

# Simulasi Komposit Isopoliester/Serat Kaca untuk *Compressed Natural Gas* (CNG) Tipe IV dengan Variasi Arah Serat terhadap Tekanan Internal

M.Imam Bukhori dan Lukman Noerochim

Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

*E-mail:* lukman@mat-eng.its.ac.id

**Abstrak**—Komposit serat kaca/Isopoliester memiliki potensi untuk dibentuk menjadi tangki CNG tipe IV sebagai alternatif bahan yang mudah dibuat dan murah. Studi ini menggunakan simulasi numerik dengan metode elemen hingga untuk mengkaji kemampuan komposit dalam menerima beban tekanan internal. Faktor keamanan yang digunakan adalah 1,5 sehingga nilai tekanan internal yang diaplikasikan sebesar 30 Mpa. Jumlah lapisan laminat dan konfigurasi arah serat dipilih sebagai variabel bebas. Analisa numerik tangki CNG dilakukan dengan menggunakan program MSC Nastran. Distribusi pergeseran pada tangki menunjukkan konfigurasi sudut (0,90) memberikan hasil optimum untuk diaplikasikan. Jumlah lapisan minimum yang dibutuhkan pada komposit adalah 24 lapis laminat sesuai kriteria kegagalan Tsai-Hill. Namun demikian tebal yang cukup besar 15,3 mm menyebabkan, material komposit serat kaca/isopolester tidak disarankan sebagai alternatif bahan pembuatan tangki CNG tipe IV.

**Kata Kunci**—Analisa numerik, komposit laminat, serat kaca, isopolyester, tangki *compressed natural gas* (CNG) tipe IV.

## I. PENDAHULUAN

PENGGUNAAN gas alam pada kendaraan bermotor umumnya menggunakan *Compressed Natural Gas* (CNG) daripada *Liquidified Natural Gas* (LNG). Hal ini dikarenakan efisiensi produksi CNG lebih tinggi daripada LNG yang memerlukan proses regasifikasi sebelum dapat didistribusikan melalui jalan darat [1]. Namun, salah satu permasalahan dari penggunaan CNG adalah kebutuhannya terhadap tempat penyimpanan yang lebih baik dari LNG karena tekanannya yang lebih besar, sekitar 200-220 bar [2]. Oleh karena itu, berbagai jenis material telah dikembangkan agar dapat memenuhi standar tersebut.

Terdapat empat macam tabung CNG. Tabung tipe IV terbuat dari komposit polimer yang menggunakan plastik HDPE di bagian dalam yang diproduksi dengan *blow molding*. Tetapi 90% tabung CNG yang saat ini bersedar di pasaran masih terbuat dari logam yang merupakan jenis tabung tipe I. Logam sebagai material yang memiliki massa jenis yang tinggi dapat menghambat laju dari kendaraan sehingga mulai dikembangkan dan dipasarkan tabung tipe IV yang bermassa lebih ringan. Permasalahan yang muncul dari penggunaan

tabung CNG tipe IV adalah harganya yang mahal jika dibandingkan dengan tiga jenis tabung lainnya.

Berbagai macam jenis komposit polimer dapat digunakan dalam pembuatan tabung CNG tipe IV selama dapat memenuhi standard E/ECE/324. Telah banyak penelitian yang berusaha mencari komposisi komposit yang tepat agar diperoleh sifat yang optimum. Resin epoksi telah banyak diteliti dan menunjukkan hasil yang memuaskan. Tetapi, harga resin epoksi cukup tinggi sehingga kita dituntut untuk mencari alternatif bahan yang lebih terjangkau tetapi tetap mempertahankan performansi yang ada [3]. Penelitian ini memilih material komposit serat kaca/vinil-ester untuk menggantikan dominasi serat karbon/epoksi dan serat kaca/epoksi.

Optimasi sifat mekanik dari tabung tidak hanya dengan pemilihan material tetapi juga melalui pemilihan parameter proses produksi. Komposit yang bersifat anisotropik dapat direkayasa agar dapat mendekati material isotropik (material kuasi-isotropik: arah [0, +45, -45, 90] dengan menggunakan lamina arah tunggal yang ditumpuk membentuk laminat dengan sudut yang berbeda-beda [4].

Penelitian-penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa sudut 55° merupakan besar sudut penggulungan tabung CNG [5]. Besar sudut optimum ini berlaku untuk komposit serat kaca E/epoksi dan juga serat gelas C/vinil-ester [6]. J.C. Velosa dkk [7] menggunakan sudut [90,(+20,-20)<sub>2</sub>]<sub>s</sub> dan hanya dapat menahan tekanan sebesar 1,9 MPa. Dengan arah serat [-70, +70, (-45, +45)<sub>2</sub>, -70, 0, (+45, -45)<sub>3</sub>, +45] dan rasio tegangan 0H:1A, F.Elliyyin dkk [8] mengetahui bahwa terjadi penjarangan retak pada lamina arah 70°. Bakaiyan dkk [9] membandingkan nilai indeks kegagalan Hill pada tabung dengan arah serat +θ, -θ, +θ - θ dan 90,90,+θ, -θ. Konfigurasi sudut 90, 90, +35, -35 memiliki kondisi teraman. Tegangan hoop, aksial, dan radial dibandingkan untuk dianalisis pengaruh serat terhadap tekanan internal. Berdasarkan hal-hal tersebut, dapat dirancang suatu tabung komposit dengan arah serat yang dapat menahan baik beban aksial tetapi juga beban hoop. Pada penelitian ini dianalisis pengaruh arah serat terhadap distribusi beban pada tabung

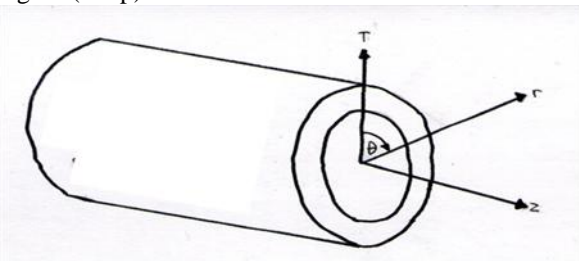
serta mencari ketebalan minimum untuk menahan tekanan 30 MPa.

II. PEMODELAN

Komposit yang dipakai adalah komposit DMX dan komposit DCMB yang diproduksi oleh PT Triaxis Composites. Merupakan komposit dengan penyusun matriks isopoliester dengan penguat serat kaca yang dikuatkan secara uniaksial

A. Analisis Tegangan dan Regangan

Tabung komposit mengacu pada sistem koordinat silindrikan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem koordinat silindrikan dipilih karena geometri yang dianalisis berbentuk silinder. Sumbu r menunjukkan arah radial, sumbu z menunjukkan arah aksial, dan sumbu T menunjukkan arah melingkar (hoop).



Gambar 1. Sistem koordinat silindrikan pada tabung komposit

Displacement (pergeseran) pada arah radial dan aksial hanya ditentukan oleh koordinat radial dan aksial. Sehingga, displacement akibat pemberian tekanan pada tabung dapat diekspresikan sebagai berikut :

$$u_r = u_r(r), u_\theta = u_\theta(r, z), u_z = u_z(z) \tag{1}$$

Tabung komposit diasumsikan sebagai material orthotropik dua dimensi [10]. Berdasarkan sistem koordinat silindrikan, hubungan tegangan regangan pada material orthotropik dua dimensi sesuai persamaan dapat diturunkan menjadi berikut :

$$\begin{bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \tau_{z\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_z \\ \epsilon_\theta \\ \gamma_{z\theta} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \sigma_z &= Q_{11}\epsilon_z + Q_{12}\epsilon_\theta \\ \sigma_\theta &= Q_{12}\epsilon_z + Q_{22}\epsilon_\theta \\ \tau_{z\theta} &= Q_{66}\gamma_{z\theta} \end{aligned} \tag{3}$$

B. Sifat Pelat Laminat Dua-Dimensi

Sifat pelat komposit dua dimensi dapat ditentukan dengan mengetahui matriks kekakuan laminat Qij.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \tag{4}$$

Notasi 1 dan 2 mengacu pada sumbu prinsipal material yang sejajar dan tegak lurus arah serat. Nilai komponen matriks dapat diketahui dari konstanta teknik.

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \tag{5}$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \tag{6}$$

$$Q_{32} = \frac{E_2}{1 - \nu_{21}\nu_{12}} \tag{7}$$

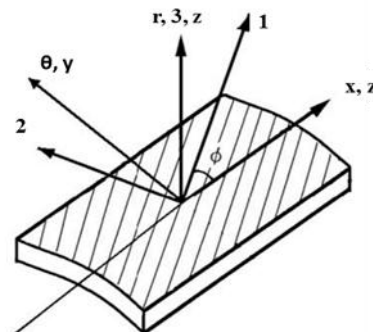
$$Q_{66} = G_{12} \tag{8}$$

Nilai tegangan dan regangan pada sistem koordinat silindrikan dan sistem koordinat lokal (serat) seperti yang tampak pada gambar 2. dapat dihubungkan dengan matriks transformasi [T].

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & \sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}_{70} = [T]_{70} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \tag{10}$$

Notasi theta merupakan besar sudut serat yang mengacu pada sumbu aksial.



Gambar 2. Hubungan antara sistem koordinat global, lokal dan silindrikan.

III. KONDISI BATAS

Kondisi batas ditentukan oleh kondisi struktur geometri dan kondisi pembebanan. Slip diasumsikan tidak terjadi saat proses pembebanan. Selain itu, tidak terdapat diskontinu pada tegangan dan displacement.

Gambar menunjukkan dimensi tabung yang dianalisis. Tumpuan diberikan di kedua ujung tabung pada arah x,y, dan z sehingga tabung dapat mengikuti hukum newton I. Beban yang diberikan berupa internal merata pada permukaan tabung sebesar 30 MPa dengan faktor keamanan sebesar 1,5.

Persamaan integral yang dapat digunakan dalam mendefinisikan beban yang diterima tabung adalah sebagai berikut :

$$N_{i=} \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_i dz = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \sigma_i^k dz \tag{11}$$

$$M_i = \int_{-h/2}^{h/2} z \sigma_i dz = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} z \sigma_i^k dz \tag{12}$$

Notasi N adalah gaya yang diaplikasikan sedangkan M adalah momen aplikasi.

Persamaan (11) menghubungkan antara kondisi batas dengan sifat material.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})_k] (h_k - h_{k-1}) \tag{14}$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})_k] (h_k^2 - h_{k-1}^2) \tag{15}$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})_k] (h_k^3 - h_{k-1}^3) \tag{14}$$

A, B dan D adalah konstanta integrasi. Tegangan, regangan, dan displacement tabung dapat diketahui setelah seluruh konstanta integrasi diketahui.

IV. KRITERIA KEGAGALAN

Kriteria kegagalan Tsai-Hill digunakan untuk memprediksi kekuatan lamina pada tabung komposit laminat. Kriteria kegagalan Tsai Hill ditulis dengan persamaan (15). Bentuk tensor dari kriteria ini adalah  $F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1$ .  $F_{ij}$  adalah parameter kekuatan material anisotropik.

$$\left[ \frac{\sigma_1}{(\sigma_1^T)_{ult}} \right]^2 - \left[ \frac{\sigma_1 \sigma_2}{(\sigma_1^T)_{ult}^2} \right] + \left[ \frac{\sigma_2}{(\sigma_2^T)_{ult}} \right]^2 + \left[ \frac{\tau_{12}}{(\tau_{12})_{ult}} \right]^2 < 1 \tag{15}$$

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Sifat Tarik Komposit

Dalam simulasi ini terdapat dua komposit yaitu komposit DCMB dan komposit DCMX. Masing-masing memiliki konstanta mekanik yang dipaparkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Sifat Mekanik Komposit

Properties (0)	DCMX	DCMX
E <sub>1</sub>	4800	15100
E <sub>2</sub>	4800	15200
G <sub>12</sub>	15200	4800
ν <sub>12</sub>	0.3	0.3
σ <sub>1</sub> <sup>ult</sup>	425	425
σ <sub>2</sub> <sup>ult</sup>	287	287
τ <sub>12</sub> <sup>ult</sup>	134	134

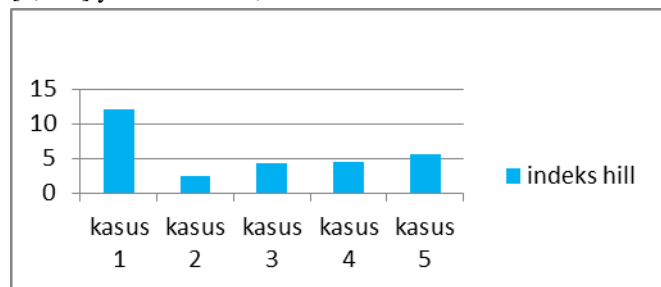
B. Konfigurasi Sudut Optimum Penggulangan

Pengaruh arah serat terhadap nilai kriteria kegagalan Hill komposit dapat diketahui dengan memodelkan 20 lamina dengan sudut [±θ] yang disusun secara berulang sebanyak 10 kali. Konfigurasi yang terdiri atas lebih dari satu jenis sudut dapat meningkatkan kekuatan secara signifikan [11]. Nilai indeks kegagalan Hill yang lebih rendah mungkin diperoleh melalui kombinasi dua sudut yang berbeda. Oleh karena itu, permodelan dilakukan pada seluruh kemungkinan kombinasi dua sudut dengan mengabaikan posisi sudut. Dalam simulasi ini konfigurasi sudut yang dipakai adalah :

Nama Permodelan	Konfigurasi Sudut
Kasus 1	[+45, - 45]
Kasus 2	[0, +90] <sub>s</sub>
Kasus 3	[+45, - 45, 0, 90] <sub>s</sub>
Kasus 4	[0, +90, + 45, -45] <sub>s</sub>
Kasus 5	[+45, 0, - 45, +90] <sub>s</sub>

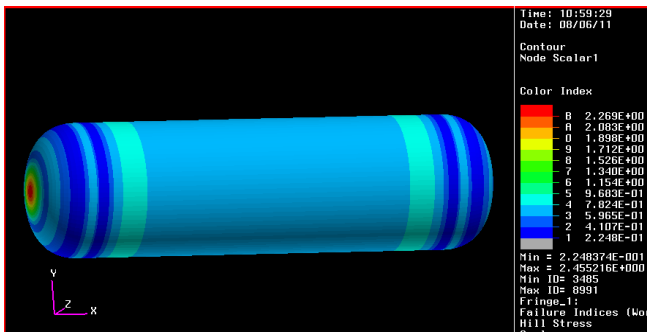
Tabel 2 Kasus permodelan laminat

Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai kriteria kegagalan minimum dicapai oleh kasus pemodelan 2 dengan nilai [0,+90] yaitu sebesar 2,46.



Gambar 4. Pengaruh konfigurasi dua sudut terhadap kriteria kegagalan Tsai Hill

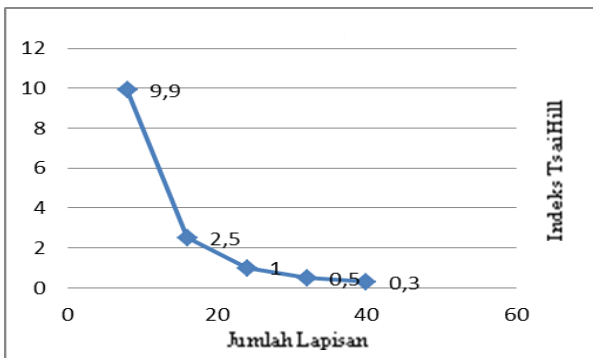
Dalam Gambar 5 dilampirkan distribusi indeks kegagalan tsai hill pada pemodelan dengan orientasi serat [0,+90] atau kasus 2.



Gambar.5. Distribusi indeks kegagalan tsai hill pada orientasi sudut [0,+90].

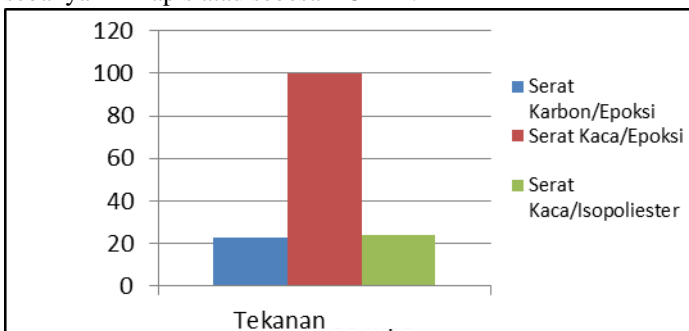
C. Ketebalan Minimum Tabung

Konfigurasi sudut optimum yang telah diperoleh sebelumnya yaitu konfigurasi kasus 1, (0,90) lalu digunakan untuk mencari jumlah lapisan minimum yang dibutuhkan. Permodelan akan dihentikan jika nilai indeks kegagalan telah dibawah satu (indeks kegagalan < 1).



Gambar 6. Pengaruh ketebalan terhadap kriteria kegagalan Tsai-Hill

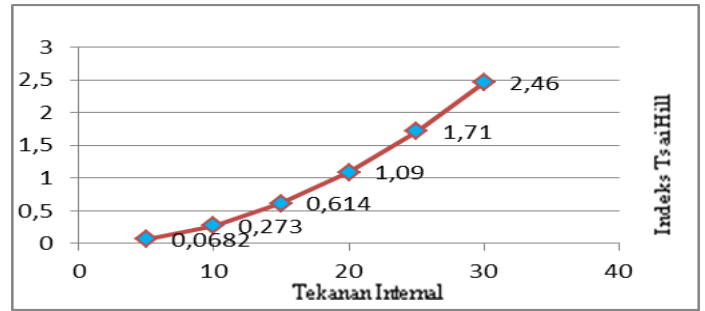
Gambar 6 menunjukkan bahwa jumlah lapisan minimum yang mampu menahan tekanan sebesar 30 MPa adalah sebanyak 24 lapis atau sebesar 15 mm.



Gambar 7. Perbandingan nilai indeks kegagalan untuk tiga jenis komposit

Komposit serat karbon/epoksi membutuhkan 23lapis (hasil interpolasi) untuk mampu menerima tekanan 30 MPa. Gambar 7 juga menggambarkan bahwa komposit serat kaca/isopoliester memiliki kemungkinan untuk mensubstitusi serat karbon karena jumlah lapis laminat yang dibutuhkan untuk menahan tekanan internal tidak jauh berbeda.

Gambar 8 menunjukkan bahwa komposit serat kaca/vinil ester dengan jumlah 16 lapis/10 mm mampu menahan tekanan internal hingga 20 MPa.



Gambar 8 . Nilai indeks kegagalan Hill untuk beberapa nilai tekanan dengan jumlah lapisan 16 lapis

VI. KESIMPULAN

1. Arah serat memberikan pengaruh yang signifikan pada distribusi beban di tabung. Distribusi beban merupakan hasil interaksi tegangan dengan arah serat. Arah serat yang berbeda menyebabkan perubahan nilai tegangan yang diterima.
2. Kombinasi sudut [0,90] pada komposit Isopoliester/Serat kaca merupakan konfigurasi penggulangan serat paling baik dalam menahan tekanan internal CNG tipe IV berdasarkan standar E/ECE/324.
3. Bagian alas dan dekat penutup tabung merupakan wilayah memiliki peluang terbesar untuk terjadinya kegagalan. Selain itu displacement akan semakin besar seiring semakin jauhnya suatu area dari pusat diameter tabung.
4. Pada aplikasi pembuatan tabung CNG tipe IV berdasarkan standar E/ECE/324 dengan material komposit serat kaca/isopoliester dibutuhkan 24 lapis laminat sehingga material ini tidak disarankan sebagai bahan untuk tangki CNG tipe IV

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hekkert, Marko P., Hendriks, Franka H.J.F., Faaij, Andre P.C., dan Neelis, Maarten L. 2005. "Natural Gas as an Alternative to Crude Oil in Automotive Fuel Chains Well-to-wheel Analysis and Transition Strategy Development", Energy Policy,33:579-594.
- [2] 2008.E/ECE/324 Addendum 109: Regulation No.110.United Nation
- [3] Gupta, N., Ye, R., dan Porfiri, M.2010."Comparison of Tensile and Compressive Characteristics of Vinyl Ester/Glass Microballoon Syntactic Foams",Composites : Part B, 41:236-245.
- [4] Niu, M. C. Y. 1992. Composite Airframe Structure : Practical Design Information and Data. Hong Kong : Commilit Press Ltd.
- [5] Onder, Aziz.2007.First Failure Pressure of Composite Pressure Vessels.Magister Thesis. Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylul University.
- [6] Rosenow, M.W.K.1984."Wind Angle Effects in Glass Fibre-Reinforced Polyester Filament Wound Pipes", Composites,15:144-152.
- [7] Velosa, J.C., Nunes, J.P., Antunes, P.J., Silva, J.F., dan Marques A.T.2009."Development of A New Generation of Filament Wound Composite Pressure Cylinders", Composite Science and Technology 69:1348-1353.
- [8] Elliyin, F., Carroll,M.,Kujawski,D.,dan Chiu, A.S.1997."The Behavior of Multidirectional Filament Wound Fiberglass/Epoxy Tubulars Under Biaxial Loading", Composites Part A,28A:781-790.

- [9] Bakaiyan, H., Hosseini, H., dan Ameri, E. 2009."Analysis of Multi-Layeres Filament-Wound Composite Pipes Under Combined Internal Pressure and Thermomechanical Loading with Thermal Variations", *Composites Structure* 88:532-541.
- [10] Calard, V.2011.*Formulas and Equations for The Classical Laminate Theory*.London.
- [11] Mertiny, P., ELLIYIN, F., dan HOTHAN, A. 2004."An Experimental Investigation on The Effect of Multi-Angle Filament Winding on The Strength of Tubular Composite Structure". *Composite Science and Technology* 64:1-9.