

MATERIAL UNTUK STRUKTUR RUANG PROPULSIF MOTOR ROKET PADAT

Dwi Wahyuni

Peneliti Bidang Material Dirgantara, LAPAN

ABSTRACT

Material used in the propulsive chamber structure comprise 3 categories, that are the solder materials, titanium alloys, aluminium alloys and composite materials. The materials characteristics are influenced by the forming process. The solder materials like 40 CDV steel, Z 2NKDT steel and 15 CDV6 steel have high strength, have been used extensively as propulsive structural materials for solid rocket motor although there are forming problems. The titanium alloys are used mainly because they provide high strength to weight ratios. The aluminum alloys are not generally used in solid propulsive motor rocket because they are not susceptible to corrosion although have low densities. The maraging steel materials which have a good mechanical characteristics are most use in booster structure Space Shuttle application (up to 6,5 m diameter). Composite materials which comprise glass fiber, Kevlar and carbon fiber, have high strength properties and low densities. These materials are formed by the filament winding and using epoxy resin. Filament winding materials are used as the boosters cases since the Challenger Disaster in 1986.

ABSTRAK

Material yang digunakan untuk struktur ruang propulsif ada 3 kelompok yaitu material yang dapat dilas, paduan titanium, paduan aluminium dan kelompok material serat halus (material komposit). Karakteristik material-material tersebut sangat dipengaruhi proses pembuatannya. Material yang dapat dilas antara lain baja 40CDV, baja Z 2NKDT, dan baja 15CDV6 yang memiliki karakteristik mekanik yang tinggi, banyak digunakan untuk struktur ruang propulsif, meski sering menghadapi masalah pembentukan. Kelompok paduan titanium banyak digunakan karena mempunyai rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi. Kelompok paduan aluminium tidak digunakan untuk struktur ruang propulsif motor roket padat karena tidak tahan terhadap korosi meskipun berat jenisnya rendah. Material *maraging steel* mempunyai karakteristik mekanik yang baik, banyak digunakan untuk struktur *booster Space Shuttle* (sampai diameter 6,5 m). Kelompok material komposit yang meliputi serat gelas, serat kevlar dan serat karbon ketiganya mempunyai ketahanan cukup tinggi dan densitas rendah. Material ini dibuat secara *filament winding* menggunakan resin epoksi. Material *filament winding* ini banyak digunakan pada *booster* motor roket padat.

Kata kunci: *Material struktur, Baja, Paduan ringan, Material anyaman*

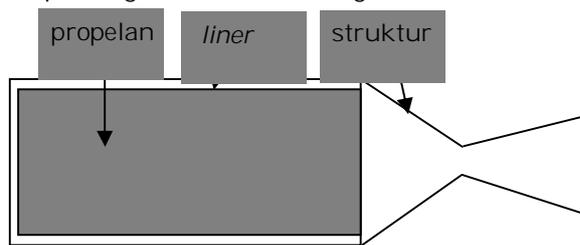
1 PENDAHULUAN

Struktur suatu sistem propulsif dari motor roket padat adalah bagian yang berfungsi sebagai *reservoir* propelan dan juga sebagai ruang bakar. Selama proses bekerjanya motor roket, struktur ini berfungsi sebagai:

- Pendukung seluruh beban suatu motor roket dan mengantarkan percepatan untuk motor roket tingkat di atasnya,
- Penahan tekanan gas hasil pembakaran selama berfungsinya motor roket, yang besarnya dapat mencapai 70 bar,

- Penahan terhadap akumulasi panas yang berasal dari gas hasil pembakaran atau perambatan panas dengan kecepatan tinggi dari lapisan di atmosfer. Temperatur gas hasil pembakaran yang mencapai $(2500 - 3000)^{\circ}\text{K}$ dalam ruang bakar. Ketika *liner* berfungsi bagus maka struktur akan menahan temperatur yang tidak tinggi, hanya beberapa ratus derajat Celsius.

Suatu sistem propulsif padat dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 1-1: Sistem propulsif motor roket padat

Dalam analisis berikut tidak ditekankan pada metode untuk menentukan ukuran struktur sistem propulsif yang merupakan kekuatan dan ketahanan material yang digunakan, tapi membahas material yang dapat digunakan, pertimbangan penggunaannya secara teknis yang berhubungan dengan karakteristik utamanya, proses pembuatan dan pengerjaannya secara garis besar dan analisis aplikasinya.

Sampai saat ini LAPAN masih menggunakan material stainless steel untuk struktur ruang propulsif, yang mana material ini mempunyai densitas relatif tinggi. Selain itu juga masih menghadapi masalah untuk mendapatkan bentuk tanpa las dan tipis. Pembahasan ini juga diharapkan menjadi masukan dalam penggunaan material sistem propulsif untuk motor roket padat di LAPAN.

2 DATA DAN PARAMETER UTAMA MATERIAL YANG DIGUNAKAN

Parameter utama yang menjadi pedoman dalam penggunaan material sistem propulsif dari motor roket padat adalah: ketahanan mekanik, elastisitas, densitas dan batasan teknik pengerjaannya. Karakteristik utama dari beberapa material untuk struktur propulsif padat adalah sebagai berikut : (Dardare et al, 1975, [http: www.lr.tudelf. nl/live/ pagina.jsp? Id = 17 eadbf 4-ec](http://www.lr.tudelf.nl/live/pagina.jsp?Id=17eadbf4-ec)).

Tabel 2-1 menunjukkan kumpulan beberapa karakteristik material yang banyak digunakan untuk struktur ruang propulsif. Dari material tersebut secara garis besar dapat dibedakan dalam 3 kategori yaitu:

- Baja yang dapat dilas, yang dalam keadaan tertentu dari proses pengolahan dan pembuatan dapat mendukung terjadinya kekuatan (ketahanan) yang sangat tinggi dengan perubahan bentuk sedikit,
- Paduan yang lebih ringan dan kurang kuat (kurang keras), lebih dapat dibentuk tetapi sedikit padat,
- Material anyaman diolah dari material yang mempunyai densitas rendah dan mempunyai ketahanan mekanik terhadap ruptur yang tinggi meliputi:
 - a. Modulus elastisitas relatif rendah, untuk sejumlah gelas,
 - b. Hasil teknologi baru yang lain (graphit dengan modulus tinggi - PRD 49),
 - c. Karakteristik yang diminta dan problem yang berhubungan dengan serat-serat antaranya.

Selain dari karakteristik utama itu, dari data penggunaan didapatkan kerugian penggunaan material metalik yang meningkat.

Tabel 2-1: KARAKTERISTIK UTAMA BEBERAPA MATERIAL STRUKTUR PROPULSIF MOTOR ROKET PADAT

KARAKTERISTIK MATERIAL	UTS M.Pa	Modulus Young E, M.Pa	Densitas gr/cm ³
Baja dengan ketahanan tinggi 40CDV	1800	215.000	7,5
Baja tak dapat dioksidasi untuk struktur keras, Z 2NKDT	1800	210.000	7,8
Baja dengan ketahanan rata-rata 15 CDV6	1100	210.000	7,5
A-286 dasar besi	827	162.000	7,92
Ni 200	362	207.000	8,89
AISI 304 L SS	564	193.000	8,00
AISI 4130 steel	670	205.000	7,833
D6AC steel ¹⁾	1483	200.000	7,780
Maraging C 350 steel ²⁾	2139	200.000	8,008
Titan alloy			
TA6V	900	120.000	4,7
Ti-6Al-4V grade 5	900	110.000	4,427
Al alloy			
AU4G	400	70.000	2,7
2219 T851	455	73.000	2,84
2219 T87	475	72.000	2,84
Serat-glass	1120	40.000	2,07
Serat karbon Karbon modulus tinggi	1260	133.000	1,52
E-glass-epoxy	1250	36.000	2,08
Kevlar-49 epoxy	1410	85.000	1,35
Serat Poliamide PRD 49	1400	84.000	1,38
Karbon-epoxy	930	195.000	1,63

Keterangan: -dari baja ketahanan tinggi sampai tipe *maraging* : kelompok baja yang dapat dilas

-dari titan alloy sampai 2219 T87 : kelompok material paduan ringan

-dari serat gelas sampai karbon epoxy : kelompok material anyaman

-UTS : *Ultra Tensile Strength*

2 PROSES PEMBUATAN

Proses pembuatan menjadi struktur ruang propulsif dari satu material berbeda dengan material yang lain. Hal ini berpengaruh pada karakteristik struktur yang dihasilkan, maka proses pembuatan dapat dipakai sebagai pertimbangan dalam pemilihan material yang digunakannya.

2.1 Material yang Dapat Dilas

Material ini adalah tipe klasik dengan kadar karbon tinggi seperti tipe 40 CDV 20, yang termasuk kelompok yang tidak dapat dioksidasi, digunakan

untuk struktur yang keras. Dari material ini memungkinkan untuk membuat struktur sistem propulsif yang dibentuk dengan cara pengelasan dari plat besi.

Penyambungan dengan pengelasan, selalu merupakan hal yang tidak menguntungkan karena material yang mengalami proses ini ketahanannya menjadi lemah.

Untuk menghindari penyusutan kualitas dilakukan pengembangan proses pembentukan dengan jalan ditempa di mana daya pelunakan akan mengubah ketebalan kerah silinder yang tipis. Cara ini menimbulkan terjadinya penguatan lokal. Dalam pembuatan

ruang propulsif dengan jumlah tertentu tetap akan dilakukan pengelasan melingkar meskipun secara mekanik kurang bagus untuk mendapatkan hasil yang andal.

Proses perlakuan termik berpengaruh pada karakteristik akhir dari penyambungan baja. Hal ini kadang-kadang menyebabkan problem ketidak-samaan dimensi yang sulit diatasi ketika penyambungan plat besi luas yang tipis. Perlakuan termik di sini meliputi pemanasan di atas temperatur leleh, pendinginan pelan-pelan, pencelupan baja panas dalam air, penambahan/pengurangan karbon, dan pemberian nitrogen.

Baja tipe *maraging* yang mengandung baja bervariasi, kekuatannya meningkat jika disepuh pada temperatur 725 – 785°C. Hasilnya adalah struktur molekul dalam baja yang mempunyai karakteristik bagus, stabilitas tinggi selama dipanaskan, penyimpan karbon yang bagus, memberikan ketahanan permukaan dan memungkinkan untuk didinginkan pada lingkungan atmosfer. Penggunaan baja tipe *maraging* untuk struktur keras, memungkinkan untuk menghindari perlakuan pada temperatur tinggi dan memudahkan pembuatan struktur tipis yang besar.

3.2 Paduan Titanium dan Paduan Aluminium

Material ini (dalam Tabel 2-1) mempunyai karakteristik yang kurang dibanding dengan baja yang dapat dilas. Paduan yang ringan ini dapat digunakan pada struktur motor dengan ketebalan kurang dari 1 mm. Masalah sterilisasi dengan dibakar sulit diatasi dan adanya pengaruh cacat permukaan terhadap ketahanan mekanik struktur menyebabkan pabrikasinya menuntut teknik pengerjaan yang halus.

Untuk karakteristik yang sama dengan menggunakan material paduan ringan, material ini akan lebih tebal sampai (2-3) kali, teknik pembuatan lebih baik, selama pabrikasi perlakuan

termik dapat dihindari, pengelasan dilakukan dengan tembakan elektronik. Keadaan ini menghasilkan material struktur propulsi padat yang sangat bagus.

3.3 Material Berserat Halus (Material Komposit)

Material ini dibuat dari karbon, gelas dan poliamida tertentu, diproses dalam kondisi khusus, dengan bentuk serabut sangat tipis (diameter 5 – 10 mikron). Proses pembuatan ini langsung menjadi bentuk struktur yang diharapkan. Dari proses ini akan dihasilkan produk dengan karakteristik mekanik yang sangat tinggi, dan dapat dibentuk sesuai dengan yang diinginkan melalui proses sebagai berikut:

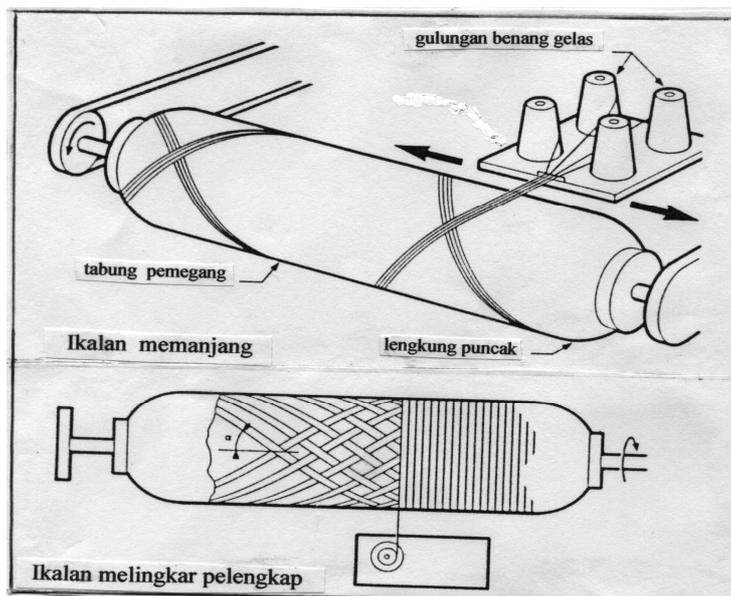
- Serat gelas dimasukkan ke dalam jamban pencampuran, dikeluarkan melewati suatu lubang halus dari platina, dan dilindungi dengan perendaman melalui adanya reaksi bahan pada tekanan atmosfer. Serat-serat ini kemudian diikal pada tambur untuk membuat selubung ruang propulsif. Serat-serat ini akan memberikan ketahanan mekanik yang sangat tinggi (ketahanan ruptur sampai 350 hbar) dan densitas sekitar 2 gram/cm³. Tetapi oleh adanya proses pengikalan berikutnya sampai terbentuknya selubung mengakibatkan terjadinya degradasi sampai 200 hbar,
- Untuk membuat serat graphit dengan modulus tinggi, dibuat dari serat-serat rayon, selulosa atau serat-serat akrilik yang dihasilkan melalui proses industri tekstil. Bahan-bahan serat tersebut ditempatkan dalam suatu tungku karbonisasi. Melalui proses pirolisa dari serat yang halus dan murni maka serat-serat ini akan diubah secara bertahap dan melewati tahap pemanasan pada temperatur 2000°C. Dari proses ini serat graphit yang sebelumnya mempunyai sifat mekanik yang rendah diubah menjadi serat graphit kaku dan ulet, dengan ketahanan ruptur sampai 300 hbar (=3000 M.Pa), modulus

elastisitas 150.000 – 300.000 M.Pa dan densitas 1,6 gr/cm³.

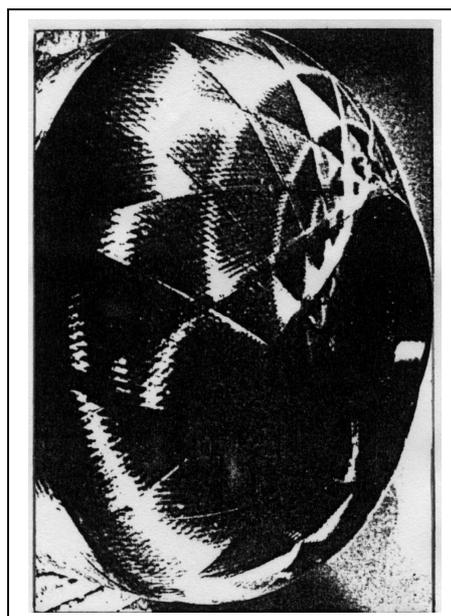
Untuk membentuk selubung material ini juga melalui proses pengikalan, yang menyebabkan terjadinya degradasi.

- Serat-serat poliamid yang dihasilkan oleh Dupont de Nemours dengan tujuan komersial dari Kevlar 49 memiliki karakteristik mekanik analog dengan yang didapat dari gelas dan graphit. Bahan ini memiliki ketahanan ruptur 300 hbar (=3000M.Pa), modulus elastisitas 130.000 M.Pa dan densitas 1,45 gr/cm³.

Serat-serat yang diikal tersebut di atas dihubungkan dengan resin epoksi dan mengalami proses polimerisasi sehingga dihasilkan material mempunyai karakteristik mekanik (hasil dari Dupont de Nemours) seperti pada Tabel 3-1 (Dardare J. et al 1975, Deier M dan Duedal 1985). Proses pengikalan seperti pada Gambar 3-1. Contoh material komposit hasil pembentukan tipe *isotensiod* (material *filament winding*) seperti pada Gambar 3-2 (Dardare J. et al, 1975).



Gambar 3-1: Pengikalan material *filament winding*



Gambar 3-2: Material komposit *Isotensiod* (material *filament winding*)

Tabel 3-1: KARAKTERISTIK MEKANIK STRUKTUR DARI *FILAMENT WINDING*, Dupont de Nemours (KOMPOSIT ANYAMAN SATU ARAH DENGAN RESIN EPOKSI) (Dardare J. et al, 1975)

Karakteristik	Gelas	Poliamida PRD 49	Graphit dengan Modulus Tinggi
Densitas (gr/cm ³)	2,07	1,38	1,52
Tahanan tarik arah serat (M.Pa)	1120	1400	1260
Tahanan tekanan arah serat (M.Pa)	600	280	1120
Tahanan tarik tegak lurus serat (M.Pa)	35	28	42
Tahanan tekanan tegak lurus serat (M.Pa)	140	40	63
Tahanan patah parallel serat (M.Pa)	63	45	63
Koefisien Poisson	0,30	0,34	0,25
Modulus Young paralel serat (M.Pa)	39.900	84.000	133.000
Modulus Young tegak lurus sera	9.100	5.600	6.300

Tabel 3-1 menunjukkan bahwa bentuk struktur dan penyebaran serat-seratnya harus lurus dan terjaga kuat tariknya. Bungkus ruang propulsif dibuat dengan mengikal serat-serat secara kontinyu yang dikerjakan pada kepompongnya (tabung pemegang), mendapatkan bentuk sederhana, bentuk kecil dan bentuk yang ekstrem.

Profil *isotensoid* seperti pada Gambar (3-2) paling banyak digunakan. Dibuat dengan perendaman serat halus dalam resin, pada bagian silindris dari bentuk yang direncanakan dipintal secara *helical*, kemudian pada ujung depan dan belakang mengikuti garis *geodetic*. Untuk memungkinkan penyebaran secara seragam dari beban setiap serat halus maka ikalan utama disempurnakan pada bagian silindris struktur dengan ikalan melingkar yang ketebalannya tergantung pada langkah dari ikalan memanjang. Pengerjaan benang selama proses perendaman dan pengikalan harus dilakukan dengan sangat teliti untuk memperkecil kerusakan. Dari Tabel 3-1, untuk serat gelas, karakteristik mekaniknya sampai dengan 350 bar (= 35 M.Pa) tapi kemudian turun menjadi 200 hbar setelah melalui

proses sumbu lilin, perendaman dan pengikalan dalam suatu tabung pemegang.

Sesudah pengikalan, kemudian dimasak dalam suatu tungku untuk mempolimerisasi resin dan mendapatkan struktur keras. Hasil yang didapat tidak tahan air. Supaya tidak berubah bentuknya membutuhkan pemeliharaan 6 kali lebih banyak dari pada pemeliharaan baja (untuk ikalan gelas).

4 PEMBAHASAN

Pertimbangan penggunaan terutama berdasarkan karakteristik mekanik, proses pembuatannya, sehingga mampu berfungsi sebagai struktur sistem propulsif motor roket padat.

Dari karakteristik ke 3 kelompok material ini (Tabel 2-1) dapat dilihat bahwa untuk kelompok baja yang dapat dilas mempunyai densitas yang cukup tinggi. Material ini adalah yang digunakan selama ini untuk struktur motor roket padat. Dari karakteristiknya kelompok material ini baik untuk digunakan tetapi faktor densitasnya menjadi pertimbangan karena dengan

beratnya struktur akan sangat berpengaruh antara lain pada gaya dorong, rasio berat struktur terhadap berat keseluruhan wahana dan sangat berhubungan dengan misi dari wahana. Di samping itu juga ditemui masalah pada proses pembentukan silinder yang tipis.

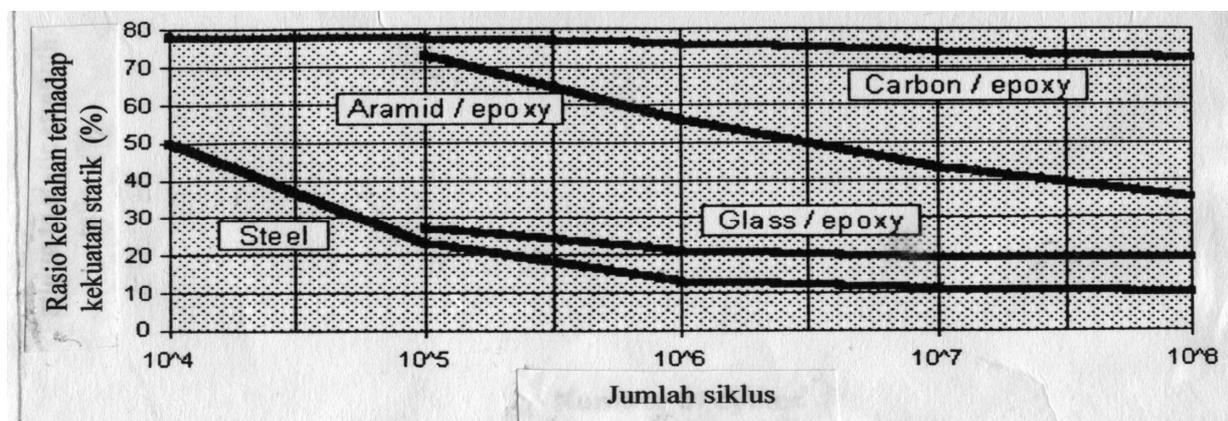
Untuk kelompok paduan titanium banyak digunakan untuk struktur ini terutama karena rasio kekuatan terhadap beratnya tinggi sehingga memungkinkan beban guna yang dibawa lebih tinggi. Material ini umumnya tidak rentan terhadap korosi pada temperatur normal, dapat kehilangan kekuatannya atau sifat fisik lainnya jika dalam tekanan (tekanan ruang bakar yang dapat mencapai $\pm 70 \text{ kg/cm}^2$).

Kelompok material tipe *maraging* karena karakteristiknya bagus maka banyak digunakan untuk ruang propulsif yang besar (sampai dengan diameter 6,5 m) dari motor roket padat. (<http://www.lr.tudelf.nl/live/pagina.jsp?Id=17eadbf4-ec>).

Kelompok paduan aluminium mempunyai ketahanan yang rendah dan meskipun densitasnya rendah, sehingga tidak digunakan untuk struktur ruang propulsif motor roket padat (<http://www.lr.tudelf.nl/live/pagina.jsp?Id=17eadbf4-ec5c>). Pertimbangan lain adalah karena tidak tahan terhadap korosi.

Kelompok material komposit yaitu dari serat glass sampai karbon epoksi mempunyai ketahanan yang cukup tinggi dan densitas yang rendah. Material komposit memiliki ketahanan terhadap kelelahan lebih tinggi dari pada baja, seperti terlihat pada Gambar 4-1.

Pertimbangan dari penggunaannya menunjukkan pada saat ini kelompok material komposit sudah lebih banyak digunakan. Terjadinya bencana pada pesawat ulang-alik Challenger pada tahun 1986 disebabkan adanya kesalahan pada rancangan penyambungan dari material baja untuk *boosternya*. Berikutnya diganti dengan material FWC (*filament wound cases*) (ref. no. <http://enWikipedia.org/wiki/>, <http://www3.interscience.wiley.com/journal/109597931>). Material FWC untuk *booster* mempunyai rancangan penyambungan *double tang* untuk memegang *booster* sungguh-sungguh pada posisi yang segaris selama dalam pergerakan ketika SSMEs (*Space Shuttle Main Engines*) dinyalakan untuk naik. Selain itu material komposit ini sudah banyak digunakan untuk ruang propulsif termasuk pada bagian noselnya (<http://www.lr.tudelf.nl/live/pagina.jsp?Id=17eadbf4-ec>, <http://enWikipedia.org/wiki/> dan <http://www3.interscience.wiley.com/journal/109597931>). *Booster* adalah motor roket pendukung motor roket utama pada wahana peluncur.



Gambar 4-1: Sifat kelelahan material komposit

5 KESIMPULAN

Dari analisis penggunaan material struktur sistem propulsif motor roket padat dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Material ini terdiri atas 3 kelompok yaitu material baja yang dapat dilas, material paduan titanium dan paduan aluminium dan material serat halus (material komposit),
- Material baja yang dapat dilas ada beberapa macam yaitu material ketahanan tinggi, material yang tak dapat dioksidasi dan material-material yang mengandung baja. Material ketahanan tinggi, material yang tak dapat dioksidasi dan material dengan kandungan baja rata-rata sudah banyak digunakan sebagai struktur ruang propulsif tetapi densitasnya juga tinggi sehingga menyebabkan berat struktur tinggi dan sering ada masalah dalam pembentukannya,
- Material paduan titanium mempunyai rasio kekuatan terhadap berat yang ekstrem, tahan terhadap korosi, sehingga penggunaan material ini dapat meningkatkan kemampuan mengangkat beban guna,
- Material paduan aluminium tidak digunakan untuk struktur ruang propulsif, karena tidak tahan terhadap korosi meskipun densitasnya rendah,
- Material tipe *maraging* karakteristik tinggi dan stabil, penyimpanan karbon yang bagus, ketahanan permukaan bagus. Material ini bagus untuk struktur ruang propulsif dengan diameter besar (sampai diameter 6,5 m),

- Material berserat halus ada 3 macam yaitu serat gelas, serat graphit dan serat poliamida. Material ini mempunyai kekuatan tinggi setinggi material yang dapat dilas tetapi mempunyai ketahanan kelelahan lebih tinggi. Material ini menjadi alternatif utama untuk penggunaan struktur ruang propulsif,
- Dari permasalahan yang dihadapi LAPAN untuk mendapatkan struktur ruang propulsif motor roket padat tanpa las, tipis, kekuatan tinggi dan ringan, maka pembahasan ini diharapkan dapat menjadi masukan.

DAFTAR RUJUKAN

- Dardare J, J.Meriguet, L. Vailhe, 1975. *Reacteurs Fusees Tome II, Les Propulsuers A Poudre*, ENSAE, Toulouse, France.
- Deier, M., D. Duedal, 1985. *Guide Pratique Des Materiaux Composites, Technique et Documentation* (Lavoisier), Paris, France.
- http: [www.lr.tudelf.nl/live/pagina.jsp?Id = 17 eadbf 4-ec5c](http://www.lr.tudelf.nl/live/pagina.jsp?Id=17eadbf4-ec5c). *Properties of Specific Structural Materials Used for Rocket Motors*. Last edited 17 March 2009.
- <http://enWikipedia.org/wiki/>, [Space_Shuttle_Solid_Rocket_Booster](http://enWikipedia.org/wiki/Space_Shuttle_Solid_Rocket_Booster). *Space Shuttle Solid Rocket Booster*. Download Februari 2009.
- <http://www3.interscience.wiley.com/journal/109597931>, Wiley Interscience: JOURNAL: *Polymer Engineering Science*. Download Februari 2009.