

# **ANALISIS *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC* (CFD) RUANG BAKAR MESIN TURBOJET TJE500FH V.1 (*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC ANALYSIS OF TURBOJET TJE500FH V.1'S COMBUSTION CHAMBER*)**

**Firman Hartono\*) dan Arizal\*\*)**  
\*) Institut Teknologi Bandung  
\*\*) Universitas Nurtanio Bandung  
e-mail: firman7738@gmail.com

## **ABSTRACT**

This paper explains the results of Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis of TJE500FH combustion chamber. The purpose of this work is to investigate the characteristics of airflow in the combustion chamber especially to find out why flame exists outside the exhaust nozzle. The simulation uses full 3D model in cold flow condition, steady and constant density flow. The standard  $k - \epsilon$  model is used to calculate the effect of turbulence. From the simulation, it is found that the mass of airflow entering primary and secondary zones is smaller than its design value. Hence the rich fuel - air mixture is probably formed in primary and secondary zones. Further, most of air enters the liner through dilution holes so that instead of cools the combustion products, the combustion reaction takes place in this zone. Lack of air entering primary and secondary zones are probably due to the sharp edges of the inner and outer wall of the liner.

Keywords: *Small turbojet, Gas turbine, CFD, Combustion chamber*

## **ABSTRAK**

Pada makalah ini dijelaskan hasil-hasil *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dari ruang bakar versi 1 mesin TJE500FH. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk menyelidiki karakteristik aliran udara di dalam ruang bakar terutama terkait fenomena adanya pembakaran di luar nosel. Simulasi ruang bakar dalam makalah ini menggunakan model 3D pada kondisi dingin, tunak dan dengan kerapatan udara dianggap konstan. Model turbulensi  $k - \epsilon$  standar digunakan untuk menghitung efek turbulensi terhadap medan aliran yang dihasilkan. Dari simulasi ini, diketahui bahwa massa udara yang masuk zona primer dan zona sekunder *liner* lebih kecil dari rancangannya sehingga kemungkinan tercipta campuran bahan bakar - udara yang terlalu kaya di daerah tersebut. Selanjutnya, sebagian besar udara masuk liner ruang bakar pada zona dilusi sehingga alih-alih terjadi pendinginan malah terjadi reaksi pembakaran. Kurangnya udara pada zona primer dan zona sekunder tampaknya disebabkan oleh bentuk sisi-sisi luar liner yang tajam.

Kata kunci: *Mesin turbojet kecil, Turbin gas, CFD, Ruang bakar*

## **1 PENDAHULUAN**

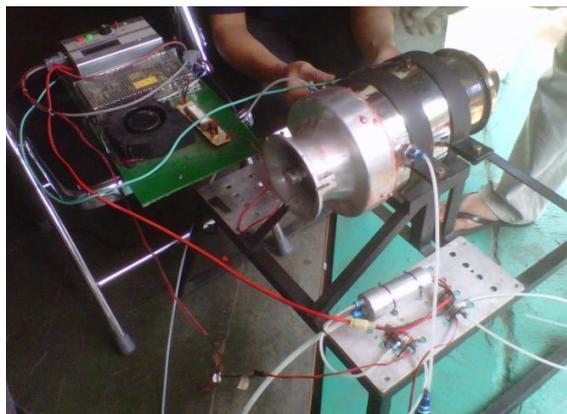
TJE500FH v.1 merupakan mesin turbojet kecil yang dirancang untuk menghasilkan gaya dorong statik maksimum 500 N pada kondisi muka laut standar ISA. Seperti umumnya

mesin turbojet, TJE500FH terdiri dari tiga komponen utama yaitu: kompresor, ruang bakar dan turbin. Fungsi dari masing-masing komponen ini adalah: kompresor untuk melakukan proses kompresi sehingga tekanan fluida kerja

naik, ruang bakar untuk melakukan proses pembakaran sehingga terjadi perubahan energi dari energi kimia bahan bakar menjadi energi dalam bentuk panas dan energi kinetik, dan turbin yang berfungsi mengambil sebagian energi yang dihasilkan dari proses pembakaran untuk memutar kompresor. Selanjutnya sisa energi gas hasil pembakaran disebarkan dengan kecepatan tinggi untuk menghasilkan gaya dorong. Proses perancangan mesin ini dapat dilihat pada Hartono [Hartono, F., 2010] dengan titik desain sebagai berikut:

- Laju massa udara = 0.88 kg/s
- Rasio tekanan kompresor = 4.06
- Temperatur masuk turbin = 1150 K

Selanjutnya mesin turbojet TJE500FH v.1 yang telah dibangun ditunjukkan pada Gambar 1-1 [Hartono, F., 2011].



Gambar 1-1: Mesin turbojet TJE500FH v.1

Sebagai salah satu komponen inti mesin turbojet, ruang bakar harus memiliki kinerja yang sesuai dengan rancangan. Hal ini penting karena ketidaksesuaian kinerja salah satu komponen mesin dapat menyebabkan mesin gagal beroperasi atau minimal menjadi tidak efisien.

Terdapat setidaknya dua metode untuk menyelidiki kinerja komponen ruang bakar, yaitu: metode eksperimen dan metode komputasi. Metode eksperimen membutuhkan sebuah *test bed* yang dapat memberikan massa udara, tekanan dan temperatur yang

sesuai dengan kondisi riil, sebuah model dengan skala yang tepat (lebih baik jika skala 1:1) dan alat-alat ukur yang memenuhi standar. Hal ini menyebabkan metode eksperimen membutuhkan waktu yang cukup lama dan biaya yang relatif mahal. Berbeda dengan metode eksperimen, metode komputasi hanya memerlukan komputer yang memenuhi kriteria dan pemodelan yang tepat sehingga membutuhkan waktu yang lebih singkat dan biaya yang lebih murah. Metode komputasi dapat dilakukan lebih dulu sebelum eksperimen.

Dalam makalah ini dilaporkan hasil-hasil analisis numerik komponen ruang bakar TJE500FH v.1. Tujuan dari dilakukannya analisis ini adalah untuk menyelidiki sifat-sifat aliran yang dihasilkan oleh ruang bakar yang telah dirancang. Hal ini terutama untuk menjelaskan fenomena adanya semburan api diluar nosel dalam uji coba TJE500FH v.1 seperti terlihat pada Gambar 1-2.



Gambar 1-2: Uji coba mesin turbojet TJE500FH v.1

Sebelum dilakukan analisis 3 dimensi, telah terlebih dahulu dilakukan analisis 2 dimensi aksisimetrik. Hasil analisis 2 dimensi aksisimetrik ruang bakar ini dapat dilihat pada [Rahardianto S dan Hartono, F., 2011].

## 2 RUANG BAKAR TJE500FH V.1

### 2.1 Pengantar

Ruang bakar TJE500FH v.1 termasuk ke dalam tipe ruang bakar annular *straight through flow*. Proses

perancangan ruang bakar secara umum mengacu pada [Lefebvre, A.H., 1983], namun pertimbangan dalam pemilihan tipe ruang bakar ini dapat dilihat pada [Hartono, F., 2010].

Ruang bakar terdiri dari *casing* dan *liner*. *Casing* adalah bagian selongsong luar ruang bakar yang berfungsi mengatur aliran udara sebelum memasuki *liner* dan melindungi komponen mesin dan lingkungan luar dari radiasi panas ruang bakar. Di bagian dalam casing terdapat *liner*. *Liner* merupakan bagian dari ruang bakar yang fungsinya sebagai tempat berlangsungnya reaksi pembakaran.

Ruang bakar ini dirancang untuk memiliki tiga zona yaitu zona primer, zona sekunder dan zona dilusi. Zona primer adalah daerah tempat proses pembakaran utama berlangsung. Zona sekunder adalah tempat proses pembakaran lanjutan (jika masih ada bahan bakar yang belum terbakar) berlangsung. Zona dilusi adalah tempat terjadinya pendinginan gas-gas hasil pembakaran agar memiliki temperatur yang sesuai dengan temperatur masuk turbin hasil perancangan termodinamika. Dalam proses perancangan aerodinamika, ditentukan agar 31% udara masuk ke dalam zona primer, 29% udara masuk ke dalam zona sekunder dan 40% udara masuk ke dalam zona dilusi.

Untuk mengatur banyaknya udara yang masuk, pada dinding *liner* setiap zona terdapat lubang-lubang. Ukuran dan jumlah lubang bervariasi tergantung pada jumlah udara yang harus masuk dan tingkat penetrasi udara. Perhitungan untuk penentuan ukuran dan jumlah lubang mengacu pada [Lefebvre, A.H., 1983].

### 2.2 Hasil Perancangan

Ruang bakar anular hasil perancangan aerodinamika disajikan pada Tabel 2-1. Perhitungan jumlah dan diameter lubang pada setiap zona di dalam ruang bakar dapat dilakukan

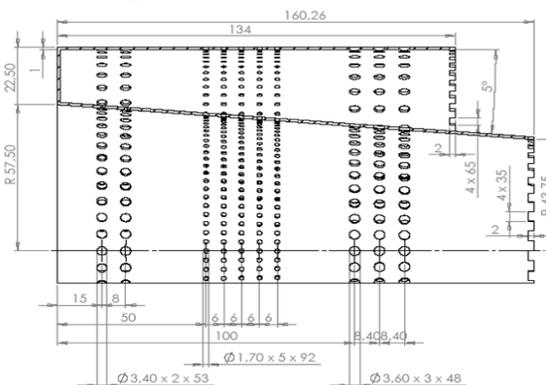
melalui proses perancangan aerodinamika, namun demikian perancangan aerodinamika pada [Lefebvre, A.H., 1983] tidak dapat digunakan untuk menentukan jarak antar lubang atau pola lubang.

Table 2-1: HASIL PERANCANGAN RUANG BAKAR

Kriteria	Nilai	Satuan
Diameter <i>liner</i> dalam (depan)	115	mm
Diameter <i>liner</i> luar	160	mm
<i>Casing</i> dalam ( <i>front</i> )	164	mm
<i>Casing</i> luar	111	mm
Panjang <i>liner</i>	134	mm
Jumlah lubang primer	53	
Diameter lubang primer	3,4	mm
Jumlah lubang sekunder	109	
Diameter lubang sekunder	1,7	mm
Jumlah lubang dilusi	50	
Diameter lubang dilusi	3,6	mm

### 2.3 Manufaktur Ruang Bakar

Dimensi *liner* ruang bakar ditunjukkan pada Gambar 2-1. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, tidak ada metode yang secara khusus dapat digunakan untuk menentukan posisi dan pola lubang-lubang pada *liner* sehingga sangat mungkin posisi dan pola lubang-lubang pada *liner* akan berubah atau mengalami modifikasi. Dengan demikian, *liner* ini merupakan *liner* ruang bakar versi pertama.



Gambar 2-1: Liner ruang bakar TJE500FH v.1

Liner dibuat dari material baja pelat yang di roll. Bahan bakar masuk ke dalam liner melalui dua pipa bahan bakar. Bahan bakar yang digunakan adalah gas LPG dan kerosene. LPG digunakan untuk proses penyalaan awal dan akselerasi awal sedangkan kerosene digunakan untuk operasi mesin selanjutnya. Hasil manufaktur liner ditunjukkan pada Gambar 2-2.



Gambar 2-2: Manufaktur liner ruang bakar TJE500FH v.1

### 3 MODEL NUMERIK

#### 3.1 Persamaan Atur

Pemodelan numerik aliran [Fluent Manual, Fluent Inc.] dilakukan dengan menggunakan persamaan konservasi massa (kontinuitas) dan persamaan konservasi momentum dalam bentuk integral dan kondisi stasioner.

Persamaan Kontinuitas

$$\oint \rho \underline{u} \cdot d\underline{A} = 0 \quad (3-1)$$

Persamaan Momentum

$$\oint \rho \underline{u} \underline{u} \cdot d\underline{A} = -\oint p d\underline{A} + \oint \underline{\tau} \cdot d\underline{A} + \int_V \underline{F} dV \quad (3-2)$$

Keterangan:

$\rho$  = densitas fluida

$\underline{u}$  = vektor kecepatan

$\underline{A}$  = vektor normal bidang batas

$P$  = tekanan

$\tau_{ij}$  = matriks tegangan geser fluida

$$\tau_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (3-3)$$

$\underline{F}$  = faktor *body forces* dalam fluida

Kedua persamaan tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan transport.

$$\oint \rho \phi \underline{u} \cdot d\underline{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\underline{A} + \int_V S_\phi dV \quad (3-4)$$

Untuk persamaan kontinuitas, faktor skalar  $\phi$  berharga 1 dan  $\Gamma_\phi$  berharga 0. Sedangkan untuk persamaan konservasi momentum,  $\phi$  merupakan vektor kecepatan dan koefisien  $\Gamma_\phi$  merupakan koefisien viskositas fluida ( $\mu$ ). Suku  $S$  merupakan rangkuman dari gaya konservatif (*body forces*) dan kontribusi kecil dari tegangan viskos (*viscous stress*). Suku yang mengandung faktor gradien tekanan akan dikaitkan dengan metode *velocity-pressure coupling*.

Aliran turbulen ditandai dengan hadirnya medan aliran yang berfluktuasi. Fluktuasi ini memiliki sifat mencampur besaran yang mengalami proses transport seperti momentum. Untuk itu, pada persamaan atur aliran harus ditambahkan fungsi *time-averaged*. Dengan menambahkan fungsi tersebut, akan muncul besaran baru hasil dari pemodelan fluktuasi tersebut. Proses ini dinamakan pemodelan turbulen. Terdapat banyak model turbulensi yang dapat dipilih untuk mensimulasikan aliran. Untuk aliran di dalam ruang bakar dengan putaran (*swirling flows*) tinggi, sebaiknya digunakan model turbulensi RSM [Hogg, S. dan Leschziner, M.A., 1989]. Untuk aliran di dalam ruang bakar dengan putaran rendah, model turbulensi RSM menjadi tidak ekonomis sehingga tidak disarankan. Hasil penelitian pada [Widmann, J.F., Charagundla, S.R., dan Presser, C., 1999] menunjukkan bahwa pada putaran yang rendah model turbulensi RNG  $k-\epsilon$  sudah sesuai dengan hasil eksperimen.

Ruang bakar mesin turbojet TJE500FH v.1, tidak menggunakan sudu pemutar aliran sehingga tidak terdapat aliran putar di dalam ruang bakar. Akan terdapat daerah-daerah aliran geser di dalam ruang bakar karena adanya lubang-lubang *liner*, juga akan terjadi resirkulasi dalam skala kecil, namun secara umum tidak terjadi aliran putar. Pada kondisi ini [Guo, B., Langrish, T.A.G, and Fletcher, D.F., 2001] menunjukkan bahwa model turbulensi  $k-\varepsilon$  standar dapat digunakan dengan hasil yang cukup baik. Hasil penelitian Guo dkk. juga bersesuaian dengan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh [Chen, J., Haynes, B.S. dan Fletcher, D.F., 1999]. Dengan mempertimbangkan hasil-hasil penelitian aliran di dalam ruang bakar menggunakan metode CFD pada [Chen, J., Haynes, B.S. and Fletcher, D.F., 1999; Guo, B., Langrish, T.A.G, and Fletcher, D.F., 2001; Hogg, S. dan Leschziner, M.A., 1989; Widmann, J.F., Charagundla, S.R., dan Presser, C., 1999], dan kondisi aliran di dalam ruang bakar mesin turbojet TJE500FH V.1, dalam komputasi ini digunakan pemodelan turbulensi  $k-\varepsilon$  standar. Persamaan yang digunakan dalam pemodelan turbulensi  $k-\varepsilon$  standar adalah sebagai berikut.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (3-5)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R$$

$$k(t) = K + k$$

$$K = \frac{1}{2} (U^2 + V^2 + W^2) \quad (3-6)$$

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

Keterangan:

$G_k$  = faktor pembentukan energi kinetik turbulen akibat gradien kecepatan rata-rata

$G_b$  = faktor pembentukan energi kinetik turbulen akibat *buoyancy*

$Y_M$  = faktor kontribusi dilatasi fluktuatif dalam aliran turbulen kompresibel pada disipasi keseluruhan

$\alpha_k, \alpha_\varepsilon$  = bilangan Prandtl efektif untuk  $k$  dan  $\varepsilon$

$C_{1\varepsilon} = 1,42$

$C_{2\varepsilon} = 1,68$

$C_{3\varepsilon} = 0,2$

$R$  = faktor kontribusi tambahan akibat pengaruh laju regangan (*strain rate*)

Dari harga  $k$  dan  $\varepsilon$  tersebut, dihitung suatu besaran  $\mu_t$ , koefisien viskositas turbulen, yang menyatakan difusi turbulen.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3-7)$$

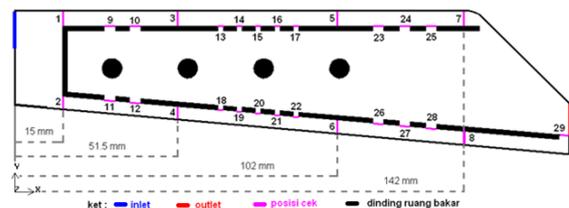
dengan

$$C_\mu = 0,0845$$

Sistem persamaan di atas diselesaikan secara implicit dengan asumsi kondisi aliran tunak dan inkompresibel. Penjelasan lebih rinci tentang asumsi inkompresibel yang digunakan dalam komputasi ini disajikan pada sub-bab 3.3.

### 3.2 Model Liner

Liner dimodelkan secara 3 dimensi. Untuk mendapatkan data hasil simulasi berupa laju aliran massa udara yang memasuki liner pada zona primer, sekunder dan dilusi, didefinisikan posisi cek pada beberapa lubang liner. Definisi posisi cek ditunjukkan pada Gambar 3-1 berikut.

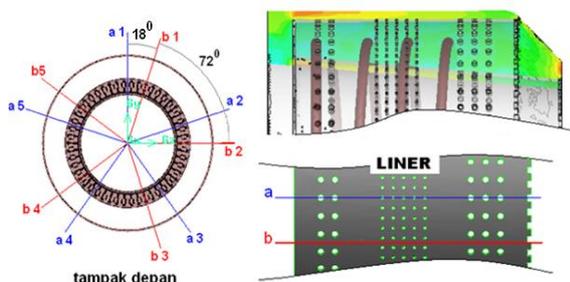


Gambar 3-1: Posisi cek laju aliran massa udara

Oleh karena digunakan model 3 dimensi, pengambilan data laju aliran massa udara pada setiap posisi cek

dilakukan dengan mengintegrasikan kecepatan udara yang melewati permukaan tersebut. Dengan asumsi kondisi aliran mendekati aksisimetrik, posisi cek pada lubang-lubang *liner* hanya diambil satu lubang per baris.

Selain posisi cek untuk menganalisis laju aliran massa udara yang memasuki *liner*, juga didefinisikan 10 permukaan arah longitudinal untuk visualisasi aliran. Permukaan-permukaan arah longitudinal ini diambil pada bidang yang memotong lubang *liner* (permukaan a) dan bidang yang tidak memotong lubang *liner* tetapi berada diantara lubang-lubang *liner* (permukaan b). Posisi permukaan-permukaan tersebut ditunjukkan pada Gambar 3-2.



Gambar 3-2: Permukaan cek arah longitudinal

### 3.3 Kondisi Aliran

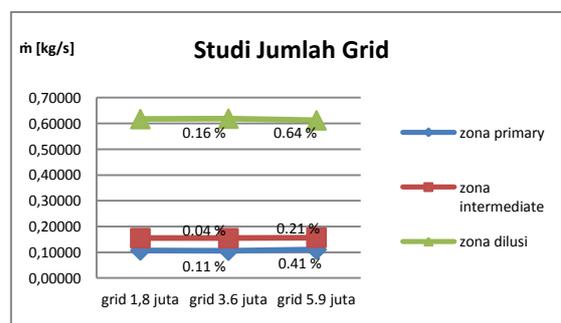
Analisis CFD ini dilakukan pada ruang bakar dalam kondisi tanpa pembakaran. Dengan demikian fluida kerja yang digunakan adalah udara (bukan campuran udara dengan bahan bakar). Pada mesin turbojet, ketika melewati kompresor udara di tekan sehingga memiliki tekanan yang lebih tinggi dari tekanan atmosfer. Dengan rasio tekanan kompresor rancangan sebesar 4.06, kerapatan udara ketika memasuki ruang bakar adalah 3,0252 kg/m<sup>3</sup>. Pada kondisi tanpa pembakaran, tekanan dan temperatur udara di dalam ruang bakar relatif konstan sehingga kerapatan udara juga relatif konstan dan dapat dianggap inkompresibel. Dengan demikian, dalam simulasi ini aliran udara dianggap inkompresibel dengan kerapatan udara 3,0252 kg/m<sup>3</sup>. Pada sisi masukan ruang bakar, kondisi

aliran yang ditetapkan adalah tekanan statik dan tekanan total yang masing-masing sebesar 406530,1 Pa dan 411998,8 Pa. Tekanan statik dan total pada kondisi masukan ruang bakar juga disesuaikan dengan hasil perancangan. Kondisi aliran yang juga didefinisikan adalah pada sisi keluaran. Oleh karena kerugian tekanan selama udara melewati *liner* tidak diketahui, kondisi aliran yang didefinisikan pada sisi keluaran adalah tekanan statik dan target laju aliran massa dengan nilai masing-masing 387278,9 Pa dan 0,88 kg/s. Pada dinding-dinding *liner*, berlaku kondisi tak slip dan tidak ada aliran yang menembus dinding.

## 4 HASIL DAN ANALISIS

### 4.1 Studi Jumlah Grid

Aliran di dalam ruang bakar sangat kompleks sehingga dalam simulasi ini digunakan grid tak terstruktur. Untuk mengetahui apakah jumlah grid yang digunakan telah mencukupi, terlebih dahulu dilakukan studi jumlah grid dengan cara memvariasikan jumlah grid kemudian membandingkan hasilnya. Dalam simulasi ini, studi jumlah grid dilakukan pada tiga jumlah grid yang berbeda yaitu: 1,8 juta, 3,6 juta dan 5,9 juta. Hasil studi jumlah grid ditunjukkan pada Gambar 4-1.



Gambar 4-1: Hasil studi jumlah grid

Variabel yang dianalisis untuk menyelidiki pengaruh jumlah grid terhadap hasil simulasi ini adalah laju aliran massa yang memasuki zona primer, sekunder dan dilusi pada

lubang-lubang *liner*. Mengacu pada Gambar 4-1, terlihat bahwa perbedaan hasil antara jumlah grid 1.8 juta, 3.6 juta dan 5.9 juta kurang dari 1%. Dengan demikian, jumlah grid 5.9 juta dianggap sudah cukup sah untuk analisis kondisi aliran di dalam ruang bakar. Selanjutnya analisis pada pasal berikut adalah hasil simulasi dengan jumlah grid 5.9 juta.

### 4.2 Laju Aliran Massa

Laju aliran massa udara yang melewati setiap posisi cek disajikan pada Tabel 4-1. Posisi cek pada Tabel 4.1 mengacu pada Gambar 3-1.

Tabel 4-1: LAJU MASSA UDARA MELEWATI POSISI CEK

No cek	Keterangan	Hasil Komputasi			
		Velocity [m/s]	Mass Flow [kg/s]	%	
-	Inlet	<b>54,07</b>	0,88007	100	
-	Outlet	107,94			
1	An atas	<b>83,60</b>	0,59226	67,3	
2	An bawah	<b>86,77</b>	0,28782	32,7	
3	An atas	71,42	0,52390	59,5	
4	An bawah	66,02	0,24555	27,9	
5	An atas	56,77	0,42328	48,1	
6	An bawah	55,41	0,18913	21,5	
7	An atas	34,61	0,23853	27,1	
8	An bawah	28,27	0,05349	6,1	
9	Zona primary	65,53	0,03146	0,11062	12,6
10		72,94	0,03689		
11		54,55	0,02224		
12		57,22	0,02003		
13	Zona intermediate	70,12	0,01719	0,15706	17,8
14		70,69	0,01874		
15		71,16	0,02016		
16		70,81	0,02163		
17		70,42	0,02291		
18		52,35	0,00868		
19		54,27	0,00987		
20		55,45	0,01115		
21		54,30	0,01241		
22		55,64	0,01431		
23	Zona dilusi	76,41	0,05251	0,32038	36,4
24		75,03	0,06170		
25		74,27	0,07054		
26		62,29	0,03209		
27		62,69	0,04432		
28		62,49	0,05923		
29	Pola persegi bawah	73,43	0,05349	6,1	

Hasil simulasi ini selanjutnya dibandingkan dengan target rancangan ruang bakar. Target rancangan ruang bakar ditunjukkan pada Tabel 4-2.

Tabel 4-2: LAJU MASSA UDARA RANCANGAN

Keterangan	Pustaka [1]	
	Mass Flow [kg/s]	%
Inlet	0,88	100
Outlet		
Zona primer	0,2728	31
Zona sekunder	0,2552	29
Zona dilusi	0,352	40

Dari Tabel 4-1 terlihat bahwa laju aliran massa udara yang melewati annulus atas adalah sebesar 0,59226 kg/s yaitu 67,3 % dari total laju aliran massa udara masuk ruang bakar, sedangkan yang melewati annulus bawah adalah 0,28782 kg/s atau 32,7 % dari total laju aliran massa udara masuk ruang bakar. Selanjutnya, udara yang masuk zona primer melalui lubang liner atas adalah 0,06835 kg/s dan melalui lubang liner bawah 0,04227 kg/s sehingga total udara yang masuk zona primer adalah 0,11062 kg/s atau 12,6 % dari total massa udara masuk ruang bakar. Nilai laju aliran massa ini jauh lebih kecil dari nilai rancangan yaitu sebesar 0,2728 kg/s atau 31 % dari total laju aliran massa udara masuk ruang bakar (Tabel 4-2).

Pada zona sekunder, jumlah total massa udara yang masuk melalui lubang-lubang liner adalah 0,15706 kg/s, atau 17,8 % dari total massa udara yang masuk ke ruang bakar. Nilai ini berasal dari lubang *liner* bawah sebesar 0,10063 kg/s dan dari lubang *liner* atas sebesar 0,05642 kg/s. Nilai ini juga lebih kecil dari target rancangan yang sebesar 0,2552 kg/s atau 29 % dari total massa udara yang masuk ruang bakar.

Berbasis pada rancangannya, udara yang masuk zona dilusi melalui

lubang-lubang *liner* seharusnya 0,352 kg/s atau 40 % dari total laju aliran massa udara masuk ruang bakar. Namun hasil analisis menunjukkan nilai yang lebih besar yaitu 69,6 %. Hal ini karena porsi udara yang masuk ruang bakar pada zona primer dan sekunder lebih kecil dari rancangan.

Dengan membandingkan total massa udara yang memasuki setiap zona pada ruang bakar dari hasil komputasi dengan target perancangan, terlihat bahwa pada zona primer dan sekunder jumlah udara yang masuk lebih rendah dari rancangannya. Selanjutnya pada zona dilusi, jumlah udara yang masuk menjadi lebih besar dari target rancangannya. Kondisi aliran tersebut dapat menyebabkan terjadinya hal-hal berikut.

#### A. Zona primer

Zona primer membutuhkan 31 % total massa udara untuk menciptakan reaksi pembakaran yang baik. Dengan total laju aliran massa udara masuk zona primer sebesar 12,6 %, zona primer akan kekurangan udara untuk reaksi pembakaran. Dengan demikian terjadi kondisi *rich* (kaya bahan bakar) pada zona primer yang kemungkinan akan menyebabkan sebagian besar dari bahan bakar mengalir ke zona sekunder karena belum terbakar sempurna.

#### B. Zona sekunder

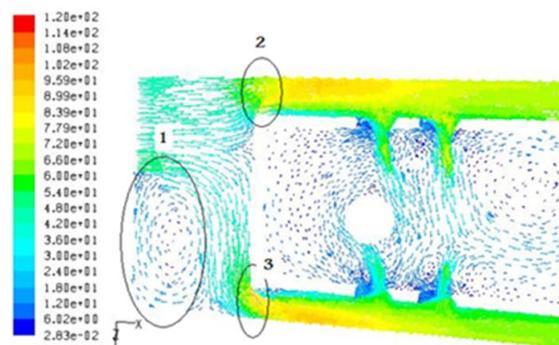
Zona sekunder membutuhkan 29% udara segar yang masuk melalui lubang-lubang sekunder untuk menyempurnakan pembakaran pada zona primer. Namun hasil komputasi menunjukkan laju massa udara yang masuk zona sekunder hanya 17,8%. Ini berarti, seperti kasus zona primer, zona sekunder akan berada pada kondisi *rich* dan ada kemungkinan sisa-sisa bahan bakar yang belum habis terbakar pada zona primer juga akan masih belum habis terbakar setelah melewati zona sekunder. Sisa bahan bakar ini selanjutnya akan memasuki zona dilusi.

#### C. Zona dilusi

Hasil komputasi memperlihatkan laju aliran massa udara masuk zona dilusi sebesar 69,6 %. Nilai ini lebih besar dari rancangannya yaitu 40%. Jika pembakaran pada zona primer dan zona sekunder berlangsung sempurna, maka temperatur masuk turbin akan lebih rendah dari rancangannya karena jumlah udara untuk pendinginan lebih besar. Namun dalam kasus ini, kekurangan udara pada zona primer dan sekunder akan menyebabkan pembakaran pada kedua zona tersebut tidak sempurna dan sejumlah sisa bahan bakar akan memasuki zona dilusi. Akibatnya, alih-alih terjadi pendinginan, pada zona dilusi terjadi penyempurnaan pembakaran. Dengan demikian, diperkirakan pembakaran masih akan berlangsung pada zona dilusi dan temperatur gas yang melewati sudu turbin akan lebih tinggi dari rancangannya.

#### 4.3 Visualisasi Aliran

Hasil komputasi menunjukkan laju aliran massa udara yang masuk setiap zona tidak sesuai dengan rancangannya. Kondisi ini terjadi sejak udara memasuki zona primer. Untuk memperkirakan penyebab kurangnya udara yang masuk zona primer, berikut ditampilkan gambar vektor kecepatan udara pada permukaan a (bidang yang memotong lubang-lubang pada permukaan *liner*) disekitar zona primer.



Vektor Kecepatan dalam m/s

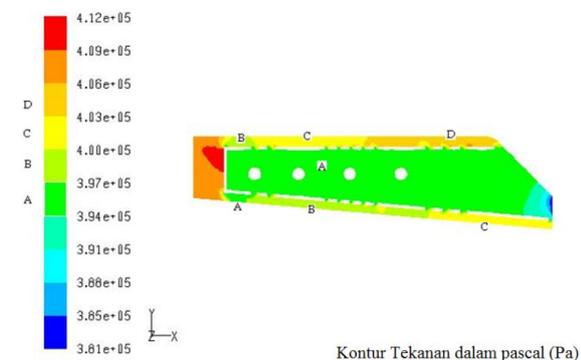
Gambar 4-2: Vektor kecepatan pada zona primer

Dengan memperhatikan gambar tampak bahwa pada bagian depan *liner*

muncul daerah stagnasi. Selanjutnya aliran udara akan terpecah ke arah luar (menuju annulus atas) dan ke arah dalam (menuju annulus bawah). Sebagian udara yang bergerak menuju annulus bawah membentuk sirkulasi (daerah 1) karena ada ruang kosong di depan *liner* yang bukan merupakan tempat masuk udara. Namun demikian, sirkulasi di daerah 1 ini merupakan hal yang wajar terjadi pada tipe *diffuser dump* seperti pada ruang bakar ini.

Kondisi aliran yang menarik untuk dicermati adalah fenomena yang terjadi pada daerah 2 dan 3. Seperti terlihat pada gambar, pada daerah 2 dan 3 kecepatan udara menjadi sangat tinggi. Tampaknya hal ini terjadi karena bentuk ujung *liner* di daerah 2 dan 3 yang tajam. Bentuk yang tajam ini menyebabkan udara harus belok dari arah radial ke arah aksial pada jari-jari putaran yang sangat kecil sehingga kecepatan udara pada daerah belokan itu menjadi tinggi. Selain adanya kecepatan tinggi, tampaknya di daerah 2 dan 3 juga terjadi separasi aliran. Kondisi ini akan menciptakan tekanan rendah di sepanjang annulus atas dan annulus bawah di sekitar lubang-lubang primer.

Fenomena aliran di sekitar zona primer juga dapat diteliti dengan mengamati kontur tekanan. Untuk itu, kontur tekanan udara ditunjukkan pada Gambar 4-3.



Gambar 4-3: Kontur tekanan di sekitar zona primer

Mengacu pada Gambar 4-2 dan Gambar 4-3, tampak bahwa kecepatan

tinggi pada daerah 2 dan 3 menyebabkan tekanan rendah pada B dan A. Hal ini sesuai dengan prinsip Bernoulli. Dari gambar juga terlihat bahwa selama udara melewati annulus, baik atas maupun bawah, tekanan udara berangsur-angsur naik.

Dengan mengamati distribusi kecepatan di sekitar zona primer pada Gambar 4-2 dan kontur tekanan pada Gambar 4-3, dapat diperkirakan penyebab rendahnya laju aliran massa udara masuk zona primer dan sekunder. Hal itu dapat dijelaskan sebagai berikut.

Setelah udara keluar dari kompresor, udara memasuki *dump diffuser* ruang bakar. Di ujung *diffuser* terdapat dinding depan *liner* sehingga udara kemudian terbagi menjadi dua, yaitu sebagian bergerak ke arah luar dan sebagian bergerak ke arah dalam. Bentuk dinding depan *liner* yang tegak menyebabkan lintasan gerak udara ini membentuk sudut tegak lurus terhadap arah aksial. Setelah mencapai ujung *liner* bagian luar dan bagian dalam, udara dipaksa untuk membelok ke arah aksial. Pembelokan ini terjadi pada jari-jari putaran yang sangat kecil karena bentuk ujung *liner* pada daerah 2 dan 3 yang tajam. Jari-jari belok yang sangat kecil menyebabkan terjadinya separasi karena udara tidak dapat mengikuti kontur permukaan. Separasi menyebabkan munculnya ulakan yang menyumbat sebagian saluran masuk annulus sehingga luas efektif annulus di daerah tersebut turun. Berkurangnya luas efektif kemudian memaksa udara memasuki annulus dengan kecepatan yang lebih tinggi. Sesuai dengan persamaan Bernoulli, kecepatan tinggi di daerah masukan annulus menyebabkan turunnya tekanan statik udara di daerah tersebut. Akibatnya tekanan di daerah annulus tidak cukup tinggi untuk mendorong lebih banyak udara untuk memasuki *liner*. Kondisi aliran inilah yang tampaknya menyebabkan jumlah udara yang memasuki zona primer tidak

sebesar rancangannya. Seperti terlihat pada Gambar 4-2 dan Gambar 4-3, lubang-lubang primer pada *liner* terletak di daerah separasi dengan tekanan rendah dan kecepatan tinggi. Hal ini menyebabkan udara di dalam annulus tidak mempunyai cukup tekanan untuk memasuki *liner* ruang bakar melalui lubang-lubang primer.

Setelah melewati lubang-lubang primer, udara kemudian bergerak ke belakang menuju lubang-lubang sekunder. Di daerah ini, kecepatan udara turun karena pengaruh dari adanya dinding casing pada bagian belakang *liner*. Turunnya kecepatan ini pada saat yang sama menyebabkan naiknya tekanan statik sehingga meningkatkan kemampuan dorongan udara untuk masuk zona sekunder *liner*. Tampaknya hal inilah yang menyebabkan lebih banyak udara memasuki zona sekunder dibandingkan dengan yang masuk zona primer. Namun demikian, udara yang memasuki *liner* melalui lubang sekunder masih tidak sebanyak rancangannya. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh dua hal, yaitu: 1. tekanan di daerah tersebut tidak cukup tinggi, dan 2. diameter lubang-lubang sekunder terlalu kecil. Sampai dengan makalah ini ditulis, belum dapat diketahui yang mana dari kedua kemungkinan itu yang menjadi penyebabnya. Diperlukan penelitian lanjutan untuk menyelidikinya.

Bagian akhir dari perjalanan udara melalui annulus adalah melewati lubang-lubang dilusi. Di daerah ini, adanya dinding casing di bagian belakang memaksa udara untuk bergerak lebih lambat sehingga tekanannya menjadi lebih tinggi. Hal ini menyebabkan sebagian besar udara akhirnya memasuki *liner* ruang bakar melalui lubang-lubang dilusi.

## 5 KESIMPULAN

Analisis komputasi dinamika fluida ruang bakar mesin turbojet TJE500FH v.1 dilakukan untuk menyelidiki

penyebab adanya semburan api di luar nosel ketika mesin di uji coba. Analisis dilakukan menggunakan model ruang bakar 3 dimensi dengan geometri dan ukuran yang sama dengan model ruang bakar yang terpasang pada mesin. Analisis dilakukan pada kondisi tanpa pembakaran.

Hasil analisis menunjukkan bahwa bentuk ujung-ujung *liner* yang tajam menyebabkan jari-jari belok udara dari arah radial ke arah aksial yang sangat kecil. Jari-jari belok yang sangat kecil menyebabkan terjadinya separasi karena udara tidak dapat mengikuti kontur permukaan. Separasi menyebabkan munculnya ulakan yang menyumbat sebagian saluran masuk annulus sehingga luas efektif annulus di daerah tersebut turun. Berkurangnya luas efektif memaksa udara memasuki annulus dengan kecepatan yang lebih tinggi. Sesuai dengan persamaan Bernoulli, kecepatan tinggi di daerah masukan annulus menyebabkan turunnya tekanan statik udara di daerah tersebut. Akibatnya tekanan di daerah annulus tidak cukup tinggi untuk mendorong lebih banyak udara untuk memasuki *liner*. Hal ini menyebabkan jumlah massa udara yang memasuki *liner* melalui lubang-lubang primer dan sekunder lebih kecil dari rancangannya. Selanjutnya sebagian besar udara memasuki *liner* melalui lubang-lubang dilusi.

Adanya semburan api di luar nosel ketika uji coba, tampaknya merupakan akibat lanjut dari kurangnya massa udara yang masuk zona primer dan zona sekunder ruang bakar. Kemungkinan campuran bahan bakar-udara pada zona primer dan sekunder berada pada kondisi *rich* sehingga pembakaran masih terus berlangsung atau bahkan justru terjadi pada zona dilusi.

## DAFTAR RUJUKAN

Chen, J., Haynes, B.S. dan Fletcher, D.F., 1999. *A Numerical and*

- Experimental Study of Tangentially Injected Swirling Pipe Flow*, 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on CFD, 485-490.
- Fluent Manual, Fluent Inc.
- Guo, B., Langrish, T.A.G, and Fletcher, D.F., 2001. *Simulation of Turbulent Swirl Flow in an Axisymmetric Sudden Expansion*, *AIAA Journal*, Vol. 39, No. 1, 96-102.
- Hartono, F., 2010. *The Design of Small Turbojet Engine for High Speed UAV*, Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology, Bali, Indonesia.
- Hartono, F., 2011. *The Development of TJE500FH Small Turbojet Engine*, International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion, Zhengzhou, China.
- Hogg, S. dan Leschziner, M.A., 1989. *Computation of Highly Swirling Confined Flow with a Reynolds Stress Turbulence Model*, *AIAA Journal*, Vol. 27, No. 1, 57-63.
- Lefebvre, A.H., 1983. *Gas Turbine Combustion*, Hemisphere Publishing Corp., New York.
- Rahardianto S dan Hartono, F., 2011. *Cold Flow 2D Axis-Symmetric Numerical Analysis and Modification of Combustion Chamber of Small Turbojet Engine*, International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion, Zhengzhou, China.
- Widmann, J.F., Charagundla, S.R., dan Presser, C., 1999. *Benchmark Experimental Database for Multiphase Combustion Model Input and Validation: Characterization of the Inlet Combustion Air*, NISTIR, 6370.

