

RANCANG BANGUN TABUNG KOMPOSIT TEKANAN TINGGI UNTUK PROPELAN ROKET CAIR KOROSIF (DESIGN OF COMPOSITE OVERWRAPPED PRESSURE VESSEL FOR CORROSIVE LIQUID ROCKET PROPELLANT)

Arif Nur Hakim, Panataran Sitinjak, Taufiqur Rochman
Peneliti Pusat Teknologi Roket
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
Jl. Raya LAPAN No. 2, Mekarsari, Rumpin, Bogor 16350 Indonesia
e-mail: arif.nurhakim@lapan.go.id

Diterima 12 September 2015, Direvisi 20 November 2015, Disetujui 23 November 2015

ABSTRACT

Composite overwrapped pressure vessel (COPV) has been designed to reduce structural weight of propellant vessel of liquid rocket. The operational pressure expected is 150 bar and the vessel is required to be resistance to nitric acid which is very corrosive. Numerical simulation has been carried out to predict the structural strength of SS304 vessel. Stainless steel SS304 was chosen as liner due to excellence corrosion resistance characteristics and relatively low cost. The liner was overwrapped with carbon fiber and EPR 174 epoxy resin manually by hand lay up method. Hydrostatic test has been conducted to examine the strength of vessel and X-ray test has been used to analyze its condition after the hydrostatic test. The weight of the composite vessel was 9.1 kg or around 67% lighter compared with vessel made from SS304 with 5.5 mm thickness. The results shows that the composite vessel can withstand a static pressure up to 200 bar, however there was a slight leak. Stretching process has been done on the first loading by increasing the pressure gradually, so the vessel will stretch appropriately and keep carbon composite bonded to the liner vessel, and prevent the structural failure of vessel up to 200 bar.

Key words: Liquid propellant vessel, Corrosive, Composite, Liner

ABSTRAK

Rancang bangun tabung komposit tekanan tinggi (COPV) telah dilakukan untuk memperkecil berat struktur tabung propelan wahana roket cair. Tekanan operasi yang diharapkan dari tabung ini adalah 150 bar dan harus mampu menahan asam nitrat yang bersifat sangat korosif. Simulasi numerik dilakukan untuk memprediksi kekuatan struktur tabung SS304. *Stainless steel* SS304 dipilih sebagai tabung *liner* karena karakteristik ketahanan yang bagus terhadap korosi dan biaya yang relatif murah. Tabung *liner* kemudian dilapisi dengan serat karbon dan resin epoxy EPR 174 secara manual dengan metode *hand lay up*. Uji hidrostatis dilakukan untuk menguji kekuatan tabung dan uji *X-ray* digunakan untuk menganalisa kondisinya setelah uji hidrostatis. Berat riil tabung komposit adalah 9,1 kg, atau 67% dari berat tabung yang menggunakan SS304 setebal 5,5 mm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tabung komposit tersebut dapat menahan tekanan statis hingga 200 bar, namun masih ada sedikit kebocoran. *Stretching* dilakukan pada pembebanan pertama dengan menaikkan tekanan secara perlahan-lahan sehingga tabung akan meregang secara tepat dan menjaga komposit tetap terikat pada tabung *liner* dan dapat mencegah kegagalan struktur hingga tekanan 200 bar.

Kata kunci: *Tabung propelan cair, Korosif, Komposit, Liner*

1 PENDAHULUAN

Sebagai *milestone* menuju roket pengorbit satelit (RPS), program pengembangan roket cair telah dimulai dengan dilakukannya pengembangan mesin berbahan bakar gas oksigen dan kerosene [Rukmini *et al.*, 2000] [Hakim, 2010] yang kemudian berlanjut pada pengembangan mesin dengan pasangan propelan asam nitrat dan kerosene, yakni mesin ECX300H [Hakim, 2011] dan mesin ECX1000H [Hakim, 2015] yang masing-masing didesain dapat menghasilkan gaya dorong maksimum 300 kgf dan 1000 kgf. Kedua mesin terakhir menggunakan sistem pengumpan gas *inert* bertekanan. Suplai propelan dilakukan dengan menekan propelan dari tabung propelan menuju ruang bakar menggunakan gas bertekanan yang dialirkan dari tabung gas tekanan tinggi. Sistem ini memerlukan tabung tekanan tinggi baik untuk propelan maupun untuk gas pendorongnya.

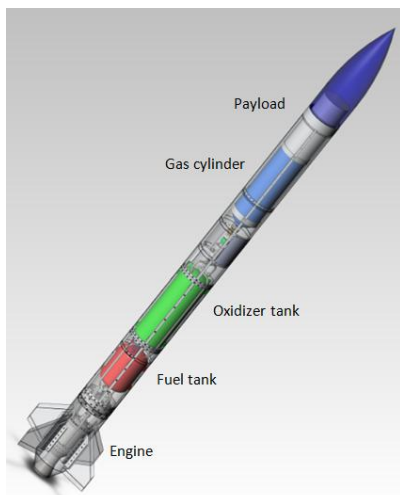
Pada pengujian darat yang telah dilakukan, tabung propelan menggunakan material *stainless steel* SS304 untuk oksidator asam nitrat yang bersifat sangat korosif [Hakim, 2015] dengan tekanan di bawah 70 bar. Pemilihan material ini dilakukan dengan pertimbangan kemampuan menahan tekanan tinggi dan ketahanan terhadap

sifat korosif propelannya. Untuk pengujian darat, pertimbangan berat bukanlah hal yang utama, tabung dapat dibuat lebih tebal dengan *safety factor* yang lebih tinggi. Namun untuk uji terbang, berat struktur menjadi hal yang krusial, sehingga harus dibuat sekecil mungkin. Sejatinya untuk uji terbang masih dimungkinkan penggunaan material *stainless steel* sebagai material tabung propelan, namun untuk menambah kinerja terbang diperlukan pengurangan berat struktur, salah satunya dengan cara mengurangi berat tabung propelan. Porsi pengurangan berat struktur dapat dikonversikan menjadi penambahan propelan sehingga waktu pembakarannya menjadi semakin lama dan jarak yang ditempuh semakin jauh. Ilustrasi wahana roket cair dengan sistem pengumpan gas bertekanan ditunjukkan pada Gambar 1-1.

Tabung tekanan tinggi dari komposit saat ini sudah banyak digunakan sebagai pengganti tabung dari material logam, baik untuk kendaraan darat yang menggunakan bahan bakar gas [Radhika *et al.*, 2014], untuk pesawat [Mital *et al.*, 2006] maupun untuk roket yang memang memerlukan tabung bertekanan tinggi. Penggunaan dalam roket meliputi penggunaan untuk tabung gas helium [Tam *et al.*,

2002] maupun tabung propelan [Abumeri *et al.*]. Terkait dengan tabung komposit, saat ini sudah banyak sekali dilakukan riset di berbagai tempat di dunia dan sudah dapat diproduksi dengan reliabilitas yang tinggi, namun masih banyak fenomena yang belum sepenuhnya dipahami, misalnya terkait dengan mode kegagalan oleh *stress rupture* [McLaughlan *et al.*, 2011]. Selain mode kegagalan tersebut, beberapa mode kegagalan lain yang telah diidentifikasi, antara lain, akibat *over pressure* dan hal yang terkait dengan *linernya*, baik kekuatan *liner* itu sendiri maupun yang terkait dengan ikatan antara *liner* terhadap kompositnya, tergantung jenis materialnya. Beberapa *liner* yang digunakan dalam tabung komposit ini di antaranya, jenis plastik dan logam [Kong *et al.*, 2004] [Lifshitz *et al.*, 1995] [Kawahara *et al.*, 1996].

Tujuan riset dan pengembangan ini adalah untuk merancang tabung untuk propelan yang bersifat korosif dengan material komposit yang mampu menahan tekanan kerja propelan cair dan gas *inert* penekan propelan hingga 150 bar dan tekanan pecah hingga 200 bar. Diharapkan dengan pemilihan material komposit, berat total wahana akan berkurang sehingga pengurangan berat struktur tersebut dapat diganti untuk menambah jumlah propelan dan menambah waktu pembakaran lebih lama lagi.

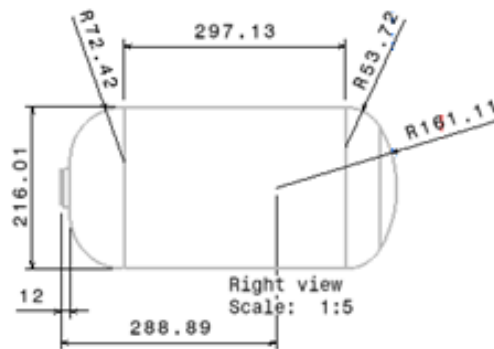


Gambar 1-1: Ilustrasi wahana roket cair

Tabung propelan yang akan didesain dan dibuat adalah tabung pengembangan tahap awal dengan konstruksi paling sederhana tanpa *baffle*. Batasan dimensinya adalah sebagai berikut:

- Volume ruang kosong 14.63L
- Diameter maksimal 230 mm
- Panjang Tabung 450 mm
- Tekanan operasi 150 Bar.
- Tekanan pengujian 200 Bar.

Dimensi dasar tabung *liner* dapat dilihat pada Gambar 1-2 berikut ini.



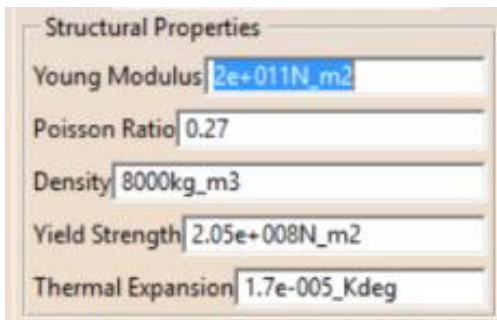
Gambar 1-2: Dimensi dasar tabung propelan roket cair

2 METODOLOGI

Proses rancang bangun dilakukan melalui 3 tahapan utama, yaitu proses perancangan, manufaktur dan pengujian. Proses ini dilakukan terhadap dua tabung. Proses pengujian terhadap tabung kedua dilakukan setelah tabung pertama selesai diuji.

2.1 Proses Desain

Proses desain dilakukan dengan melakukan simulasi tegangan statis tabung dengan material SS304 terlebih dahulu untuk mengetahui ketebalan minimalnya. Simulasi dilakukan dengan menggunakan Catia dengan *solver* NASTRAN dan *meshing* dibuat otomatis. Kondisi pada simulasi tersebut, tabung dipegang pada dua sisi atas dan bawah, kemudian di berikan gaya tekanan sebesar 200 bar pada 3 area yaitu area dinding *dome* atas, bawah dan dinding silindernya. *Structural properties* yang digunakan untuk simulasi ditunjukkan pada Gambar 2-1



Gambar 2-1: *Structural properties* untuk simulasi dengan NASTRAN

Setelah mengetahui ketebalan minimal tabung dengan material *steel*, kemudian ditentukan ketebalan tabung *liner* dan kompositnya. Namun ketebalan tabung komposit yang aman tidak dapat disimulasikan karena keterbatasan database *software* yang ada. Ketebalan ditentukan dengan penghitungan sederhana konversi ketebalan dari material SS304 ke material komposit berdasarkan nilai *ultimate tensile strength*. Penghitungan konversi ini dilakukan terhadap ketebalan aman tabung dengan SS304 setelah dikurangi ketebalan tabung *liner*. Kemudian untuk menambah faktor keamanannya dengan pertimbangan proses manufaktur yang tidak sempurna, ketebalan komposit dikalikan menjadi lebih dari dua kali lipat dari perhitungan konversi sederhananya. Hasil akhir desain ini kemudian muncul dalam bentuk gambar teknik lengkap.

2.2 Proses Manufaktur

Ada beberapa contoh metode yang umum digunakan dalam manufaktur komposit, di antaranya adalah dengan *filament winding* dan *hand lay up*. Mengenai hal ini, banyak literatur yang menjelaskannya, sebagai contoh adalah literatur [Mazumdar, 2002]. Dengan pertimbangan keterbatasan peralatan manufaktur, dalam pengembangan ini, metode yang dipilih dalam pengembangan ini adalah metode *hand lay up*.

Kemudian, dalam proses manufakturnya sendiri ada dua tahap proses manufaktur, yaitu pembuatan tabung

liner dan manufaktur komposit. Proses lengkapnya adalah sebagai berikut,

2.2.1 Pembuatan tabung *liner*

Dua buah tabung *liner* dibuat dari pelat *stainless steel* setebal dua mm. Pelat tersebut di roll dan dibuat dalam tiga bagian yaitu bagian atas dan bawah berbentuk setengah bola, dan bagian tengah berbentuk silinder. Masing masing bagian disatukan dan dilas dengan las argon.

2.2.2 Pembuatan *mattress* untuk pengepres lapisan komposit

Mattress dibuat dari komposit *fiberglass* dengan perekat *epoxy* tahan panas, sebagai alat bantu pengepresan lapisan komposit basah sebelum di oven, dengan tujuan untuk mendapatkan struktur yang padat dan untuk mengurangi udara yang terjebak didalam lapisan komposit yang terbawa pada saat pengolesan *resin epoxy* tahan panas (EPR 174). *Mattress* di belah menjadi dua bagian dan dikunci oleh 12 baut pada sekeliling telinga *mattress*. Bentuk kontur *mattress* mengikuti bentuk kontur luar tabung *liner*. Gambar 2-2 menunjukkan bentuk *Mattress* yang sudah selesai dicetak.



Gambar 2-2: *Mattress* pengepres

2.2.3 Pelapisan tabung *liner* dengan komposit karbon-epoxy

Tabung *liner* dilapis dengan kain karbon yang direkat dengan resin EPR 174. Pelapisan dilakukan lembar demi lembar sebanyak 20 lapisan (7mm setelah kering) dengan garis sambungan yang dipindah-pindah untuk tiap lapisan sehingga sambungan antar lapisan kain

karbon, selalu terletak pada tempat berbeda.

2.2.4 Proses pengepresan

Setelah tabung *liner* selesai dilapisi dengan kain karbon dan resin sebanyak 20 lapisan maka langkah selanjutnya adalah dilakukan pengepresan dengan *mattress*.

2.2.5 Proses pengeringan

Langkah berikutnya adalah melakukan pengeringan dengan oven untuk mematangkan resin dan mengeluarkan udara-udara yang terjebak diantara celah-celah kain karbon dan resin. Proses pengeringan dilakukan selama tiga jam dengan suhu 120 °C didalam oven. Setelah proses pemanasan selesai, tabung dikeluarkan dari oven, dan setelah dingin, *mattress* kemudian di buka.

2.3 Proses Pengujian

Tahap akhir adalah pengujian. Untuk menjamin bahwa dinding tabung yang di desain bisa dioperasikan sampai dengan tekanan 150 Bar maka tabung harus diuji hingga tekan 200 bar. Uji tekanan statik dilakukan dengan menggunakan *hydrostatic pump* yang mampu memompa cairan hingga tekanan 250 bar. Tabung diisi dengan air, setelah penuh lalu dipasang regulator dan diikat dengan kuat untuk menghindari kebocoran. Regulator tersebut kemudian disambungkan dengan *hydrostatic pump* melalui selang khusus yang tahan tekanan hingga 2900 bar yang dilengkapi dengan *pressure gauge* 250 bar dengan akurasi 10 bar untuk tiap divisinya, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2-3. Pengujian dilakukan dengan mengisi tabung dengan cairan hidrolik sampai penuh dan kemudian memompanya sampai tekanan 100 bar dan dibiarkan ditahan selama beberapa menit, kemudian dengan metode yang sama dilanjutkan dengan menaikkan lagi tekanan sampai 125 bar, 150 bar, 175 bar dan 200 bar. Setelah uji hidrostatis, kondisi tabung

ditest dengan X-Ray. Uji ini untuk melihat kondisi tabung bagian dalam.



Gambar 2-3: Set up uji *hydrostatic*

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisa Tegangan dan Pemilihan Bahan Tabung

3.1.1 Simulai global analisa statik

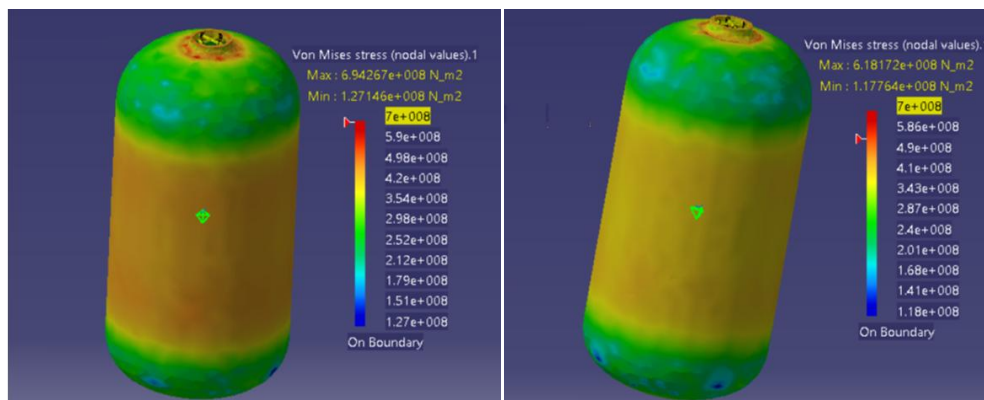
Kondisi operasi tabung propelan roket cair ini sama dengan kondisi operasi untuk tabung O₂, N₂, He, dsb. Oleh karena itu untuk pertimbangan dan parameter awal dalam simulasi kekuatan statik tabung yang dirancang dengan dimensi seperti yang telah dijelaskan di atas, maka bahan dan tekanan kerja bisa merujuk pada bahan dan tekanan kerja tabung oksigen yaitu menggunakan *steel* dan tekanan kerja 150 bar atau untuk keamanannya digunakan tekanan 200 bar untuk simulasinya.

Berdasarkan hasil simulasi tegangan statis, maka kekuatan statis dari material *steel* dapat di lihat secara global seperti pada Gambar 3-1, 3-2 dan 3-3. Gambar 3-1 menunjukkan hasil simulasi tabung dengan ketebalan dinding 4 mm dan 4,5 mm. Dari hasil simulasi tersebut terlihat bahwa tabung dengan ketebalan 4 mm dan 4,5 mm masing-masing mempunyai nilai maksimum Von Misses Stress 694 MPa dan 618 MPa, ini berarti sudah di atas nilai *ultimate strength* dari SS304 yaitu 515 MPa, sehingga bisa disimpulkan bahwa tabung dengan ketebalan 4 mm dan 4,5 mm dari bahan SS304 tidak akan kuat menahan beban tekanan 200 bar. Demikian pula tabung dengan ketebalan 5 mm yang mempunyai nilai maksimum

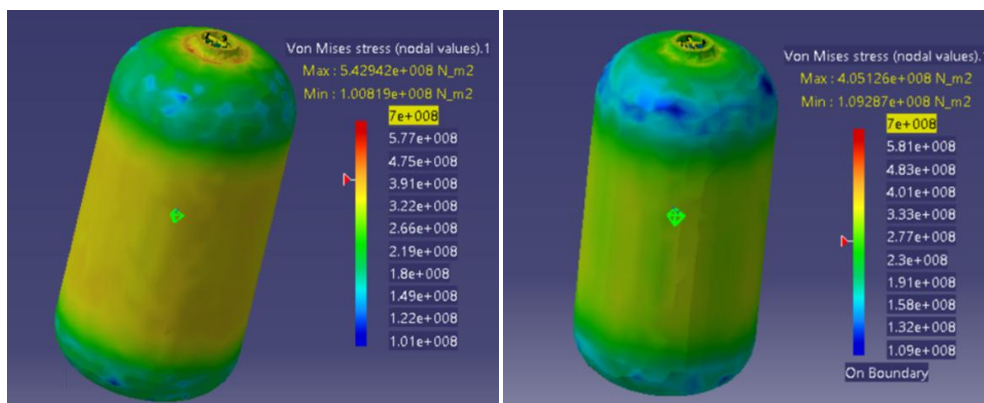
Von Mises Stress sebesar 542 MPa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-2, tidak akan mampu menahan beban tekanan hingga 200 bar karena masih di atas nilai *ultimate strength*-nya.

Tabung dengan ketebalan 5,5 mm sampai dengan 7 mm menghasilkan Nilai Von Misses Stress antara 359 MPa – 405 Mpa (Gambar 3-2 dan 3-3). Nilai ini jauh di bawah nilai *ultimate tensile strength* sehingga ketebalan ini dipertimbangkan cukup kuat untuk menahan tekanan 200 bar dengan catatan silinder SS304

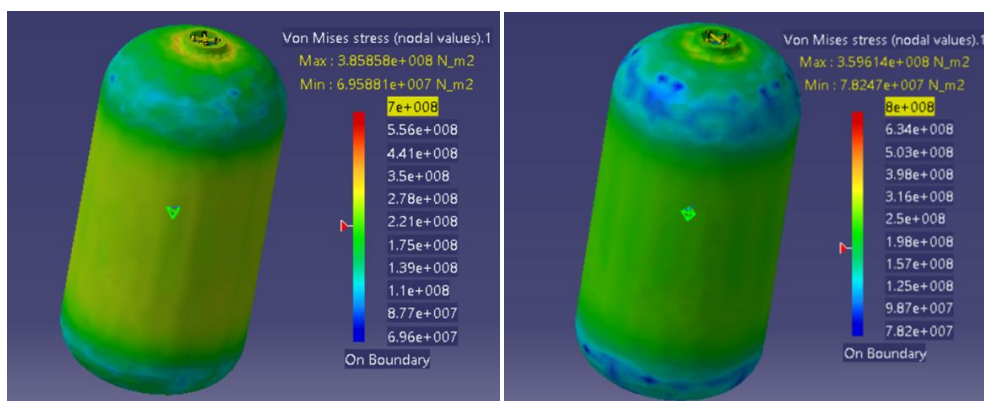
yang digunakan adalah *seamless*. Namun demikian, tabung SS304 ini mempunyai massa yang cukup berat. Pada desain tabung dengan ketebalan 5,5 – 7mm akan mempunyai berat tabung kosong mencapai 13,61 – 17,14 kg, ini belum termasuk berat *connector* dan regulator. Untuk itu harus di cari bahan yang jauh lebih ringan namun mempunyai kekuatan yang mampu menahan tekanan 200 Bar. Nilai Von Mises Stress maksimum hasil simulasi dirangkum pada Tabel 3-1.



Gambar 3-1: *Stress analysis* tabung dengan ketebalan dinding 4 mm (kiri) dan 4,5 mm (kanan)



Gambar 3-2: *Stress analysis* tabung dengan ketebalan dinding 5 mm (kiri) dan 5,5 mm (kanan)



Gambar 3-3: *Stress analysis* tabung dengan ketebalan dinding 6,5 mm (kiri) dan 7 mm (kanan)

Tabel 3-1: TEGANGAN *VON MISES* MAKSIMUM HASIL SIMULASI TABUNG DENGAN MATERIAL SS304

Thickness (mm)	Maximum Von Mises Stress (MPa)
4,0	694,27
4,5	618,17
5,0	542,94
5,5	405,13
6,5	385,86
7,0	359,61

3.1.2 Pemilihan bahan pengganti *steel*

Material alternatif pengganti *steel* yang cukup kuat terhadap tekanan tinggi dan ringan adalah material komposit. Ada dua jenis material komposit yang bisa dipertimbangkan sebagai pengganti *steel* yaitu *fiberglass* dan *fiber carbon*, dengan data sifat mekanisnya seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3-2. Dari tabel tersebut terlihat bahwa *ultimate strength* karbon mencapai 570-600 MPa sedangkan *fiberglass* mempunyai *ultimate strength* antara 425 – 440 MPa lebih rendah daripada karbon. Di samping itu massa jenis karbon juga lebih rendah dari pada *steel* maupun *fiberglass* sehingga secara otomatis akan lebih ringan daripada kedua material tersebut. Dalam industri praktis, *fiberglass* banyak digunakan sebagai bahan tabung bertekanan rendah, sementara untuk *fiber carbon* digunakan untuk tabung bertekanan tinggi.

Dalam perancangan dan pembuatan tabung propelan untuk roket cair yang bertekanan tinggi, yaitu bertekanan kerja 150 Bar dan akan dites pada tekanan 200 Bar, maka desain rancangannya akan berbasis material *fiber carbon* sebagai pengganti material - ketebalan dinding awal yang aman

untuk tekanan 200 bar, belum bisa dilakukan secara simulasi karena material komposit belum ada di dalam data *base software* untuk *static analysis* yang kami gunakan. Oleh karena itu harus dilakukan uji secara eksperimental. Tabel 3-3 menunjukkan gambaran perkiraan berat antara tabung dengan material *fiber carbon*, *fiberglass* dan SS304.

Tabung dibuat dengan kombinasi pelat *stainless steel* SS304 setebal 2 mm dan komposit karbon setebal 7 mm. Dengan kombinasi material tersebut maka tabung diperkirakan akan mempunyai berat kurang lebih 8.23 kg atau sekitar 60 persen dari berat jika menggunakan SS304 dengan tebal 5,5 mm, sesuai dengan ketebalan minimal yang aman hasil simulasi tersebut di atas. Dari perhitungan secara sederhana menggunakan *ultimate tensile strength* dari komposit karbon dan SS304, dapat diketahui ketebalan tabung komposit karbon 7 mm akan setara dengan SS304 setebal 8,1 mm, sehingga jika proses manufaktur komposit karbon setebal 7 mm dengan *liner* menggunakan *stainless steel* SS304 setebal 2 mm sempurna, maka secara teori kekuatannya akan jauh di atas SS304 setebal 5,5 mm.

Tabel 3-2: PROPERTIES MATERIAL FIBER KARBON, FIBERGLASS [http://www.performance-composites.com] DAN SS304

Parameters	Unit	Carbon		Fiberglass	SS304
		Std CF Fabric	Std CF Fabric UD	E glass Fabric	
Young's Modulus 0 deg	GPa	70	135	25	200
Young's Modulus 90 deg	GPa	70	10	25	200
Ultimate Tensile Strength 0 deg	MPa	600	1500	440	515
Ultimate Tensile Strength 90 deg	MPa	600	50	440	515
Ultimate Com Strength 0 deg	MPa	570	1200	425	
Ultimate Com Strength 90 deg	MPa	570	250	425	
Density	kg/m3	1600	1600	1900	8000

CF= Carbon Fiber, UD=Unidirectional

Tabel 3-3: PROPERTIES MATERIAL FIBER KARBON, FIBER GLASS [http://www.performance-composites.com] DAN SS304

Ketebalan dinding	mm	1	2	3	4	5	5,5	6	6,5	7
Massa tabung steel (SS304)	kg	2,54	5,06	7,54	9,99	12,41	13,61	14,79	15,97	17,14
Massa tabung komposit (50% CF + 50% Resin)	kg	0,47	0,93	1,39	1,85	2,29	2,52	2,74	2,96	3,17

Densitas : SS304 = 8000 kg/m3, CF = 1600 kg/m3, Resin = 1360 kg/m3

3.2 Revisi Desain

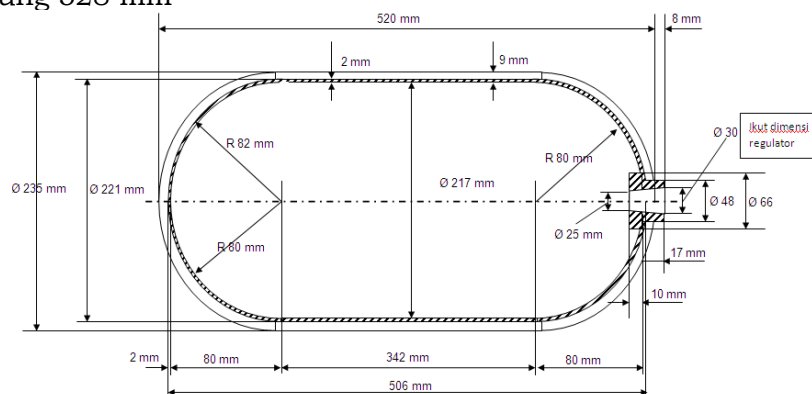
Untuk memudahkan dalam manufaktur, maka desain dimensi tabung di revisi sebelum proses pembuatan. Spesifikasi teknis dari revisi tersebut adalah sebagai berikut:

- Volume ruang kosong 15,38L
- Diameter silinder maksimal 235 mm
- Panjang tabung 528 mm

- Ketebalan dinding dan bahan akan digunakan, ditentukan kemudian pada pemilihan bahan.

- Tekanan operasi 150 Bar.
- Tekanan Uji 200 Bar.

Gambar 3-4 menunjukkan desain tabung yang telah direvisi dengan dimensi baru.



Gambar 3-4: Revisi *drawing* tabung propelan untuk roket cair

3.3 Hasil Rancang Bangun

Gambar 3-5 menunjukkan tabung *liner* SS304 hasil rancang bangun sebelum dilapisi komposit. Setelah melalui proses pelapisan, pengepresan dan pengeringan, hasilnya menjadi seperti pada Gambar 3-6. Pada gambar tersebut, masih terdapat ekses-ekses resin dan kain karbon yang biasanya terjadi pada pertemuan dua belah *mattress*. Ekses-ekses ini kemudian dibersihkan dengan gerinda tangan dan didapatkan produk tabung propelan final seperti terlihat pada Gambar 3-7. Berat riil tabung adalah 9,1 kg atau 1 kg lebih berat dari berat prediksi desain yang hanya 8,14 kg. Penambahan berat ini dikarenakan pada proses manufaktur riil, volume kain karbon dan perbandingan antara resin dan kompositnya berubah untuk memenuhi kebutuhan ketebalannya. Namun, berat riil tabung komposit ini masih sekitar 67 persen berat tabung jika menggunakan SS304 dengan tebal 5,5 mm, sesuai dengan ketebalan minimal yang aman hasil simulasi tersebut di atas.



Gambar 3-5: Tabung *liner stainless steel* hasil rancang bangun sebelum dilapisi komposit



Gambar 3-6: Tabung yang dikeluarkan dari *mattress* setelah proses oven



Gambar 3-7: Produk jadi tabung hybrid *stainless steel* - komposit karbon

3.4 Uji Hidrostatik dan Analisa Tabung Hasil Revisi Desain

Pengujian tabung pertama dimulai dengan memberi tekanan sebesar 50 Bar dan ditahan beberapa menit. Kemudian tekanan dinaikkan 25 bar pada setiap tahapannya dan ditahan hingga 3 – 5 menit hingga mencapai 125 bar. Setelah tekanan mencapai 100 bar, setiap tekanan dinaikkan lagi 25 bar, terdengar bunyi gemeretak sebentar. Bunyi ini tidak seperti suara logam dan tidak dapat diketahui secara jelas apa penyebabnya karena tidak ada pengukuran khusus, tapi diprediksi bunyi ini disebabkan karena adanya peregangan pada material komposit yang beradaptasi dengan peregangan tabung *liner*. Kemungkinan lain adalah lepasnya ikatan komposit dan *linernya* di beberapa tempat.

Ketika tekanan mencapai 150 bar, tekanan statis tersebut kemudian ditahan hingga 15 menit untuk memberikan *stretching* yang cukup pada material tabung. Setelah itu, tekanan kemudian dinaikkan lagi sebesar 25 bar hingga mencapai 175 Bar, kemudian terdengar lagi bunyi gemeretak sebentar, namun pada tekanan ini mulai ada rembesan kecil yang muncul di area batas dudukan konektor dan lapisan karbon (ilustrasi pada Gambar 3-8), hingga

mengakibatkan tekanan turun menjadi 170 bar dengan durasi waktu yang ditahan kurang lebih antara 5-10 menit.



Gambar 3-8: Daerah rembesan pada pengujian tabung pertama saat tekanan 175 bar

Tekanan tabung kemudian dinaikkan lagi hingga 195 bar, namun terdengar gemeretak agak keras seperti material yang sedang mengalami regangan yang cukup besar secara mendadak. Pada tekanan ini rembesan di area batas dudukan konektor dan lapisan karbon sedikit bertambah besar, namun ketika tekanan diteruskan hingga mencapai 200 bar, lapisan komposit karbon terbelah dua dengan diawali bunyi yang agak keras. Gambar 3-9 memperlihatkan retakan besar atau belahan yang terjadi pada lapisan komposit tabung pertama yang sedang di uji tekanan statik.



Gambar 3-9: Lapisan komposit karbon tabung pertama terbelah dua pada tekanan 200 bar

Kenaikan 25 bar pada setiap tahapan pengujian bisa jadi terlalu besar, sehingga pada daerah kritis, yakni daerah dengan beban tegangan yang tinggi seperti yang ditunjukkan pada hasil simulasi, ketika tekanan di atas 100 bar, kenaikan tekanan yang besar tersebut membuat material dinding tabung mengalami peregangan yang cukup ekstrim tanpa terlebih dahulu mengadakan penyesuaian elastisitas

sehingga diprediksi terjadi *over stretching* yang melemahkan daya rekat antara tabung *liner* dan komposit. Melemahnya daya rekat ini semakin meningkat ketika tekanan dinaikkan dan akhirnya menyebabkan terlepasnya ikatan antara komposit dan tabung *linernya*, sehingga akibatnya cairan fluida bertekanan tinggi itu merembes keluar melalui area batas dudukan konektor dan lapisan karbon pada tekanan 175 bar.

Dugaan yang lain adalah Ikatan yang terjadi antara lapisan komposit karbon dan *steel* dengan lem *epoxy* memang dari awal tidak cukup kuat sehingga ketika mendapat penambahan beban tekanan yang lebih tinggi lagi, ikatan antara tabung *liner* dan lapisan komposit tersebut lepas.

Lepasnya ikatan lapisan komposit karbon dan tabung *liner* menyebabkan turunnya kekuatan tabung secara keseluruhan dan akhirnya menyebabkan terjadinya keretakan awal lapisan komposit di daerah sambungan komposit. Keretakan ini terus memanjang seiring bertambahnya tekanan dan akhirnya terbelah menjadi dua ketika tekanannya mencapai 200 bar.

Pengujian tabung kedua dimulai dengan memberi tekanan pada tabung sebesar 50 Bar dan ditahan beberapa menit. Kemudian tekanan dinaikkan 10 bar pada setiap tahapannya dan ditahan hingga 5 – 10 menit hingga mencapai 150 bar.

Setelah tekanan mencapai 150 bar, pengujian dilanjutkan dengan menaikkan secara bertahap dengan kenaikan 5 bar untuk setiap tahapannya dan ditahan 5-15 menit untuk memberikan *stretching* yang cukup pada material tabung.

Ketika tekanan pengujian mencapai 175 Bar terdengar sedikit bunyi gemeretak (sebentar), diikuti adanya rembesan kecil yang muncul di area batas dudukan konektor dan lapisan karbon, hingga mengakibatkan tekanan turun menjadi 174 bar dengan durasi waktu kurang lebih 5 menit.

Pada saat tekanan dinaikkan dan ditahan di 201 bar, kebocoran akibat rembesan kecil di area berbatasan dengan konektor mengakibatkan penurunan dua bar pada tiap lima menit. Untuk menjaga agar tekanan tetap terjaga di 200 ± 1 bar, setiap lima menit tekanan ditambah atau dinaikkan dua bar. Pengujian statis tekanan 200 bar dilakukan selama 30 menit dengan hasil yaitu tabung masih utuh dan tidak mengalami retak.

Uji selanjutnya pada tabung kedua ini adalah dengan memberikan tekanan kejut hingga 175 bar secara kontinyu tanpa ada kenaikan bertahap. Setelah itu baru dinaikkan bertahap setiap 10 bar. Akan tetapi dikarenakan rembesan pada area berbatasan dengan connector meningkat, tekanan tidak bisa naik lebih dari 190 bar dan setelah itu turun kurang lebih 1 bar setiap menit. Namun demikian pada tekanan kejut ini tabung juga masih utuh dan tidak mengalami keretakan dinding. Gambar 3-10 menunjukkan kondisi tabung kedua setelah dilakukan uji hidrostatis.



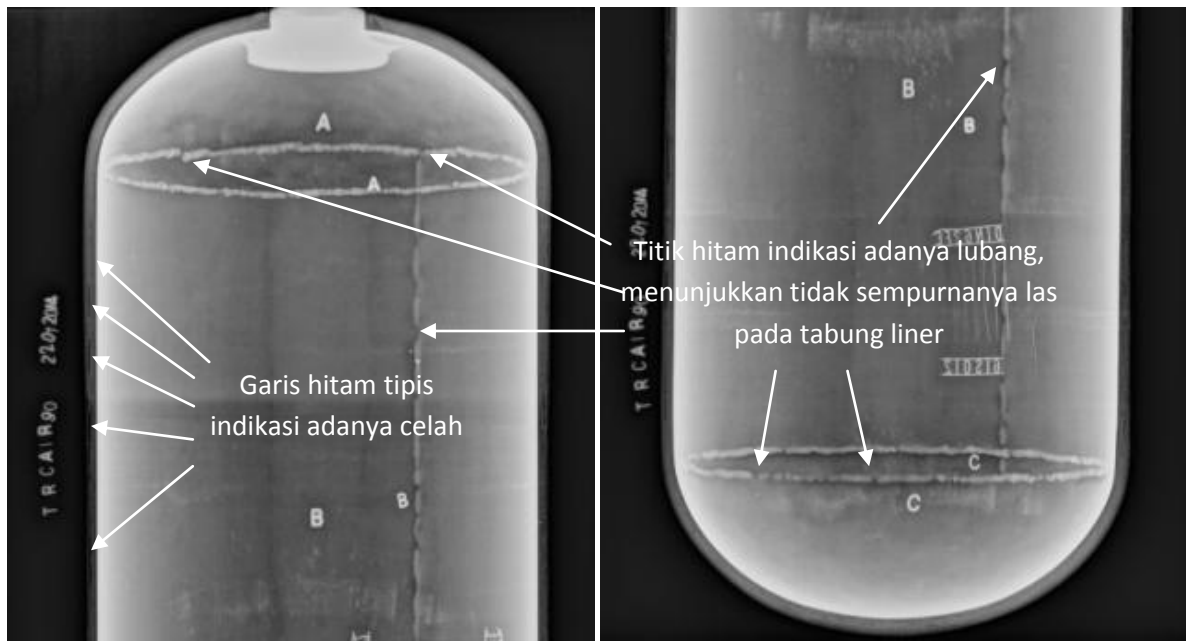
Gambar 3-10: Tabung komposit kedua setelah uji hidrostatis

Untuk memastikan kondisi tabung setelah pengujian dan penyebab terjadinya kebocoran, dilakukan uji X-Ray setelah uji hidrostatis terhadap tabung yang kedua untuk melihat lebih detail kondisi tabung bagian dalamnya. Hasil uji X-Ray dapat dilihat pada

Gambar 3-11. Dari gambar tersebut dapat dilihat banyak titik-titik hitam yang mengindikasikan kondisi las-lasan tabung *liner* memang kurang bagus. Warna hitam dapat dilihat sebagai lubang atau kekosongan material, sehingga dari gambar tersebut dapat diketahui terjadi kebocoran di cukup banyak tempat di bagian las-lasan. Kebocoran yang terjadi pada tabung *liner* menyebabkan cairan fluida yang keluar dari lubang di daerah las-lasan merembes di antara tabung *liner* dan komposit. Tekanan yang tinggi dari fluida menyebabkan ikatan antara komposit dan tabung *liner* lepas di beberapa titik yang ikatannya lemah sehingga timbul celah dan menyebabkan cairan merembet ke atas menuju ke celah antara batas konektor dengan komposit pada tekanan 175 bar.

Dari gambar tersebut juga dapat diketahui terdapat garis-garis hitam pada lapisan komposit dan di antara lapisan komposit dan tabung *liner*. Ini menunjukkan adanya celah pada tempat-tempat tersebut. Bunyi gemeretak pada saat uji hidrostatis kemungkinan berasal dari lepasnya ikatan antara lapisan-lapisan komposit dan antara lapisan komposit dengan tabung *liner*.

Lepasnya ikatan tersebut menyebabkan turunnya kekuatan untuk menahan gaya geser. Pada tabung pertama kombinasi antara lepasnya ikatan antara lapisan-lapisan komposit dan antara tabung *liner* dan lapisan komposit, tekanan tinggi fluida yang masuk ke celah antara tabung *liner* dan komposit, serta pemberian beban tekanan mendadak pada saat pembebanan pertama akhirnya menyebabkan lapisan komposit terbelah ketika tekanan mencapai 200 bar.



Gambar 3-11: Hasil X-Ray tabung komposit kedua

4 KESIMPULAN

Tabung komposit tekanan tinggi untuk roket cair telah dirancang dan dibuat sebanyak dua buah dengan metode hand lay up dengan melapisi tabung *liner* yang terbuat dari baja SS304 yang tahan terhadap sifat korosif setebal 2 mm dengan komposit karbon-*epoxy* setebal 7 mm dan kemudian dikeringkan. Kedua tabung mempunyai spesifikasi sama. Berat riil tabung komposit ini adalah 9,1 kg atau sekitar 67 persen dari berat tabung jika menggunakan material SS304 dengan tebal 5,5 mm, sesuai dengan ketebalan minimal yang aman hasil simulasi.

Pengujian hidrostatis dilakukan terhadap dua tabung tersebut untuk mengetahui kekuatannya. Dari hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa tabung komposit rancangan dapat menahan tekanan hingga 200 bar, namun masih ada kebocoran kecil.

Pada pengujian tabung pertama, kombinasi antara tekanan tinggi fluida yang masuk ke celah antara tabung *liner* dan komposit, lepasnya ikatan antara lapisan-lapisan komposit dan antara tabung *liner* dan komposit, serta pemberian beban tekanan mendadak pada saat pembebanan pertama menyebabkan lapisan komposit terbelah

ketika tekanan mencapai 200 bar. Sedangkan tabung komposit kedua dapat menahan tekanan yang diberikan secara kontinu sampai dengan 175 bar setelah dilakukan *stretching* (penyesuaian elastisitas) pada pembebanan pertama dengan menaikkan tekanan secara perlahan.

Untuk mengatasi permasalahan kebocoran dan meningkatkan kekuatan strukturnya, pada pengembangan berikutnya perlu dilakukan uji kebocoran terlebih dahulu terhadap tabung *liner*, dan perlu dilakukan penyempurnaan perekatan pada area joint antara metal dan komposit dengan *surface treatment* yang lebih baik dan pemilihan *epoxy* yang mempunyai daya rekat lebih kuat antara komposit dan metal. Selain itu, perlu juga dikaji lebih dalam terhadap kecukupan ketebalan komposit karbon.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih pada Ir. Nur Rohman dari PT Kuantum Tekno Kreatif atas kerja samanya dalam pengembangan tabung komposit ini, dan juga kepada kepala Pusat Teknologi Roket – LAPAN yang telah mendukung pengembangan tabung komposit ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Abumeri, G. H., Kosareo, D. N., Roche, J. M., 2004. *Cryogenic Composite Tank Design for Next Generation Launch Technology*, 40th AIAA/ASME/SAE/ ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit.
- Hakim, A. N., 2010. *Analisa Uji Bakar Roket RCX2 Berpropelan GOX-Kerosen*, Prosiding Seminar Nasional Thermofluid, Yogyakarta.
- Hakim, A. N., 2011. *Analisis Propulsi Enjin Roket Cair RCX300H dengan Storable Propellant Asam Nitrat dan Kerosen*, Prosiding Seminar Nasional IPTEK Dirgantara (SIPTEKGAN) XV, Jakarta.
- Hakim, A. N., 2015. *Rancang Bangun Enjin Roket Cair dengan Gaya Dorong 1000 Kgf Menggunakan Propelan Asam Nitrat-Kerosen*, Jurnal Teknologi Dirgantara Vol. 13 No. 1.
- http://www.performance-composites.com/carbonfibre/mechanicalproperties_2.asp diakses pada Juli 2013
- Kawahara, G., McCleskey, S.F., 1996. *Titanium Lined, Carbon Composite Overwrapped Pressure Vessel*, AIAA 96-2751.
- Kong, C. W., Yoon, J. H., 2004. *Design of Composite Pressure Vessels with Metallic and Plastic Liners*, Key Engineering Materials, 261, 1505-1510.
- Lifshitz, J. M., Dayan, H., 1995, *Filament-wound pressure vessel with thick metal liner*, Composite Structures 32, 313-323.
- Mazumdar, S. K., 2002, *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, CRC Press LLC.
- McLaughlan, P. B., Forth, S. C., Grimes-Ledesma, L. R., 2011. *Composite Overwrapped Pressure Vessels, A Primer*, NASA/SP-2011-573.
- Mital, S. K., Gyekenyesi, J. Z., Arnold, S. M., Sullivan, R. M., Manderscheid, J. M., Murthy, P. L. N., 2006. *Review of Current State of the Art and Key Design Issues with Potential Solutions for Liquid Hydrogen Cryogenic Storage Tank Structures for Aircraft*, NASA/TM-2006-214346.
- Radhika, M., Shekar, K. C., Rao, G. V., 2014, *Design, Fabrication and Testing of Composite Overwrapped Pressure Vessel for CNG Storage*, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 3, Issue 12.
- Rukmini, S. D., Wahyuni, D., Wasi, D. R., Sufri, A., 2000. *Penelitian Sistem Propulsi Cair dengan Pendingin pada Ruang Bakar*, Jurnal Nusantara Kimia No. 2.2. Vol VII Tahun ke-7.
- Tam, W. H., Griffin, P. S., Jackson, A. C., 2002. *Design and Manufacture of a Composite Overwrapped Pressurant Tank Assembly*, AIAA 2002-4349.

