

# Analisis Kinerja Teoritik Dan Uji Statik Motor Rx-250/2000 Propelan HTPB Konfigurasi Bintang-7

Kasman Pinem

Bidang Propulsi, Pusat Teknologi Wahana Dirgantara, LAPAN

## ABSTRACT

Static test of motor RX-250/2000 had been conducted on October 16, 1995. Its performance parameters, including chamber pressure and thrust-time curve were recorded. The result showed that the performance, indicated by the area under thrust-time curve, calculated from static test (i.e. 21600 kg-sec) is a bit lower than the theoretical value (i.e. 22065 kg-sec). The same phenomenon is indicated by its chamber pressure 60 kg/cm<sup>2</sup>, while its theoretical value is 57 kg/cm<sup>2</sup>. In the other hand the static test thrust 3600 kg is some what lower than its theoretical value 3765 kg. The overall result concludes that the performance parameters measured through static test deviate from the theoretical value by less than 6 %.

## ABSTRAK

Uji statik motor roket RX-250/2000 dilaksanakan pada 16 Oktober 1995. Kinerja motor tersebut ditunjukkan dengan parameter-parameter tekanan ruang bakar dan gaya dorong vs waktu dari hasil uji statik. Kemampuan ditunjukkan oleh kurva gaya dorong vs waktu dihitung dari uji statik (21600 kg-sec) lebih rendah dari hasil teoritis (22065 kg-sec). Dengan cara yang sama ditunjukkan bahwa secara teoritik tekanan ruang bakar 57 kg/cm<sup>2</sup> dan gaya dorong 3765 kg sedangkan hasil uji statik tekanan ruang bakar 60 kg/cm<sup>2</sup> dan gaya dorong 3600 kg. Hasil keseluruhan dapat disimpulkan bahwa kinerja motor dari uji statik menunjukkan penyimpangan dari harga teoritik kurang dari 6 %.

## 1. PENDAHULUAN

LAPAN merupakan suatu lembaga penelitian yang salah satu kegiatannya adalah penelitian sistem propulsi motor roket padat dengan berbagai konfigurasi propelan. Bahan propelan yang diteliti juga berbeda beda, antara lain polysulfid, polyurethan, dan HTPB (Hydroxyl Terminated Polybutadiene) dengan ukuran antara lain RX-150, Rx-180, dan RX-250. Pada makalah ini, penelitian dilakukan pada motor roket RX-250/2000 dengan bahan propelan HTPB konfigurasi bintang-7 (Gambar 2-1), secara umum konfigurasi ini memberikan bentuk kurva relatif mendatar, hal ini memudahkan pada saat pengendalian.

Dengan pembuatan simulasi, akan diperoleh kurva gaya dorong (F) vs waktu pembakaran (burning time) dan tekanan ruang bakar ( $p_c$ ) vs waktu

pembakaran (t), sehingga diperoleh gaya dorong, tekanan ruang bakar rata-rata, dan kinerja motor secara teoritik.

Tekanan ruang bakar dapat disesuaikan dengan kekuatan bahan tabung yang tersedia, sensor gaya dorong dan pressure transducer digunakan pada saat dilaksanakan pengujian statik. Bila sensor-sensor digunakan melebihi ke-mampuannya, akan merusak sensor tersebut, sehingga data tidak dapat di-catat dan bila tekanan ruang bakar terlalu tinggi akan menyebabkan tabung pecah. Setelah uji statik diperoleh gaya dorong, tekanan ruang bakar, waktu pembakaran dan kinerja motor sebenarnya, sehingga dapat dibandingkan dengan nilai teoritiknya.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja motor dan seberapa

jauh penyimpangan yang terjadi pada motor RX-250/2000 dengan konfigurasi propelan bintang-7 dan bahan propelan HTPB.

**2. TEORI DASAR**

Teori yang berkaitan dengan pembuatan simulasi ataupun uji statik antara lain luas bidang bakar, karakteristik propelan, tekanan ruang bakar, temperatur pembakaran dll.

Beberapa asumsi digunakan untuk penyederhanaan matematisnya, asumsi tersebut sebagai berikut: (Barrere, et.al.1960)

- a. Analisa gas pada nosel dianggap hanya satu arah, tidak dalam keadaan transient, tidak terjadi perpindahan panas gas dengan dinding nosel, dan tidak terjadi kerugian gesekan antara garis arus dalam boundary layer.
- b. Gas dianggap homogen dan tidak mengalami perubahan komposisi.
- c. Gas mengalir dianggap memenuhi persamaan gas ideal ( $p=\rho RT$ )
- d. Panas jenis gas dianggap tidak berubah terhadap temperatur dan tekanan gas.

**2.1 Luas Bidang Bakar**

Luas bidang bakar ( $A_b$ ) = perimeter port ( $P_b$ ) x panjang propelan ( $L_p$ ). Luas port adalah luas lubang propelan atau luas bintang -7 dan perimeter port adalah keliling bintang-7, luas port ( $A_p$ ) dan perimeter port ( $P_b$ ) pada setiap zone dirinci sebagai berikut (Riccardi, 1992):

$$ON = R - \frac{W_c}{\sin \xi} - r_1$$

$$TC = ON \frac{\sin \xi}{\cos \eta} - r_1$$

$$OT = Y_1 = ON (\cos \xi + \sin \xi \tan \eta)$$

$$XC = TC \cos \eta$$

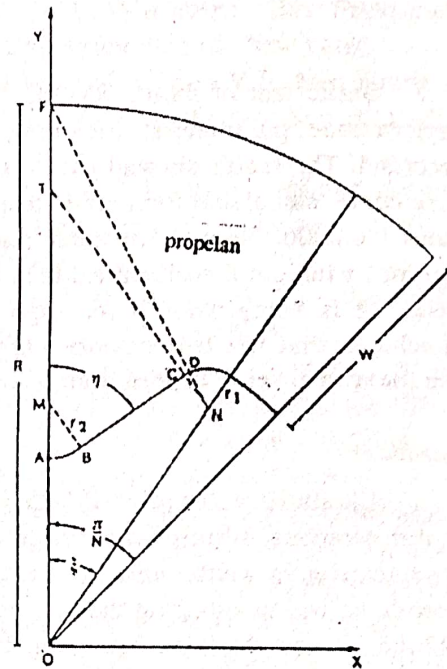
$$YC = Y_1 - TC \sin \eta$$

$$FN = \sqrt{(ON \sin \xi)^2 + (R - ON \cos \xi)^2}$$

$$FD = FN - r_1$$

$$\varepsilon = \frac{\xi}{\pi/n}$$

Dengan persyaratan :  $R > 0$ ;  $0,5 \leq \varepsilon \leq 1$ ;  $3 \leq N \leq 20$ ;  $0 < \eta < \pi/2$ ;  $0 < W < R$ ;  $0 < r_1 < (R - W)$ ;  $0 \leq r_2 \leq TC$



Gambar 2-1: Sebagian penampang propelan

Proses pembakaran akan mengalami beberapa tahapan yang terdiri dari zone-zone.

Zone-zone ini ditunjukkan pada Gambar 2-2 yang terdiri dari 4 zone, beberapa tahapan proses yang terdiri dari zone 1 hingga zone 4, masing-masing zone sbb:

- $0 \leq W_c < r_2$  (zone 1)
- $r_1 \leq W_c < TC$  (zone 2)
- $TC \leq W_c < W$  (zone 3)
- $W < W_c \leq FD$  (zone 4)

**Zone 1:**

$$P_s = (R - W + W_c) \left( \frac{\pi}{n} - \xi \right) + (r_1 + W_c) \left( \frac{\pi}{2} - \eta + \xi \right) + \left( \frac{r_2 - r_1}{\sin \eta} \right) (r_2 - W_c) \left( \frac{\pi}{2} - \eta \right) \dots \dots \dots (2-1)$$

$$A_p = \frac{(R - W + W_c)^2}{2} \left( \frac{\pi}{n} - \xi \right) + \frac{(r_1 + W_c)^2}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \eta + \xi \right) + \frac{(ON \cdot Y_1)}{2} \sin \xi - \frac{(r_2 - W_c)^2}{2 \sin \eta} + \frac{(r_2 - W_c)^2}{2 \sin \eta} - \frac{(r_2 - W_c)^2}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \eta \right) \dots (2-2)$$



**Zone 2:**

$$p_s = (R - W + W_c) \left( \frac{\pi}{N} - \xi \right) + (r_1 + W_c) \left( \frac{\pi}{2} - \eta + \xi \right) + \left( \frac{T_c - W_c}{1g \eta} \right) \dots \dots \dots (2-3)$$

$$A_r = \frac{(R - W + W_c)^2}{2} \left( \frac{\pi}{N} - \xi \right) + \frac{(r_1 + W_c)^2}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \eta + \xi \right) + \frac{ON \cdot Y_t \cdot \sin \xi}{2} - \frac{(T_c - W_c)^2}{2 \cdot 1g \eta} \dots \dots \dots (2-4)$$

**Zone 3:**

$$p_s = (R - W + W_c) \left( \frac{\pi}{N} - \xi \right) + (r_1 + W_c) \left( \frac{\pi}{2} - \eta + \xi - \gamma \right) \dots \dots \dots (2-5)$$

dengan ,

$$\gamma = \arccos \left( \frac{T_c + r_1}{r_1 + W_c} \cos \eta \right) - \eta,$$

$$0 < (\gamma + \eta) < \pi$$

$$A_r = \frac{(R - W + W_c)^2}{2} \left( \frac{\pi}{N} - \xi \right) + \frac{(r_1 + W_c)^2}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \eta + \xi - \gamma \right) + \frac{ON}{2} (r_1 + W_c) \sin \left( \frac{\pi}{2} + \eta - \xi + \gamma \right) \dots \dots \dots (2-6)$$

**Zone 4:**

$$p_s = (r_1 + W_c) \left( \frac{\pi}{2} - \eta + \xi - \gamma - \theta \right) \dots \dots \dots (2-7)$$

$$A_s = \frac{R^2}{2} \left( \frac{\pi}{N} - \xi + \beta \right) - \frac{R}{2} ON \cdot \sin \beta + \frac{(r_1 + W_c)^2}{2} \left( \frac{\pi}{2} - \eta + \xi - \gamma - \theta \right) + \frac{(r_1 + W_c)}{2} ON \cdot \sin \left( \frac{\pi}{2} + \eta - \xi + \gamma \right) \dots \dots \dots (2-8)$$

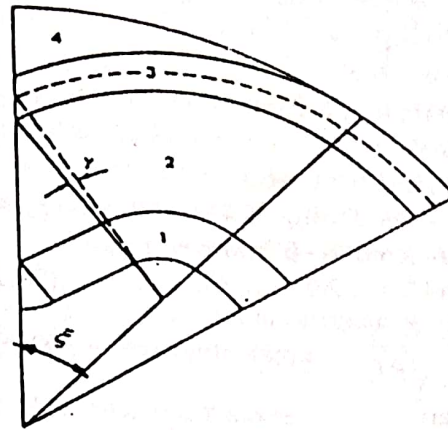
dengan,  $A = [R^2 + X_n^2 + Y_n^2 - (r_1 + W_c)^2] (2X_n)^{-1}$

$$\beta = \xi - \arccos \frac{Y_n}{R}$$

$$0 < (\xi - \beta) < \pi$$

$$\theta = \arcsin \left( \frac{R}{r_1 + W_c} \sin \beta \right)$$

$$Y_n = \left\{ A \left( \frac{Y_n}{X_n} \right) + \sqrt{A^2 \left( \frac{Y_n}{X_n} \right)^2 - \left[ 1 + \left( \frac{Y_n}{X_n} \right)^2 \right] (A^2 - R^2)} \right\} \left[ 1 + \left( \frac{Y_n}{X_n} \right)^2 \right]^{-1}$$



Gambar 2-2 : Pembagian zone

**2.2 Tekanan Ruang Bakar**

Hubungan tekanan ruang bakar ( $p_c$ ) dan luas kerongkongan nosel ( $A_t$ ) sebagai berikut (Barrere, et.al .1960):

$$p_c = \frac{\rho_p \cdot A_b \cdot r_r \sqrt{RT_c}}{\Gamma \cdot A_t \cdot g} \dots \dots \dots (2-9)$$

$$\Gamma = \sqrt{\gamma \cdot \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}}$$

dengan ,

- R =  $R_o$  / BM
- $\Gamma$  : konstanta
- $\rho_p$  : kerapatan propelan
- $r_r$  : kecepatan pembakaran
- $A_t$  : luas kerongkongan nosel
- g : gravitasi
- $R_o$  : konstanta gas universal  
8316,6 x 10 erg/mole K
- BM : berat molekul gas pembakaran
- $T_c$  : temperatur ruang bakar

Umumnya tekanan ruang bakar ( $p_c$ ) berada pada 30 - 100Kg/Cm<sup>2</sup> (Barrere, et.al.1960).

**2.3 Gaya Dorong**

$$\text{Besarnya gaya dorong } (F_t) = p_c \cdot A_t \cdot C_{F_r} \dots \dots (2-10)$$

(Barrere, et.al.1960)

dengan,

- $C_{F_r}^o$  : koefisien gaya dorong
- $A_t$  : luas kerongkongan
- $p_{ct}$  : tekanan ruang bakar

Dalam keadaan optimum  $p_e = p_a$ , maka  $C_F^0$

$$C_F^0 = \Gamma \sqrt{\frac{\gamma - 1}{\gamma} \left[ 1 - \left( \frac{p_e}{p_c} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]} \quad (2-11)$$

(Barrere, et al. 1960)

$\gamma = c_p/c_v$

= specific heat ratio

atau gaya dorong ( $F_t$ ) =  $m \cdot V_e + (p_e - p_a) A_t$ ,

dalam keadaan optimum  $p_e = p_a$

$$F = m \cdot V_e \quad (2-12)$$

$$m = \Gamma \frac{P_c A_t}{\sqrt{RT_c}} \quad (2-13)$$

dengan

$m$  : mass rate keluar nosel

$V_e$  : kecepatan pancar gas menengalkan nosel.

$$V_e = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} RT_c \left[ 1 - \left( \frac{p_e}{p_c} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]} \quad (2-14)$$

### 2.4 Koefisien Gaya Dorong

Parameter ini menentukan nilai keandalan nosel dan juga menyangkut aliran gas yang mengalami proses ekspansi melalui nosel. Bertambah tinggi harga  $C_F$  untuk harga pressure ratio ( $p_c/p_e$ ) dan area ratio ( $A_e/A_t$ ) tertentu menunjukkan keandalan nosel yang lebih baik. Harga  $C_F$  aktual dapat diperoleh dari hasil pengujian statis. Harga ini biasanya berbeda dengan hasil perhitungan teoritis. Perbedaan ini disebabkan karena pada perhitungan teoritis aliran gas yang melalui nosel dianggap proses isentropik, sedangkan proses ekspansi yang sebenarnya tidak isentropik.

### 2.5 Impuls Spesifik ( $I_{sp}$ )

Impuls spesifik ( $I_{sp}$ ) merupakan parameter yang mencakup reaksi pembakaran dan ekspansi gas dalam nosel. Oleh karena  $I_{sp}$  merupakan parameter untuk membandingkan kemampuan motor roket, maka makin tinggi nilai  $I_{sp}$  makin baik.

$$I_{sp} = F/W \quad (2-15)$$

= besarnya gaya dorong yang dihasilkan oleh motor roket persatuan berat propelan ( $w_p$ ). persatuan waktu (Barrere, et al. 1960)

### 2.6 Total Impuls ( $I_{tot}$ )

Impuls total merupakan luas kurva hasil uji statik menggambarkan kinerja motor roket itu sendiri yang dirumuskan sebagai berikut:

$$I_{tot} = F \cdot d \cdot t \quad (2-16)$$

$$= w_p \cdot I_{sp}$$

$w_p$  : berat propelan (Barrere, et al. 1960)

### 3. PEMBUATAN SIMULASI

Dengan menggunakan rumus-rumus di atas dibuatkan program komputer. Selanjutnya dimasukkan data-data propelan dan ukuran dari "grain" propelan sebagai berikut:

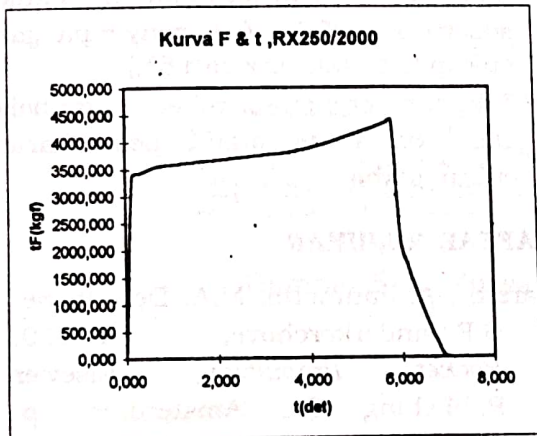
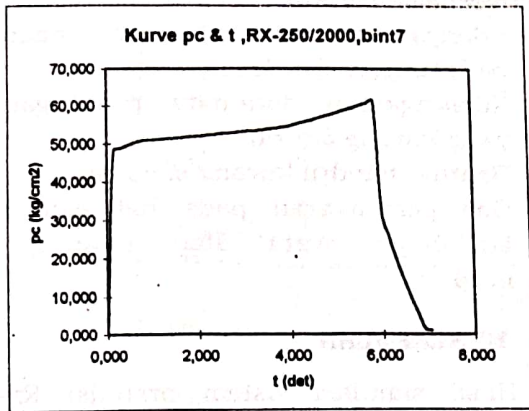
|                                  |                           |
|----------------------------------|---------------------------|
| Web thickness ( $W$ )            | : 5,2 cm                  |
| jari-jari luar propelan ( $R$ )  | : 11,7 cm                 |
| panjang propelan ( $L$ )         | : 200 cm                  |
| temp. ruang bakar ( $T_c$ )      | : 2900 °K                 |
| luas kerongkongan ( $A_t$ )      | : 50,24 cm <sup>2</sup>   |
| kecepatan pembakaran ( $r_f$ )   | : 0,87 cm/det             |
| tekanan atmosfer ( $p_a$ )       | : ,033 kg/cm <sup>2</sup> |
| Jari-jari fillet ( $r_1$ )       | : 0,5 cm                  |
| jari-jari cusp ( $r_2$ )         | : 0,48 cm                 |
| star point semi angle ( $\eta$ ) | : 39°                     |
| gravitasi ( $g$ )                | : 9,81 m/det <sup>2</sup> |

Harga rata-rata teoritis yang diperoleh sebagai berikut:

|                                  |                         |
|----------------------------------|-------------------------|
| Gaya dorong ( $F_t$ )            | : 3765 kg               |
| Tekanan ruang bakar ( $p_{ct}$ ) | : 57 kg/cm <sup>2</sup> |
| Waktu pembakaran ( $t_{bt}$ )    | : 5,85 det              |
| Total impuls teoritis            | : 22065 kg-det          |

Kurva gaya dorong ( $F_t$ ) vs waktu pembakaran ( $t_{bt}$ ) dan kurva tekanan ruang bakar ( $p_{ct}$ ) vs waktu ( $t_{bt}$ ) ditunjukkan pada Gambar 3-1. Dari kurva ini diperoleh kinerja motor secara teoritis.





Gambar 3-1: Kurva gaya dorong dan tekanan ruang bakar vs waktu pembakaran (teoritis)

#### 4. PERSIAPAN PENGUJIAN

Sebelum pelaksanaan pengujian, beberapa langkah yang perlu diperhatikan adalah sebagai berikut :

- Pelaksanaan perakitan motor, dilaksanakan setelah melalui proses kualitas kontrol yang baik untuk masing-masing komponen.
- Penyiapan rangka uji
- Pemasangan motor pada rangka uji.
- Pemasangan sensor tekanan ruang bakar dan sensor gaya dorong.
- Penyediaan air pendingin sensor tekanan
- Penyiapan peralatan perekam data
- Penyiapan sistem dokumentasi.

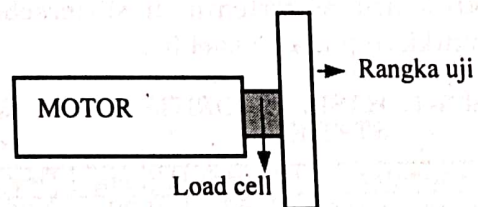
#### 4.1 Penempatan Motor Roket Pada Rangka Uji

Penempatan motor pada rangka uji, diletakkan sedemikian rupa sehingga benar-benar horizontal. Gaya gesek antara motor dengan rol penyangga motor diusahakan sekecil mungkin (rol-rol penyangga diusahakan tidak terlalu kuat menekan motor) dan sebelum pelaksanaan uji statik sebaiknya rangka uji dirawat dengan baik; sehingga penempatan motor pada rangka uji tidak membutuhkan waktu lama.

#### 4.2 Penempatan Sensor

##### 4.2.1 Sensor gaya dorong

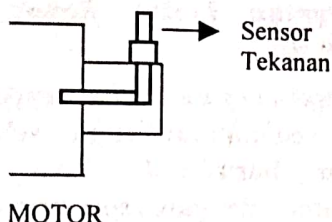
Sensor gaya dorong (load cell) dipasang pada rangka uji di depan tutup motor. Selanjutnya motor diletakkan sedemikian rupa sehingga sumbu horizontal motor dengan sumbu sensor gaya dorong sejaris dan benar-benar menyinggung sensor gaya dorong. Adanya celah antara motor dan sensor gaya dorong akan menimbulkan tumbukan pada sensor yang dapat merusak sensor tersebut. Umumnya sensor-sensor ini sebelum pelaksanaan uji statik terlebih dahulu dikalibrasi.



Gambar 4-1: Penempatan sensor gaya dorong.

##### 4.2.2 Sensor tekanan ruang bakar

Sensor tekanan ruang bakar diletakkan pada tutup (cap) motor. Bila terjadi penyumbatan lubang menuju sensor tekanan, sensor tidak dapat berfungsi dengan baik. Penyumbatan ini dapat dicegah dengan meniup lubang tersebut dengan menggunakan kompressor.



Gambar 4-2 : Penempatan sensor tekanan

**5. PENGUJIAN STATIK**

Pengujian statik adalah pengujian motor roket pada kondisi statis (diam), dengan menggunakan sensor tekanan (pressure transducer) dan sensor gaya dorong (load cell). Dari uji statik diperoleh kurva gaya dorong, tekanan ruang bakar vs waktu pembakaran (Gambar 5-1) sebenarnya.

Dari hasil uji statik diperoleh :

- Gaya dorong ( $F_a$ ) = 3600 kg
- Tekanan ruang bakar ( $p_{ca}$ ) = 60 kg/cm<sup>2</sup>
- Waktu pembakaran ( $t_{ba}$ ) = 6 det
- Total impuls ( $I_{total}$ ) = 21600 kg-det

**6. ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

Dari hasil teoritis dan uji statik tampak perbedaan cukup kecil untuk variabel-variabel tertentu, hasil tersebut ditunjukkan pada Tabel 6-1.

Tabel 6-1: HASIL TEORITIS DAN UJI STATIK

| No | Parameter                             | Teoritis | Uji sta. | Dev.(%) |
|----|---------------------------------------|----------|----------|---------|
| 1. | G.dorong (kg)                         | 3765     | 3600     | 0,76    |
| 2. | Tek.ruang bakar (kg/cm <sup>2</sup> ) | 57       | 60       | 5       |
| 3. | Waktu pembakaran (det)                | 5,85     | 6        | 2,5     |
| 4. | Impuls total (kg-det)                 | 22065    | 21600    | 2,1     |

Perbedaan ini disebabkan antara lain sebagai berikut:

- Adanya asumsi diberikan pada perhitungan simulasi.
- Kemungkinan data-data rancangan yang kurang akurat
- Bentuk mandril kurang simetris
- Gas pembakaran pada hakekatnya adalah gas nyata atau bukan gas ideal

**7. KESIMPULAN**

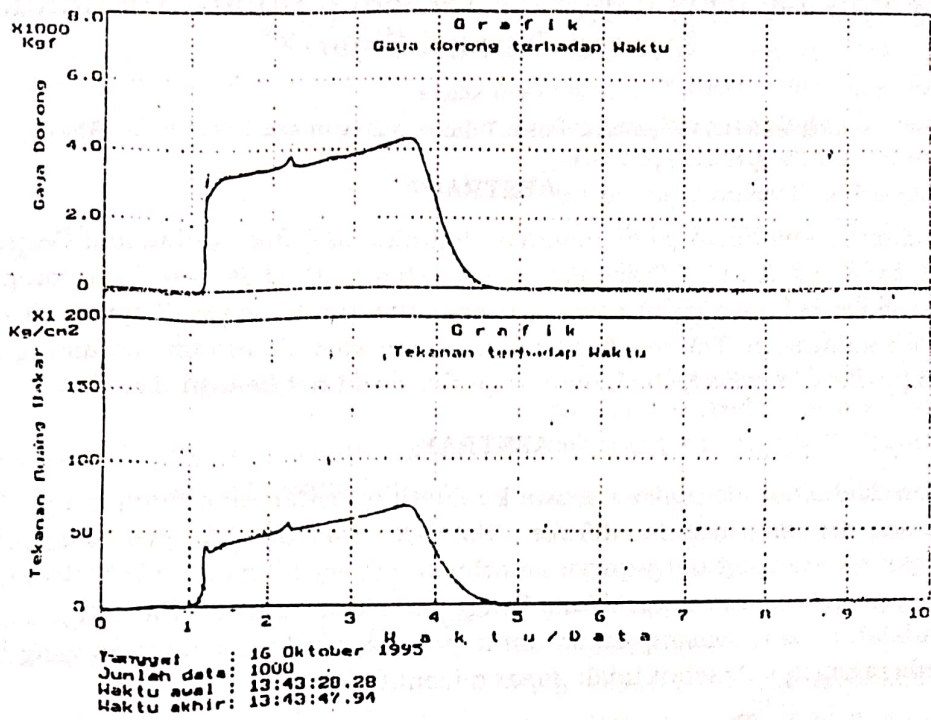
- a. Hasil simulasi sistem propulsi Rx-250/ 2000, mendekati hasil uji statik, seperti pada Tabel 6-1, penyimpangan cukup kecil (kurang dari 6%).
- b. Tekanan kerja motor roket sangat baik
- c. Dari kurva uji statik pembakaran cukup stabil

**DAFTAR RUJUKAN**

Barere , A. Jaumotte, M.A. Deveubehe, B.F.Vanderkerchove, G.1960, *Rocket Propulsion*, Elsevier Publishing Co, Amsterdam. p. 56,62 -100, dan 237.

Riccardi, 1992, *Generalized Geometric Analisis of Right Circular Cilindrical Star Perforated and Tapered Grains*, Agenzia Spaziale, Italiana, Rome, Italy. (Journal of Propulsion and Power , Vol.8 No.1 Jan-Feb. 1992, p. 51-8





Gambar 5-1 : Kurva F vs t dan pc vs t uji statik