

PERTIMBANGAN-PERTIMBANGAN PENGGUNAAN PROPELAN MAUPUN MATERIAL STRUKTUR DALAM PEMBUATAN MOTOR ROKET

Dwi Wahyuni

Peneliti Bidang Material Dirgantara, LAPAN

ABSTRACT

The considerations for the rocket motor manufacturing have to be taken , which consisting of three main parts that are propellant, structure and pay-load. The propellant consideration comprising the economical and saving, energetic and the problems which relating to the motor rocket operational. The structure consideration comprising the material resistance, environment condition, manufacturing, density and economical factor. The economical factor are about the price and availability in the market. The important saving factor are the corrosiveness , the explosion danger and burning, toxicity physically and chemically factors. The energetic consideration relating to the thrust , the possibility to start and restart, the usage time, propellant quantity and anticipation to withstand the failure. Moreover the rocket motor operational consideration for the liquid propellant. The strength resistance, rupture resistance, elasticity limit, Young modulus, tiredness, static tenacity and can be forged. The material have to resist to the environment comprises hot and cold condition, corrosive liquid, sun shine and ionic particles bombardment. The density consideration have an effect on the weight structure and the construction index. The material also have to find easily and the price is achievable.

Keywords : *Propellant, Structure, Material, Economy, Structure index*

ABSTRAK

Pertimbangan-pertimbangan yang harus diambil dalam pembuatan motor roket meliputi tiga bagian utama yaitu propelan, struktur dan beban guna. Pertimbangan untuk propelan meliputi masalah ekonomi dan penyimpanan, energetik dan ha-hal yang berkaitan dengan cara kerja motor roket. Pertimbangan untuk struktur meliputi ketahanan material, kondisi lingkungan, pengerjaan, densitas dan faktor ekonomi. Faktor ekonomi yaitu mengenai harga dan ketersediaannya di pasaran. Dalam penyimpanan sangat penting dipertimbangkan sifat-sifat korosifitas, bahaya ledakan dan kebakaran, sifat racun, sifat fisika dan sifat kimia. Pertimbangan faktor energetik, berhubungan dengan jumlah gaya dorong, kemungkinan dapat dimatikan-dihidupkan, waktu penggunaan, jumlah propelan danantisipasi mengatasi kegagalan. Di samping itu juga pertimbangan dengan cara kerja motor roket, untuk propelan cair. Ketahanan struktur terhadap ruptur, batas elastisitas, modulus Young, kelelahan, keuletan statik dan sifat dapat ditempa. Material harus tahan terhadap lingkungan meliputi keadaan panas, dingin, cairan korosif, sinar matahari, dan hantaman partikel-partikel ionik. Pertimbangan densitas berpengaruh pada berat struktur dan berpengaruh pada indeks konstruksi. Material juga harus mudah didapatkan dan harganya terjangkau.

Kata kunci : *Propelan, Struktur, Material, Ekonomi, Indeks struktur*

1 PENDAHULUAN

Suatu motor roket secara garis besar terdiri atas dua bagian utama yaitu propelan dan struktur. Bila motor roket sudah digunakan sebagai wahana peluncur atau wahana antariksa lainnya, ada satu bagian lagi yaitu beban yang diangkut atau beban guna. Dalam perencanaan motor roket sangat penting dimasukkan pertimbangan-pertimbangan untuk ketiga bagian tersebut sehingga motor roket dapat berfungsi sesuai dengan misinya.

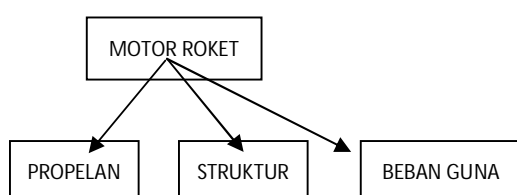
Lingkup penggunaan motor roket antara lain untuk pesawat terbang, wahana peluncur, misil, satelit, dan lainnya. Besarnya daya yang harus dibangkitkan oleh motor roket pada wahana-wahana ini berbeda. Hal ini berhubungan dengan faktor propelan, struktur maupun beban guna.

Dalam problem energetik propulsi harus menjawab sejumlah pertimbangan-pertimbangan teknik penggunaan antara lain temperatur, waktu penyimpanan, waktu persiapan untuk membangkitkan gaya dorong, fasilitas penggunaan dan keamanan. Untuk suatu wahana yang menggunakan motor roket bertingkat akan mempunyai pengaruh tersendiri dalam pertimbangan-pertimbangan ini.

Dari pertimbangan-pertimbangan yang cukup baik dari semua komponen motor roket secara keseluruhan akan sangat berpengaruh pada kinerja dan biaya motor roket yang direncanakan.

Pertimbangan-pertimbangan diharapkan dapat memberi masukan dalam penggunaan propelan maupun material struktur untuk motor roket LAPAN.

Dalam bentuk bagan, bagian-bagian dari motor roket dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 1-1: Bagan bagian motor roket

Beban guna sendiri dapat terdiri atas struktur dan bagian lain seperti propelan atau peralatan-peralatan lainnya yang mana persentase beratnya sudah menyatu di dalam beban guna.

2 PROPELAN

Pertimbangan-pertimbangan untuk propelan meliputi pertimbangan ekonomi dan penyimpanan, energetik dan sifat-sifat fisis serta faktor yang berhubungan dengan fungsinya dalam motor roket.

2.1 Problem Ekonomi dan Penyimpanan

Motor roket membutuhkan komponen-komponen yang mempunyai spesifikasi sesuai dengan yang dibutuhkan. Harga propelan dan ketersediaannya sangat berperan dalam menentukan pilihannya. Jika motor roket digunakan pada mesin-mesin atau wahana terbang yang dibuat dengan jumlah seri banyak, maka akan dipilih propelan yang ada di pasaran dan yang tersedia dalam jumlah banyak. Untuk motor-motor roket yang digunakan dalam penelitian dimana jumlah tembakan propulsi banyak sehingga jumlah propelan yang dibutuhkanpun banyak. Demikian juga motor roket untuk penggunaan yang berbeda-beda akan sangat mempengaruhi pemilihan propelannya.

Hal yang tidak kalah pentingnya adalah faktor penyimpanan. Propelan harus dapat disimpan dalam *reservoir* atau ruang penyimpan di dalam mesin. Untuk memastikan propelan dapat disimpan atau tidak, ada beberapa pertimbangan meliputi (Dardare et al., 1981):

- Korosifitas,
- Bahaya ledakan dan kebakaran,
- Sifat racun,
- Sifat fisika,
- Sifat kimia,

Pertimbangan ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Korosifitas, yang berpengaruh pada tempat menyimpan baik yang di dalam motor roket maupun di luar motor, dan juga bagian-bagian lain maupun instrumen dari motor, dapat dipilih dari metal atau plastik. Hal ini akan mempengaruhi berapa lama propelan dapat disimpan,
- Bahaya ledakan dan kebakaran, yang disebabkan oleh ketidakstabilan propelan karena adanya kotoran dan bahan-bahan yang mengganggu, kenaikan temperatur, guncangan dan temperatur nyala sendiri,
- Sifat racun : dipertimbangkan konsentrasi maksimum sifat racun yang diijinkan di udara, pengaruhnya terhadap pernapasan dan jaringan organ-organ tubuh manusia dari propelan itu sendiri atau hasil-hasil pembakarannya,
- Sifat fisik : titik beku, titik didih, tekanan uap, karakteristik fisik yang tahan terhadap percepatan, guncangan dan siklus thermik,
- Sifat-sifat kimia : tahan terhadap reaksi dengan udara luar, stabilitas yang tidak berubah sebagai fungsi waktu.

2.2 Problem Energetik

Propelan yang digunakan diharapkan mempunyai kinerja yang tinggi, sehingga memperkecil problem energetik. Propelan dengan kinerja tertentu akan menghasilkan peningkatan kecepatan motor roket (ΔV) tertentu. Pertimbangan energetik berhubungan dengan (Dardare et al., 1972):

- Gaya dorong yang diinginkan,
- Kemungkinan dapat dimatikan-dihidupkan kembali selama dalam penerbangan,
- Lama waktu penggunaan,
- Jumlah penggunaan propelan,

- Kemungkinan untuk mengatasi kegagalan.

Adanya beban guna juga berpengaruh pada problem energetik.

2.2.1 Motor roket satu tingkat

Untuk motor ini yang penting diperhitungkan adalah peningkatan kecepatan motor roket (ΔV), untuk propelan dengan kinerja tertentu maka akan menghasilkan ΔV dan gaya dorongnya pun tertentu. Ini dapat dilihat dari formula berikut (Dardare et al., 1972, 1981):

$$V_e = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} r \cdot T_0 \left(1 - \frac{1}{\delta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}\right)} \quad (2-1)$$

$$F = q \cdot V_e \quad (2-2)$$

$$\frac{M_0}{M_u} = \frac{\mu e^{\Delta V/V_e}}{1 - (1-\mu) \cdot e^{\Delta V/V_e}} \quad (2-3)$$

$$\mu = \frac{M_{pr}}{M_{st} + M_{pr}} \quad (2-4)$$

Keterangan:

F : Gaya dorong

r : $C_p - C_v$

γ : $\frac{C_p}{C_v}$: perbandingan kapasitas panas pada tekanan konstan dan pada volume konstan

M_0 : massa total pada permulaan propulsi

M_u : massa beban guna

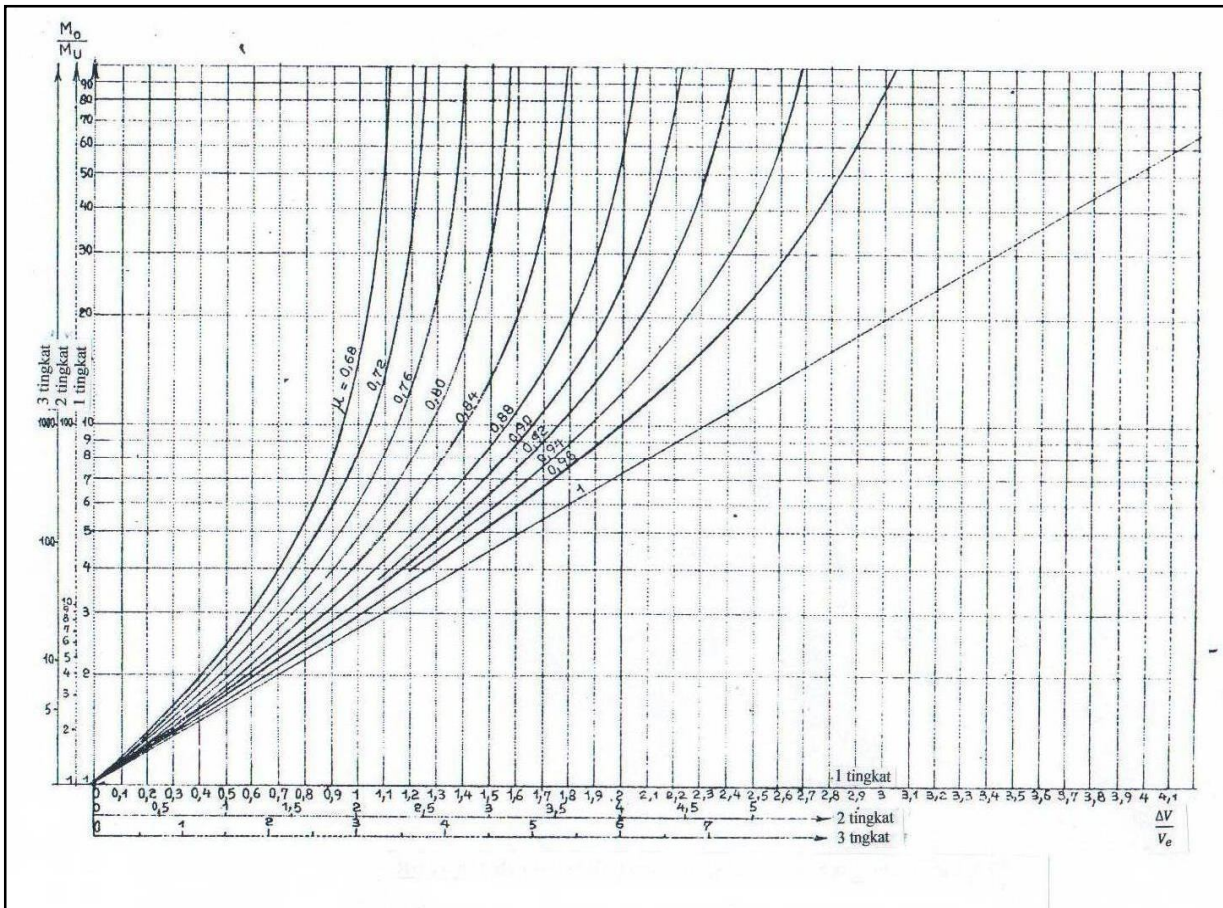
V_e : kecepatan keluaran gas hasil pembakaran

M_{st} : massa struktur

M_{pr} : massa propelan

μ : indeks konstruksi

Persamaan (2-3) dapat dinyatakan seperti pada Gambar 2-1. (Dardare et al., 1972)



Gambar 2-1: Perbandingan Massa Motor 1, 2 atau 3 Tingkat sebagai Fungsi μ dan $\frac{\Delta V}{V_e}$

Gambar tersebut adalah bentuk semi logaritmik, menyatakan bentuk untuk harga indeks struktur yang berbeda-beda. Dari gambar tersebut menunjukkan:

- Untuk propelan tertentu (V_e tetap), beban guna (M_u) tertentu, massa motor pada waktu tertentu, dengan pangkat dari ΔV yang diinginkan, berarti gaya dorong yang diharapkan dapat dicapai dengan massa struktur tertentu,
- Untuk propelan yang mempunyai kinerja rendah, koefisien struktur mempunyai pengaruh kecil pada perbandingan massa, tetapi pengaruh itu meningkat cepat ketika kemampuan bertambah,
- Keadaan itu asimptotis vertikal sesuai dengan perbandingan massa tak terbatas,

ketika : $(1 - \mu) e^{\Delta V/V_e} = 1$

sehingga : $\frac{\Delta V}{V_e} = \text{Log}\left(\frac{1}{1-\mu}\right)$

berarti untuk koefisien struktur tertentu dan propelan tertentu ada suatu kemampuan yang dilewati.

2.2.2 Motor roket beberapa tingkat

Setiap tingkat dari motor roket yang bertingkat dihubungkan dengan Δv yang sama.

Motor roket dengan n tingkat, massa waktu tinggal landas M_0 , massa beban guna M_u , massa setiap tingkat M_1, M_2, \dots, M_n , maka (Dardare et al., 1972):

massa waktu tinggal landas:

$$M_0 = M_u + M_1 + M_2 + \dots + M_n.$$

$$\frac{M_0}{M_0 - M_1} = \frac{M_0 - M_1}{M_0 - M_1 - M_2} \dots =$$

$$\frac{M_0 - M_1 - \dots - M_{n-1}}{M_u} = A \tag{2-5}$$

Perbandingan massa global motor roket

$$\frac{M_0}{M_u} = A^n .$$

Untuk motor roket lengkap :

$$\frac{\Delta V}{V_e} = n \frac{\Delta v}{v_e} = n \cdot \log \frac{A}{(1-\mu)A + \mu} = n \cdot \log B \quad (2-6)$$

Dari persamaan (2-6), untuk propelan tertentu, jumlah tingkat tertentu maka Δv dapat dihitung.

Gambar (2-1) juga menggambarkan untuk motor roket beberapa tingkat pada kondisi yang sesuai.

Jika kecepatan pembuangan gas dan koefisien struktur setiap tingkat sama maka persamaan (2-6) menunjukkan perbandingan massa dalam konfigurasi motor roket "n" yang sama, tetapi beban guna yang dipertimbangkan menggambarkan massa total tingkat atas.

2.3 Problem Yang Berhubungan Dengan Cara Kerja Dalam Motor Roket

Pertimbangan ini berkaitan dengan adanya kesulitan yang disebabkan oleh sifat alami propelan dalam cara kerja motor roket. Hal ini berlaku untuk propelan cair dan terutama mengenai prinsip kerja sistem pengumpan dari ruang propulsif, pendinginan nosel, penyalaan dan pembakaran. Kinerja propelan diharapkan baik untuk memfasilitasi:

- Sistem pengumpan berjalan baik antara lain yaitu titik beku yang rendah, tekanan uap yang kecil, viskositas rendah dan sifat fisika yang bervariasi sedikit terhadap temperatur,
- Sistem penyalaan berjalan baik: saat permulaan pembakaran yang selalu sangat sulit karena waktunya sangat pendek dan sering berbahaya untuk motor roket.

3 STRUKTUR

Dalam pemilihan material untuk struktur, pada hakekatnya tidak ada material yang kurang baik, tetapi yang

terjadi pemilihan yang kurang tepat untuk penggunaan yang ada. Ada 5 pertimbangan dalam pemilihan bahan untuk struktur yaitu mengenai : (Deier dan Duedal ,1985; Terree 1986):

- Ketahanannya
- Menghadapi lingkungan
- Pengerjaan
- Faktor ekonomi
- Densitas

3.1 Kekuatan

Material harus tahan terhadap: kuat tarik (σ_u) sampai 1400 Mpa, *rupture* (σ_m = ketahanan terhadap pecah) sampai 900 M.Pa, batas elastisitas (σ_e) sampai 10.000 M.Pa, modulus Young (E = perbandingan kuat tarik terhadap regangan) sampai 120. 000 M.Pa, batas kelelahan (f) (sampai siklus 10^7 putaran), keuletan statik dan sifat dapat ditempa. Batasan-batasan tersebut bila digunakan bahan paduan titan. (Terree, 1986). Ketahanan ini juga dapat dicapai bahan serat poliamide PRD 49 yang digunakan untuk tabung motor roket (<http://www.freepatentsonline.com/4787202.html>, 2007; <http://www.lr.tudelf.nl/live/pagina.jsp?id=17eadbf4-ec5c>, 2009).

3.2 Ketahanan Terhadap Lingkungan

Material harus tahan terhadap lingkungan panas dan dingin, yaitu pada posisi bayangan matahari, $T = - 150^\circ\text{C}$ s/d posisi berhadapan dengan matahari, $T = + 150^\circ\text{C}$, cairan korosif, pengaruh sinar matahari, dan hantaman partikel-partikel ionik, maka material harus tahan menghadapi keadaan yang sebelumnya berubah pelan-pelan menjadi permanen seperti panas, guncangan termik waktu peluncuran wahana antariksa sampai 60 g. $\frac{1}{2}$ sinusoida, kelelahan termik, korosi elektronik, korosi karena tekanan, kelelahan, gas panas dan kering, penuaan dan umur penggunaan. Material harus tahan

menghadapi keadaan hampa di ruang antariksa dari 10^{-10} sampai 10^{-15} Torr. (Terree, 1986).

3.3 Pertimbangan dalam Pengerjaan

Material harus dipertimbangkan dengan industri yang akan membuatnya, supaya tidak ada problem dalam pengerjaan dan merangkainya. (Terree, 1986).

- Maka pemilihan material harus menjawab masalah : dapat dibentuk, dapat disolder atau dilekatkan, dibuat secara industri, perawatan termik, perawatan permukaan,
- Kualitas material sebelum, selama dan sesudah diproses tidak boleh berubah,
- Kualitas material harus sesuai dengan peralatan atau mesin yang digunakan untuk memproses.

3.4 Pertimbangan Ekonomi

Dari faktor ekonomi, material harus dipertimbangkan dari harganya, ketersediaannya di pasaran meliputi mudah tidaknya dan jumlahnya, biaya pengerjaan maupun biaya produksi. Harga material bisa mahal karena harus mempunyai spesifikasi khusus dan tidak tersedia di pasaran. Biaya pengerjaan ini penting karena harus melalui tahapan-tahapan yang terstruktur, mesin-mesin dengan presisi yang tinggi dan tenaga yang professional.

3.5 Densitas

Material struktur diharapkan mempunyai densitas yang rendah, karena akan sangat berpengaruh terhadap berat struktur dan akan berpengaruh pada indeks konstruksi. Hal ini juga akan berpengaruh pada faktor energi. Contoh gambaran densitas material adalah: paduan titan $4,7 \text{ g/cm}^3$, serat poliamide PRD 49 $1,38 \text{ g/cm}^3$, baja dengan ketahanan tinggi $7,5 \text{ g/cm}^3$ (Terree, 1986).

4 KESIMPULAN

Dari uraian di atas mengenai pertimbangan penggunaan struktur dan propelan motor roket dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- Motor roket terdiri dari dua bagian utama yaitu struktur dan propelan, dan setelah digunakan bertambah faktor beban guna,
- Pertimbangan dari propelan yang digunakan meliputi faktor ekonomi dan penyimpanan, faktor energetik, dan faktor yang berhubungan dengan penggunaan dalam motor roket,
- Pertimbangan dari struktur meliputi faktor ketahanannya, kemampuan menghadapi lingkungan, pengerjaan dan faktor ekonomi. Material harus tahan terhadap: kuat tarik sampai 1400 Mpa , *rupture* sampai 900 M.Pa , elastisitas sampai 10.000 Mpa , modulus Young sampai 120.000 m.Pa dan kelelahan sampai 10^7 putaran. Material juga harus mampu menghadapi lingkungan dingin sampai dengan -150°C dan panas sampai dengan $+150^\circ\text{C}$, mampu menghadapi guncangan termik sampai 60 g.1/2 sinusoida, dan juga menghadapi keadaan hampa dari 10^{-10} sampai 10^{-15} Torr,
- Dari faktor ekonomi baik propelan maupun bahan struktur sama yaitu yang harganya terjangkau, mudah didapat. Untuk penggunaan khusus misalnya untuk persenjataan yang sangat dibutuhkan, mungkin faktor ekonomi tidak menjadi pertimbangan utama,
- Propelan harus yang dapat disimpan baik di luar maupun di dalam motor roket, dengan pertimbangan-pertimbangan: sifat korosifitas, mudah meledak dan terbakar, sifat racun, sifat fisis, sifat kimia,
- Untuk problem energi, dasar pertimbangan adalah pada kenaikan kecepatan (ΔV) yang dihasilkan. Bila propelan dengan kinerja rendah maka (ΔV) yang dihasilkan rendah. Untuk motor roket bertingkat (ΔV) yang

dihasikan tiap tingkat diharapkan sama,

- Pertimbangan indeks struktur, juga menjadi pertimbangan penting, densitas material struktur makin tinggi, berat wahana makin besar, indeks struktur makin kecil. Hal ini tidak diinginkan,
- Secara keseluruhan pertimbangan-pertimbangan merupakan gabungan dari bagian penelitian, laboratorium dan pengolahan, *workshop* dan pabrikasi, bagian pembelian dan persediaan,
- Pertimbangan-pertimbangan penggunaan propelan dan material struktur ini belum sepenuhnya digunakan di LAPAN karena masih adanya keterbatasan untuk mendapatkan bahan-bahan tersebut di pasaran maupun harganya, dan juga dalam kemampuan pabrikasinya.

DAFTAR RUJUKAN

- Dardare J., J. Meriguet, J. Vailhe, *Reacteurs Fusees*, Tome I, 1981. *La Poussee Les Propergols Les*
- Echanges Thermique*, E.N.S.A.E., Toulouse, France.
- Dardare J., J. Meriguet, J. Vailhe, *Reacteurs Fusees*, Tome III, 1972. *Les propulseurs A Liquides Domaines D'Application Des Reacteurs Fusees*, E.N.S.A.E., Toulouse, France.
- Deier, M., D. Duedal, 1985. *Guide Pretique Des Materiaux Composites*, Technique et Documentation (Lavoisier), Paris, France.
- <http://www.freepatentsonline.com/4787202.html>, 2007. *Combustion Chamber for Rocket Motor and Its Assembling Method*, Patent Expiration Date January 2007.
- <http://www.lr.tudelf.nl/live/pagina.jsp?id=17eadbf4-ec5c>. 2009. *Properties of Specific Structural Materials Used for Rocket Motors*, Last edited 17 March 2009.
- Terree J.M., 1986. *Technologie Generale*, E.N.S.E., Toulouse, France.
- Terree J.M., 1986. *Technologie Spatiale*, E.N.S.A.E., Toulouse, France.