

PREDIKSI UMUR KELELAHAN STRUKTUR BADAN TEKAN KAPAL SELAM KARENA PENGULANGAN PERUBAHAN BEBAN HIDROSTATIK

ON THE FATIGUE LIFE PREDICTION OF SUBMARINE PRESSURE HULL DUE TO ALTERNATING HYDROSTATIC LOADS

¹⁾Wibowo H Nugroho, ²⁾Ahmad S Mujahid

Marine Structural Monitoring/Hydro-elasticity Group

¹⁾Pusat Teknologi Rekayasa Industri Maritim (PTRIM),

²⁾Balai Teknologi Hidrodinamika (BTH), BPPT

Email : ¹⁾wibowo.harso@bppt.go.id, ²⁾ahmad.mujahid@bppt.go.id

Abstrak,

Kajian teknis ini untuk memprediksi kelelahan dari struktur badan tekan kapal selam berbahan material HY – 80. Karena beban operasional utama yang terjadi pada kapal selam yang bekerja adalah beban hidrostatik akibat sifat operasinya. Beban hidrostatik ini mengakibatkan tegangan utama (*principal stress*) dimana terjadi saat kapal selam masih dipermukaan dan masuk pada kedalaman operasional dimulai dengan kedalaman Sarat (T) 5,5m ke 50m dan 100m. Peristiwa penyelaman dari permukaan laut sampai kedalaman operasional dan kembali ke permukaan lagi, menyebabkan kapal selam mengalami perubahan beban yang berulang (*repeated load*) hal ini berkontribusi cukup besar terhadap kelelahan material struktur tersebut. Perhitungan prediksi kelelahan ini dimulai dengan pemodelan metode elemen hingga (MEH) pada badan tekan yang diasumsikan dengan bentuk yang serupa kapal selam type U-209 dengan bentuk silinder berongga bergading besar (*web framed cylindrical hollow structure*). Perhitungan kelelahan dilakukan dengan mengaplikasikan aturan akumulasi kerusakan Palgrem – Miner pada S – N curve material HY – 80 berdasarkan data tegangan utama yang diperoleh dari MEH dan faktor keamanan 2,5. Asumsi yang dipakai adalah bahwa kapal selam memiliki 120 hari layar dalam setahun. Hasil studi ini menunjukkan bahwa umur kelelahan struktur badan tekan kapal selam berkisar 29 tahun

kata kunci; fatigue life, beban hidrostatik, kapal selam

Abstract

This technical study to predict the fatigue of the body structure made from material press submarine HY - 80. Because of the major operating expense that occurred on submarines that work is the hydrostatic load due to the nature of its operations. This resulted in hydrostatic load mains voltage (principal stress) which occurs when the submarine was on the surface and into the operational depth starting with Sarat depth (T) 5,5m to 50m and 100m. Events dives from the ocean surface to a depth of operational and back to the surface again, causing the submarine to change the burden of recurrent (repeated load) it contribute substantially to the structure of the material fatigue. Fatigue prediction calculation begins by modeling finite element method (FEM) in the press agency that assumed the form of a similar type submarine U-209 in the form of a hollow cylinder large bergading (web framed hollow cylindrical structure). Calculations carried out by applying the rules of fatigue damage accumulation Palgrem - Miner on S - N curve of materials HY - 80 based on the primary voltage data obtained from the FEM and the safety factor of 2.5. The assumption used is that the submarine has a screen of 120 days in a

year. The results of this study show that the fatigue life of the structure of press submarine range 29 years

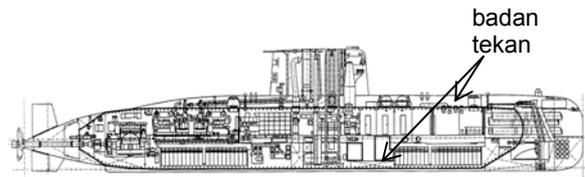
keywords; fatigue life, hydrostatic loads, submarine

Diterima (recieved) : 11 Agustus 2015, Direvisi (Revised) : 08 September 2015, Disetujui (Accepted) : 27 November 2015

PENDAHULUAN

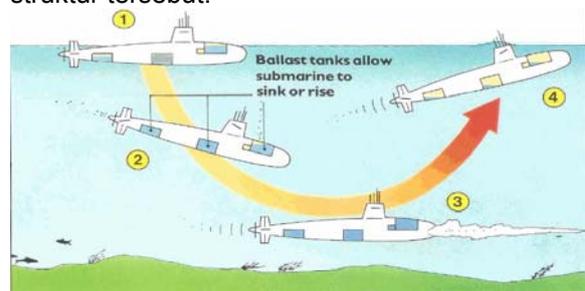
Kemandirian bangsa dalam bidang militer riset dan pengembangan Alusista dalam negeri adalah suatu keharusan bagi bangsa Indonesia. Dimana hal ini juga berlaku pada desain dan pembangunan kapal perang untuk mengawal keutuhan Negara Kesatuan Republik Indonesia (NKRI) yang memiliki luasan daerah maritim mencapai dua kalinya dari luas daratan. Dengan kondisi seperti ini adalah wajar dan masuk akal bila NKRI mempunyai angkatan laut yang kuat dimana tentunya mempunyai suatu armada kapal tempur yang handal untuk mempertahankan dan mengamankan kedaulatan negara. Berkaitan dengan peningkatan kemandirian bangsa dalam bidang militer penguasaan riset dan pengembangan Alpalhan dalam negeri merupakan suatu keharusan dimana salah satu aspeknya adalah melakukan desain dan pembangunan kapal selam yang murni oleh bangsa Indonesia sehingga aspek kerahasiaan teknologi tetap terjaga. Dengan dikuasainya teknologi desain dan rancang bangun kapal selam tentunya akan meningkatkan efek penggetar (deterent effect) dari bangsa Indonesia terhadap kekuatan asing yang ingin menguasai atau mempermainkan bangsa ini.

Salah satu aspek yang penting untuk dikaji adalah pengaruh beban berulang hidrostatik pada komponen struktur badan tekan kapal selam. Perubahan beban statis ini sangat dominan karena terjadinya perubahan tekanan hidrostatik dari kapal selam saat menuju ke kedalaman operasionalnya atau saat kembali ke permukaan. Komponen struktur ini diharapkan harus handal dan berumur kelelahan tinggi selama kapal selam melakukan operasinya. Bentuk badan tekan kapal selam yang digunakan pada studi ini mengacu pada kapal selam tipe U – 209³ seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1, dimana berupa selubung konstruksi didalam bentuk kapal selam keseluruhan. Data teknis dari varian kapal selam tipe U -209 ini diperlihatkan pada Tabel 1⁴.



Gambar 1.
Badan tekan Kapal Selam Type 209

Secara mudahnya untuk memahami bagaimana kapal selam dapat menyelam dan muncul ke permukaan laut yaitu dengan menggunakan mekanisma pengaturan masuk keluarnya air ke dalam tangki – tangki ballast dimana pergerakan kapal selam ini diperlihatkan pada Gambar 2^{6,14}. Tangki – tangki yang digunakan untuk maksud ini adalah ciri khas dari kapal selam. Pada kondisi 1 tangki ballast mulai terisi dengan air selanjutnya kapal selam akan menyelam dengan *hydroplane* mengarah ke bawah ke kondisi 2 selanjutnya pada kondisi 3 kapal selam sudah beroperasi di dalam air dan dapat menembakkan torpedonya, untuk kembali ke permukaan tangki – tangki ballast diisi udara dan air dipompa keluar dimana pada kondisi 4 ini *hydroplane* mengarah ke atas. Peristiwa penyelaman dari permukaan laut masuk pada kedalaman operasional dan kembali ke permukaan lagi seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2, menyebabkan kapal selam mengalami perubahan beban yang berulang (repeated load) hal mana merupakan kontribusi cukup besar dalam kejadian kelelahan material struktur tersebut.



Gambar 2.
Bagaimana kapal selam menyelam dan muncul ke permukaan¹⁴

Tabel 1.
Data Ukuran Utama Varian Kapal Selam Type 209⁴

Description	Type 1100	Type 1200	Type 1300	Type 1400	Type 1500
Displacement at submerged, Ton	1,207	1,285	1,300	1,586	1,610
Dimensions, m x m xm	54.1 x 6.2 x 5.9	55.9 x 6.3 x 5.5	59.5 x 6.2 x 5.5	61.2 x 6.25 x 5.5	64.4 x 6.5 x 6.2
Pressure Hull Diameter, m	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8
Propulsion	Diesel electric,4 diesels, 1 shaft	Diesel – electric,4 diesels, 1 shaft	Diesel – electric,4 diesels, 1 shaft	Diesel – electric,4 diesels, 1 shaft	Diesel – electric,4 diesels, 1 shaft
Propulsion – Diesel, shp	5000	5000	5000	5000	5100
Propulsion - electric	4x 120 –cell batteries	4x 132 –cell batteries			
Speed at Surface, knots	11	11	11	11	11.5
Speed at Submerged,knots	21.5	21.5	21.5	22	22.5
Range at Surface at 10 knots, nmi	10000	10000	10000	10000	10000
Range at Snorkel at 10 knots, nmi	8000	8000	8000	8000	8000
Range at Submerged at 4 knots, nmi	400	400	400	400	400
Endurance, days	50	50	50	50	50
Maximum depth, m	500	500	500	500	500
Armament	8x 533 mm torpedo tubes 14 torpedos OptionalUGM-84 Harpoon integration Optional Mines	8x 533 mm torpedo tubes 14 torpedos OptionalUGM-84 Harpoon integration Optional Mines	8x 533 mm torpedo tubes 14 torpedos OptionalUGM-84 Harpoon integration Optional Mines	8x 533 mm torpedo tubes 14 torpedos OptionalUGM-84 Harpoon integration Optional Mines	8x 533 mm torpedo tubes 14 torpedos OptionalUGM-84 Harpoon integration Optional Mines
Crew	31	33	30	30	36

Seperti umumnya kajian teknis kapal selam termasuk kategori penelitian militer sehingga tidak begitu banyak informasi yang didapat. Penulisan ini mengacu pada bentuk badan tekan kapal selam type U – 209³ hasil dari penelusuran internet dan penjelasan sederhana bagaimana kapal cara kerja kapal selam untuk menyelam dan naik kembali ke

permukaan laut⁶ sehingga menguatkan dugaan bahwa struktur badan tekan mengalami beban tegangan berulang. Penggunaan pemodelan elemen hingga untuk menghitung tegangan pada struktur kapal permukaan^{7,12} bisa diaplikasikan saat kapal selam berada di permukaan laut saat kapal selam di bawah permukaan laut

perhitungan tegangan yang bekerja pada badan tekan selam dibuat serupa dengan metode penyelesaian pada untuk struktur berbentuk silinder berpenegar² dan struktur subsurface buoy karena beban hidrostatik pada kedalaman tertentu⁹. Karena material badan tekan kapal selam terdiri dari baja HY – 80 maka perhitungan kelelahan dilakukan berdasarkan kurva S –N untuk material HY – 80¹³. Perhitungan prediksi kelelahan material pada studi ini secara garis besar menggunakan aturan Palgrem – Miner yang dijelaskan untuk pemakaian pada beban acak untuk konstruksi otomotif⁵ dan struktur kapal¹⁰ dimana metode serupa juga digunakan untuk beban acak seperti pada tali tambat⁸ dan struktur kapal cepat¹⁰.

BAHAN DAN METODE

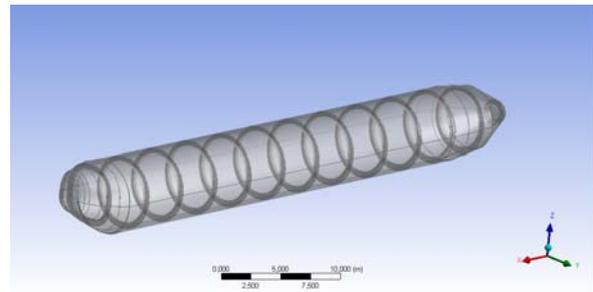
Bahan yang dipakai dalam studi ini berupa data uji kelelahan material HY – 80¹³ dan metode yang diaplikasikan adalah penggunaan Metode Elemen Hingga (MEH) untuk mendapatkan nilai tegangan maksimum dan minimum dari badan tekan kapal selam yaitu berupa penyelesaian persamaan tegangan utama (principal stress). Persamaan tegangan utama ini secara umum dapat dilihat dalam bentuk matriks pada persamaan (1), dimana besarnya berupa nilai eigen dari matriks tersebut.

$$\begin{aligned}
 (\sigma_{11} - \sigma)n_1 + \sigma_{12}n_2 + \sigma_{13}n_3 &= 0 \\
 \sigma_{21}n_1 + (\sigma_{22} - \sigma)n_2 + \sigma_{23}n_3 &= 0 \\
 \sigma_{31}n_1 + \sigma_{32}n_2 + (\sigma_{33} - \sigma)n_3 &= 0 \quad (1)
 \end{aligned}$$

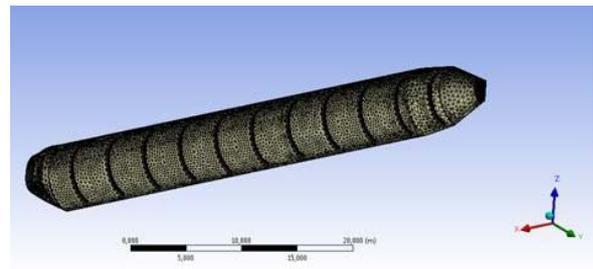
Dimana subkript 1, 2, 3, mewakili sumbu orthogonal x, y, dan z

Dalam kajian ini secara detail perhitungan tegangan kekuatan struktur karena kondisi beban sebenarnya yaitu tekanan air yang bekerja pada kondisi kedalaman sarat 5,5 m, 50 m dan 100m di bawah permukaan air laut, digunakan perangkat lunak berbasis metoda elemen hingga. Dengan menggunakan perangkat lunak ini struktur badan kapal selam dimodelkan berupa silinder berongga berdiameter 6200 mm dan mempunyai ketebalan 25mm dan diperkuat dengan gading besar berupa profil T, berukuran (250mmx480mmx20mmx30mm) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3. Gambar 3 juga memperlihatkan bagian dalam struktur badan tekan kapal selam.

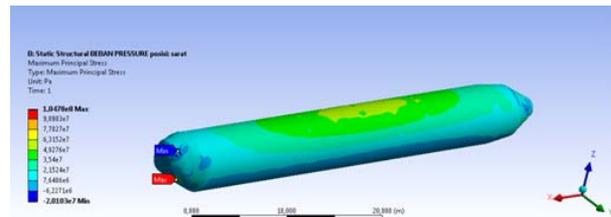
Pemodelan elemen hingga ini berupa pendiskritkan struktur badan badan dengan elemen 3 D tetrahedron sejumlah 100146 dan jumlah node sebanyak 204206. Hasil pendiskritan ini diperlihatkan pada Gambar 4. Hasil perhitungan distribusi tegangan utama pada badan tekan kapal selam diperlihatkan pada Gambar 5, 6, dan Gambar 7.



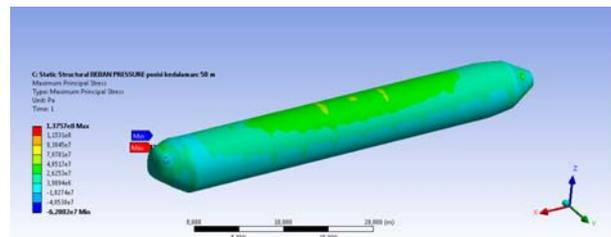
Gambar 3. Struktur Badan Tekan



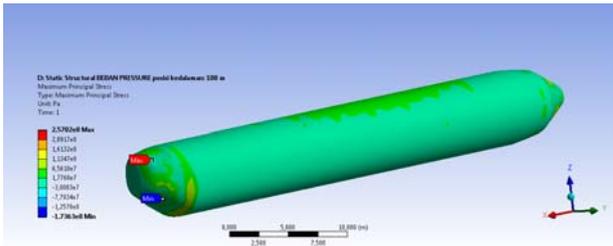
Gambar 4. Diskritisasi Struktur badan Tekan Kapal selam dengan 3D tetrahedron element



Gambar 5. Tegangan Utama Badan Tekan Kapsel Kondisi Sarat 5,5m



Gambar 6. Tegangan Utama Badan Tekan Kapsel Kondisi Kedalaman air 50m



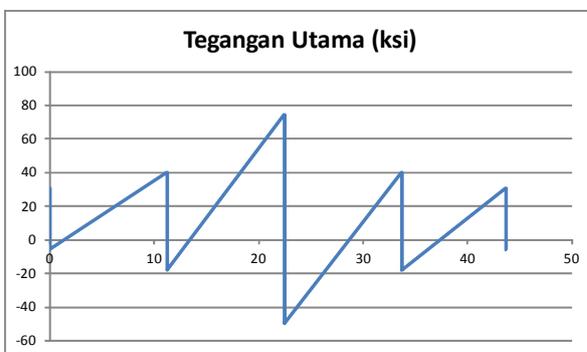
Gambar 7.
Tegangan Utama Badan Tekan Kapsel
Kondisi kedalaman air 100m

Nilai perhitungan tegangan utama dari metode elemen hingga diatas diperlihatkan dalam Tabel 2, dimana satuan nilai tersebut telah dikonversikan dari Mpa ke Ksi untuk keperluan aplikasi di kurva S – N untuk material HY – 80.

Tabel 2.
Tegangan Utama hasil MEH

Kondisi (m)	Tegangan Utama (ksi)
5.5	-2.916
5.5	15.197
50	-9.108
50	19.953
100	-25.179
100	32.278

Nilai tegangan utama yang diperoleh ini merupakan nilai kondisi ideal dari pemodelan sehingga perlu disesuaikan dengan kondisi lingkungan laut dimana perlu ditambahkan adanya faktor keamanan (Safety Factor) sebesar 2.5 adalah umum untuk analisa kelelahan pada struktur kelautan¹. Dimana nilai tegangan utama yang terkoreksi dengan faktor keamanan tersebut diperlihatkan dalam bentuk jejak waktu beban (time hystory) pada Gambar 8.



Gambar 8.
Jejak waktu dari Tegangan Utama badan tekan kapal selam dgn faktor keamanan 2,5

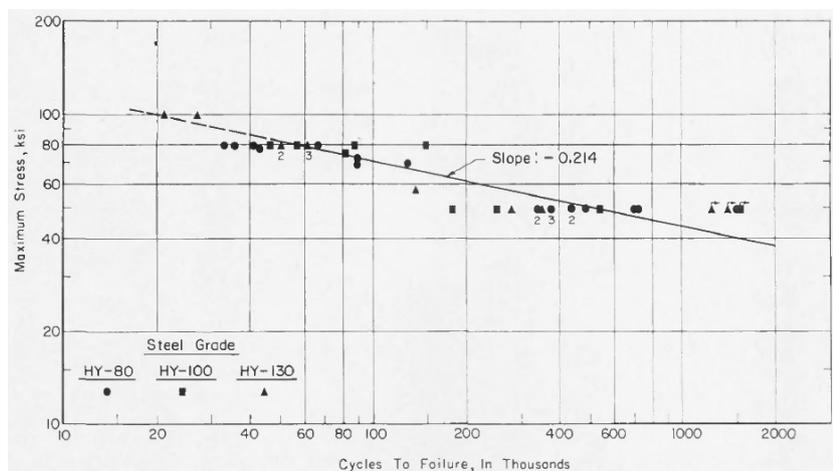
HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji kelelahan pada Material HY–80

Kelelahan material didefinisikan sebagai kerusakan yang progresif terjadi pada bahan yang terkena beban siklik. Beban siklik ini bisa berulang (dengan tegangan bertanda sama, yaitu selalu tekan atau selalu tarik) atau kebalikannya (tegangan berupa perubahan antara tekan dan tarik). Jika beban siklik cukup tinggi dan berulang-ulang maka dapat menyebabkan kegagalan kelelahan. Umur kelelahan merupakan jumlah siklus beban yang terjadi sebelum kegagalan. Kekuatan lelah merupakan tegangan maksimum yang dicapai dalam siklus tegangan dan digunakan untuk menentukan umur kelelahan dimana secara eksponensial berhubungan dengan umur kelelahan; yaitu, kekuatan lelah berkurang secara linear saat logaritma dari jumlah siklus bertambah. Kuat lelah dan umur kelelahan juga tergantung pada beberapa faktor antara lain: frekuensi siklik, pengulangan atau pembalikan beban; faktor beban (rasio tegangan minimum terhadap maksimum per siklus), dan faktor lainnya seperti suhu, kelembaban, dan ukuran spesimen. Kemampuan menahan kelelahan dari material kadang-kadang merupakan suatu pertimbangan yang penting. Material dengan kontur liat (*ductile*) biasanya mempunyai ketahanan lelah yang baik (terhadap pembebanan berulang) dibanding dengan material keras tapi rapuh (*brittle*). Dari besaran tegangan hasil uji kelelahan material HY–80 dengan properti material seperti pada Tabel 3, maka akan didapat grafik hubungan antara tegangan dan jumlah siklus hingga terjadinya patah. Semua data yang ada untuk pembuatan kurva SN (SN-Curve) dilakukan skala logaritmik. Data diperoleh uji kelelahan ini berupa 80% kuat putus (σ_u) yaitu sebesar 80,5 ksi (555,028 Mpa) mempunyai umur lelah $\leq 4 \times 10^4$ sikels kemudian 70% % kuat putus (σ_u) yaitu sebesar 70 ksi (482,633 Mpa) mempunyai umur lelah $\leq 15 \times 10^4$ sikels akan tetapi pada 50% kuat putus (σ_u) yaitu sebesar 50 ksi (344,738 Mpa) mempunyai umur lelah $\geq 4 \times 10^5$ sikels yang kemudian disebut dengan batas lelah (*fatigue limit*) material. Adapun kurva data uji kelelahan yang dihasilkan terlihat pada Gambar 9 dimana kurva ini biasa disebut dengan Kurva S–N dari material HY. Karena pada badan tekan kapal selam dalam studi ini digunakan material HY–80 maka data yang diambil dari Tabel 3 dan Gambar 9 hanya untuk material tersebut.

Tabel 3.
Properti Material HY-80, HY-100 dan HY-130¹³

Steel	Heat number	Plate thickness, in.	Properties in longitudinal direction				
			Yield strength ^b , ksi	Tensile strength, ksi	Elongation in 2 in., %	Reduction in area, %	Charpy V-notch ^c , ft-lb
HY-80	19595-1	1 1/2	80.5	101.1	29.0	74.8	103
	20995	1 1/2	87.3	105.0	25.0	69.4	138
	69S344	1 1/2	88.5	108.3	22.6	69.2	92
HY-100	N31543	3/4	90.0	109.2	25.3	70.4	136
	73A661	3/4	105.9	121.6	22.5	71.5	93
	N15423	3/4	110.0	127.5	23.0	71.1	83
HY-130	3P0074	1 1/2	138.0	144.0	20.0	69.8	102 ^d
	5P0540	1	138.5	149.0	20.5	67.5	83 ^d
	5P2004	1	141.6	152.0	20.0	63.8	90 ^d
	5P2456	1	140.4	149.2	20.0	64.4	83 ^d



Gambar 9.
Kurva S – N untuk Material HY – 80, HY – 100 dan HY – 130¹³

Aturan Palgrem – Miner

Untuk menentukan umur operasional struktur badan tekan kapal selam ini digunakan teori Palmgren Miner's Rule. Aturan Palmgren Miner *cumulative damage*¹¹ ini dipakai untuk menghitung umur kelelahan komponen struktur dari logam. Dasar dari perhitungan tegangan untuk perhitungan umur kelelahan sebenarnya hanya untuk amplitudo beban berulang yang tetap. Tetapi pada kenyataannya pada komponen – komponen rancang bangun amplitudo dari beban, rata – rata tegangan dan frekuensi pembebanan dalam sering berubah – rubah. Pada penulisan ini komponen rancang bangun itu adalah struktur badan tekan kapal selam sedangkan berubahnya tegangan yang acak berasal dari perhitungan tegangan utama dengan pemodelan elemen hingga. Kriteria mudah yang dapat dipakai untuk menghitung seberapa lama umur kerusakan terjadi diperoleh dengan melakukan penjumlahan berurutan kotak – kotak (block) berupa amplitudo beban tegangan yang tetap yang berbeda antara kotak satu dengan lainnya.

Secara implisit aturan kerusakan linear mempunyai anggapan sebagai berikut:

- Jumlah siklus beban/tegangan yang mengenai komponen struktur dapat ditulis dalam persentasi dari jumlah keseluruhan siklus tegangan/beban dari amplitudo yang sama yang menyebabkan kerusakan hal ini akan memberikan fraksi dari kerusakan.
- Urutan dari kotak tegangan/beban yang berbeda amplitudo tidak mempengaruhi umur kelelahan komponen struktur.
- Kegagalan struktur terjadi saat jumlah secara linear dari kerusakan dari setiap tingkatan beban telah mencapai nilai kritis.

Jika n_i adalah jumlah dari siklus dari balok ke I dari amplitudo tegangan/beban yang tetap σ_{ai} dalam suatu urutan kotak – kotak m., dan jika N_{fi} adalah jumlah siklus yang menyebabkan kerusakan pada σ_{ai} , dimana diperoleh dari Kurva S – N, maka aturan Palmgren Miner damage mengatakan bahwa kegagalan akan terjadi ketika

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_{fi}} = 1 \dots\dots\dots [2]$$

Selanjutnya dengan mengaplikasikan data perhitungan tegangan utama yang didapat dari hasil pemodelan elemen hingga pada Gambar 8. Adapun kejadian tegangan utama berdasarkan pemodelan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4. Untuk menentukan umur kelelahan struktur badan tekan kapal selam ini, harus diketahui dahulu besar tegangan yang bekerja di atas fatigue limit [$\sigma \geq 50$ ksi (344,738 Mpa)]. Kemudian nilai tegangan tersebut diplot pada grafik SN-Curve yang ada, maka akan didapatkan nilai siklus yang menyebabkan kerusakan (N_k). Seperti diketahui nilai (n_k) adalah jumlah siklus setiap blok dengan amplitudo tegangan tetap, sedang nilai (N_k) adalah jumlah siklus yang menyebabkan kerusakan struktur.

Tabel 4.
Kejadian Tegangan diatas fatigue limit dari struktur Badan Tekan Kapal selam

No	Sterss [ksi(Mpa)]	Jumlah Kasus(n_k)	SN-Curve (N_k)	(n_k/N_k)
1	50,358 (347,206)	1	500000	2,0E-06
2	74,554 (514,04)	1	90000	1,11E-05

Dan nilai hasil perhitungan dapat dilihat pada Table 4 dengan nilai total (n_k/N_k) adalah $1,31 \times 10^{-5}$, sehingga akan didapat umur struktur badan tekan kapal selam ini adalah sebagai berikut :

$$\frac{1}{500000} + \frac{1}{90000} = \frac{1}{1,31 \times 10^{-5}}$$

Sehingga akan terjadi kerusakan struktur badan tekan kapal selam bila

$$D = \frac{1}{1,31 \times 10^{-5}} = 1$$

Maka umur kelelahan (t_{fi}) = $(1/1,31) \times 10^5 = 76271,16$ det . Jika diasumsikan kapal ini menyelam / muncul ke /dari kedalaman 100m dengan kecepatan sekitar 10 knot (5,12 m/detik) dengan arah 30 derajat dari permukaan laut maka waktu pembebanan (T) adalah

$$t = \frac{100m \cdot det}{\cos 30^0 \cdot 5,12m} = 22 \text{ det } ik ,$$

Bila badan tekan kapal selam beroperasi selama 120 hari layar selama 1 (satu) tahun dengan asumsi setiap satu harinya 1 kali menyelam dan 1 hari lainnya naik kepermukaan dengan pembebanan penuh pada struktur tersebut maka umur kelelahan (t_{fi})= $(76271,16 / 22)$ hari = 3467 hari = 3467/120 Tahun , Sehingga umur kelelahannya (t_{fi}) sekitar 29 Tahun.

SIMPULAN

Secara umum makalah ini menunjukkan prediksi umur pakai dari struktur badan tekan kapal selam di didalam laut. Dimana penentuan umur kelelahan struktur berbasis material HY - 80 ini memakai metode *Palmgren Miner rule* dengan didasarkan pada data tegangan utama yang diperoleh dari hasil pemodelan elemen hingga badan tekan kapal selam berbentuk silinder berongga dilengkapi dengan gading besar saat beroperasi di dalam laut. Umur kelelahan struktur badan tekan kapal selam ini adalah 29 tahun dengan asumsi kejadian beban berulang setelah 22 detik setiap harinya yaitu saat kejadian 1 (satu) kali menyelam dan naik kepermukaan laut.

Rekomendasi yang perlu disampaikan dari hasil kajian ini adalah ; Perlu adanya pemeriksaan keseluruhan pada struktur badan tekan kapal selam paling tidak 1 atau 2 kali dalam setahun, penggunaan gading (*frame*) antar gading besar (*web frame*) sangat diperlukan dan selain itu hasil penelitian ini diharapkan merupakan masukan yang bermanfaat bagi para pengguna/ pemilik kapal selam dan juga pihak pembuat kebijakan, untuk mulai merealisasikan program pembuatan kapal selam milik bangsa Indonesia untuk menggantikan kapal selam yang telah berumur lebih dari 25 tahun.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan banyak terimakasih kepada Kementerian Negara Riset dan Teknologi dan Pendidikan Tinggi (KEMENRISTEKDIKTI) Republik Indonesia atas bantuan dana untuk studi ini sebagai bagian dari kegiatan riset INSINAS Kajian Eksperimental Beban Hidrodinamika Slamming Untuk Analisa Fatigue Komponen Struktur Badan Tekan Kapal Selam, TA 2015

DAFTAR PUSTAKA

1. Barltrop NDP, Adams AJ, " Dynamics of Fixed Marine Structures", pp 594 – 596, Third Edition, Butterworth-Heinemann, Ltd , 1991
2. Graham Derek, " Predicting the collapse of externally pressurised ring-stiffened cylinders using finite element analysis", *Journal of Marine Structures* 20 (2007) 202–217, Elsevier
3. <http://defence.pk/threads/modern-submarine- designs.98561/ page>
4. http://en.wikipedia.org/wiki/Type_209_submarine
5. Juvinal R C and Marshek K M, " 2nd Fundamentals of Machine Component Design", Chapter 8 pp 257-302 , John Willey & Son (1991)
6. Nugroho Wibowo H, "Perancangan Kapal Selam Berdasarkan Kajian Berat, Daya Apung & Stabilitas Statisnya", *Jurnal Pengkajian Industri BPPT : Vol.1 No.2. Agustus 2007*
7. Nugroho Wibowo H, Pitoyo, " Studi Numerik Distribusi Tegangan Badan Kapal Berbahan Aluminium (EN AC-(AlSi10Mg(b))", *Jurnal Wave UPT BPPH*, Vol 6. No 1. 2012
8. Nugroho Wibowo H, Samudro O" On The Fatigue Analysis of Mooring Lines in Irregular Wave", Published for 4th Regional Conference of Marine Technology 2004 paper no III. A. 14 - 22, on 7 & 8 September 2004 at Johor, Malaysia
9. Nugroho Wibowo H, Sahlan, Syafiul A , "Analisa Kekuatan Struktur Subsurface Buoy untuk Kedalaman Operasional 100m Dibawah Permukaan Laut", Seminar Nasional Fakultas Teknik UMSIDA 1 Oktober 2011 Nugroho Wibowo H, Sahlan, Syafiul A, " Prediksi Umur Pakai Struktur Badan tekan kapal selam di Sungai Musi karena Beban Impak dari Gerakan Porpoising", Seminar nasional Teori dan Aplikasi Teknologi Kelautan (SENTA), ITS-Surabaya, 15 December 2011
10. Petinov S, " Fatigue Analysis of Ship Structure, Backbone Publishing Company, 2003
11. Tjahjanti Prantasi Harmi, Manfaat Djauhar, Darminto, Nugroho Wibowo Harso, Panunggal Eko, " Numerical Modeling of Ship Composite – Based on Aluminum Casting as Alternative Materials for Ship Building", *Journal of Advanced Materials Research* Vol. 789(2013) pp 143 – 150 Trans Tech Publications, Switzerland
12. RADZIMINSKI, J. B. AND LAWRENCE, Jr F. V, " Fatigue of High-Yield-Strength Steel Weldments", presented at the AWS 51st Annual Meeting held in Cleveland. Ohio, during June 8-12, 1970.
13. Wood T, " Spotlight on SUBMARINES", Franklin Watts – London (1989)