

# ANALISIS NOSEL MOTOR ROKET RX - 122 LAPAN SETELAH DILAKUKAN PEMOTONGAN PANJANG DAN DIAMETER

**Ahmad Jamaludin Fitroh, Saeri**  
Peneliti Peneliti Pusat Teknologi Terapan, LAPAN

## ABSTRACT

RX-122 Nozzle of LAPAN has been reinvestigated and analyzed. The nozzle has been designed to produce pressure of chamber of 70 bar. Analitical calculation and numerical simulation show that the thrust produced are 18.6 kN and 18.0 kN, respectively. The 13% total pressure loss indicate that the friction between gas flow and inner surface of nozzle would be the reason of thrust difference. The nozzle had initial diameter 130 mm and then it was shortened about 30 mm of diameter and 85 mm of length in order to fit to the rocket dimension. However, the shortened nozzle gives lower performance. Analitical calculation and numerical simulation shows that shortened nozzle gives thrust of 18.1 kN and 17.7 kN, respectively, or just 2 % loss.

Keywords: *Nozzle motor rocket 122, Numerical simulation, Shortened nozzle*

## ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian dan analisis ulang nosel motor roket RX - 122 milik LAPAN. Nosel tersebut didesain untuk tekanan ruang bakar 70 bar. Hasil perhitungan secara analitis menunjukkan bahwa gaya dorong yang dihasilkan seharusnya sebesar 18,6 kN. Hasil simulasi numerik memberikan gaya dorong yang lebih kecil, yaitu sebesar 18,0 kN. Perbedaan tersebut dikarenakan adanya gesekan antara aliran gas dengan permukaan bagian dalam nosel yang mana ditandai dengan penurunan tekanan total sebesar 13%. Diameter awal nosel adalah 130 mm. Oleh karena keterbatasan dimensi motor roket, maka diameter nosel harus dibatasi maksimum 100 mm. Pengurangan diameter nosel dilakukan dengan cara memotong nosel sepanjang 85 mm. Pemotongan tersebut mengakibatkan penurunan prestasi nosel. Perhitungan secara analitis dan simulasi numerik memberikan gaya dorong masing – masing 18,1 kN dan 17,7 kN. Akibat pemotongan panjang nosel tersebut, maka gaya dorong yang dihasilkan nosel berkurang hanya sekitar 2%.

Kata kunci : *Nosel motor roket 122, Simulasi numerik, Pemotongan panjang nosel*

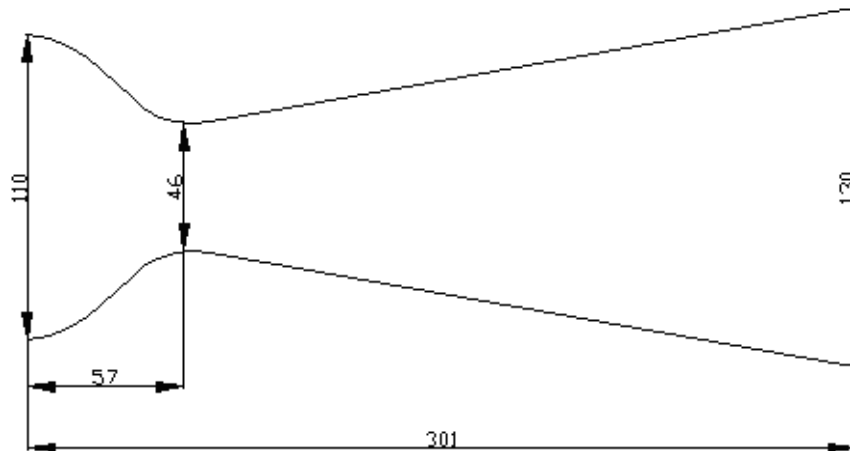
## 1 PENDAHULUAN

Sebuah motor roket pada umumnya terdiri dari dua komponen utama, yaitu ruang bakar dan nosel. Di dalam ruang bakar terjadi perubahan energi potensial bahan bakar menjadi energi potensial gas. Dengan adanya nosel di belakang ruang bakar, maka energi potensial gas tersebut diubah menjadi energi kinetik gas yang dimanifestasikan dalam bentuk gaya dorong.

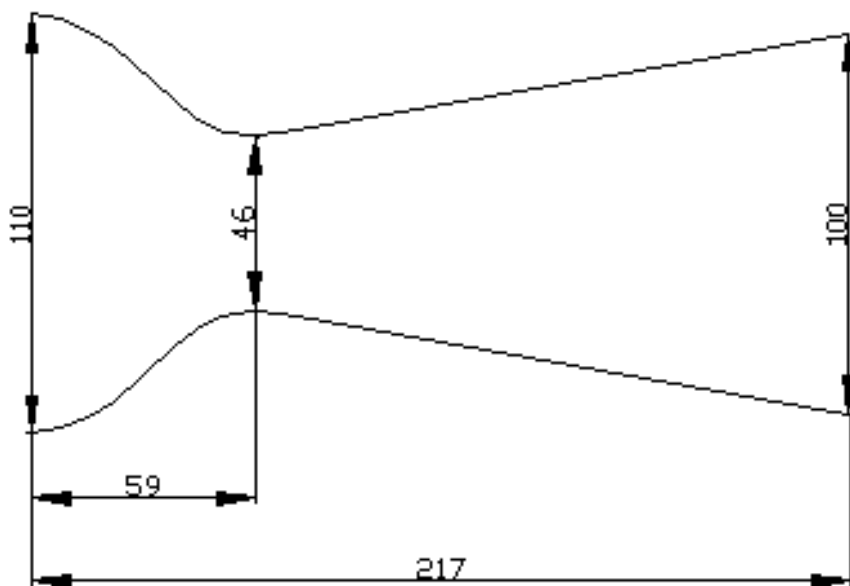
Salah satu motor roket yang dimiliki LAPAN adalah motor roket RX –

122. Bahan bakar yang digunakan adalah propelan padat. Propelan tersebut dirancang dan diharapkan mampu menghasilkan tekanan ruang bakar sebesar 70 bar. Dengan tekanan ruang bakar sebesar itu, maka nosel didesain sedemikian rupa agar menghasilkan gaya dorong yang optimal.

Salah satu syarat agar gaya dorong yang dihasilkan optimal adalah tekanan statik aliran keluar nosel sama dengan tekanan atmosfer. Dalam hal ini tekanan atmosfer dipilih sebesar 1 bar.



Gambar 1-1: Geometri dan dimensi nosel panjang (satuan : mm)



Gambar 1-2: Geometri dan nosel pendek (satuan : mm)

Hasil rancangan menunjukkan bahwa untuk mendapatkan tekanan statik keluar nosel sama dengan tekanan atmosfer, maka diperlukan perbandingan luas keluar nosel terhadap luas *throat* sama dengan 7,99.

Diameter *throat* dipilih sebesar 46 mm. Dengan perbandingan luas keluar nosel terhadap luas *throat* sama dengan 7,99, maka didapat diameter keluar nosel sama dengan 130 mm. Sesuai dengan namanya, maka nosel motor roket RX - 122 mempunyai diameter luar maksimum 122 mm. Dengan memper-timbangkan ketebalan material, maka diameter bagian dalam nosel dibatasi maksimum 100 mm.

Terdapat dua cara yang dapat dilakukan untuk mengurangi diameter keluar nosel dari 130 mm menjadi 100 mm, yaitu mengurangi diameter *throat* atau memotong panjang nosel. Mengurangi diameter *throat* berarti mendesain dan memproduksi ulang nosel. Meskipun cara tersebut dapat mempertahankan prestasi nosel namun akan memerlukan upaya, waktu, dan biaya yang cukup besar. Dengan geometri yang sama, maka memotong panjang nosel akan mengurangi diameter keluar nosel. Cara tersebut sangat mudah untuk dilakukan sehingga telah dilakukan oleh LAPAN. Geometri dan dimensi nosel sebelum dan sesudah pemotongan disajikan dalam Gambar 1-1 dan 1-2.

Kedua nosel tersebut akan dihitung ulang prestasinya menggunakan dua metode yang berbeda, yaitu metode analitis dan metode numerik. Metode analitis digunakan untuk mendapatkan prestasi nosel secara cepat. Metode numerik digunakan untuk mengoreksi hasil metode analitis agar mendekati kondisi yang sebenarnya.

Selain untuk menganalisis ulang prestasi nosel motor roket 122 tersebut, penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui efek pemotongan panjang nosel terhadap gaya dorong yang dihasilkan.

## 2 BATASAN MASALAH

Setiap penelitian tentunya memerlukan beberapa batasan supaya ruang lingkup pekerjaan dan analisis menjadi jelas dan lebih mudah untuk dilakukan. Beberapa batasan masalah yang digunakan dalam penelitian kali ini antara lain :

- Analisis hanya dilakukan pada nosel dan aliran di belakangnya saja. Kondisi ruang bakar tidak termasuk dalam ruang lingkup penelitian ini,
- Selain menganalisis nosel pada kondisi desain, penelitian ini juga menganalisis nosel yang telah dipotong sepanjang 84 mm,
- Tekanan dan temperatur ruang bakar dipilih masing-masing 70 bar dan 3.000 K,
- Parameter propelan yang digunakan didapat dari Bidang Propelan LAPAN. Dalam hal ini propelan mempunyai berat molekul,  $Mr = 25$  dan properti gas,  $\gamma = 1,2$ ,
- Kondisi aliran bebas adalah kondisi pada permukaan laut.

Untuk mempermudah perhitungan dan analisis, maka beberapa asumsi yang digunakan antara lain :

- Geometri nosel sepenuhnya bersifat aksi-simetri,
- Semua parameter aliran masuk nosel bersifat seragam terhadap area frontal.

Meskipun ada kemungkinan asumsi yang digunakan berbeda dengan kondisi sebenarnya, namun diharapkan perbedaan tersebut tidak akan menimbulkan perbedaan gaya dorong yang signifikan.

## 3 DASAR TEORI

Nosel merupakan salah satu komponen utama roket. Fungsi nosel adalah mengubah energi potensial gas dalam ruang bakar menjadi energi kinetik yang pada akhirnya diwujudkan dalam bentuk gaya dorong.

Gas dalam ruang bakar bersifat stagnasi, yaitu kecepatan alirannya sangat kecil atau bahkan mendekati diam. Setelah memasuki *inlet* nosel kecepatan aliran gas dipercepat karena bentuk nosel yang semakin mengecil atau disebut sebagai daerah konvergen. Pada saat aliran gas melewati *throat* kecepatannya menjadi 1 *Mach*. Setelah memasuki *throat* aliran gas melewati daerah divergen, yaitu daerah dengan luas yang semakin membesar. Kecepatan aliran gas meningkat ketika melewati daerah divergen hingga keluar nosel.

Setelah keluar nosel kondisi aliran sangat ditentukan oleh parameter aliran gas keluar nosel dan kondisi aliran bebas di belakang nosel. Apabila tekanan statik aliran keluar nosel lebih besar daripada tekanan udara bebas, maka akan terjadi kondisi *under-expansion*. Kondisi sebaliknya akan mengakibatkan kondisi *over-expansion*.

Perhitungan menggunakan metode analitis mengasumsikan bahwa tekanan total tidak berkurang selama aliran gas melewati nosel, seperti berikut :

$$p_0 = p_{0e} \tag{3-1}$$

Keterangan

$p_0$  = tekanan ruang bakar

$p_{0e}$  = tekanan total *exit*

Seperti telah dijelaskan pada paragraf sebelumnya, bahwa setelah melewati *throat* kecepatan aliran dipercepat. Kondisi tersebut dapat terjadi bila

kecepatan aliran melewati *throat* adalah 1 *Mach*. Semakin besar luas *exit*, maka kecepatan aliran gas *exit* juga akan semakin tinggi. Hubungan antara luas *throat*, luas *exit*, dan kecepatan aliran gas *exit* dinyatakan sebagai berikut :

$$\left(\frac{A_e}{A^*}\right)^2 = \frac{1}{M_e^2} \left( \frac{2}{\gamma+1} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2 \right) \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \quad (3-2)$$

Keterangan:

$A_e$  = luas keluar nosel

$A^*$  = luas *throat*

$M_e$  = *Mach exit*

$\gamma$  = properti gas

Sama halnya dengan tekanan total, maka temperatur total juga diasumsikan konstan sepanjang nosel, seperti berikut :

$$T_0 = T_{0e} \quad (3-3)$$

Keterangan:

$T_0$  = temperatur ruang bakar

$T_{0e}$  = temperatur total *exit*

Temperatur total merupakan fungsi dari temperatur statik dan kecepatan aliran. Hubungan antara ketiga parameter tersebut dinyatakan sebagai berikut :

$$T_{0e} = T_e \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2 \right) \quad (3-4)$$

Keterangan:

$T_e$  = temperatur statik *exit*

Kecepatan suara aliran sangat dipengaruhi oleh temperatur. Semakin tinggi temperatur, maka kecepatan suara akan semakin meningkat. Kecepatan suara secara matematika dinyatakan sebagai berikut :

$$a_e = \sqrt{\gamma R T_e} \quad (3-5)$$

Keterangan:

$a_e$  = kecepatan suara

$R$  = properti gas

Secara umum bilangan *Mach* dinyatakan sebagai perbandingan antara

kecepatan aliran terhadap kecepatan suara aliran tersebut, yang mana dapat dinyatakan dengan

$$M_e = \frac{u_e}{a_e} \quad (3-6)$$

Keterangan:

$u_e$  = kecepatan aliran *exit*.

Gaya dorong yang dihasilkan motor roket merupakan penjumlahan antara gaya dorong akibat energi kinetik keluar nosel dan perbedaan tekanan antara bagian belakang dan depan roket. Secara matematika dinyatakan sebagai berikut :

$$F = \dot{m} u_e + (p_e - p_a) A_e \quad (3-7)$$

Keterangan:

$F$  = gaya dorong

$\dot{m}$  = laju aliran massa

$p_e$  = tekanan statik *exit*

$p_a$  = tekanan atmosfer

$A_e$  = luas *exit*

Motor roket LAPAN yang menggunakan nosel 122 menggunakan bahan bakar propelan padat sehingga gaya dorong yang dihasilkan hanya berasal dari energi kinetik keluar nosel saja. Dengan demikian persamaan (3-7) menjadi

$$F = \dot{m} u_e \quad (3-8)$$

Seperti yang telah dijelaskan pada paragraf sebelumnya bahwa tekanan total diasumsikan konstan sepanjang nosel. Tekanan total merupakan penjumlahan antara tekanan statik dan tekanan dinamik. Untuk aliran kompresibel hubungan antara ketiga parameter tersebut pada *exit* adalah

$$p_{0e} = p_e \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3-9)$$

Besar  $p_e$  juga mempengaruhi prestasi nosel. Kondisi optimum dicapai bila  $p_e = p_a$ . Biasanya nosel dirancang untuk kondisi optimum. Apabila panjang

nosel dikurangi, maka dengan geometri divergen yang sama akan menghasilkan luas *exit* yang lebih kecil. Pengurangan luas *exit* mengakibatkan kecepatan aliran gas pada *exit* juga berkurang sehingga tekanan statiknya akan meningkat. Dengan demikian pengurangan panjang nosel secara tidak langsung mengakibatkan terjadinya kondisi *under-expansion*.

#### 4 METODE

Penelitian ini menggunakan dua metode, yaitu metode analitis dan metode numerik. Metode analitis menerapkan semua persamaan dan asumsi pada Bab Dasar Teori. Keuntungan menggunakan metode analitis adalah lebih mudah dan lebih cepat. Kekurangannya adalah belum dapat memperkirakan dengan akurat pengurangan energi dalam bentuk penurunan tekanan total akibat gesekan antara aliran gas dengan permukaan bagian dalam nosel.

Analisis gesekan dapat dilakukan dengan baik dengan menggunakan salah satu perangkat lunak berbasis fluida numerik. Kompensasi menggunakan perangkat lunak tersebut adalah membutuhkan upaya dan waktu yang cukup besar.

### 5 HASIL

Seperti yang telah disebutkan pada paragraf sebelumnya bahwa penelitian ini menggunakan dua metode, yaitu metode analitis dan metode numerik. Pada bab ini akan disajikan hasil perhitungan dan simulasi menggunakan kedua metode tersebut beserta perbandingan antara keduanya.

#### 5.1 Hasil Metode Analitis

Hasil perhitungan menggunakan metode analitis hanya dapat berupa harga

parameter aliran di beberapa daerah perhitungan. Hasil selengkapnya disajikan dalam tabel di bawah ini.

Tabel 5-1: HASIL METODE ANALITIS

Parameter	Nosel Panjang	Nosel Pendek
$\dot{m}$ (kg/det)	7,49	7,42
$M_e$	3,12	2,75
$u_e$ (m/det)	2.452	2.291
$p_e$ (bar)	1,18	2,39
$T_e$ (K)	1.520	1.708
$F$ (kN)	18,6	18,1

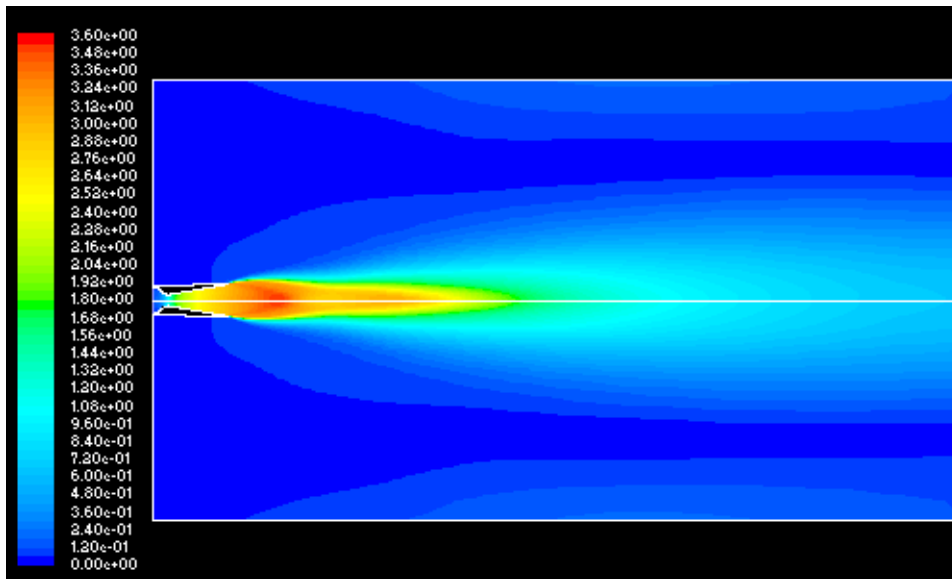
Pada tabel di atas yang dimaksud dengan nosel panjang adalah nosel hasil desain. Dengan demikian yang dimaksud dengan nosel pendek adalah nosel hasil desain yang dipotong panjangnya.

#### 5.2 Hasil Metode Numerik

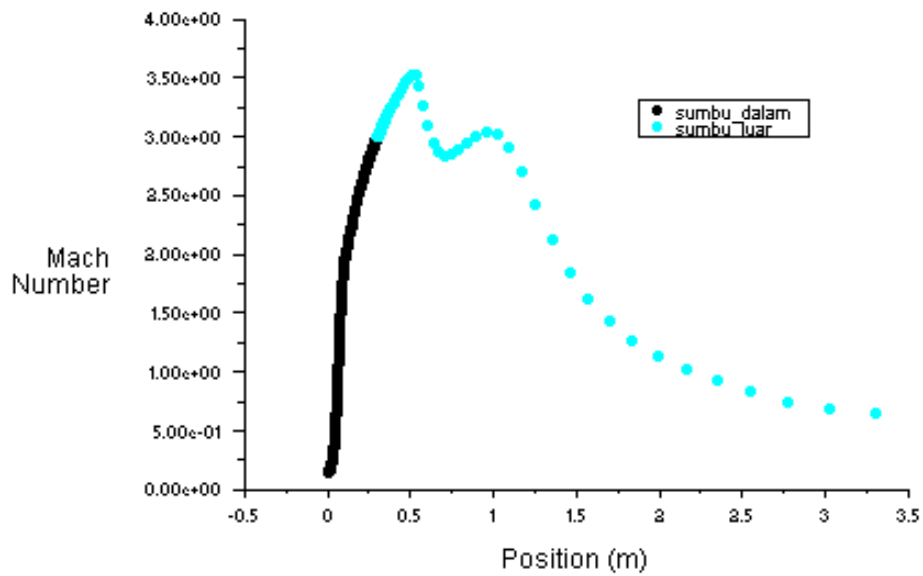
Analisis menggunakan metode numerik menghasilkan harga dan distribusi parameter aliran gas, baik di dalam maupun di luar nosel. Analisis dengan metode ini menggunakan salah satu perangkat lunak berbasis fluida numerik. Hasil simulasi numerik disajikan dalam tabel, beberapa gambar dan plot berikut ini.

Tabel 5-2: HASIL METODE NUMERIK

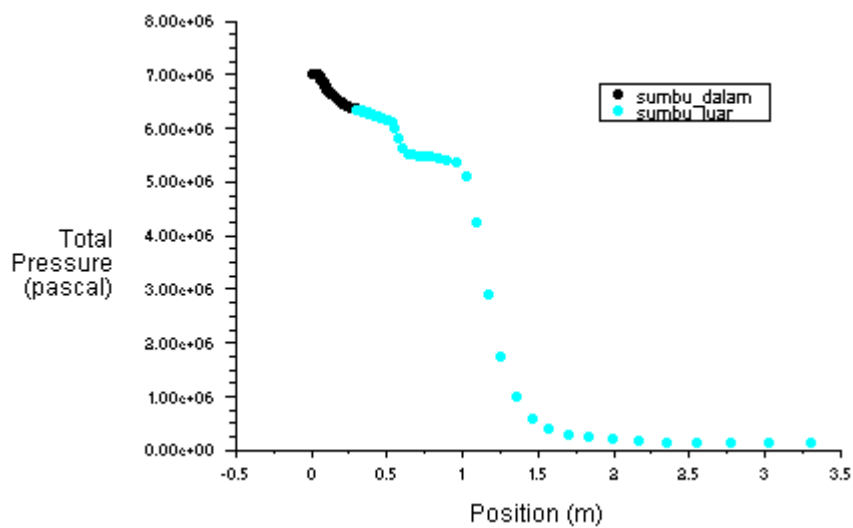
Parameter	Nosel Panjang	Nosel Pendek
$p_{0e}$ (bar)	60,9	63,3
$\dot{m}$ (kg/det)	7,82	7,82
$M_e$	2,93	2,62
$u_e$ (m/det)	2.246	2.095
$p_e$ (bar)	1,34	2,63
$T_e$ (K)	1.757	1.920
$F$ (kN)	18,0	17,7



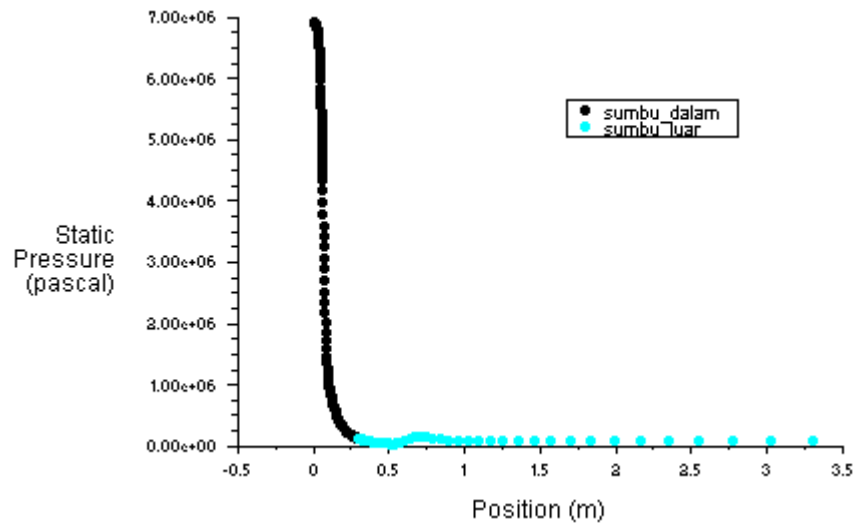
Gambar 5-1a : Distribusi bilangan mach nosel panjang



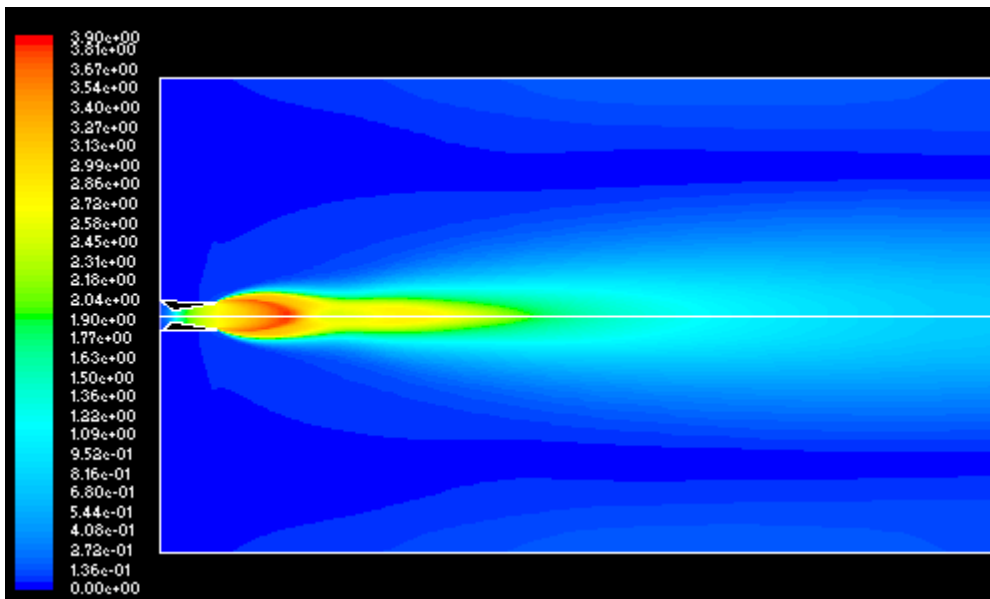
Gambar 5-1b: Plot bilangan mach pada sumbu nosel panjang



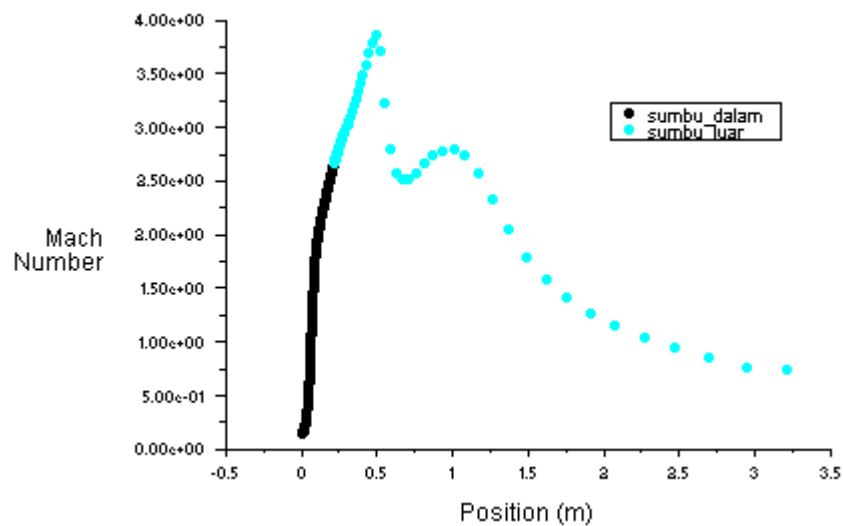
Gambar 5-1c: Plot tekanan total pada sumbu nosel panjang



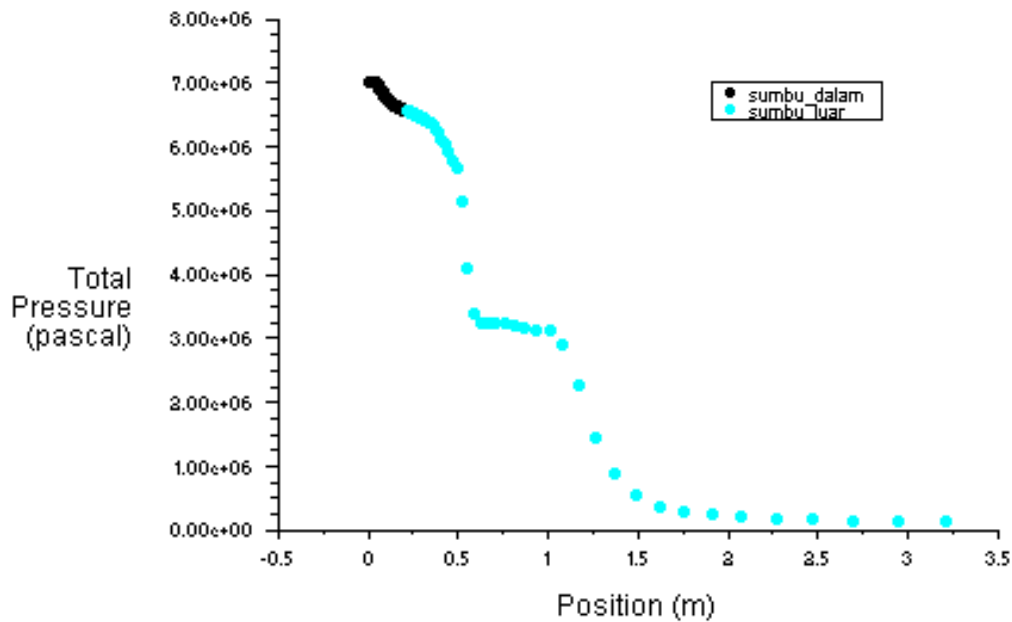
Gambar 5-1d: Plot tekanan statik pada sumbu nosel panjang



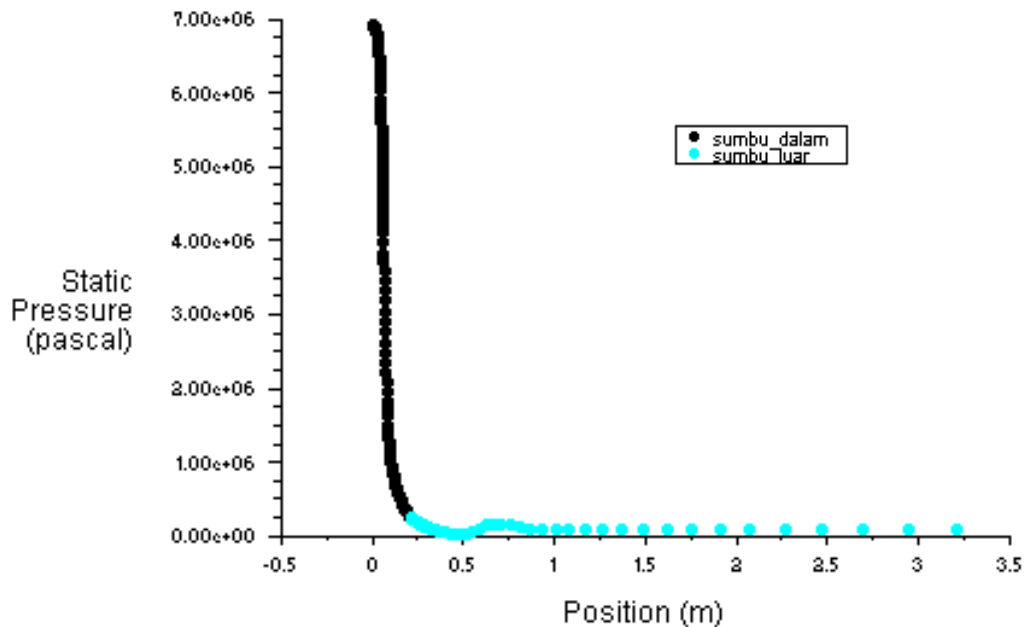
Gambar 5-2a: Distribusi bilangan mach nosel pendek



Gambar 5-2b: Plot bilangan mach pada sumbu nosel pendek



Gambar 5-2c: Plot tekanan total pada sumbu nosel pendek



Gambar 5-2d: Plot tekanan statik pada sumbu nosel pendek

Pada Gambar 5-1 dan 5-2 sumbu dalam menyatakan sumbu tengah di dalam nosel sedangkan sumbu luar menyatakan sumbu tengah di luar/belakang nosel. Kondisi aliran bebas di belakang nosel dipilih sejauh 10 kali panjang nosel.

### 5.3 Perbandingan Hasil

Analisis menggunakan metode analitis tidak dapat memperkirakan dengan tepat penurunan tekanan total

akibat gesekan antara aliran gas dan permukaan dalam nosel. Penurunan tekanan total mengakibatkan penurunan gaya dorong yang dihasilkan. Dengan menggunakan metode numerik, maka ketidakakuratan metode analitis dapat diminimalkan.

Dengan menggabungkan Tabel 5-1 dan 5-2, maka perbandingan hasil kedua metode tersebut dapat disajikan sebagai berikut :



Tabel 5-3a: PERBANDINGAN HASIL UNTUK NOSEL PANJANG

Parameter	Nosel Panjang		
	Analitis	Numerik	Selisih (%)
$p_{0e}$ (bar)	70,0	60,9	13,0
$\dot{m}$ (kg/det)	7,49	7,82	4,4
$M_e$	3,12	2,93	6,1
$u_e$ (m/det)	2.452	2.246	8,4
$p_e$ (bar)	1,18	1,34	13,6
$T_e$ (K)	1.520	1.757	15,6
$F$ (kN)	18,6	18,0	3,2

Tabel 5-3a: PERBANDINGAN HASIL UNTUK NOSEL PENDEK

Parameter	Nosel Pendek		
	Analitis	Numerik	Selisih (%)
$p_{0e}$ (bar)	70,0	63,3	9,6
$\dot{m}$ (kg/det)	7,42	7,82	5,4
$M_e$	2,75	2,62	4,7
$u_e$ (m/det)	2.291	2.095	8,5
$p_e$ (bar)	2,39	2,63	10,0
$T_e$ (K)	1.708	1.920	12,4
$F$ (kN)	18,1	17,7	2,2

Hasil perhitungan pada tabel di atas menunjukkan bahwa perbedaan antara hasil metode analitis dan metode numerik tidak terlalu besar, kecuali untuk tekanan total. Pemotongan panjang nosel juga tidak memberikan penurunan prestasi yang signifikan.

## 6 ANALISIS

Bab ini berisi uraian tentang analisis hasil penelitian ini. Secara garis besar yang dianalisis adalah perbedaan hasil kedua metode dan efek pemotongan panjang nosel terhadap prestasi nosel.

### 6.1 Analisis Penurunan Tekanan Total

Secara umum penurunan tekanan total diakibatkan oleh gesekan antara aliran gas dengan permukaan bagian dalam nosel. Semakin panjang sebuah nosel, maka energi yang hilang akibat gesekan juga semakin besar. Dengan demikian apabila panjang nosel dipotong, maka penurunan tekanan total akan berkurang.

### 6.2 Analisis Kecepatan Aliran Exit

Nosel motor roket 122 LAPAN ini mempunyai tipe konvergen-divergen. Aliran gas memasuki nosel dengan kecepatan yang sangat rendah (*low subsonic*). Kemudian aliran melewati daerah konvergen sehingga kecepatan alirannya dipercepat hingga mencapai kecepatan sonik pada *throat*. Setelah melewati *throat* aliran memasuki daerah divergen sehingga aliran dipercepat menjadi aliran supersonik. Semakin luas daerah *exit*, maka kecepatan *exit* juga akan semakin besar. Dengan demikian apabila panjang nosel dikurangi, maka luas daerah *exit* akan semakin kecil sehingga kecepatan *exit* juga akan semakin kecil.

Gesekan menyebabkan kecepatan aliran di dekat permukaan menjadi sangat kecil. Metode numerik turut mempertimbangkan gesekan tersebut sehingga kecepatan *exit* yang dihasilkan lebih kecil dari hasil metode analitis.

### 6.3 Analisis Temperatur Statik *Exit*

Penelitian ini mengasumsikan bahwa tidak ada perpindahan panas dari dalam nosel ke lingkungan sekitar melalui dinding nosel. Selain itu kondisi aliran diasumsikan bersifat tunak (*steady*). Dengan demikian tidak ada penurunan temperatur total sepanjang nosel.

Temperatur total merupakan penjumlahan antara temperatur statik dan temperatur dinamik, sesuai dengan persamaan 3-4. Untuk temperatur total yang sama, maka semakin tinggi kecepatan *exit* akan menghasilkan temperatur statik yang semakin kecil. Dengan demikian temperatur statik *exit* hasil metode numerik menjadi lebih besar.

Semakin panjang atau semakin luas daerah *exit* nosel, maka kecepatan *exit*-nya juga semakin tinggi, sesuai dengan persamaan 3-2. Untuk temperatur total yang sama, maka semakin panjang atau semakin luas daerah *exit* nosel akan menghasilkan temperatur statik *exit* yang lebih rendah. Dengan demikian pemotongan panjang nosel akan menyebabkan kenaikan temperatur statik *exit*.

### 6.4 Analisis Tekanan Statik *Exit*

Metode analitis mengasumsikan bahwa tidak ada pengurangan tekanan total di sepanjang nosel. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa semakin panjang atau semakin luas daerah *exit*, maka kecepatan aliran gas *exit* juga akan semakin tinggi. Dengan tekanan total yang sama, maka kecepatan aliran *exit* yang lebih tinggi menyebabkan tekanan statiknya lebih rendah, sesuai dengan persamaan 3-9. Dengan demikian pemotongan panjang nosel mengakibatkan kenaikan tekanan statik *exit*.

Metode numerik memberikan kecepatan *exit* yang lebih kecil dibandingkan dengan metode analitis karena mempertimbangkan gesekan pada permukaan bagian dalam nosel. Secara tidak langsung hal tersebut menjelaskan mengapa metode numerik memberikan

hasil tekanan statik *exit* yang lebih besar daripada metode analitis.

### 6.5 Analisis Laju Aliran Massa

Secara umum laju aliran massa hanya dipengaruhi oleh parameter gas di dalam ruang bakar. Dengan kata lain pemotongan panjang nosel tidak memberikan perubahan terhadap laju aliran massa yang dihasilkan.

Secara matematika laju aliran massa merupakan hasil kali antara kerapatan gas statik, luas frontal, dan kecepatan aliran gas. Hasil numerik memberikan kecepatan aliran *exit* yang lebih kecil. Dengan demikian laju aliran massa yang dihasilkan seharusnya juga menjadi lebih kecil. Di lain pihak metode numerik memberikan tekanan statik *exit* yang lebih besar sehingga secara tidak langsung menyebabkan kerapatan gas statik *exit* yang lebih besar. Kenaikan kerapatan gas statik di *exit* akan meningkatkan laju aliran massa.

### 6.6 Analisis Gaya Dorong

Gaya dorong yang dihasilkan nosel merupakan hasil perkalian antara laju aliran massa dan kecepatan aliran gas di *exit*. Laju aliran massa tidak dipengaruhi oleh panjang nosel. Pemotongan panjang nosel akan mengurangi kecepatan aliran *exit* sehingga gaya dorong yang dihasilkan juga berkurang.

Hasil numerik memberikan kecepatan aliran gas di *exit* lebih kecil daripada metode analitis. Dengan hasil laju aliran massa yang hampir sama, maka hasil numerik memberikan gaya dorong yang lebih kecil.

## 7 KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan beberapa kesimpulan, antara lain :

- Penurunan tekanan total yang terjadi sekitar 11%,
- Pemotongan panjang nosel akan menurunkan penurunan tekanan total sekitar 4%,

- Pemotongan panjang nosel tidak mempengaruhi laju aliran massa,
- Metode numerik memberikan kecepatan aliran *exit* yang lebih kecil, tekanan dan temperatur statik *exit* yang lebih besar, dan gaya dorong yang sedikit lebih kecil daripada metode analitis,
- Pemotongan panjang nosel mengakibatkan kecepatan aliran *exit* menurun, tekanan dan temperatur statik *exit* meningkat, dan gaya dorong menjadi berkurang,
- Metode numerik memberikan gaya dorong lebih kecil sekitar 3% dibandingkan metode analitis,
- Pemotongan panjang nosel mengakibatkan penurunan gaya dorong sekitar 3% sehingga tidak terlalu mempengaruhi prestasi nosel.

## 8 SARAN

Untuk melakukan optimasi nosel 122 ini perlu kiranya dilakukan analisis bentuk bel (*bell shape*).

## DAFTAR RUJUKAN

- Davenas, Alain, 1993. *Solid Rocket Propulsion Technology*, first English edition, Pergamon Press.
- John D. Anderson Jr, 2003. *Modern Compressible Flow*, third edition, Mcgraw-Hill International.
- Marcel Barrere, 1960. *Rocket Propulsion*, Elsevier Publishing Company.
- Sutton, George P., 2001. *Rocket Propulsion Elements 7<sup>th</sup> Edition*, John Wiley and Sons.
- Zuchrow, Maurice J.; Hoffman, Joe D., 1976. *Gas Dynamic Volume 1*, John Wiley and Sons.