

DESAIN SISTEM PENGGADINGAN PADA STRUKTUR RING *STIFFENED PRESSURE HULL*

Alan Tigana Sabaruddin, Ahmad FauzanZakki, Berlian Arswendo Adietya
S1 Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Email : bonzsuit@gmail.com, ahmadfzakki@undip.ac.id, berlian@undip.ac.id

Abstrak

Trend yang berkembang dalam perancangan kapal selam menunjukkan adanya kebutuhan untuk tingkat kedalaman yang semakin meningkat untuk sektor industri ataupun militer. *Pressure hull* pada umumnya memiliki konstruksi baja tebal berkekuatan tinggi dengan struktur yang kompleks dan sanggup menerima tekanan tinggi. Desainer harus mengetahui karakter tekuk (*buckling*) dari *pressure hull* dan tekanan kritis yang diterima oleh struktur. Penelitian menganalisa *pressure hull* dengan variasi sistem penggadingan, ketebalan pelat yang digunakan 30 mm dan ukuran profil T yang digunakan. Pembuatan model dikerjakan di software FEM, dan *buckling analysis* akan dilakukan menggunakan software. Berdasarkan hasil analisa *pressure hull* kapal selam dengan menggunakan konstruksi *ring stiffened* maka *buckling load factor* paling kritis adalah 0,84057. Kedalaman maksimum yang bisa dicapai oleh *pressure hull* model 1 adalah 126,0855 m, sedangkan *pressure hull* model 2 adalah 171,106 m dan *pressure hull* model 3 adalah 129,561 m.

Kata kunci : Kapal selam, *pressure hull*, *buckling*, FEM

Abstract

An upward trend in developing a submarine design shows the need to the level of depth of the growing to the industrial sector or military. *Pressure hull* generally have a thick steel construction of a high with a complex structure and able to receive a high pressure. Designers need to know the character of buckling of the *pressure hull* and the critical pressure received by the structure. The research analyzed *pressure hull* with variation framing system, the thickness of the plates used 30 mm and the size of the T profile used. Making a model done in FEM software, buckling and analysis will be carried out using software. Based on analysis of the *pressure hull* submarine by using construction *ring stiffened* and *buckling load factor* is the most critical 0,84057. Maximum depth of which can be reached by *pressure hull* model 1 is 126,0855 m, while *pressure hull* model 2 is 171,106 m and the *pressure hull* model 3 was 129,561 m.

Keywords : Submarine, *pressure hull*, *buckling*, FEM

1. PENDAHULUAN

Secara umum, struktur kapal selam terdiri dari dua lambung, yaitu lambung luar (the outer hull) yang mana lebih difokuskan terhadap pengaruh beban-beban hidrodinamik sehingga biasa disebut hydrodynamics hull, dan lambung dalam (the inner hull) yang mana bagian ini adalah berfungsi untuk menahan tekanan hidrostatik pada saat kapal dalam kondisi menyelam. Berdasarkan dari fungsinya yang digunakan untuk menahan tekanan, maka bagian ini biasa disebut sebagai *pressure hull*, [1]. *Pressure hull* pada umumnya memiliki konstruksi baja tebal berkekuatan tinggi

dengan struktur yang kompleks dan sanggup menerima tekanan tinggi. Struktur yang biasa digunakan oleh pembuat kapal selam adalah tipe *ring stiffener*. Untuk mendapatkan *pressure hull* yang memiliki kemampuan menahan tekanan tinggi biasanya desainer juga membuat kapal selam berukuran besar, hal ini yang akan menjadi kasus dalam melakukan analisa kekuatan struktur *pressure hull* dengan beberapa variasi sistem penggadingan.

Masalah yang akan dipecahkan pertama adalah berapa besar tekanan yang dialami struktur dan yang kedua apakah besar tekanan struktur masih pada kondisi aman. Batasan masalah yang digunakan yakni kondisi pembebanan berupa tegangan maksimum dan

displasmen maksimum, jenis konstruksi yang dipakai hanya *ring stiffener* dan berdasarkan ABS “*Rules for Building and Classing Underwater Vehicles, System and Hiperbaric Facilities 2002*”. Tujuan yang ingin dicapai adalah mendapat desain sistem penggadingan yang memiliki tegangan terkecil dan berat konstruksi paling ringan serta dari beberapa variable bisa didapat kedalaman maksimum kapal selam.

2. TINJAUAN PUSTAKA

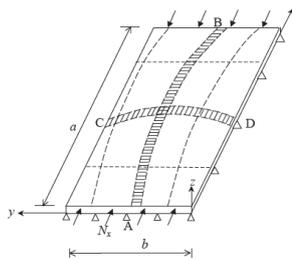
2.1 Buckling

Tegangan tekuk merupakan kondisi ketidakstabilan yang mengarah ke modus kegagalan. Secara teoritis, tegangan tekuk disebabkan oleh bifurkasi dalam solusi untuk persamaan keseimbangan statis. Adapun definisi lain mengenai tegangan tekuk ialah suatu proses dimana suatu struktur tidak mampu mempertahankan bentuk aslinya. Konsekuensi buckling pada dasarnya adalah masalah geometrik dasar, dimana terjadi lendutan besar sehingga akan mengubah bentuk struktur. Fenomena tekuk atau buckling dapat terjadi pada sebuah kolom, lateral bukling balok, pelat dan cangkang (shell).

Persamaan kesetimbangan untuk pelat diberikan oleh :

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{12(1-\nu^2)}{Et^3} \left(-N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (1)$$

dimana, w menunjukkan defleksi dalam arah z dari setiap titik (x, y) .



Gambar 1. *Buckling of Plate under Uni-axial Compression*

w dapat diasumsikan:

$$w = \sum_{m=1,2,3,\dots} \sum_{n=1,2,3,\dots} w_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2)$$

m dan n dalam pers. 2, menunjukkan jumlah setengah gelombang sinus dalam modus melengkung. Dapat dicatat bahwa ini diasumsikan bentuk otomatis memenuhi kondisi batas berengsel untuk pelat, yaitu $w =$

0 pada $x = 0, x = a, y = 0$ dan $y = b$. Pergantian pers. 2 dalam pers. 1 memberikan :

$$\left(\frac{m^4 \pi^4}{a^4} + 2 \frac{m^2 n^2 \pi^4}{a^2 b^2} + \frac{n^4 \pi^4}{b^4} \right) = \frac{12(1-\nu^2)}{Et^3} (N_x)_{cr} \frac{m^2 \pi^2}{a^2} \quad (3)$$

Karena itu,

$$(N_x)_{cr} = \frac{\pi^2 Et^3}{12(1-\nu^2)} \frac{(m^2/a^2 + n^2/b^2)^2}{m^2/a^2} = \frac{\pi^2 Et^3}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{m}{a} + \frac{n}{mb} \right)^2 \quad (4)$$

Nilai terendah dari membran tekuk stres $(N_x)_{cr}$, dalam Pers. (4) diperoleh untuk $n = 1$ dan dapat juga ditulis sebagai berikut,

$$(N_x)_{cr} = \frac{\pi^2 Et^3}{12(1-\nu^2)b^2} \left(m \frac{b}{a} + \frac{1}{mb} \right)^2 \quad (5)$$

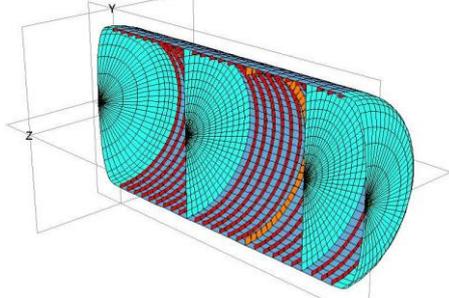
Yang menunjukkan kuantitas dalam tanda kurung lebih besar dengan k dan mencatat bahwa beban tekuk, NCR, adalah produk dari tekuk stres σ_{cr} dan ketebalan, kita mendapatkan stres tekuk sebagai,

$$\sigma_{cr} = \frac{k \pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b/t)^2} \quad (6)$$

2.2 Pressure Hull

Pressure hull biasanya dibangun dengan menggunakan kombinasi bentuk silinder, kerucut dan bentuk kubah (dome). Desain ini dibuat untuk menahan tekanan sebagai akibat menyelam pada tingkat kedalaman yang tinggi. Peningkatan tekanan untuk setiap penambahan kedalaman sebesar 100 kaki maka tekanan hidrostatik meningkat sebesar 44.5 psi untuk air laut standar dan 43.5 psi untuk air tawar [2]. Berat kapal selam tergantung dari kedalaman selam maksimum: dengan tingkat kedalaman selam yang lebih besar maka hal ini mengakibatkan diperlukan berat *pressure hull* yang lebih besar pula. Tingkat kedalaman yang digunakan sebagai pertimbangan desain yaitu: tingkat kedalaman operasional/normal, tingkat kedalaman maksimum yang diijinkan (*maximum permitted depth*) dan tingkat kedalaman gagal struktur (*collapse depth*). *Pressure hull* kapal selam tidak hanya dibangun untuk menahan besar tekanan hidrostatik, namun juga mampu untuk menahan kejutan ledakan yang keras. Pada tahun 1987, Ross memperkenalkan sebuah desain *pressure hull axisymmetric* dengan *swedge stiffened* untuk menahan tekanan hidrostatik[3]. Perbandingan antara *swedge stiffened* dengan *ring stiffened* juga telah dilakukan yang mana dari segi struktur *swedge*

stiffened lebih efisien dibanding dengan ring stiffened conventional,[4]. Pada tahun 1995, Ross mempresentasikan hasil eksperimen yang menampilkan kegagalan plastis dari *thin walled ring stiffened* pada cangkang kerucut, dengan beban tekanan eksternal uniform, [5]. Yuan juga telah mempresentasikan analisis teoretik ketidakstabilan elastis dari silinder swedge stiffened terhadap beban tekanan hidrostatik, dengan mempertimbangkan pengaruh variasi sudut pada penampang kerucut. Liang juga melakukan analisis elastoplastic dan respon non linier dari model swedge milik Ross, [6].



Gambar 2. Ring stiffened pressure hull

3. METODOLOGI PENELITIAN

➤ Geometry

Tahap pertama pembuatan model. Mulai dari *point*, *curve* dan *surface*.

Struktur properties kapal selam,

Panjang : 16 m

Diameter : 6,71 m

Jarak frame : depan = 0,5 m, tengah = 0,5 m, belakang = 0,4 m

Tebal pelat : 30 mm

➤ Properties

Tahap kedua ini berfungsi untuk memasukkan data dari jenis material yang digunakan pada *isotropic*, kemudian input *shell* dan *beam*.

Nama material : Alloy Steel HY 80

Modulus Young : 205 Gpa = $2,05 \times 10^{11}$ N/m²

Density : 7,87 Mg/m³ = 7870 kg/m³

Poisson Ratio : 0,28

➤ Meshing

Tahap ketiga ini berfungsi untuk pembagian area dari model itu sendiri yakni pada *mesh seed* dan *mesh*. Dan juga pembuatan *beam* pada *element*.

➤ Load/BCs

Tahap keempat ini berfungsi untuk memasukkan nilai *boundary condition*, *inertial load* dan *pressure*.

➤ Analysis

Tahap kelima ini berfungsi untuk menganalisa model yang sudah siap. Khususnya pada kasus ini adalah analisa *buckling*.

NASTRAN menghitung selisih vektor perpindahan :

$$(\Delta U) = (U_n) - (U_{n-1}) \quad (7)$$

Peningkatan beban:

$$(\Delta P) = P_n - (P_{n-1}) \quad (8)$$

Menggunakan prinsip kerja virtual, NASTRAN menghitung :

$$\alpha = \frac{\lambda_{(\Delta U)}^T (K_n + \Delta K) (\Delta U)}{(\Delta U)^T (\Delta P)} \quad (9)$$

Beban tekuk kritis diperkirakan sebagai:

$$(P_{cr}) = (P_n) + \alpha (\Delta P) \quad (10)$$

➤ Result

Tahap terakhir ini berfungsi untuk melihat hasil dari model yang sudah di analisa.

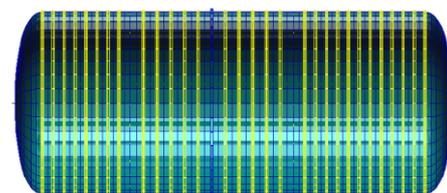
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Prosedur *Direct Strength Analysis*

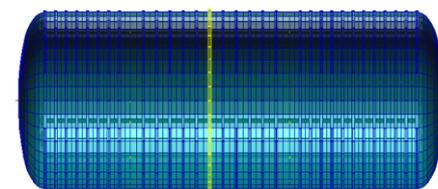
4.1.1 Pemodelan Struktur Pressure Hull

➤ *Pressure hull* model 1

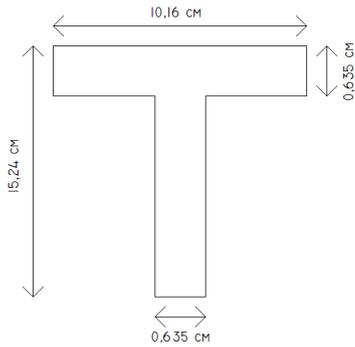
Desain konstruksi yang digunakan adalah konstruksi *ring stiffened* dengan komposisi *frame* dan 1 buah *king frame*.



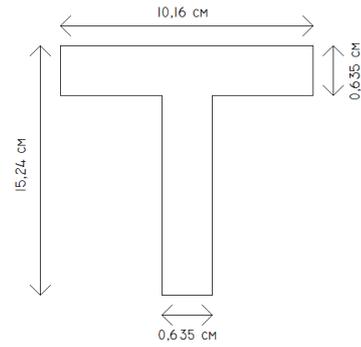
Gambar 3. frame pada model 1



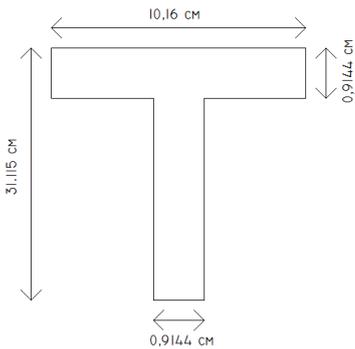
Gambar 4. King frame model 1



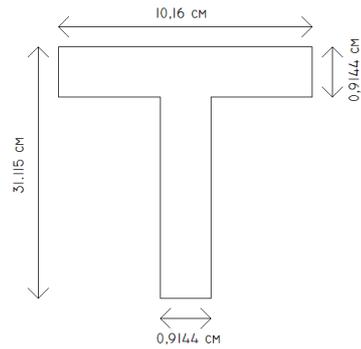
Gambar 5. Ukuran profil T pada *frame*



Gambar 9. Ukuran profil T pada *frame*



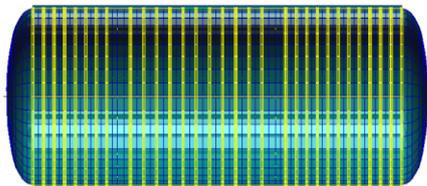
Gambar 6. Ukuran profil T pada *king frame*



Gambar 10. Ukuran profil T pada *side girder* dan *center girder*

➤ *Pressure hull model 2*

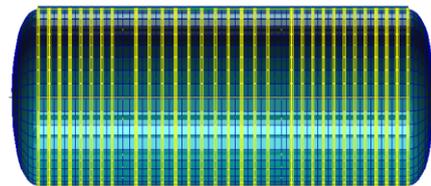
Desain konstruksi yang digunakan adalah konstruksi *ring stiffened* dengan komposisi *frame*, *side girder* dan *center girder*.



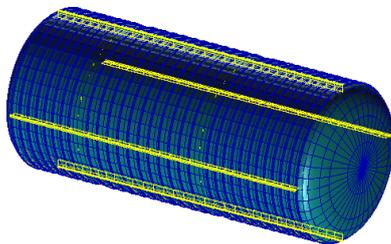
Gambar 7. *Frame model 2*

➤ *Pressure hull model 3*

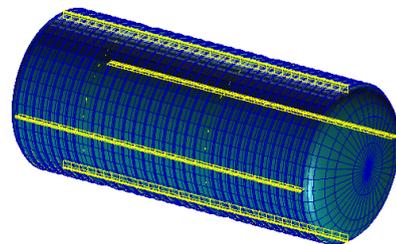
Desain konstruksi yang digunakan adalah konstruksi *ring stiffened* dengan komposisi *frame*, *side girder*, *center girder* dan *bulkhead*.



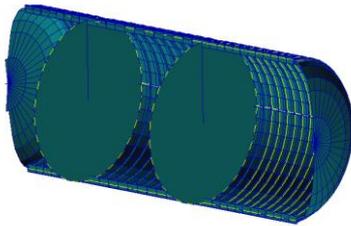
Gambar 11. *Frame model 3*



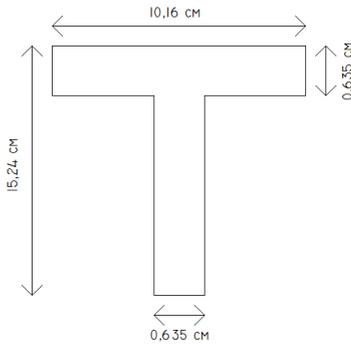
Gambar 8. *Side girder* dan *center girder*



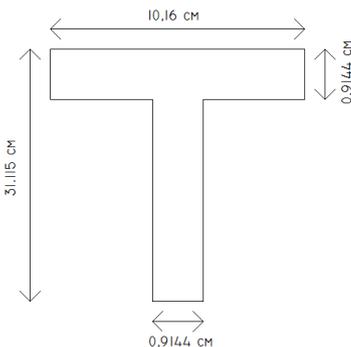
Gambar 12. *Side girder* dan *center girder*



Gambar 13. Bulkhead



Gambar 14. Ukuran profil T pada frame



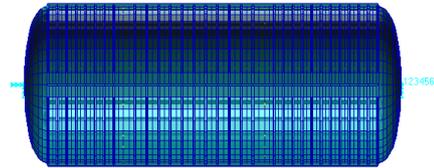
Gambar 15. Ukuran profil T pada side girder dan center girder

4.1.2 Boundary Conditions

Boundary Condition dalam proses analisa menggunakan *software* berbasis metode elemen hingga adalah tahap bagaimana mengondisikan batas-batas (bagian yang harus dijepit) pada model tersebut sebelum dilakukan pembebanan dan dianalisa. Bagian yang dijepit itu menjadi tumpuan, tidak dapat bergerak, bergeser maupun berputar. Dalam pemodelan *Pressure Hull* kapal selam ada 2 jenis kondisi batas, yaitu, kondisi pertama adalah model struktur *Pressure Hull* hanya memiliki satu titik jepit disalah satu ujung model. Kondisi kedua adalah dengan menjepit kedua ujung model *Pressure Hull*.

Dalam penelitian ini, penulis memilih menggunakan kondisi yang kedua. Karena pada saat dilakukan analisa dengan

menggunakan kondisi yang pertama, bentuk yang dihasilkan tidak sesuai dengan sebagaimana mestinya. Hal ini disebabkan karena ada bagian ujung yang dibiarkan bebas bergerak, bergeser maupu berputar, sehingga bagian ujung yang seharusnya kaku (*fixed*) menjadi bergerak mengikuti tekanan yang diberikan.



Gambar 16. Boundary condition pada model pressure hull kapal selam

4.1.3 Loading Conditions

Loading conditions dalam menganalisa karakteristik *buckling* pada *pressure hull* ini menggunakan *pressure* air laut serta berdasarkan variasi desain penggadingan dan ukuran profil yang digunakan.

4.1.4 Verifikasi Hasil Analisa

Tahap terakhir dari proses analisa ini adalah verifikasi hasil data, yaitu dengan memperhatikan bentuk-bentuk dari karakter *buckling* (tekuk) dengan variasi pembebanan yang telah diberikan.

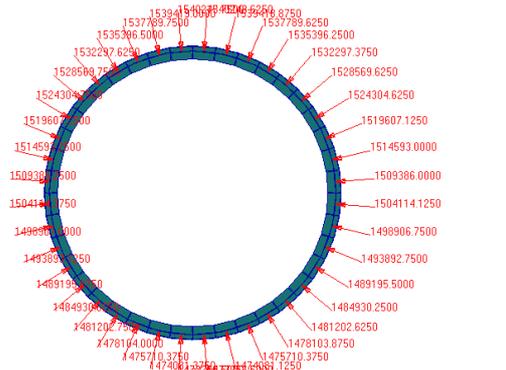
4.2 Variasi Pembebanan

Beban yang diberikan pada struktur *pressure hull* kapal selam ini adalah merupakan tekanan dari air laut sesuai dengan kondisi kedalamannya. Tekanan (*pressure*) yang diberikan ini akan menekan *plate element* dan *beam element*.

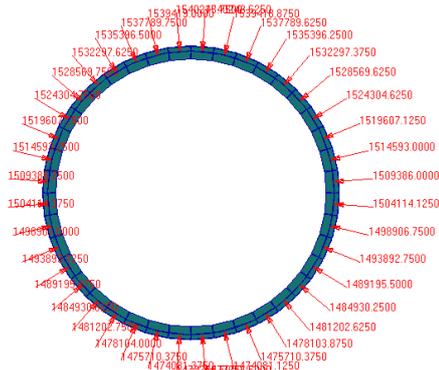
4.2.1 Beban Pada Pressure Hull Model 1

Tekanan hidrostatis untuk struktur *pressure hull* model 1 adalah:

$$\begin{aligned} Ph &= 1025 \text{ kg/m}^3 \times 9,8 \text{ m/s} \times 153.355 \text{ m} \\ &= 1540450,975 \text{ N/m}^2 \text{ (Pascal)} \\ &= 1,54 \times 10^6 \text{ Pascal} \end{aligned}$$



Gambar 17. Pembebanan air laut model 1 pada kedalaman 150 m

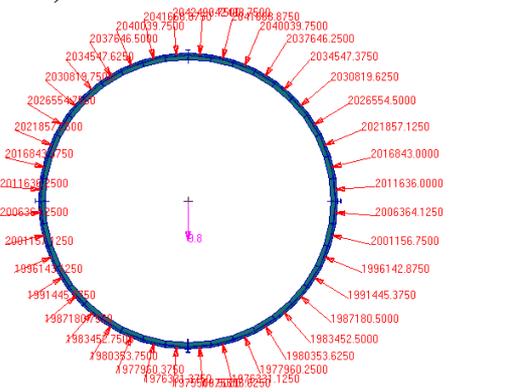


Gambar 19. Pembebanan air laut model 3 pada kedalaman 150 m

4.2.2 Beban Pada Pressure Hull Model 2

Tekanan hidrostatik untuk struktur *pressure hull* kapal selam model 2 adalah:

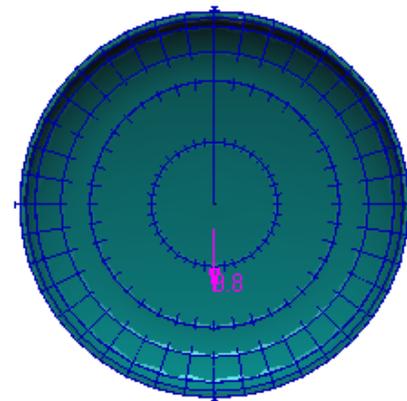
$$\begin{aligned}
 P_h &= 1025 \text{ kg/m}^3 \times 9,8 \text{ m/s} \times 203,355 \text{ m} \\
 &= 2042700,975 \text{ N/m}^2 \text{ (Pascal)} \\
 &= \mathbf{2,04 \times 10^6 \text{ Pascal}}
 \end{aligned}$$



Gambar 18. Pembebanan air laut model 2 pada kedalaman 200 m

4.2.4 Body Force

Body force dalam proses analisa ini diartikan sebagai gaya gravitasi atau gaya kebawah kapal, jadi berdasarkan arti diatas maka besarnya nilai *body force* adalah sama dengan gravitasi, yaitu 9,8 m/s. Dalam metode elemen hingga disebut juga sebagai *Inertial Load*.



Gambar 20. Body force pada model

4.2.3 Beban Pada Pressure Hull Model 3

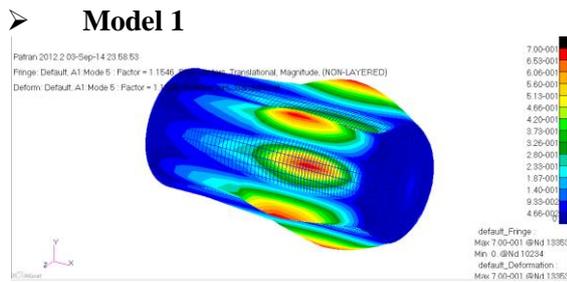
Tekanan hidrostatik untuk struktur *pressure hull* model 3 adalah:

$$\begin{aligned}
 P_h &= 1025 \text{ kg/m}^3 \times 9,8 \text{ m/s} \times 153,355 \text{ m} \\
 &= 1540450,975 \text{ N/m}^2 \text{ (Pascal)} \\
 &= \mathbf{1,54 \times 10^6 \text{ Pascal}}
 \end{aligned}$$

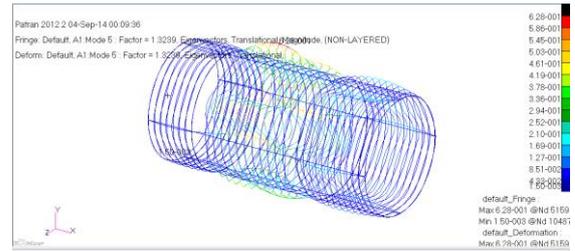
4.3 Hasil Analisa

4.3.1 Plate Stress

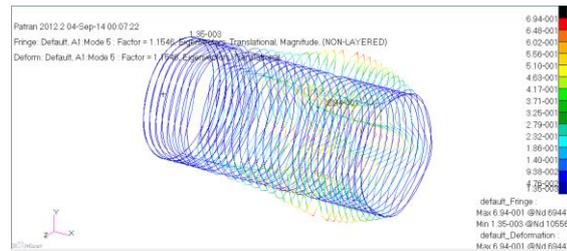
Plate stress menunjukkan nilai *Buckling Load Factor (BLF)* dari hasil *running* pada *software*.



Gambar 21. Kondisi buckling model 1



Gambar 24. Buckling pada struktur pressure hull model 2



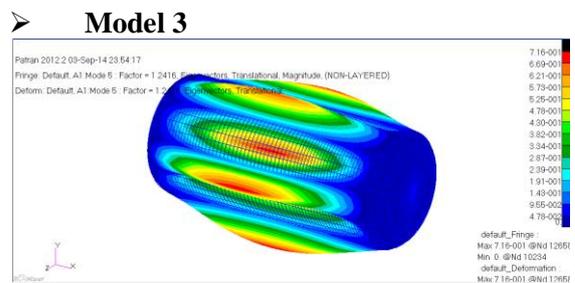
Gambar 22. Buckling pada struktur pressure hull model 1

Tabel 4.2 Nilai Buckling Load Factor pressure hull model 2.

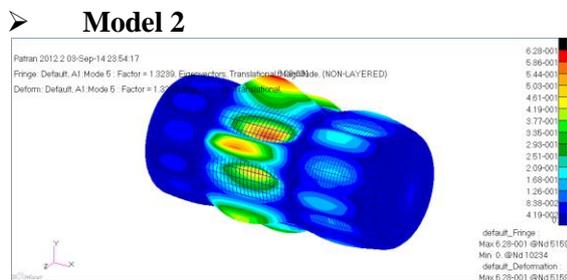
Mode	BLF (λ)	CBL $\lambda \{P\}$	Deskripsi
1	0,85553	1747591,965	Pressure Hull Buckling
2	0,85554	1747612,392	Pressure Hull Buckling
3	1,1719	2393841,273	Bulkhead Buckling
4	1,2979	2651221,595	Bulkhead Buckling
5	1,3239	2704331,821	Pressure Hull Buckling

Tabel 4.1 Nilai Buckling Load Factor pressure hull model 1.

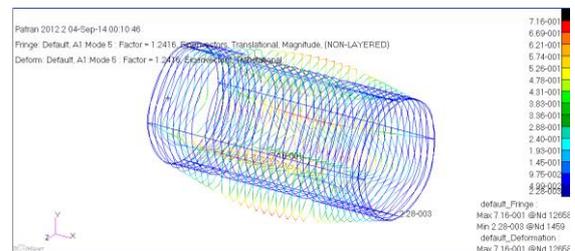
Mode	BLF (λ)	CBL $\lambda \{P\}$	Deskripsi
1	0,84057	1294856,876	Pressure Hull Buckling
2	0,84057	1294856,876	Pressure Hull Buckling
3	0,8635	1330179,417	Pressure Hull Buckling
4	0,8635	1330179,417	Pressure Hull Buckling
5	1,1546	1778604,696	Pressure Hull Buckling



Gambar 25. Kondisi buckling model 3



Gambar 23. Kondisi buckling model 2



Gambar 26. Buckling pada struktur pressure hull model 3

Tabel 4.3 Nilai *Buckling Load Factor pressure hull* model 3

Mode	BLF (λ)	CBL $\lambda \{P\}$	Deskripsi
1	0,86374	1330549,125	<i>Pressure Hull Buckling</i>
2	0,86837	1337681,413	<i>Pressure Hull Buckling</i>
3	0,99273	1529251,896	<i>Pressure Hull Buckling</i>
4	0,99273	1529251,896	<i>Pressure Hull Buckling</i>
5	1,2416	1912623,931	<i>Pressure Hull Buckling</i>

4.3.2 Kedalaman Maksimum *Pressure Hull* Model 1, 2 dan 3

- ***Pressure Hull* model 1 (150 m)**

Tingkat kedalaman yang diuji pada model + [Tingkat kedalaman yang diuji pada model (1 – *BLF* model 1)]
 $150 + 150 (1 - 0,84057) = 173,9145 \text{ m}$

- ***Pressure Hull* model 2 (200 m)**

Tingkat kedalaman yang diuji pada model + [Tingkat kedalaman yang diuji pada model (1 – *BLF* model 1)]
 $200 + 200 (1 - 0,85553) = 228,894 \text{ m}$

- ***Pressure Hull* model 3 (150 m)**

Tingkat kedalaman yang diuji pada model + [Tingkat kedalaman yang diuji pada model (1 – *BLF* model 1)]
 $150 + 150 (1 - 0,86374) = 170,439 \text{ m}$

4.3.3 Berat Konstruksi *Pressure Hull* Model 1, 2 dan 3

- *Pressure Hull* model 1 = 14,60 Ton
- *Pressure Hull* model 1 = 14,75 Ton
- *Pressure Hull* model 1 = 19,26 Ton

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Hasil analisa menunjukkan bahwa kapal selam yang didesain dengan jarak frame dan ukuran profil yang sama yakni model 1 mendapatkan tekanan minimum 1,29 MPa, model 2 mendapatkan tekanan minimum 1,74 MPa dan model 3 mendapatkan tekanan minimum 1,33 MPa. Untuk berat konstruksi model 1 = 14,60 Ton, model 2 = 14,75 Ton dan model 3 = 19,26 Ton. Sedangkan kedalaman maksimum yang dicapai oleh model 1 adalah 173,9145 m, model 2 adalah 228,894 m dan model 3 adalah 170,439 m.

5.2 Saran

Pembuatan model dilakukan dengan pembagian *mesh* yang lebih banyak lagi, terutama pada daerah yang mengalami pemusatan tegangan. *Software* ini sangat direkomendasikan untuk melakukan uji kekuatan suatu struktur khususnya, karena cukup kompleks dan mudah dalam pengoperasiannya.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yuan, K. Y., Liang, C. C., and Ma, Y. C. Investigation of The Cone Angle of A Novel Swedged-stiffened Pressure Hull. *SNAME J. Ship Res.*, 1991: 35, 83–86.
- [2] Friedman, N. (1984). *Submarine Design and Development*. London: Conway Maritime.
- [3] Ross, C.T.F. A Novel Submarine Pressure Hull Design. *J. Ship Res.*, 1987; 31:186–188.
- [4] Ross, C.T.F. General Instability of Swedge-stiffened Circular Cylinders Under Uniforms External Pressure. *J. Ship. Res.*, 1993.
- [5] Ross, C.T.F. Plastic Collpase of Thin-walled Ring-stiffened Conical shells Under Uniform External Pressure. *J. Ship. Res.*, 1995: 39, 166–175.
- [6] Liang, C.C., Yang, M.F., Chen, H.W. Elastic-plastic Axisymmetric Failure of Swedge-stiffened Cylindrical Pressure Hull Under External Pressure. *J. Ship. Res.*, 1993: 37, 176–188.