

ANALISIS LAPISAN BATAS ALIRAN DALAM NOSEL STUDI KASUS: NOSEL RX 122

Ahmad Jamaludin Fitroh, Saeri
Peneliti Pustekwagan, LAPAN
Email : ahmad_fitroh@yahoo.com

ABSTRACT

The simulation and calculation of boundary layer along inside nozzle has been studied. Test study is nozzle RX 122. The nozzle has inlet, throat, and exit diameter of 100, 34, and 96 mm respectively. The characteristic flow inside nozzle was simulated with 59 bars and 3,000 K of inlet condition. The result shows that boundary layer still occurred from inlet to nozzle exit. The boundary layer thickness increases to inlet and exit region. The boundary layer thickness around inlet and exit are 0.28 and 0,67 mm respectively.

Key words: *Boundary layer, Nozzle*

ABSTRAK

Telah dilakukan simulasi dan perhitungan lapisan batas permukaan dinding bagian dalam nosel. Studi kasusnya adalah nosel RX 122. Nosel mempunyai diameter *inlet*, *throat*, dan *exit* masing-masing 100, 34, dan 96 mm. Simulasi dan analisis lapisan batas dilakukan dengan kondisi batas tekanan dan temperatur ruang bakar masing - masing 59 bar dan 3.000 K. Hasil simulasi menunjukkan bahwa lapisan batas tetap terjadi mulai dari nosel bagian depan (*up stream throat*) hingga ke belakang (*down stream throat*). Lapisan batas semakin menebal pada posisi mendekati *inlet* dan *exit*. Tebal lapisan batas di dekat *inlet* dan di dekat *exit* masing-masing adalah 0,28 dan 0,67 mm.

Kata kunci : Lapisan batas, Nosel

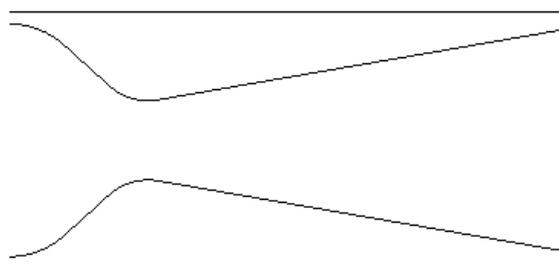
1 PENDAHULUAN

Salah satu komponen utama motor roket adalah nosel. Energi potensial yang berasal dari ruang bakar diubah menjadi energi kinetik melalui nosel. Perkalian antara laju aliran massa gas hasil pembakaran dengan perubahan kecepatan antara aliran yang masuk dan yang keluar dari nosel menghasilkan gaya dorong.

Aliran dalam nosel dipercepat mulai dari *inlet* hingga *exit*. Kecepatan aliran gas di *throat* berkisar satu Mach. Dengan adanya *no slip condition*, maka terjadi perbedaan kecepatan antara permukaan bagian dalam nosel dengan kecepatan di sekitar sumbu nosel. Perbedaan kecepatan tersebut menghasilkan profil kecepatan aliran di sekitar permukaan dinding. Tebal aliran di

permukaan dinding dimana kecepatannya mendekati kecepatan aliran bebasnya didefinisikan sebagai tebal lapisan batas.

Objek penelitian lapisan batas ini dipilih nosel RX 122 Nosel tersebut dipilih karena merupakan salah satu nosel LAPAN yang berbentuk *cone* sehingga mempunyai bentuk permukaan divergen yang lurus. Nosel tersebut mempunyai geometri dan dimensi seperti terlihat pada Gambar 1-1:



Gambar 1-1: Geometri nosel 122

- Diameter *inlet* = 100 mm
- Diameter *throat* = 34 mm
- Diameter *exit* = 96 mm
- Panjang nosel = 239 mm
- Dimensi = *axi-symmetric*

Nosel tersebut dialiri gas dari ruang bakar dengan tekanan dan temperatur sebesar 59 bar dan 3.000 K. Data tekanan tersebut diperoleh dari hasil perhitungan pada Laporan Kerja sedangkan temperatur sebesar 3.000 K merupakan temperatur kerja standar ruang bakar motor roket berbahan bakar propelan padat.

Kondisi aliran gas dalam nosel diperoleh melalui simulasi *Computational Fluid Dynamic (CFD)*. Hasil simulasi dapat berupa kontur parameter aliran, baik di dalam maupun di belakang nosel. Selain itu hasil simulasi dapat juga dinyatakan dalam bentuk kuantitatif.

Hasil simulasi selanjutnya diolah kembali untuk mendapatkan profil kecepatan di sekitar permukaan bagian dalam nosel. Dengan menggunakan definisi tebal lapisan batas tertentu, maka diperoleh distribusi lapisan batas di sepanjang dinding nosel mulai dari *inlet* hingga *exit*.

Dengan diketahui tebal lapisan batas di *exit* nosel, maka diperoleh luas efektif *exit*. Perbandingan antara luas *exit* hasil desain dengan luas efektifnya akibat adanya lapisan batas dapat dijadikan koreksi untuk penentuan diameter *exit* yang sebenarnya.

2 TUJUAN DAN BATASAN MASALAH

2.1 Tujuan

Kegiatan utama dalam penelitian ini adalah mensimulasikan aliran dalam nosel. Karakteristik aliran hasil simulasi difokuskan pada profil kecepatan di sekitar permukaan. Dengan demikian penelitian ini bertujuan untuk:

- Mendapatkan profil dan tebal lapisan batas di sepanjang permukaan dalam nosel.

- Memperoleh luas *exit* efektif nosel dan membandingkan dengan luas *exit* hasil desain dan produksi.

Profil dan tebal lapisan batas yang terbentuk di sepanjang dinding nosel akan disajikan dalam bentuk plot atau kurva.

2.2 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah dan asumsi yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

- Tekanan dan temperatur *inlet* dianggap konstan selama operasi sebesar 59 bar dan 3.000 K.
- Nosel dioperasikan pada kondisi atmosfer permukaan laut (*sea level*).
- Kondisi aliran bersifat tunak (*steady*).
- Massa atom relatif (M_r) gas hasil pembakaran propelan dan γ gas masing-masing sebesar 25 gr/mol dan 1,2.
- Nosel berbentuk *axi-symmetric* sempurna.
- Metode turbulensi yang digunakan adalah *k - epsilon standard*.
- Tebal lapisan batas didefinisikan pada suatu titik dimana kecepatan aliran lokal sebesar 0,90 kecepatan aliran bebasnya.

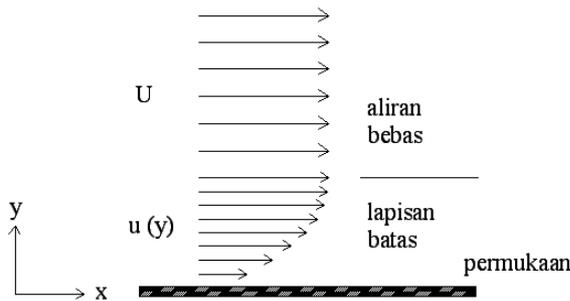
Dalam penelitian ini profil dan tebal lapisan batas hanya diperoleh dari hasil simulasi yang diolah terlebih dahulu. Sedangkan untuk memvalidasi hasil simulasi, maka parameter aliran di *exit* akan dibandingkan terlebih dahulu dengan hasil perhitungan secara analitis.

Penelitian ini hanya membahas mengenai lapisan batas saja. Prestasi nosel berupa gaya dorong tidak diikuti sertakan dalam perhitungan dan analisis.

3 DASAR TEORI

Sebuah fluida yang mengalir melintasi sebuah permukaan mempunyai distribusi kecepatan yang tidak seragam, khususnya aliran di dekat permukaan tersebut. Partikel aliran yang bersentuhan

langsung dengan permukaan mempunyai kecepatan sama dengan nol. Fenomena tersebut dikenal dengan istilah *no slip condition*. Adanya perbedaan kecepatan aliran antara partikel fluida yang menempel pada permukaan dengan partikel lainnya menghasilkan distribusi atau profil kecepatan di sekitar permukaan yang disebut sebagai lapisan batas. Gambar 3-1 menunjukkan sketsa profil kecepatan di sekitar permukaan.



Gambar 3-1: Sketsa lapisan batas

U dan u (y) masing-masing menunjukkan kecepatan aliran bebas dan kecepatan aliran lokal dalam lapisan batas.

Dengan kondisi permukaan yang sama, maka semakin tinggi kecepatan aliran akan mengakibatkan lapisan batas yang semakin tebal (John D. Anderson Jr., 2003; Catatan Kuliah Lapisan Batas, 2003). Merujuk geometri nosel pada Gambar 1-1, maka nosel merupakan tipe nosel konvergen-divergen dimana kecepatan aliran dipercepat mulai dari *inlet* hingga *exit* nosel. Dengan demikian lapisan batas yang terbentuk semakin tebal hingga *exit* nosel.

Menurut bentuknya, lapisan batas dapat digolongkan menjadi dua, yaitu lapisan batas laminar dan lapisan batas turbulen. Lapisan batas turbulen mempunyai gradien kecepatan pada permukaan yang lebih tinggi sehingga menghasilkan gaya gesek yang lebih besar. Pernyataan tersebut didukung dengan persamaan tegangan geser yang dinyatakan dalam persamaan (3-1) (Catatan Kuliah Lapisan Batas, 2003). Sketsa kedua jenis lapisan batas tersebut disajikan dalam Gambar 3-2.

$$\tau_{laminar} = \mu \frac{du}{dy} \tag{3-1a}$$

$$\tau_{laminar} = (\mu + \epsilon) \frac{\partial u}{\partial y} \tag{3-1b}$$

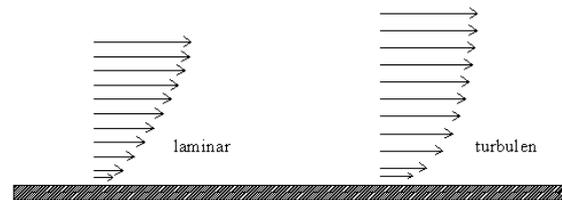
dimana

τ = tegangan geser

μ = viskositas

u = kecepatan aliran searah permukaan

y = arah tegak lurus permukaan



Gambar 3-2: Profil lapisan batas laminar dan turbulen

Lapisan batas turbulen lebih tebal dibandingkan dengan lapisan batas laminar. Selain itu lapisan batas turbulen mempunyai gradien kecepatan pada permukaan yang lebih besar sehingga profil kecepatannya kelihatan lebih melengkung (John D. Anderson Jr., 2003; Rott, N., Lewelen W.S., 1966; Schlichting, H., 1977; Catatan Kuliah Lapisan Batas, 2003).

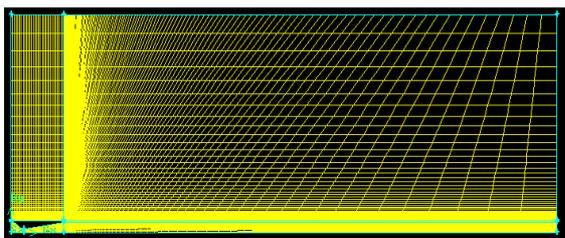
4 METODE

Secara umum penelitian dan pengembangan dapat dilakukan dengan tiga metode, yaitu metode analitis, metode numerik atau simulasi, dan metode pengujian. Biasanya ketiga metode tersebut dilakukan secara berurutan. Metode analitis menggunakan beberapa persamaan dasar untuk mendapatkan parameter awal dan estimasi prestasi objek penelitian. Metode numerik menggunakan persamaan-persamaan yang lebih detail dan biasanya diperlukan iterasi untuk mendapatkan hasil perhitungan. Iterasi diterapkan pada setiap titik atau elemen *domain* perhitungan yang biasa disebut dengan *mesh* atau *grid*. Metode numerik biasanya dipadukan dengan simulasi sehingga hasil-hasil perhitungan dapat disajikan dalam bentuk kuantitatif

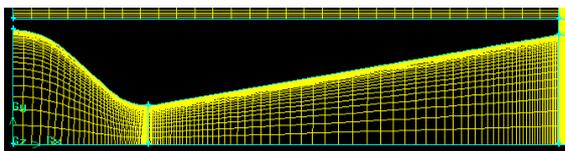
maupun gambar. Untuk permasalahan fluida, metode numerik biasanya disebut dengan *Computational Fluid Dynamic (CFD)*.

Kondisi aliran di dalam dan di luar nosel disimulasikan secara *CFD*. Untuk memvalidasi hasil simulasi *CFD*, maka parameter aliran di *exit* nosel juga dihitung secara analitis. Selanjutnya parameter aliran di *exit* hasil simulasi dibandingkan dengan hasil analitis. Apabila kedua metode tersebut memberikan hasil yang relatif sama, maka hasil simulasi dianggap cukup valid.

Pada paragraf sebelumnya telah diasumsikan bahwa geometri nosel bersifat *axi-symmetric* sempurna. Dengan demikian simulasi cukup dilakukan secara setengah geometri. Pemodelan dan *grid* yang digunakan disajikan dalam Gambar 4-1.



Gambar 4-1a: Pemodelan dan *meshing*



Gambar 4-1b: Pemodelan dan *meshing* (detail)

Seperti yang telah dijelaskan pada paragraf sebelumnya bahwa interaksi antara aliran dan permukaan adalah *no slip condition*. Dengan demikian aliran bersifat viskos. Dengan adanya viskositas aliran, maka terbentuk lapisan batas.

Apabila simulasi menggunakan *setting* aliran laminar, maka akan terbentuk lapisan batas laminar saja di sepanjang dinding nosel. Dengan demikian simulasi akan menggunakan *setting* aliran turbulen untuk mengantisipasi terbentuknya kedua jenis lapisan batas tersebut (Manual *FLUENT*).

Pemodelan viskositas untuk aliran turbulen yang tersedia adalah sebagai berikut (Manual *FLUENT*):

- *Spalart – Allmaras*
- *k – epsilon*
 - *Standard*
 - *RNG*
 - *Realizable*
- *k – omega*
 - *Standard*
 - *SST*
- *Reynolds Stress*

Turbulensi aliran dalam nosel biasanya tidak terlalu besar sehingga dapat dimodelkan dengan *k – epsilon*. Dalam penelitian ini pemodelan yang digunakan adalah *k – epsilon standard*.

Analisis secara *CFD* berarti memecahkan beberapa persamaan secara diskrit. Semakin halus bentuk diskrit yang digunakan, maka semakin akurat hasilnya. Dalam penelitian ini diskritisasi yang digunakan adalah *second order up-wind*.

5 HASIL

Parameter aliran di *exit* berdasarkan metode analitis dan simulasi *CFD* disajikan dalam Tabel 5-1:

Tabel 5-1: PARAMETER ALIRAN DI *EXIT*

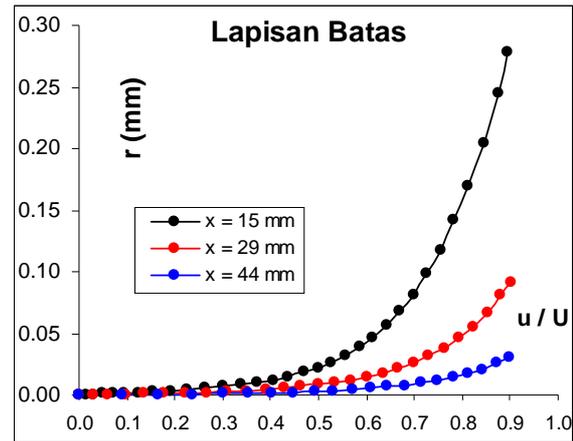
Parameter	Analitis	CFD
1. Laju massa (kg/det)	3,44	3,40
2. Tekanan total (bar)	59,0	56,4
3. Tekanan statik (bar)	1,00	1,25
4. Kecepatan (Mach)	3,12	3,05

Kedua metode tersebut menghasilkan harga parameter aliran di *exit* yang hampir sama. Dengan demikian hasil simulasi *CFD* dianggap telah valid.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa lapisan batas sudah terbentuk mulai dari *inlet*. Lapisan batas paling tipis terjadi di *throat* sedangkan lapisan batas paling tebal terjadi di *exit*. Distribusi tebal lapisan batas sepanjang dinding nosel disajikan dalam Tabel 5-2.

Tabel 5-2: DISTRIBUSI TEBAL LAPISAN BATAS

x (mm)	y (mm)	δ (mm)	δ / y (%)
15	47	0,28	0,6
29	35	0,09	0,3
44	22	0,03	0,1
81	21	0,18	0,8
104	24	0,27	1,1
126	28	0,39	1,4
149	32	0,47	1,5
171	36	0,56	1,6
194	40	0,64	1,6
216	44	0,67	1,5

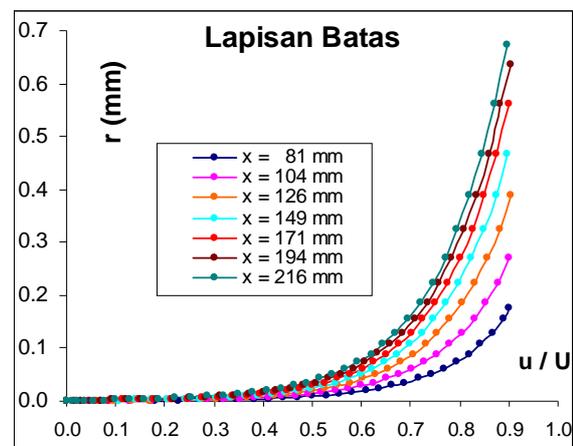


Gambar 5-2a: Profil lapisan batas di *up stream throat*

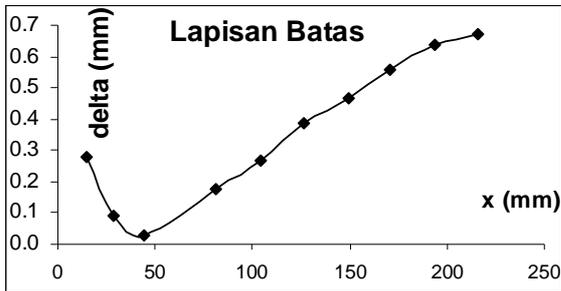
Dimana:

x = jarak aksial dihitung dari *inlet* nosel
 y = jari-jari lokal nosel, merupakan fungsi dari x
 δ = tebal lapisan batas

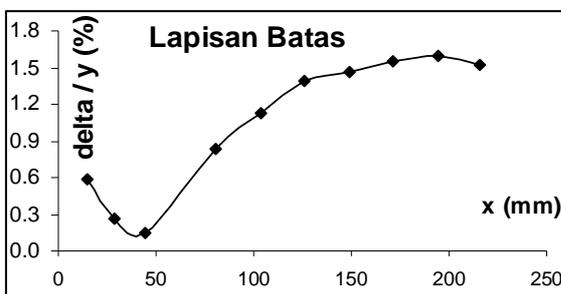
Distribusi tebal lapisan batas pada Tabel 5-2 dapat juga disajikan dalam bentuk kurva pada Gambar 5-1.



Gambar 5-2b: Lapisan batas di *down stream*



Gambar 5-1a: Distribusi tebal lapisan batas



Gambar 5-1b: Distribusi δ/y

Seperti yang telah dijelaskan pada paragraf sebelumnya bahwa tebal lapisan batas diasumsikan pada batas $u/U = 0,90$. Profil lapisan batas, baik di *up stream* maupun di *down stream throat* disajikan dalam Gambar 5-2.

Tabel 5-2 menunjukkan bahwa tebal lapisan batas di sekitar *exit* adalah sebesar 0,67 mm. Tebal tersebut setara dengan $\delta/y = 1,5 \%$. Dengan demikian dapat diestimasi bahwa luas efektif *exit* nosel sebesar $(100 \% - 1,5 \%)^2 = 97 \%$ kali luas berdasarkan geometri.

6 ANALISIS

Bagian ini membahas semua hasil yang telah disajikan dalam paragraf sebelumnya. Pembahasan difokuskan pada:

- Harga parameter aliran di *exit* nosel yang diperoleh dengan menggunakan metode analitis dan simulasi *CFD*.
- Distribusi tebal lapisan batas, baik di *up stream* maupun di *down stream throat*.

- Luas efektif *exit* nosel beserta pengaruhnya, baik terhadap kecepatan aliran maupun tekanan statik di *exit*.

Penjelasan selengkapnya disajikan dalam beberapa paragraf selanjutnya.

6.1 Analisis Harga Parameter Aliran di *Exit*

Harga laju aliran massa adalah konstan di sepanjang nosel. Hal tersebut sesuai dengan hukum kekekalan massa (John D Anderson Jr., 2003; Zuchrow, Maurice J., 1976). Harga laju aliran massa hasil dari metode analitis dan simulasi *CFD* masing-masing adalah 3,44 dan 3,40 kg/det. Selisih kedua harga tersebut sangat kecil, yaitu 1,16 %. Dengan demikian hasil simulasi ditinjau dari laju aliran massa dianggap cukup valid.

Roket balistik RX 122 dirancang untuk beroperasi pada tekanan dan temperatur ruang bakar masing-masing sebesar 59 bar dan 3.000 K. Dengan demikian kondisi tersebut sama dengan kondisi di *inlet* nosel.

Metode analitis mengasumsikan bahwa tidak ada *pressure loss* di sepanjang nosel sehingga tekanan total di *exit* sama dengan di *inlet*, yaitu sebesar 59 bar. Dengan mengkondisikan *no slip condition* dalam simulasi *CFD*, maka terdapat gradien kecepatan di permukaan nosel. Perkalian antara viskositas aliran gas dengan gradien kecepatan tersebut menghasilkan tegangan gesek yang nantinya dapat dikonversi menjadi energi gesek. Apabila tidak ada separasi aliran dalam nosel, maka gesekan antara aliran gas dan permukaan nosel mengakibatkan *pressure loss*. Dengan demikian terjadi penurunan tekanan total di *exit* menjadi 56,4 bar atau sekitar 4,4 %.

Pada paragraf sebelumnya telah disebutkan bahwa adanya lapisan batas menyebabkan luas efektif nosel menjadi berkurang, yaitu menjadi 97 % kali luas geometri di sekitar *exit*. Nosel RX 122 ini mempunyai konfigurasi konvergen-

divergen. Daerah konvergen juga disebut sebagai *up stream throat* sedangkan daerah divergen disebut juga sebagai *down stream throat*. Pada daerah divergen semakin besar perbandingan antara luas *exit* dan luas *throat*, maka semakin besar kecepatan aliran di *exit*. Dengan luas *throat* yang sama, maka semakin besar luas *exit* akan menghasilkan kecepatan aliran di *exit* yang semakin tinggi pula. Dengan adanya lapisan batas, maka luas efektif *exit* menjadi berkurang sehingga kecepatan aliran di *exit* juga menjadi lebih kecil dari rancangan.

Ditinjau dari komponen pergerakan partikelnya, maka tekanan fluida dapat digolongkan menjadi tiga, yaitu tekanan total, tekanan statik, dan tekanan dinamik (John D. Anderson Jr, 2003; Liepmann, H.W., Roshko, A., 1977; Zuchrow, Maurice J., Hoffman, Joe D., 1976). Tekanan total merupakan penjumlahan antara tekanan statik dan tekanan dinamik. Pengurangan kecepatan aliran di sekitar *exit* menyebabkan pengurangan tekanan dinamik sehingga secara tidak langsung menyebabkan kenaikan tekanan statik aliran di sekitar *exit* nosel.

6.2 Analisis Distribusi Tebal Lapisan Batas

Lapisan batas terbentuk akibat adanya viskositas fluida dan kondisi *no slip*. Dengan batas luar yang sama, maka semakin tinggi kecepatan aliran bebasnya menghasilkan lapisan batas yang semakin tebal. Pada daerah divergen (*down stream throat*) aliran dipercepat sehingga lapisan batas yang terbentuk juga semakin tebal.

Selain kecepatan aliran bebas, tebal lapisan batas juga dipengaruhi oleh batas luarnya. Pada daerah konvergen (*up stream throat*) geometri nosel dipersempit hingga *throat*. Penyempitan geometri menyebabkan batas luar aliran bebasnya juga menjadi semakin kecil. Pengurangan batas luar yang signifikan menyebabkan lapisan batas semakin menipis.

6.3 Analisis Efek Luas Efektif

Pembahasan pengaruh adanya lapisan batas terhadap luas efektif nosel telah diuraikan pada paragraf sebelumnya. Lapisan batas pada permukaan bagian dalam nosel menyebabkan luas efektif di sekitar *exit* menjadi 97 % kali luas berdasarkan geometri. Pengurangan luas aliran di sekitar *exit* nosel menyebabkan kecepatan aliran di daerah tersebut juga berkurang karena rasio luas antara *exit* dan *throat* menjadi semakin kecil. Penurunan kecepatan aliran menyebabkan kenaikan tekanan statik.

7 KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang dapat diperoleh dari penelitian ini antara lain :

- Lapisan batas sudah terbentuk mulai dari *inlet* hingga *exit* nosel.
- Lapisan batas semakin menipis hingga *throat* dan kembali semakin menebal hingga *exit* nosel.
- Tebal lapisan batas di daerah *inlet*, *throat*, dan *exit* masing-masing adalah 0,28, 0,03, dan 0,67 mm.
- Adanya lapisan batas menyebabkan luas efektif di sekitar *exit* menjadi 97 % kali luas geometri sehingga kecepatan aliran berkurang dan tekanan statiknya meningkat.

Besaran tebal lapisan batas dan luas efektif di atas hanya berlaku untuk nosel RX 122 dengan geometri dan daerah kerja tertentu. Perubahan tekanan ruang bakar atau *inlet* nosel akan mempengaruhi karakteristik lapisan batas pada dinding nosel.

DAFTAR RUJUKAN

- Catatan Kuliah Lapisan Batas, 2003. Teknik Penerbangan, ITB.
- John D. Anderson Jr, 2003. *Modern Compressible Flow*, third edition, Mcgraw-Hill International.
- Liepmann, H.W.; Roshko, A., 1977. *Elements of Gas Dynamics*, John Wiley & Sons, New York.
- Manual *FLUENT*.
- Rott, N.; Lewellen, W.S., 1966. *Boundary Layers and Their Interactions in Rotating Flows Volum 7*, 1966, Progress in Aeronautical Science, Pergamon Press.
- Schlichting, H., 1977. *Boundary Layer Theory*, Mc. Graw-Hill, New York.
- Sutton, George P., 2001. *Rocket Propulsion Elements 7th Edition*, John Wiley and Sons.
- Zuchrow, Maurice J.; Hoffman, Joe D., 1976. *Gas Dynamic Volume 1*, John Wiley and Sons.