

# Pengujian dan Analisis Kekuatan Sambungan Propelan Konfigurasi Silinder Pada Roket RX 150-1200 – LPN

Sutrisno<sup>\*)</sup>, Hudoro<sup>\*\*)</sup>

<sup>\*)</sup> Peneliti Bidang Propelan, Puspropen – Detekgan LAPAN

<sup>\*\*)</sup> Peneliti Bidang Uji Statik dan Termodinamika, Puspropen – Detekgan LAPAN

## ABSTRACT

The rocket motor RX 150-1200-LPN which used a propellant joint with hollow configuration was failure on static test. The joint strength and a standard rocket motor with many propellant joints had been tested using JANAF method to investigate the contribution of propellant joint in the rocket motor failure. The static test data of both rockets motor RX 150-1200-LPN and a standard rocket motor were analyzed. It was obtained that the propellant joint strength was higher than the propellant tensile strength, i.e 5.31 kg/cm<sup>2</sup> and the rocket motor RX 150-1200-LPN failure was not caused by the propellant joint.

## ABSTRAK

Motor roket RX 150-1200-LPN yang menggunakan satu sambungan propelan dengan konfigurasi silinder telah meledak pada saat diuji statik. Guna meneliti peranan sambungan propelan pada kegagalan tersebut telah dilakukan uji tarik kekuatan sambungan propelan dengan metoda JANAF dan uji statik motor roket standar yang menggunakan propelan dengan beberapa sambungan. Data uji statik motor roket standar maupun motor roket yang meledak dianalisis. Berdasarkan hasil uji dan analisis yang dilakukan diperoleh bahwa kekuatan sambungan propelan lebih besar dari pada kuat tarik propelan yakni sebesar 5.31 kg/cm<sup>2</sup>. Selain itu terjadinya kegagalan pada motor roket RX 150-1200-LPN bukan diakibatkan oleh adanya sambungan propelan.

## 1. PENDAHULUAN

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) telah banyak melakukan penelitian dan pengembangan roket khususnya yang berbahan bakar padat (*solid propellant rocket*). Pengujian terhadap roket yang dibuat ini telah berulang kali dilakukan baik berupa uji statik maupun uji terbang. Hasil pengujian sebagian besar menunjukkan keberhasilan, namun demikian ada juga beberapa roket yang mengalami kegagalan. Bentuk kegagalan yang dapat dilihat dengan jelas adalah roket tidak menyala dan roket meledak. Terjadinya kegagalan jenis pertama biasanya disebabkan oleh sistem penyala (*igniter*) yang kurang sempurna. Pada kegagalan

jenis kedua (roket meledak) sering kali menimbulkan beberapa dugaan yang masih diperdebatkan.

Penyebab terjadinya ledakan dapat diarahkan pada dua aspek yaitu sistem motor roket dan sistem propelan. Berdasarkan aspek motor roket dapat ditinjau dari perancangan maupun cara pemasangan cap dan nosel. Adapun dugaan penyebab terjadinya roket meledak ini paling sering diarahkan pada aspek yang kedua (sistem propelan) dengan meninjau cacat-cacat pada propelan, penahan panas dinding tabung motor roket (*liner*) dan sambungan propelan. Kemungkinan terjadinya cacat propelan yang berupa retak atau kerosok dapat diamati dengan pemeriksaan X-ray pada uji tidak merusak (*Non*



*Destructive Test*) sebelum propelan digunakan. Apabila menurut hasil pemeriksaan tersebut cacat propelan tidak diketemukan (lolos uji) maka analisis penyebab terjadinya roket meledak tersebut langsung mengarah pada sambungan propelan (jika terdapat sambungan). Berdasarkan hal ini penelitian dan pembahasan mengenai kekuatan sambungan propelan penting untuk dilakukan.

Pada tulisan ini akan dikemukakan pengujian terhadap kekuatan sambungan propelan pada roket RX 150-1200-LPN. Selain itu juga akan menganalisis apakah kegagalan pada motor roket RX 150-1200-LPN dengan propelan konfigurasi silinder (*hollow*) tersebut disebabkan oleh adanya sambungan propelan. Roket ini menggunakan satu sambungan propelan dan meledak saat dilakukan uji statik.

## 2. TEORI

Propelan merupakan bahan bakar dari suatu roket. Pada roket padat, propelan ini terdapat di bagian dalam tabung motor roket. Berdasarkan mekanisme pembakarannya, propelan dapat dibagi menjadi dua tipe yaitu pembakaran radial (*radial burning*) dan pembakaran ujung (*cigarette burning*) (Davenas, 1993). Pembakaran propelan tipe yang pertama berjalan dari sepanjang permukaan dalam propelan menuju dinding tabung motor roket sedangkan pada tipe yang kedua dimulai dari ujung propelan (dekat nosel) menuju bagian ujung atas (dekat cap). Hasil dari pembakaran propelan adalah gas dengan temperatur dan tekanan tinggi yang berakumulasi di ruang pembakaran dan segera diekspansikan keluar melalui nosel sehingga dapat menggerakkan roket ke depan.

Berdasarkan bentuk bangunan batang propelan (*grain architecture*) maka penempatan propelan ke dalam tabung motor roket dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu *free standing grains* dan *case bonded grains* (Sutton, 1976). Pada

penempatan propelan jenis pertama batang propelan dicetak (*casting*) dan dimatangkan (*curing*) lebih dahulu kemudian dimasukkan ke dalam tabung motor roket (*cartridge-loaded*). Adapun penempatan propelan jenis kedua dilakukan dengan cara mencetak propelan (*casting*) dan dimatangkan (*curing*) secara langsung di dalam tabung motor roket. Teknologi penempatan propelan ke dalam tabung motor roket yang ada di LAPAN menggunakan cara yang pertama (*free standing grains*) di mana panjang batang propelan yang dihasilkan pada sekali cetak biasanya tidak lebih dari 115 cm. Oleh karena itu untuk roket yang menggunakan propelan lebih panjang harus dilakukan penyambungan propelan menggunakan perekat (*adhesive*). Beberapa persyaratan sambungan propelan yang harus dipenuhi di antaranya adalah (Davenas, 1993):

- mempunyai daya rekat yang baik (lebih kuat dari batang propelan yang disambung)
- cukup rapat, dimana tidak dapat ditembus oleh gas hasil pembakaran propelan
- dapat terbakar dengan laju pembakaran yang lebih kecil dari propelan.
- Tidak mengganggu proses pembakaran propelan.

Pembakaran propelan pada motor roket akan menghasilkan sejumlah gas yang terakumulasi di ruang bakar mempunyai tekanan ( $P_c$ ) dan diekspansikan keluar melalui nosel sehingga menimbulkan gaya dorong ( $F$ ). Besarnya tekanan dan gaya dorong tersebut akan sebanding dengan luas permukaan bakar propelan sesuai dengan Persamaan 2-1a dan 2-1b (Davenas, 1993).

$$P_c = \rho \cdot S \cdot r / C_D \cdot A_t \quad \dots\dots\dots (2-1a)$$

$$F = P_c \cdot C_F \cdot A_t \quad \dots\dots\dots (2-1b)$$

dimana :

$P_c$  : tekanan ruang bakar

$\rho$  : kerapatan propelan

$S$  : luas permukaan pembakaran propelan

$r$  : laju pembakaran propelan

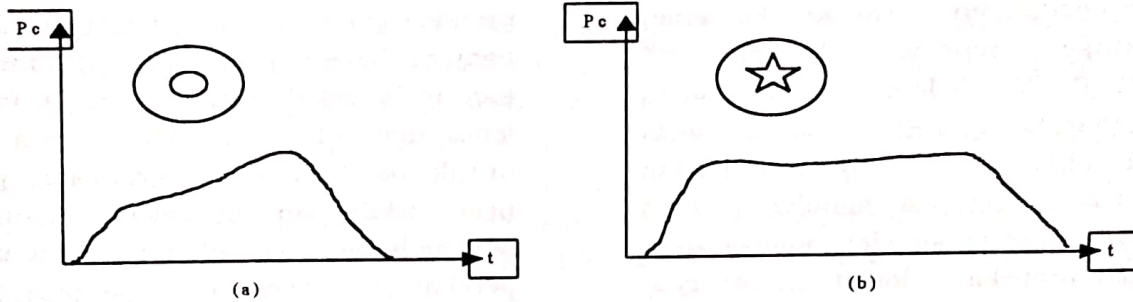
$C_D$  : koefisien berkurangnya propelan (propellant discharge coefficient)



$A_t$  : luas kerongkongan nosel  
 $F$  : gaya dorong motor roket  
 $C_F$  : koefisien gaya dorong (nozzle thrust coefficient)

Berdasarkan persamaan di atas terlihat bahwa makin besar luas permukaan propelan yang terbakar akan menghasilkan tekanan ( $P_c$ ) dan gaya dorong ( $F$ ) yang makin besar pula. Pada motor roket yang menggunakan propelan dengan konfigurasi silinder (*hollow*),

luasan permukaan bakar selama pembakaran akan bertambah besar (*progressive*) sedangkan untuk konfigurasi bintang (*star*) relatif stabil (*plateau*). Hal ini akan mengakibatkan tekanan dan gaya dorong yang berbeda pula pada kedua konfigurasi propelan tersebut. Profil gaya dorong terhadap waktu untuk kedua jenis konfigurasi propelan tersebut diperlihatkan pada Gambar 2-1 di bawah ini (Sutton, 1976).



Gambar 2-1: Profil tekanan terhadap waktu : (a) konfigurasi silinder (b) konfigurasi bintang

Dalam pembuatan suatu motor roket telah dirancang sesuai dengan tekanan ruang bakar dan gaya dorong yang dihasilkan. Untuk motor roket yang menggunakan propelan padat kedua besaran tersebut dapat diprediksi dari konfigurasi propelannya dimana luasan permukaan bakarnya akan mengikuti konfigurasi yang direncanakan. Apabila terdapat sambungan propelan yang gagal (retak, koyak dan lain-lain) maka luasan permukaan bakar propelan sudah tidak sesuai dengan yang direncanakan (akan tiba-tiba membesar). Hal ini akan menimbulkan tekanan ruang bakar yang besar pula sehingga motor roket dapat mengalami kegagalan (meledak). Sementara itu menurut Saint-Robert laju pembakaran propelan sangat dipengaruhi oleh tekanan ruang bakar sesuai dengan persamaan (Kuo, 1984):

$$r = a P_c^n \dots\dots\dots (2-2)$$

dengan:

- $r$  : laju pembakaran
- $P_c$  : tekanan ruang bakar
- $a$  : koefisien laju pembakaran
- $n$  : eksponen laju pembakaran (indeks pembakaran)

Dari persamaan 2-2 di atas terlihat bahwa laju pembakaran akan meningkat dengan bertambahnya tekanan ruang bakar. Apabila propelan yang terbakar terdapat sambungan yang patah (cacat) maka luasan pembakaran bertambah dan  $P_c$  akan meningkat yang selanjutnya akan meningkatkan laju pembakaran ( $r$ ). Oleh karena itu dalam waktu yang sangat singkat akan menyebabkan meningkatnya tekanan pembakaran yang cukup berarti .

### 3. METODOLOGI PENGUJIAN DAN ANALISIS

#### 3.1. Proses Penyambungan Propelan

Proses penyambungan propelan dapat dibagi menjadi tiga tahap, yaitu pembuatan adhesive, perataan permukaan dan kelurusan propelan serta perekatan.

##### 3.1.1. Pembuatan adhesive

Bahan perekat (*adhesive*) yang digunakan untuk menyambung propelan adalah jenis epoksi yang terdiri dari:

resin epoksi, hardener dan ditambah dengan sealant polisulfid (Colpor 200). Penambahan sealant ini dimaksudkan agar dapat mengisi celah/pori-pori yang ada di sambungan sehingga tidak terjadi kebocoran gas hasil pembakaran propelan melewati sambungan tersebut. Perbandingan jumlah ketiga bahan yang digunakan adalah 1 : 1 : 0,15 (bagian berat). Campuran bahan adhesive ini diaduk selama lima menit untuk selanjutnya digunakan untuk merekatkan sambungan propelan.

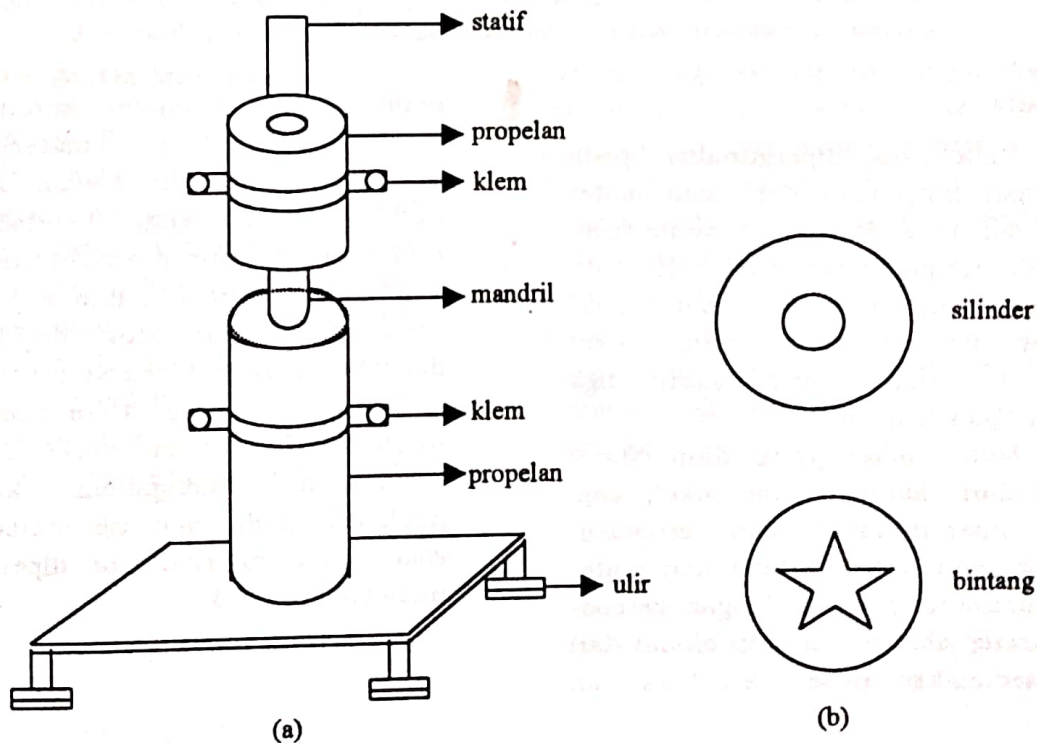
### 3.1.2. Perataan permukaan propelan

Propelan yang disambungkan harus mempunyai permukaan yang rata. Selain itu kedua batang propelan yang telah disambung juga harus pada posisi lurus (satu garis). Kelurusan sambungan dapat diperoleh menggunakan gerinda (untuk meratakan bagian permukaan propelan) dan dibantu dengan alat *water-*

*level*. Penggunaan gerinda harus dilakukan dengan kecepatan rendah agar tidak menimbulkan panas yang membahayakan propelan.

### 3.1.3. Perekatan propelan

Proses penyambungan propelan dilakukan secara vertikal pada meja penyambungan. Kedua permukaan propelan yang akan disambungkan diolesi dengan bahan *adhesive* yang telah dibuat. Perekatan kedua batang propelan ini dibantu dengan sebuah mandril di bagian permukaan dalam propelan. Adapun bentuk penampang lintang dari mandril yang digunakan disesuaikan dengan konfigurasi grain propelan yang akan disambungkan. Cara penyambungan propelan ini dapat dilihat pada Gambar 3-1.



Gambar 3-1: (a) Penyambungan propelan (b) Konfigurasi propelan



### 3.2 Metoda Pengujian dan Analisis

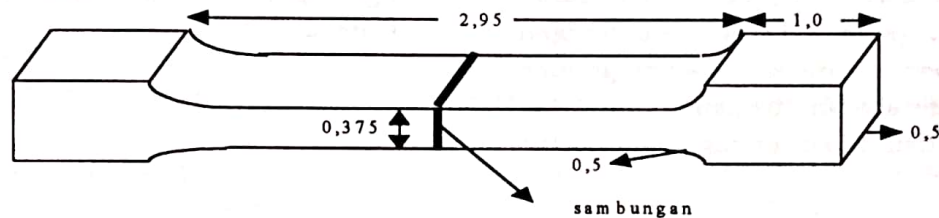
Motor roket RX-150-1200-LPN yang menggunakan propelan konfigurasi silinder dengan satu sambungan telah mengalami kegagalan (meledak) pada saat diuji statik. Guna menjawab pertanyaan apakah kegagalan ini diakibatkan oleh adanya sambungan propelan atau bukan dilakukan beberapa penelitian. Penelitian ini meliputi pengujian kekuatan sambungan propelan melalui uji tarik sampel sambungan propelan dan uji statik motor roket *standard* dengan beberapa sambungan propelan. Analisis data uji statik dilakukan baik terhadap hasil uji statik motor roket *standard* mau-pun motor roket yang meledak. Berdasarkan data kekuatan sambungan

propelan dan analisis terhadap tekanan pembakaran motor roket pada saat diuji statik, peranan sambungan propelan pada terjadinya ledakan dapat diketahui.

Kekuatan sambungan propelan diuji dengan menggunakan mesin TENSILON UTM-III/100 (metode JANAF). Kondisi pengujian adalah sebagai berikut:

- beban tarik : 20 kg
- kecepatan tarik : 100 mm/menit
- temperatur : 29°C

Gambar sampel uji tarik sambungan propelan dapat dilihat pada Gambar 3-2.



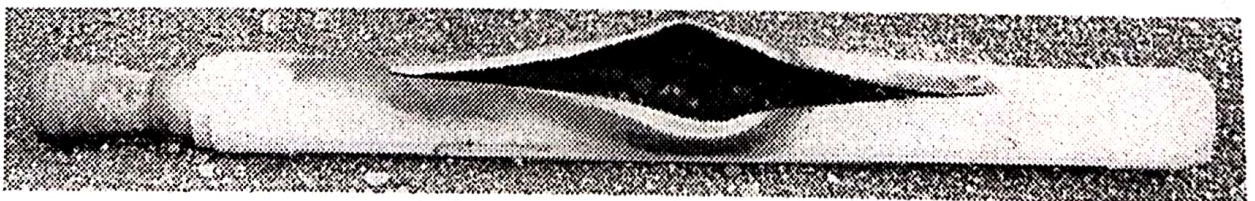
Gambar 3-2: Sampel uji tarik kekuatan sambungan propelan (ukuran dalam inci)

### 3.3 Data

Data yang dipergunakan pada penelitian ini terdiri dari data motor roket, uji tarik kekuatan sambungan propelan, uji statik motor roket RX 150-1200-LPN dengan propelan konfigurasi silinder dan uji statik motor roket *standard* yang menggunakan tiga sambungan propelan.

Motor roket yang diuji statik terdiri dari tabung motor roket, cap, *nose*, liner/inhibitor dan propelan. Tabung motor roket terbuat dari material aluminium paduan dengan ketebalan kurang lebih 5 mm. Cap dibuat dari baja sedangkan *nose* dari baja dan

grafit dengan diameter kerongkongan (*throat*) sebesar 50 mm. Material liner/inhibitor dibuat dari epoksi dan *fiber cloth* serat gelas dengan ketebalan rata-rata 4 mm. Adapun propelan merupakan jenis HTPB dengan panjang 1190 mm yang terdiri dari dua bagian yang disambung. Bagian pertama (dekat cap) mempunyai panjang 540 mm sedangkan bagian kedua (dekat *nose*) 650 mm. Roket ini mengalami kegagalan (meledak) pada saat uji statik. Motor roket yang meledak ini diperlihatkan pada Gambar 3-3.



Gambar 3-3: Motor roket RX 150-1200-LPN yang meledak saat uji statik



## 4. HASIL

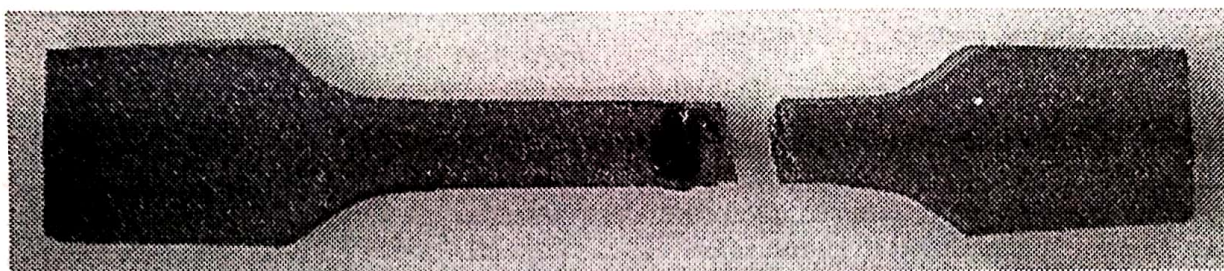
### 4.1. Kekuatan Sambungan Propelan

Kekuatan sambungan propelan telah diuji dengan uji tarik menggunakan metode (JANAF). Pada pengujian yang dilakukan diperoleh bahwa bagian sampel yang putus selalu terjadi pada batang propelan. Hasil uji tarik sampel sambungan propelan disajikan pada Tabel 4-1. Pada uji tersebut diperoleh rata-rata kuat tarik propelan sebesar 5,31 kg/cm<sup>2</sup>. Bagian sampel propelan

yang putus setelah mengalami uji tarik dapat dilihat pada Gambar 4-1. Warna gelap pada bagian tengah sampel menunjukkan posisi sambungan.

Tabel 4-1: HASIL UJI TARIK SAMBUNGAN PROPELAN

No	Kode Sampel	Kuat Tarik (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	A	5,40
2	B	5,22
3	C	4,98
4	D	5,51
5	E	5,01
6	F	5,74



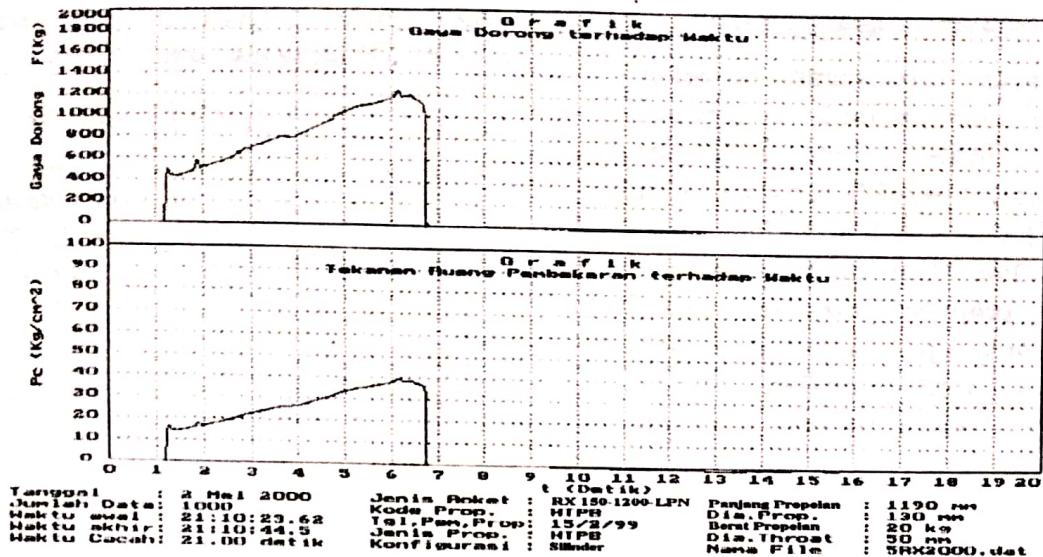
Gambar 4-1: Bagian sampel propelan yang putus setelah diuji tarik

### 4.2. Hasil Uji Statik Motor Roket.

Data yang diperoleh dari uji statik motor roket RX 150-1200-LPN berupa gaya dorong, tekanan ruang bakar dan waktu pembakaran. Grafik tekanan ruang bakar maupun gaya dorong terhadap waktu dari hasil pengujian untuk motor roket yang mengalami kegagalan (meledak) dapat dilihat pada Gambar 4-2. Data tersebut menunjukkan bahwa selama pembakaran

berlangsung tekanan dan gaya dorong meningkat dari waktu ke waktu (*progressive*) dan akhirnya setelah 6,7 detik kedua besaran tersebut berubah drastis ke harga nol dimana pengujian dan analisis kekuatan sambungan propelan roket ini meledak pada detik tersebut. Tekanan dan gaya dorong maksimum diperoleh berturut-turut kurang lebih sebesar 40 kg/cm<sup>2</sup> dan 1200 kg.

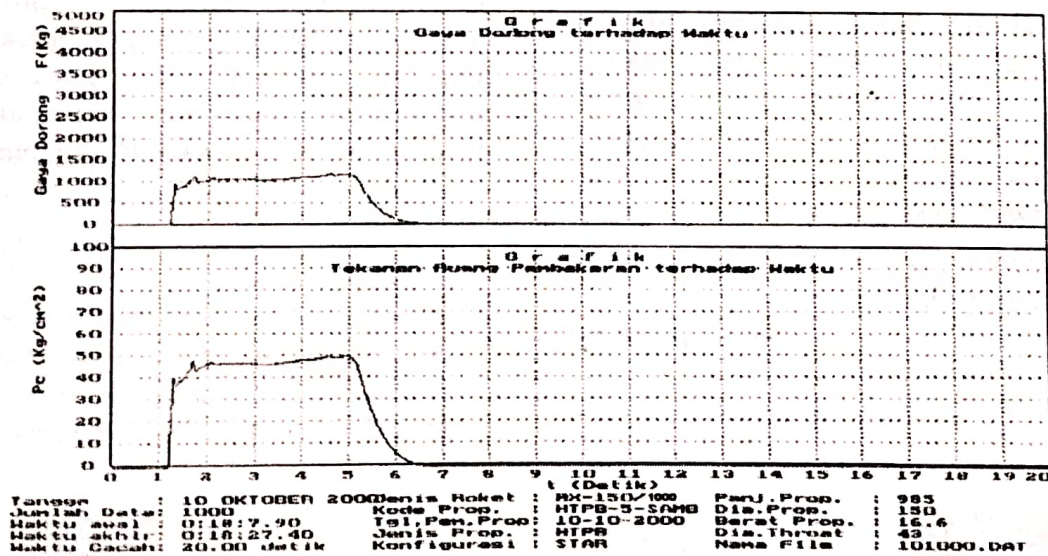




Gambar 4-2 : Grafik hasil uji statik motor roket RX 150-1200-LPN

Uji statik motor roket untuk menguji kekuatan sambungan dilakukan dengan menggunakan motor roket standard (diameter 150 mm dan panjang 1000 mm). Propelan yang digunakan terdiri dari empat segmen (tiga sambungan) dengan panjang masing-masing 195 mm, 290 mm, 255 mm dan 245 mm. Pada uji statik ini diperoleh grafik gaya dorong dan tekanan ruang

bakar terhadap waktu seperti pada Gambar 4-3. Dari grafik tersebut diperlihatkan bahwa tekanan ruang bakar dan gaya dorong relatif konstan dari waktu ke waktu dan setelah detik ke 5 mulai menurun eksponensial ke harga nol pada detik ke 6,2. Tekanan ruang bakar dan gaya dorong maksimum berturut-turut sebesar 50 kg.cm<sup>2</sup> dan 1100 kg.



Gambar 4-3: Grafik hasil uji statik motor roket RX 150-1000-LPN (3 sambungan propelan)



## 5. PEMBAHASAN

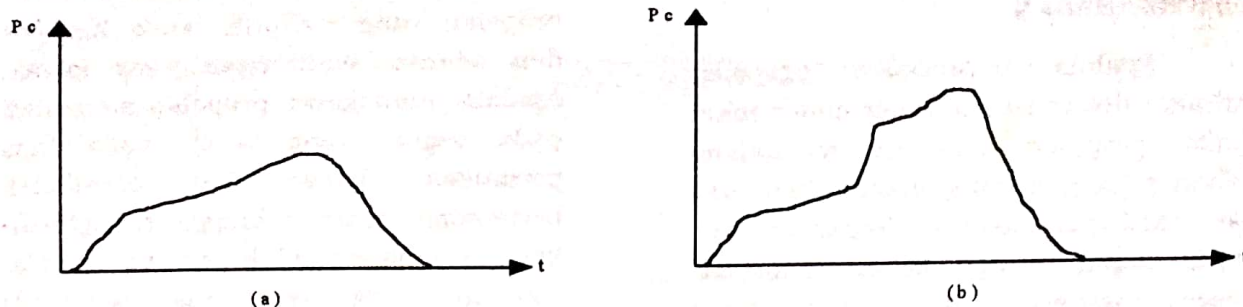
Apabila permukaan propelan terbakar dalam ruang bakar motor roket maka propelan tersebut mengalami beban tegangan yang diakibatkan oleh gas hasil pembakaran. Tegangan tersebut dapat berupa beban kompresi, geser maupun tarik yang dapat mengenai seluruh bagian propelan tidak terkecuali bagian sambungannya. Sambungan ini harus mempunyai kekuatan yang lebih besar atau sama dengan kuat putus (*break strength*) dari propelan itu sendiri. Kekuatan sambungan propelan telah diuji melalui uji tarik sampel propelan. Hasil uji menunjukkan bahwa pada setiap pengujian bagian yang mengalami putus ada di bagian propelan (lihat Gambar 4-1). Besarnya rata-rata kuat tarik hingga putus pada uji ini adalah  $5,31 \text{ kg/cm}^2$ . Harga ini sesuai dengan kuat tarik propelan HTPB yang berkisar antara  $4 - 6,5 \text{ kg/cm}^2$  (Sutrisno, 1997). Hasil uji ini menunjukkan bahwa sambungan propelan lebih kuat dari pada kuat tarik propelannya.

Guna mengetahui apakah terjadinya ledakan pada roket RX 150-1200-LPN ini diakibatkan oleh sambungan propelan atau tidak, telah dilakukan uji statik terhadap motor roket *standard* dengan beberapa sambungan propelan. Sesungguhnya penyebab terjadinya roket meledak dapat diakibatkan oleh dua kasus, yaitu struktur motor roket yang tidak kuat (tidak mampu menahan beban tekanan yang semestinya) atau tekanan ruang bakar melebihi tekanan yang semestinya (tidak sesuai dengan perencanaan). Penyebab kasus pertama dapat terjadi karena penggunaan material struktur motor roket yang cacat (retak, keropos dan lain-lain) atau perakitan yang tidak akurat. Adapun penyebab dari kasus kedua diakibatkan oleh adanya cacat

propelan yang meliputi retak, keropos dan adanya sambungan yang koyak. Apabila pembakaran propelan merambat pada bagian yang cacat maka luas permukaan bakar akan mendadak bertambah besar sehingga menghasilkan gas dengan jumlah yang besar pula. Hal ini juga akan mengakibatkan tekanan bertambah besar secara tiba-tiba sesuai dengan persamaan (2-1a).

Pengujian terhadap kinerja propelan (termasuk kekuatan sambungan) di LAPAN biasanya dilakukan menggunakan motor roket *standard* yang mempunyai ketebalan yang cukup besar agar aman (tidak meledak). Guna mengetahui apakah suatu sambungan propelan mampu menahan beban tekanan atau tidak, dapat dilihat dari profil gaya dorong/tekanannya. Apabila sambungan propelan koyak maka nyala pembakaran propelan akan melewati celah sambungan tersebut. Hal ini menyebabkan luas permukaan bakar propelan menjadi bertambah sehingga gas yang dihasilkan akan makin banyak pula yang akhirnya akan meningkatkan tekanan ruang bakar sesuai dengan persamaan (2-1a). Sementara itu berdasarkan persamaan (2-2) diperoleh bahwa bertambahnya tekanan ruang bakar akan meningkatkan laju pembakaran propelan. Hal ini berarti bahwa apabila sambungan propelan koyak maka dalam waktu yang sangat singkat akan terakumulasi sejumlah gas yang sangat banyak sehingga terjadi peningkatan tekanan ruang bakar secara tiba-tiba. Berdasarkan uraian ini, jika terjadi kerusakan sambungan propelan, profil tekanan ruang bakar terhadap waktu pada uji statik motor roket *standard* yang menggunakan propelan dengan konfigurasi silinder dapat ditunjukkan pada Gambar 5-1 di bawah ini.





Gambar 5-1: Profil Tekanan terhadap waktu: (a) sambungan propelan baik (b) sambungan propelan koyak

Hasil uji statik motor roket dengan propelan berkonfigurasi silinder yang mengalami kegagalan ditunjukkan pada Gambar 4-2. Dari gambar tersebut terlihat tidak menunjukkan adanya kejanggalan profil tekanan/gaya dorong yang berarti. Selain itu juga masih sesuai dengan profil gaya dorong/tekanan terhadap waktu pembakaran seperti pada Gambar 2-1a. Hal ini berarti bahwa sambungan propelan yang digunakan tidak mengalami kegagalan (cacat). Guna meyakinkan dalam memberi gambaran kekuatan sambungan propelan, telah dilakukan uji statik motor roket dengan menggunakan propelan yang berkonfigurasi bintang tujuh. Pada uji tersebut digunakan propelan sepanjang 985 mm yang terdiri dari empat segmen (tiga sambungan). Hasil uji statik motor roket dengan propelan sambungan ini ditunjukkan pada Gambar 4-3. Berdasarkan hasil tersebut tidak menunjukkan adanya kejanggalan pada kurva gaya dorong/tekanan terhadap waktu pembakaran. Selain itu kurva tersebut juga masih sesuai dengan profil tekanan/gaya dorong pada Gambar 2-1b. Hal ini berarti bahwa sambungan yang ada pada propelan tersebut tidak mengganggu kinerja motor roket yang diharapkan. Adapun terjadinya kegagalan (meledak) pada roket RX 150-1200-LPN di atas kemungkinan adanya cacat pada tabung motor roket yang tidak terdeteksi melalui pemeriksaan X-ray yang kurang akurat.

## 6. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan di atas diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Uji tarik propelan memberikan hasil kuat tarik propelan sebesar 5,31 kg/cm<sup>2</sup>.
2. Kekuatan sambungan propelan lebih besar dari pada kuat tarik propelan.
3. Sambungan propelan pada motor roket LAPAN telah memenuhi kriteria sambungan dengan baik.
4. Kegagalan pada uji statik motor roket RX 150-1200-LPN dengan propelan konfigurasi silinder tidak disebabkan oleh adanya sambungan propelan.

## DAFTAR RUJUKAN

- Davenas, Alain, 1993, "Solid Rocket Propulsion Technology", 1<sup>st</sup> edition, Pergamon Press, Oxford.
- Kuo, Kenneth K and Summerfield, Martin, 1984, "Fundamentals of Solid Propellant Combustion", Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol 90, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, 1633 Broad-way, New York.
- Sarner, Stanley F, 1966, "Propellant Chemistry", Reinhold Publishing Corporation, New York
- Shields, J, 1976, "Adhesives Handbook", 2<sup>nd</sup> edition Newness-Butterworths, London
- Sutrisno, 1997, "Sifat Mekanik Propelan Padat Polibutadien - HTPB dengan Berbagai Aditif", Proceeding Kiprosat-LAPAN
- Sutton, George P and Ross, Donald M, 1976, "Rocket Propulsion Elements", 4<sup>th</sup> ed, John Wiley and Sons, New York.