaran adiabatik  $(T/T_0)$  yang merupakan fungsi bilangan Mach**

Dari hasil yang diperoleh diatas dapat dilihat bahwa tekanan, temperatur, dan massa jenis dari karakteristik aliran helium yang mengalir melalui bagian *converging* nosel sebagai aliran yang dipercepat hingga mencapai bilangan Mach sama dengan satu atau sama kecepatan aliran helium sama dengan kecepatan rambat suara. Pada bagian *diverging* nosel juga terlihat mengalami percepatan dengan nilai bilangan Mach lebih besar daripada satu atau tepatnya  $M = 2,72$  pada kondisi aliran helium keluar nosel. Tekanan pada bagian keluar ini akan mengalami penurunan walaupun luas penampangnya bertambah besar.

Untuk keadaan stasioner, aliran satu dimensi, dan dengan menggunakan aliran isentropik untuk mengubah kombinasi antara persamaan massa dan persamaan momentum menjadi bentuk aljabar yang hanya mengandung variable luas penampang dan bilangan Mach. Dengan menyamakan fluks massa disebarkan penampang dengan aliran massa helium dalam keadaan kritis ( $M = 1$ ), maka bentuk numerik dari rasio antara luas penampang nosel pada lokasi tertentu dan luas penampang nosel pada

kerongkongan ( $A/A^*$ ) dapat dihitung. Rasio luas penampang nosel tersebut merupakan fungsi dari bilangan Mach dan perbandingan panas spesifik. Harga ( $A/A^*$ ) pada setiap titik dari kontur nosel dapat diperoleh dengan cara memberikan sebuah nilai bilangan Mach dalam aliran helium pada kondisi temperatur kerja tertentu atau dengan mengaplikasikan persamaan (8) dan persamaan (9). Gambar 7 memperlihatkan variasi dari nilai ( $A/A^*$ ) dengan bilangan Mach untuk aliran helium dalam nosel tipe *converging-diverging* pada sistem turbin gas. Terlihat bahwa kurva mempunyai nilai dari ( $A/A^*$ ) yang sama untuk dua nilai bilangan Mach yang mungkin atau yang berbeda. Hal ini menggambarkan bahwa nosel dengan tipe *converging-diverging* yang mempunyai luas penampang kritis (minimum) diperlukan untuk mempercepat aliran helium dari kecepatan rendah (subsonik) menjadi kecepatan tinggi (supersonik) agar gaya dorong yang diproduksi menjadi besar sehingga dapat memutar rotor turbin.



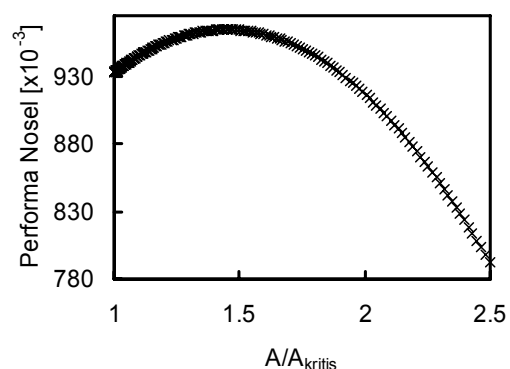
**Gambar 7. Variasi dari perbandingan luas penampang ( $A/A^*$ ) dengan bilangan Mach dalam aliran isentropik untuk helium**

Pada kondisi masuk diperoleh harga ( $A/A^*$ ) = 2,89 dan  $M = 0,2$ , pada kondisi kritis diketahui

harga ( $A/A^*$ ) = 1 dan  $M = 1$ , sedang pada kondisi keluar nosel didapat harga ( $A/A^*$ ) = 2,50 dan  $M = 2,72$ . Dari Gambar 7 diatas, dapat diperoleh bahasan sebagai berikut :

- Jika kecepatan aliran helium lebih kecil daripada kecepatan rambat suara, maka penyusutan luas penampang nosel akan memperbesar kecepatan aliran. Bagian ini disebut *converging*.
- Jika kecepatan aliran helium sama dengan kecepatan rambat suara, maka tidak terjadi perubahan luas penampang nosel atau bagian ini disebut kerongkongan.
- Jika kecepatan aliran helium lebih besar dari kecepatan rambat suara, maka pembesaran luas penampang akan memperbesar kecepatan aliran. Bagian ini disebut *diverging*.

Dari Gambar 7 diatas, dapat juga dijelaskan bahwa dengan adanya kenaikan bilangan Mach didaerah subsonik, luas penampang dari nosel akan berkurang dan mencapai nilai minimum (kritis) pada bilangan Mach sama dengan satu. Kenaikan bilangan Mach pada daerah aliran helium supersonik menyebabkan luas penampang nosel akan bertambah besar.



**Gambar 8. Performa dari nosel yang dipakai**

Gambar 8 memperlihatkan kurva dari performa dari nosel terhadap perbandingan luas penampangnya. Terlihat bahwa variasi dari koefisien dorong dapat dihitung menggunakan perbandingan massa helium persatuan waktu yang mengalir melalui bagian *diverging* dari nosel. Dari Gambar 8 tersebut diatas dapat diketahui performa nosel yang diaplikasikan untuk siklus turbin gas sebagai system pendingin sekunder pada instalasi PLTN jenis MSR.

Sebagai contoh, hasil-hasil perhitungan yang telah dilakukan ditunjukkan pada bagian Lampiran dalam makalah ini.

## 5. KESIMPULAN

Dari hasil uraian dapat diambil kesimpulan bahwa nosel tipe *converging-diverging* dengan konfigurasi geometri seperti tersebut diatas mempunyai performa bagus untuk diaplikasikan pada turbin helium dalam memproduksi kerja poros sehingga layak untuk menjamin beroperasinya sistem pendingin sekunder dalam memindahkan panas dari teras reaktor agar keselamatan instalasi PLTN jenis MSR dapat terjamin. Sebagai hasil, harga-harga temperatur, tekanan, dan massa jenis gas helium menurun pada bagian *diverging* nosel karena kecepatan aliran helium pada bagian ini ditingkatkan menjadi kecepatan supersonik. Dikonfirmasi bahwa performa optimum yang dihitung adalah sekitar 0,965 pada perbandingan luas penampang 1,45, sedangkan kecepatan helium keluar nosel adalah 2,72 kali kecepatan rambat suara dalam media yang sama.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Kegiatan Penelitian ini merupakan bagian kerja di Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN). Terima kasih kami sampaikan kepada semua pihak yang telah membantu dalam perbaikan makalah yang akan dipresentasikan dalam Seminar Teknologi PLTN dan Keselamatan Fasilitas Nuklir ke 15, 2009 di PTRKN-BATAN.



## DAFTAR PUSTAKA

## LAMPIRAN

1. ABRAMS, B., A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum Available:[http://gif.inel.gov/roadmap/pdfs/gen\\_iv\\_roadmap.pdf](http://gif.inel.gov/roadmap/pdfs/gen_iv_roadmap.pdf), (2002).
2. SUDADIYO, S., Analisis Siklus Tertutup Turbin Helium Untuk Keselamatan Reaktor Daya Garam Cair, Prosiding Seminar Nasional ke-14 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir ke 14, PTRKN-BATAN, (2008).
3. GIAMPAOLO, T., Gas Turbine Handbook, Principles and Practices, Edisi ketiga, CRC Press, (2006).
4. BOYCE, MP., Gas Turbine Engineering Handbook, Edisi ketiga, Butterworth-Heinemann, (2002).



**TANYA JAWAB**