

## ANALISIS EFEK PEMOTONGAN NOSEL PADA DESAIN MULTINOSEL

Oleh:  
Sofyan\*  
Bagus Hayatul Jihad\*

### **Abstrak**

*Pada penelitian ini dilakukan analisis efek pemotongan nosel pada desain multinosel. pada beberapa kasus, pemotongan nosel harus dilakukan agar nosel-nosel pada susunan multinosel dapat menempati ruangan yang tersedia. Secara teoretis, pemotongan nosel yang didesain ideal (tekanan aliran keluar nosel = tekanan atmosfer) dapat mengakibatkan pengurangan gaya dorong dari kondisi idealnya, nosel mengalami kondisi underexpanded.*

*Analisis perhitungan pada nosel terpotong dilakukan dengan terlebih dahulu menentukan bilangan Mach aliran keluar nosel dari data rasio luas exit terhadap luas throat nosel yang diketahui (dari geometri nosel yang dipotong). Dari bilangan Mach aliran keluar nosel, properti aliran-aliran berupa tekanan dan temperatur aliran keluar nosel dapat ditentukan, sehingga gaya dorong yang dihasilkan nosel terpotong dapat diperoleh. Perhitungan gaya dorong tetap memperhitungkan faktor koreksi gaya dorong akibat pengaruh variasi sudut divergen nosel. Pada tulisan ini dilakukan analisis untuk nosel dengan sudut divergen  $11^{\circ}$  dan  $13^{\circ}$*

*Dengan pengurangan luas exit nosel seminimal mungkin diperoleh pengurangan gaya dorong yang tidak signifikan akibat pemotongan nosel. Pengurangan rasio luas exit terhadap throat nosel dari 7,17 menjadi 5,26 menghasilkan efisiensi gaya dorong masing-masing 99,08136 % dan 98,7185 % terhadap gaya dorong ideal (sebelum dipotong) untuk sudut divergen  $11^{\circ}$  dan  $13^{\circ}$*   
kata kunci : multinosel, nosel terpotong

### **Abstract**

*Analyses of cutted nozzle on multinozzle design is done in this research. In some cases, nozzle must be cutted so that the nozzle is well placed in multinozzle arrangement. Theoretically, cutting the ideal designed nozzle will cause the decrement of the thrust produced by the nozzle, the nozzle opeb rates in underexpanded condition.*

*Calculation analyses on cutted nozzle is started by determining exit Mach number of the nozzle from the geometry of the nozzle, i.e. exit to throat area ratio. Once the exit Mach number is obtained, so the flow properties such as exit pressure and temperature can be found that the thrust produced can be calculated. Correction factor due to divergence losses is applied in calculating the thrust. In this paper, the analyses is done on the nozzle with  $11^{\circ}$  and  $13^{\circ}$  divergent angle.*

*By minimizing the decrement of nozzle exit area, decrement of thrust due to nozzle cutting is not significant. The decrement of nozzle area ratio from 7,17 to 5,26 still produced signicant thrust i.e 99,08136 % and 98,7185 % of ideal thrust for  $11^{\circ}$  and  $13^{\circ}$  divergent angle respectively.*

*Keywords : multinozzle, nozzle cutting*

## 1. PENDAHULUAN

Roket dapat digunakan sebagai wahana untuk keperluan komersial, seperti pengukur cuaca, peluncur satelit, ataupun *platform* untuk melakukan berbagai penelitian di atmosfer. Namun selain itu, roket dapat juga berfungsi sebagai alat pertahanan dan keamanan. Oleh karenanya, sebagai suatu bangsa yang besar, Indonesia sangat memerlukan penguasaan dan kemandirian di bidang teknologi peroketan ini. Pada kenyataannya, penguasaan teknologi peroketan saat ini masih didominasi oleh negara-negara tertentu karena penyebarannya memang sangat dibatasi dengan aturan-aturan, antara lain MTCR (*Missile Technology Control Regime*) dan CISTEC (*Center for Information on Security Trade Control*). Saat ini penguasaan teknologi peroketan di Indonesia masih ketinggalan dibandingkan dengan negara-negara lain di Asia, seperti India, China, Korea Selatan, Korea Utara dan lain-lainnya. Oleh karena itu, diperlukan upaya-upaya untuk memacu bangsa ini agar memiliki kemandirian dan menguasai teknologi peroketan secara bertahap dan terarah.

---

\* Peneliti Bidang Motor Roket, Pusat Teknologi Roket - LAPAN

Untuk mengejar ketertinggalan dalam penguasaan teknologi roket, baik untuk kepentingan ilmiah, kesejahteraan maupun untuk pertahanan, salah satu cara untuk mengejar ketertinggalan dalam penguasaan teknologi tersebut adalah, antara lain: melalui proses penerusan teknologi (*forward engineering*) terhadap teknologi yang sudah dikuasai, proses perancangan dan pembuatan-ulang (*reverse engineering*) dari produk negara-negara lain maupun proses alih-teknologi (*Transfer of Technology*) roket dari negara-negara yang bersedia bekerjasama dengan Indonesia. Penguasaan teknologi dan industri roket secara mandiri, selain untuk kepentingan pengamanan wilayah negara kita, juga untuk mengurangi ketergantungan dari negara-negara yang sudah maju, dan sekaligus dapat menghemat devisa negara.

Pada saat ini kemampuan minimal sudah tersedia, misalnya kemampuan rancang bangun dan rekayasa di bidang peroketan yang dimiliki oleh industri-industri strategis dan lembaga penelitian (meskipun masih terbatas) seperti PT. PINDAD, PT.DI, LAPAN, LEN, BPPT, ITB, Dislitbang TNI-AU dan lainnya, serta kemampuan dan pengalaman pengoperasian roket-roket senjata oleh TNI. Realisasi program peroketan di Indonesia akan memberikan kesempatan kepada industri terkait di dalam negeri, baik yang sudah ada maupun industri baru, untuk berkembang lebih baik lagi untuk menjadi suatu Industri Pertahanan. Dengan demikian akan memberikan manfaat kepada masyarakat dengan memberikan peluang adanya tambahan lapangan kerja baru.

Sinergi potensi nasional dalam pengembangan kemampuan peroketan nasional sebenarnya sudah dimulai lewat program RISTEK D230 di tahun 2008-2009. Program ini mencanangkan untuk merancang dan membuat roket altileri yang mempunyai jangkauan sejauh 20-30 Km. Beberapa industri BUMN, lembaga penelitian dan akademisi terlibat dalam program ini, dan telah memperlihatkan sistem kerja tim dan hasil yang cukup memuaskan. Pada 6 November 2010 program D230, terakhir diuji coba di Puslatpur (Pusat Latihan Tempur) TNI di Baturaja, dengan nama R-Han 122. Uji coba yang telah menggunakan warhead buatan PT. PINDAD ini berhasil mencapai jarak 14 km.

Untuk meningkatkan jarak jangkau sesuai dengan harapan 20-30 km, telah dilakukan upaya dengan penelitian roket RX2020. Salah satu bagian dari upaya tersebut adalah desain model roket RX 200 booster dan sustainer yang terintegrasi, mengikuti model roket SeaCat. Terintegrasinya sustainer dan booster tanpa separasi dapat dilakukan bila desain nosel yang diaplikasikan adalah tipenosel jamak (*multinozzle*). Dalam aplikasinya, untuk kasus-kasus tertentu, ternyata nosel yang terbentuk harus dilakukan pemotongan pada bagian divergen karena ketebatasan ruang yang tersedia. Hal ini dilakukan agar bagian *exit* nosel tidak saling berpotongan jumlah diameter *exit* nosel harus dipotong untuk dapat menempati ruang tersedia. Tulisan ini menjelaskan efek pemotongan terhadap kinerja motor roket dimaksud terutama pengaruhnya terhadap penurunan gaya dorong.

## 2. METODOLOGI

Perhitungan parameter-parameter penting pada aliran yang terdiri dari tekanan, temperatur, dan gaya dorong dilakukan untuk melakukan analisis pada nosel yang dipotong. Seperti telah disebutkan pada bagian Pendahuluan, pengurangan gaya dorong akibat pemotongan merupakan parameter utama yang menjadi tinjauan dalam tulisan ini karena secara langsung berpengaruh pada performa roket. Desain nosel jamak didasarkan pada asumsi bahwa tekanan statik pada bagian inlet masing-masing nosel tunggal pada susunan nosel jamak adalah sama. Juga diasumsikan bahwa tekanan statik pada bagian inlet tiap-tiap nosel sama dengan tekanan ruang bakar, dengan anggapan bahwa kecepatan aliran saat memasuki inlet nosel adalah nol atau mendekati nol dengan mendesain radius inlet nosel minimal 2 kali lebih besar daripada radius throat (Sutton dan Biblarz, 2001). Nosel yang dipotong dalam penelitian ini adalah nosel yang didesain ideal untuk tekanan ruang bakar tertentu, sehingga secara teoretis (aliran 1 dimensi), nosel harus dipotong sekecil mungkin untuk meminimalkan pengurangan gaya dorong. Dengan pendekatan-pendekatan di atas, maka apabila nosel-nosel pada susunan nosel jamak memiliki dimensi yang sama (identik), maka masing-masing nosel dapat dihubungkan dengan nosel tunggal yang ekuivalen melalui persamaan di bawah ini (Sofyan dkk., 2007)

$$A_{ts} = n \cdot A_{tm} \quad (1)$$

sehingga

$$D_{tm} = \sqrt{\frac{D_{ts}^2}{n}} \quad (2)$$

Dengan,

$A_{tm}$  = luas *throat* masing-masing nosel pada susunan nosel jamak

$A_{ts}$  = luas *throat* nosel tunggal ekuivalen

$D_{tm}$  = diameter *throat* tiap nosel pada susunan nosel jamak

$D_{ts}$  = diameter *throat* nosel tunggal ekuivalen

$n$  = jumlah nosel identik pada susunan nosel jamak

Persamaan di atas menunjukkan bahwa untuk kasus nosel jamak identik, jumlah total luas *throat* nosel jamak ekuivalen dengan luas *throat* nosel tunggal yang ekuivalen. Juga tersirat bahwa tiap nosel pada nosel jamak identik memiliki bilangan Mach, tekanan *exit*, temperatur *exit*, dan koefisien gaya dorong yang sama dengan nosel tunggal ekuivalen apabila rasio luas *exit* nosel terhadap luas *throat* nosel dipertahankan. Properti-properti aliran pada nosel dicari dengan menggunakan persamaan isentropik pada aliran kompresibel (Anderson, 1990).

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left[ \left( \frac{2}{\gamma+1} \right) \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (3)$$

$$\frac{p_0}{p} = \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (4)$$

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \quad (5)$$

$$\frac{p_0}{p} = \left( \frac{\rho_0}{\rho} \right)^\gamma = \left( \frac{T_0}{T} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (6)$$

Arti dari simbol-simbol dari persamaan-persamaan di atas adalah sebagai berikut :

$M$  = bilangan Mach

$\frac{A}{A^*}$  = Rasio luas lokal terhadap luas minimum (luas *throat*)

$\gamma$  = konstanta panas spesifik

$\rho$  = kerapatan aliran

$A_t$  = luas *throat*

$\rho_0$  = kerapatan gas pada kondisi stagnan

$T_0$  = temperatur stagnasi/total

$T$  = temperatur statik

$R$  = konstanta gas

Untuk mencari besar gaya dorong, digunakan persamaan-persamaan berikut (Sutton dan Biblarz, 2001)

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

$\dot{m} = \rho v A_t$  (Zuchrow dan Hoffman, 1976), dengan anggapan *mass flow* konstan sepanjang nosel.

Arti simbol-simbol persamaan di atas adalah sebagai berikut :

$\dot{m}$  = *mass flow*

$F$  = Gaya dorong

$v_e$  = kecepatan aliran keluar nosel

$p_e$  = tekanan aliran keluar nosel

$p_a$  = tekanan sekitar

$A_e$  = luas penampang *exit* nosel

Berikut dijabarkan langkah-langkah perhitungan gaya dorong tiap nosel pada susunan nosel jamak.

- Dari geometri nosel yang dipotong, diketahui rasio luas nosel  $\left(\frac{A_e}{A_t}\right)$
- Dengan menggunakan persamaan (3), diperoleh bilangan Mach aliran keluar nosel
- Dengan menggunakan persamaan (4), diperoleh tekanan aliran keluar nosel ( $p_e$ )

- d. koefisien gaya dorong dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Sutton dan Biblarz, 2001)

$$C_f = \sqrt{\frac{2\gamma^2}{\gamma-1} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_c}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]} + \frac{p_e - p_a}{p_c} \frac{A_e}{A_t} \quad (8)$$

$C_f$  = koefisien gaya dorong

- e. Gaya dorong diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut (Sutton dan Biblarz, 2001)

$$F = C_f p_c A_t \quad (9)$$

$p_c$  = tekanan ruang bakar

Walaupun mengabaikan friksi pada nosel, kehilangan gaya dorong akibat sudut divergen nosel tetap diperhitungkan. Faktor koreksi gaya dorong dengan mempertimbangkan sudut divergen dinyatakan dengan persamaan berikut (Sutton dan Biblarz, 2001)

$$\lambda = \frac{1}{2}(1 + \cos\alpha) \quad (10)$$

$\alpha$  = sudut divergen nosel

$\lambda$  = faktor koreksi gaya dorong terhadap variasi sudut divergen

### 3. HASIL

Harga variabel masukan untuk mendesain nosel jamak yang dipotong diperlihatkan pada Tabel 3.1

Tabel 3.1. Input perhitungan desain

Tekanan ruang bakar ( $P_c$ )	51,18 atm
Tekanan atmosfer	1 atm
Temperatur ruang bakar	3000 K
Konstanta panas spesifik ( $\gamma$ )	1,2
Konstanta gas universal ( $\tilde{R}$ )	8314,472 J/Kmol K
Konstanta gas propelan ( $R$ )	332.58 J/Kg. K
Berat molar gas propelan ( $m$ )	25 kg/kmol

Gambar 3.1 sampai dengan 3.4 menampilkan gambar-gambar nosel desain awal (sebelum dipotong) dan setelah dipotong. Tampak bahwa susunan multinosel yang didesain ideal berpotongan akibat tidak tersedianya cukup ruang. Oleh karena itu dilakukan pemotongan agar nosel-nosel pada susunan multinosel dapat menempati ruangan yang tersedia.

Dari input pada Tabel , diperoleh hasil perhitungan sebagai berikut:

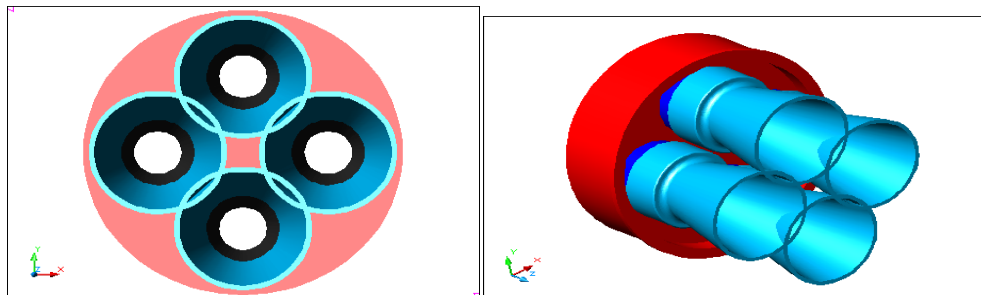
Tabel 3.2 Geometri dan hasil perhitungan nosel dengan sudut divergen 11 derajat

Tekanan <i>exit</i> nosel terpotong	1,52 atm
Bilangan Mach <i>exit</i> nose terpotong	2,822
Koefisiens gaya dorong nosel ideal	1,5581
Koefisien gaya dorong nosel terpotong	1,5496
Gaya dorng masing-masing nosel pada susunan nosel jamak	573,9141 kgf
Gaya dorong nosel tunggal ekivalen	2308,323 kgf
Diameter throat nosel tunggal ekivalen (nosel terpotong)	60 mm
Diameter throat masing-masing nosel pada susunan nosel jamak	30,00 mm

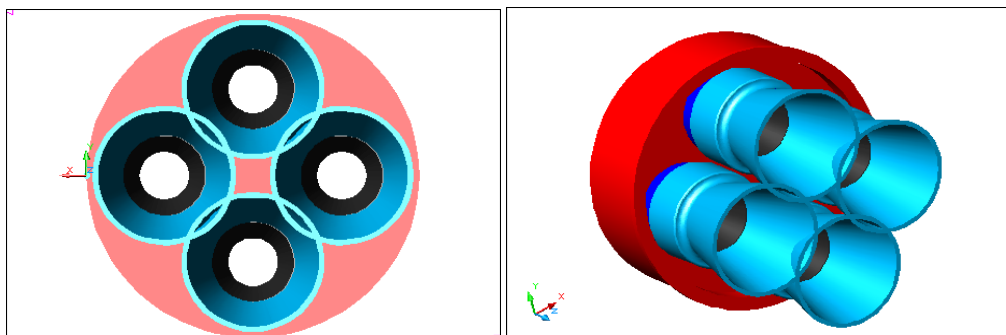
Diameter <i>exit</i> tiap nosel pada susunan nosel jamak terpotong	68,80 mm
Diameter <i>exit</i> tiap nosel pada susunan nosel jamak terpotong	80,33mm
Rasio luas luas <i>exit</i> terhadap luas throat nosel terpotong	5,26
Rasio luas luas <i>exit</i> terhadap luas throat nosel ideal	7,17
Jumlah nosel	4
efisiensi (%)	<b>99,08136</b>

Tabel 3.3 Geometri dan hasil perhitungan nosel dengan sudut divergen 11 derajat

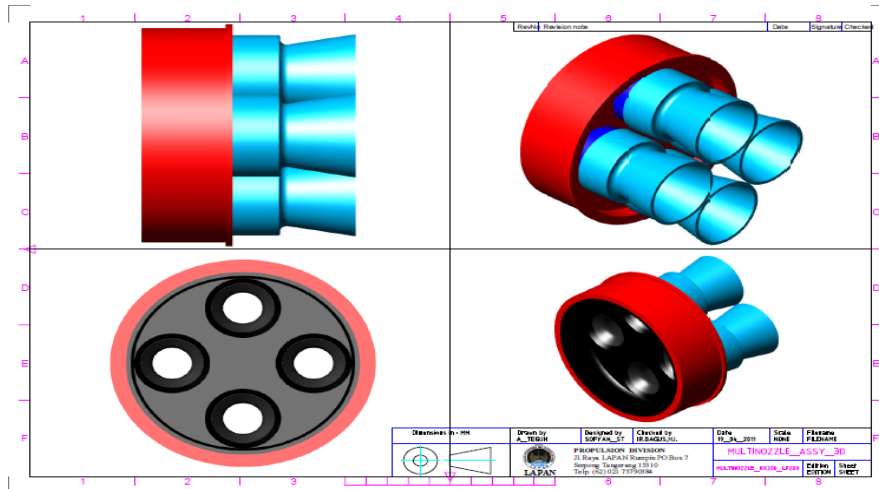
Tekanan <i>exit</i> nosel terpotong	1,52 atm
Bilangan Mach <i>exit</i> nosel terpotong	2,821981
Koefisiens gaya dorong ideal	1,558133
Koefisien gaya dorong nosel terpotong	1,549583
Gaya dorng masing-masing nosel pada susunan nosel jamak	571,8124 kgf
Gaya dorong nosel tunggal ekivalen (nosel terpotong)	2299,87 kgf
Diameter <i>throat</i> nosel tunggal ekivalen	60 mm
Diameter <i>throat</i> masing-masing nosel pada susunan nosel jamak	30 mm
Diameter <i>exit</i> tiap nosel pada susunan nosel jamak terpotong	68,80 mm
Diameter <i>exit</i> tiap nosel pada susunan nosel jamak terpotong	80,33 mm
Rasio luas luas <i>exit</i> terhadap luas throat nosel terpotong	5,26
Rasio luas luas <i>exit</i> terhadap luas throat nosel (kondisi ideal)	7,17
Jumlah nosel	4
efisiensi (%)	<b>98,7185</b>



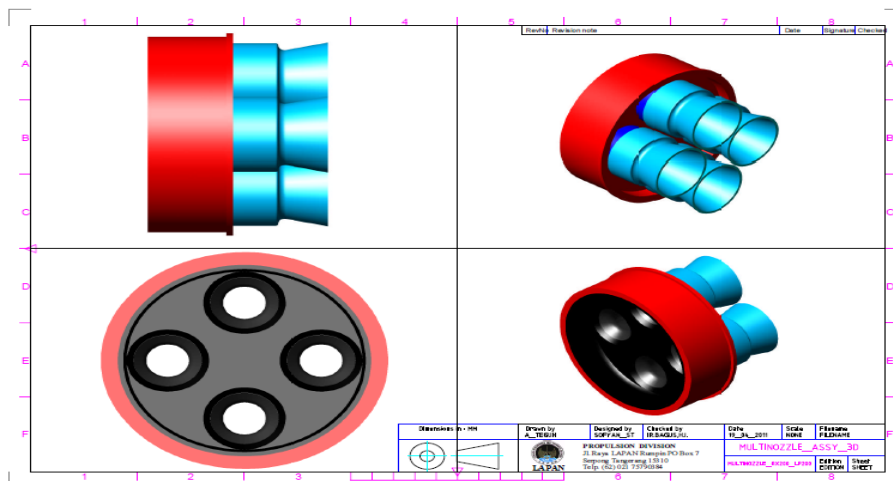
Gambar 3.1 Hasil desain awal (sebelum dipotong) multinosel dengan jumlah 4 nosel sudut divergen 11<sup>o</sup>



Gambar 3.2 Hasil desain awal (sebelum dipotong) multinosel dengan jumlah 4 nosel sudut divergen 13<sup>o</sup>



Gambar 3.3 Hasil desain multinosel dengan jumlah 4 nosel sudut divergen 11<sup>0</sup> setelah pemotongan



Gambar 3.4 Hasil desain multinosel dengan jumlah 4 nosel sudut divergen 13<sup>0</sup> setelah pemotongan

Dari input pada Tabel 1, diperoleh **gaya dorong ideal** (gaya dorong pada saat tekanan *exit* nosel sama dengan tekanan atmosfer) sebesar **2329,73 kgf**. Akibat adanya pemotongan nosel, tekanan *exit* akan lebih besar daripada tekanan atmosfer (kondisi *underexpanded*) seperti yang ditunjukkan oleh tabel 1 dan 2. Kondisi ini menyebabkan terjadinya pengurangan gaya dorong. Efisiensi gaya dorong pada Tabel 1 dan 2 menunjukkan **efisiensi terhadap gaya dorong ideal** (kehilangan gaya dorong akibat pemotongan dan pengaruh sudut divergen nosel sudah diperhitungkan). Dari hasil perhitungan gaya dorong tersebut dapat dilihat bahwa pemotongan nosel dengan mengurangi rasio  $A_e/A_t$  seperti pada Tabel, tidak mengakibatkan pengurangan gaya dorong secara signifikan. Hal ini dapat dipahami karena nosel dipotong dengan pengurangan luas *exit* nosel **sekecil mungkin**. Apabila pengurangan luas *exit* nosel cukup signifikan, maka akan mengakibatkan pengurangan gaya dorong yang signifikan juga. Efisiensi gaya dorong untuk sudut divergen 11<sup>0</sup> lebih besar dibandingkan sudut 13<sup>0</sup> karena menghasilkan *divergence losses* lebih rendah (lihat persamaan (10)). Dengan memperhatikan besar efisiensi gaya dorong pada Tabel 1 dan 2, nosel dengan sudut divergen 13<sup>0</sup> menghasilkan gaya dorong dengan perbedaan yang sangat kecil dibandingkan dengan nosel dengan sudut divergen 11<sup>0</sup>. Untuk ruangan yang tersedia, nosel tetap dapat didesain ideal dengan rasio  $A_e/A_t$  **5,26** dengan tekanan ruang bakar yang bersesuaian adalah sebesar **33,61 atm** (dari persamaan (4)). Akan tetapi dengan tekanan ruang bakar sebesar 33,61 atm, akan menghasilkan gaya dorong sebesar 1468,53 kgf (dari persamaan (8) dan (9)). Gaya dorong ini lebih kecil jika dibandingkan gaya dorong setelah pemotongan dengan tekanan ruang bakar sebesar **51,18 atm**. Oleh karena itu **untuk kasus ini**, opsi pemotongan nosel

masih lebih baik jika dibandingkan dengan desain nosel ideal dengan mengubah tekanan ruang bakar agar nosel-nosel tidak berpotongan.

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari uraian dan analisis di atas dapat diambil kesimpulan bahwa pemotongan nosel dengan pengurangan luas *exit* nosel sekecil mungkin tidak mengakibatkan pengurangan gaya dorong yang signifikan. Pengurangan rasio luas *exit* terhadap throat nosel dari 7,17 menjadi 5,26 menghasilkan efisiensi gaya dorong masing-masing 99,08136 % dan 98,7185 % terhadap gaya dorong ideal (sebelum dipotong) untuk sudut divergen  $11^0$  dan  $13^0$ .

Dari hasil penelitian ini dapat disarankan hal-hal sebagai berikut :

- Perlu divariasikan beberapa sudut divergen dan berbagai pengurangan luas *exit* nosel untuk menganalisis perubahan gaya dorong akibat pemotongan nosel.
- Perlu dilakukan validasi hasil perhitungan analitik dengan menggunakan simulasi dinamika fluida komputasional dan eksperimen (uji statik).
- Perlu dilakukan analisis yang cermat terhadap rasio gaya dorong terhadap berat nosel untuk mempertimbangkan signifikansi pengurangan gaya dorong akibat pemotongan nosel.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, Jr, John D., "*Modern Compressible Flow*", Mcgraw – Hill, 1990
- Zuchrow, Maurice J., dan Hoffman, Joe D., "*Gas Dynamics Volume 1*", John Wiley and Sons, 1976
- Sutton, George P., dan Biblarz, Oscar, "*Rocket Propulsion Elements 7<sup>th</sup> Edition*", John Wiley and Sons, 2001
- Sofyan, Saeri, dan Ganda Samosir, "*Disain Nosel Jamak untuk Meningkatkan Performa Roket*", Prosiding Seminar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Dirgantara (SIPTTEKGAN) LAPAN, 2007

#### DAFTAR RIWAYAT HIDUP PENULIS

##### DATA UMUM

Nama Lengkap : Sofyan  
 Tempat & Tgl. Lahir : Bima, 28 Februari 1976  
 Jenis Kelamin : Laki-laki  
 Instansi Pekerjaan : Bidang Teknologi Motor Roket, Pusat Teknologi Roket LAPAN  
 NIP. / NIM. : 19762802 200604 1 001  
 Pangkat / Gol. Ruang : Penata Tingkat I/III B  
 Jabatan Dalam Pekerjaan : Staf Peneliti Bidang Roket Padat  
 Agama : Islam  
 Status Perkawinan : Menikah

##### DATA PENDIDIKAN

SLTA : SMAN 1 Bima Tahun : 1991  
 STRATA 1 (S.1) : Institut Teknologi Bandung Tahun: 1996  
 STRATA 2 (S.2) : Institut Teknologi Bandung Tahun: 2008

##### ALAMAT

Alamat Rumah : Pisangan Lama No. 31 RT 006/ RW 005 Kelurahan Pisangan Timur Kecamatan Pulo Gadung Jakarta Timur 13230  
 Handphone : 085920792010

Alamat Kantor / Instansi : Jalan Raya LAPAN No. 2, Mekarsari, Rumpin, Bogor 16350  
 Telepon : 021-9204790  
 Email: sofyan\_sandiantariksa@yahoo.com