

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kapal

Penggunaan kapal sebagai sarana transportasi sudah dikenal luas sejak zaman nenek moyang bangsa Indonesia, salah satu buktinya adalah Kapal Pinisi yang popularitasnya mendunia. Berdasarkan KUHD Pasal 309, kapal dijelaskan sebagai segala jenis perahu, apa pun nama dan jenisnya. Sementara itu, menurut Pasal 1 angka 36 UU No. 17 Tahun 2008, kapal didefinisikan sebagai kendaraan air dengan bentuk dan jenis tertentu yang dapat bergerak menggunakan tenaga angin, tenaga mekanik, atau energi lainnya, termasuk yang ditarik atau ditunda, kendaraan yang memiliki daya dukung dinamis, kendaraan bawah permukaan air, serta alat apung dan bangunan terapung yang bersifat tidak berpindah tempat. (Farid Teguh Prasetiawan et al., 2022)

2.1.1 Kapal Negara

Kapal Negara adalah kapal yang dimiliki dan dioperasikan oleh negara untuk tujuan tugas pemerintahan dan bukan untuk kegiatan komersial (UU 66 tahun 2024). Kapal negara biasanya menjalankan fungsi-fungsi seperti:

1. Penegakan hukum di laut, seperti patroli laut, pengawasan wilayah perairan, pemberantasan penyelundupan, dan perlindungan sumber daya laut.
2. Keamanan maritim, meliputi penjagaan kedaulatan, operasi SAR (*Search and Rescue*), pengamanan perbatasan laut, dan operasi militer non-perang.
3. Tugas administratif dan pemerintahan, misalnya kegiatan survei hidrografi, penelitian kelautan, pemeliharaan navigasi laut, serta pelayanan publik lainnya.

Kapal Negara umumnya tidak dikomersialkan, memiliki tanda atau bendera khusus yang menunjukkan status pemerintahannya, dan sering kali

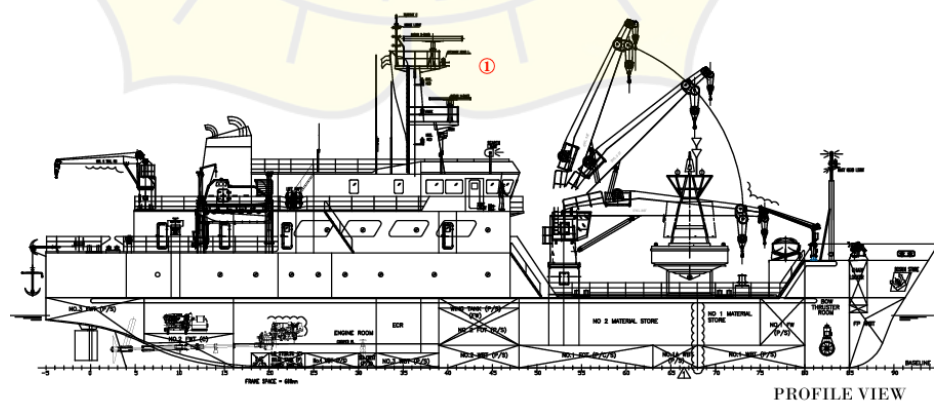
memiliki kekebalan tertentu dalam aspek hukum internasional, terutama ketika melaksanakan tugas negara.

Contoh Kapal Negara antara lain adalah kapal patroli TNI AL, kapal patroli KPLP (Kesatuan Penjagaan Laut dan Pantai), kapal Bea Cukai, kapal Polisi Air, kapal Bakamla (Badan Keamanan Laut), serta kapal penelitian milik lembaga pemerintah.

Dalam konteks penelitian tentang KN Sibaru-Baru, kapal tersebut merupakan salah satu kapal yang menjalankan tugas pemerintah, sehingga aspek keselamatan dan keandalan struktur menjadi sangat penting untuk menunjang tugas-tugas yang diembannya.

2.1.2 Pengertian Kapal Perambuan

Kapal Perambuan adalah bagian dari armada Kapal Negara Kenagavigasian (KNK) yang merupakan salah satu sarana pokok dalam penyelenggaraan kegiatan pengamatan, perawatan, pemeliharaan dan pemasangan SBNP. Kapal bantu perambuan bertujuan untuk mewujudkan keselamatan bernavigasi diperairan indonesia dengan mewujudkan ruang dan alur pelayaran yang aman bernavigasi. Untuk itu kapal perambuan di upayakan agar mampu menunjang kegiatan bernavigasi di perairan indonesia yang dinilai riskan terhadap keselamatan berlayar, sesuai kondisi dan perairan indonesia, serta untuk memenuhi persyaratan hukum internasional. (Napitupulu et al., 2016)



Sumber. DIT.NAV

Gambar 2.1 Kapal Perambuan

Tugas dan fungsi utama kapal induk perambuan adalah:

- Melaksanakan pemasangan pendistribusian pelampung suar. Pemasangan Sarana Bantu Navigasi, Kapal ini membawa dan memasang berbagai jenis rambu navigasi seperti pelampung suar, buoy, beacon, dan tanda batas alur pelayaran.
- Melakukan atau pengangkutan, pemeliharaan, perawatan pelampung suar serta sistem penjangkarannya. Pemeliharaan dan Perawatan, Melakukan perawatan berkala terhadap alat-alat navigasi, seperti pengecekan lampu, baterai, peralatan elektronik, dan membersihkan bagian-bagian yang terkena dampak cuaca laut.
- Melaksanakan perawatan pemeliharaan menara suar. atau Mengantar gilir tugas penjaga menara suar dan keluarganya.
- Mengangkut bahan-bahan material untuk operasional dan pemeliharaan menara suar.
- Penggantian dan Perbaikan Sarana, Menggantikan atau memperbaiki rambu navigasi yang rusak atau hilang akibat cuaca buruk, kecelakaan, atau penyebab lainnya.
- Pengawasan dan Inspeksi, Melaksanakan pengawasan dan inspeksi secara rutin untuk memastikan bahwa sarana navigasi berfungsi optimal sesuai standar keselamatan pelayaran.
- Operasi Darurat, Memberikan layanan darurat jika terjadi kecelakaan atau gangguan yang menyebabkan rambu navigasi rusak, hilang, atau bergeser dari posisi semula.

2.2 Klasifikasi (Class)

Klasifikasi kapal adalah proses penilaian teknis dan sertifikasi yang dilakukan oleh badan klasifikasi (*Classification Society*) terhadap kapal, guna memastikan bahwa struktur, sistem permesinan, dan komponen utama kapal telah dibangun, diuji, dan dipelihara sesuai standar keselamatan teknis tertentu.

Tujuan Utama Klasifikasi Kapal:

- Menjamin kelayakan teknis dan keselamatan kapal

- Menentukan standar konstruksi dan permesinan
- Memberi kepercayaan kepada pemilik, operator, dan pihak asuransi
- Menjadi prasyarat pendaftaran kapal di bendera tertentu atau asuransi laut

Klasifikasi kapal dilakukan oleh badan klasifikasi seperti BKI, DNV, ABS, dan lainnya. Dalam konteks getaran dan struktur, klasifikasi ini menentukan batasan dan kriteria yang harus dipenuhi agar kapal dinyatakan laik laut, termasuk standar getaran maksimum, penggunaan material, metode pengujian, dan dokumentasi teknis lainnya.

Tabel 2.1 Badan Klasifikasi Internasional

Nama Badan	Negara Asal	Singkatan
Biro Klasifikasi Indonesia	Indonesia	BKI
Det Norske Veritas	Norwegia	DNV
American Bureau of Shipping	Amerika Serikat	ABS
Lloyd's Register	Inggris	LR
Bureau Veritas	Prancis	BV
Nippon Kaiji Kyokai	Jepang	ClassNK

2.3 Struktur Kapal

Struktur konstruksi kapal adalah rangkaian elemen-elemen struktur yang dirancang untuk memberikan kekuatan, kekakuan, dan stabilitas pada badan kapal, sehingga kapal mampu menahan beban-beban yang dialami selama beroperasi di laut. Struktur kapal secara umum terdiri atas beberapa elemen pokok seperti lunas (*keel*), gading-gading (*frame*), pelat lambung (*shell plating*), geladak (*deck*), sekat kedap air (*bulkhead*), serta penopang memanjang seperti gelagar (*girder*) dan penguat melintang seperti balok geladak (*deck beam*).

Menurut Eyres & Bruce (2012) dalam bukunya yang berjudul *Ship Construction*, konstruksi kapal terdiri atas tiga tipe struktur utama:

1. Konstruksi Melintang (*Transverse Framing System*)

Pada sistem ini, penguatan utama kapal dilakukan secara melintang (*transversal*), yaitu dari sisi lambung kiri ke kanan. Struktur ini didominasi

oleh gading-gading melintang yang berfungsi memberikan kekuatan melawan tekanan hidrostatik dan beban gelombang laut. Umumnya, sistem ini banyak digunakan pada kapal dengan ukuran kecil hingga menengah (Eyres & Bruce, 2012).

2. Konstruksi Memanjang (*Longitudinal Framing System*)

Sistem konstruksi ini lebih menitikberatkan pada penguatan yang memanjang dari haluan ke buritan kapal. Penguatan memanjang berupa stringer, longitudinal, dan gelagar utama berfungsi untuk meningkatkan kekuatan longitudinal kapal dalam menahan beban lentur akibat gelombang dan beban muatan. Konstruksi memanjang lebih umum digunakan pada kapal besar dengan panjang yang signifikan, seperti tanker, bulk carrier, dan kapal kontainer besar, karena efektif dalam menahan lentur longitudinal (Rawson & Tupper, 2001).

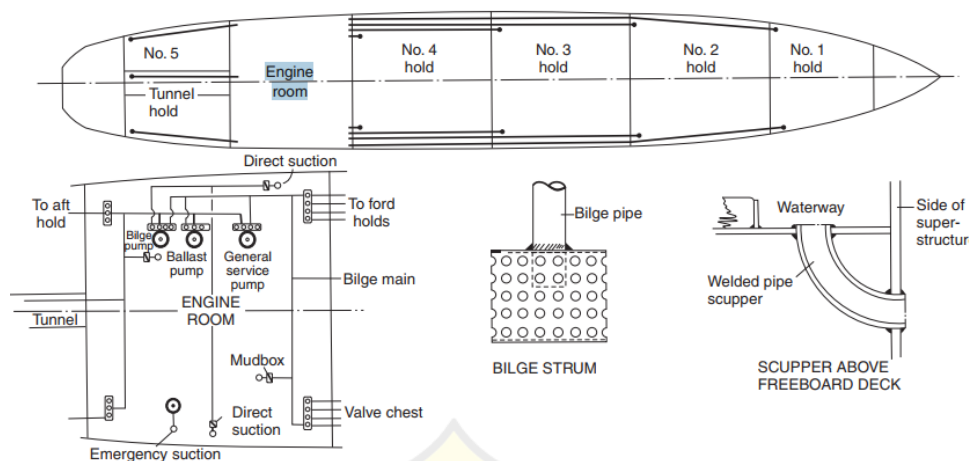
3. Konstruksi Campuran (*Combined Framing System*)

Sistem ini menggabungkan kelebihan dari sistem konstruksi melintang dan memanjang. Pada bagian lambung tengah kapal biasanya digunakan konstruksi memanjang untuk menahan beban lentur, sementara bagian haluan dan buritan menerapkan konstruksi melintang untuk memperkuat struktur terhadap gaya-gaya lokal seperti tekanan gelombang laut dan beban dinamis lainnya. Sistem campuran memberikan fleksibilitas konstruksi yang optimal serta efisiensi dalam material dan biaya produksi kapal (Rawson & Tupper, 2001).

Selain struktur primer tersebut, konstruksi kapal juga dilengkapi oleh struktur sekunder seperti bracket, knee, stiffener, serta plat-plat penguat lokal yang bertujuan mendistribusikan tegangan secara merata ke seluruh badan kapal.

2.3.1. Struktur Kamar Mesin

Permesinan kapal diatur di bagian belakang kapal laut, dan struktur dasar ganda berbingkai melintang diadopsi di ruang mesin. Detail konstruksi dasar ganda ini mirip dengan kapal kargo kering konvensional, dengan lantai di setiap ruang bingkai, gelagar samping tambahan, dan tempat duduk mesin integral dengan bagian yang kaku di bawah. (Eyres & Bruce, 2012)



Sumber. Ship Construction 7th Edition

Gambar 2.2 Posisi Kamar Mesin Kapal

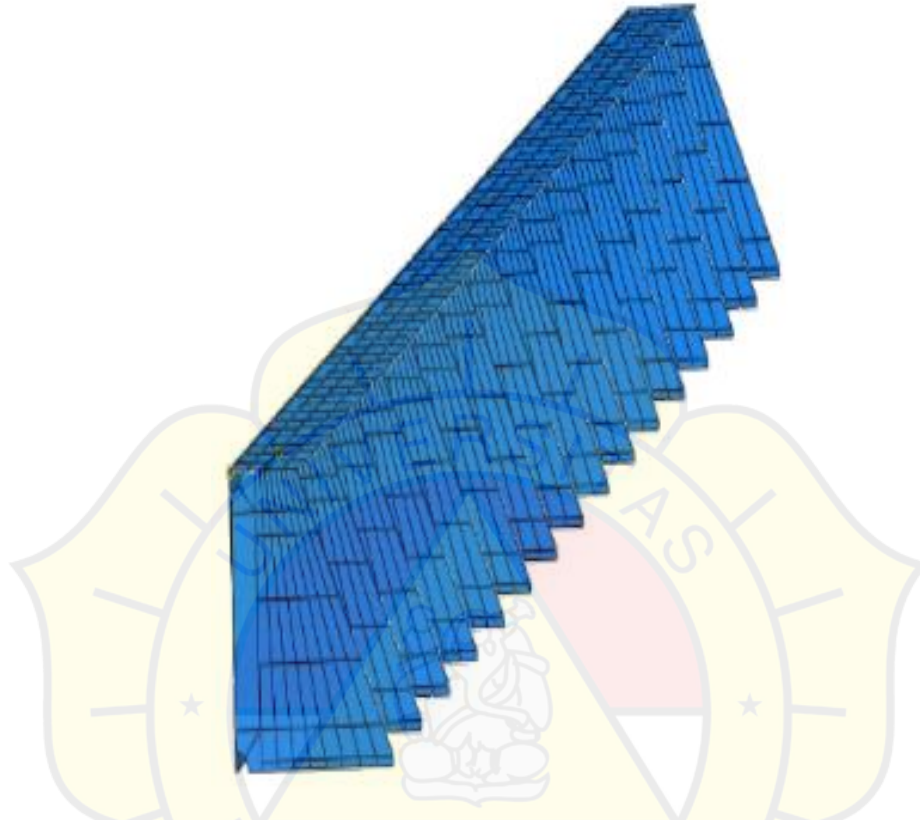
Salah satu inovasi yang ditawarkan untuk pemodelan struktur ruang mesin didasarkan pada keseimbangan energi regangan dan cukup sederhana adalah dengan penggunaan FEM 3D. Dalam kasus ponton, kapal menunjukkan perbedaan kecil dengan aslinya, oleh karena itu umumnya dapat digunakan untuk meningkatkan model struktural balok dalam analisis hidroelastis kapal yang relatif fleksibel seperti kapal kontainer besar. (Senjanović et al., 2010)

2.3.2. Struktur Engine Sitting

Pondasi mesin merupakan salah satu konstruksi yang cukup penting karena menopang beban mesin induk dan menahan tahanan dari trust block, selain itu pondasi mesin induk secara efektif harus dapat menjamin keamanan dari struktur lambung kapal untuk menahan berbagai macam variasi gaya yang terjadi. Diperlukan suatu pengujian yang melibatkan pihak-pihak terkait mesin seperti engine designer, manufacturer, dan system supplier untuk melakukan serangkaian pengujian tertentu. (Emily et al., 2021)

Pada konstruksi di kapal, perlu adanya kekuatan tambahan sebagai penopang yang dinamakan *bracket*. Bracket secara umum didefinisikan

sebagai suatu konstruksi dari bahan logam, aluminium, plastik, dan kayu yang berfungsi sebagai penopang atau penahan konstruksi tersebut agar tidak mengalami pembengkokan atau deformasi pada suatu konstruksi tersebut. (J. A. Putra & Misbah, 2022)

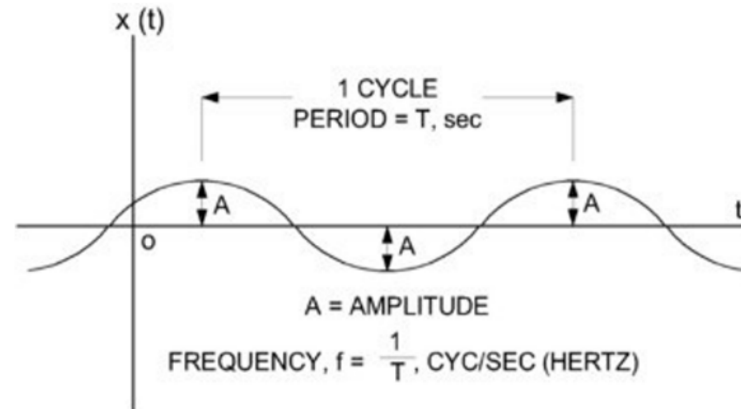


Sumber. (J. A. Putra & Misbah, 2022)

Gambar 2.3 Model Engine Foundation Menggunakan FEM.

2.4 Getaran

Getaran merupakan tanggapan dari suatu sistem mekanik yang muncul akibat adanya gaya eksitasi atau perubahan kondisi operasi seiring waktu. Getaran terjadi karena adanya perpindahan gaya yang bersifat siklik melalui komponen-komponen mesin. Perubahan seperti kerusakan, keausan, atau deformasi dapat mengubah karakteristik dinamis sistem dan umumnya menyebabkan peningkatan energi getaran. Sumber gaya penyebab getaran ini bisa berasal dari beberapa hal, seperti kontak atau benturan antar bagian yang bergerak atau berputar, ketidakseimbangan massa saat berputar, ketidaksejajaran (misalignment), maupun kerusakan pada bantalan. (Arifin et al., 2017a).



Gambar 2.4 Kurva Getaran terhadap Waktu

1. Perpindahan Getaran (puncak ke puncak)

Perpindahan getaran "peak to peak" mengacu pada jarak total yang dilalui oleh bagian mesin yang mengalami getaran, dari satu titik maksimum ke titik maksimum berlawanan. Dalam Sistem Internasional (SI), satuan yang digunakan adalah mikron (μm), yaitu seperseribu milimeter. Sedangkan dalam sistem British, digunakan satuan mils, yang setara dengan seperseribu inci. Istilah "peak" juga kerap digunakan sesuai dengan standar ISO 2372, yang merujuk pada nilai setengah dari perpindahan "peak to peak".

2. Kecepatan Getaran (puncak)

Saat suatu massa bergetar, kecepatannya berubah secara dinamis. Kecepatan akan menjadi nol ketika massa mencapai titik tertinggi atau terendah dalam gerakannya, dan mencapai nilai tertinggi saat melewati titik tengah atau posisi setimbang. Nilai maksimum inilah yang disebut sebagai kecepatan getaran puncak (peak velocity), yang biasanya dinyatakan dalam satuan mm/s-pk atau inci/s-pk.

3. Kecepatan Getaran (rms)

Menurut rekomendasi dari Organisasi Standar Internasional (ISO), pengukuran getaran mesin sebaiknya menggunakan kecepatan root mean square (rms). Nilai rms dianggap lebih mencerminkan tingkat keefektifan kecepatan getaran karena memberikan gambaran yang lebih representatif terhadap energi getaran.

Berbeda dengan kecepatan puncak yang hanya menunjukkan intensitas sesaat, kecepatan rms yang tinggi biasanya lebih berpotensi menimbulkan kerusakan.

4. Percepatan Getaran

Saat kecepatan massa mendekati nol di ujung pergerakannya, dibutuhkan percepatan agar massa tersebut dapat kembali bergerak ke arah berlawanan. Percepatan getaran menunjukkan seberapa cepat kecepatan getaran itu berubah dari waktu ke waktu. Dalam konteks ini, percepatan adalah tingkat perubahan kecepatan yang terjadi dalam sistem getaran.

5. Nilai Acuan Percepatan Getaran

Berdasarkan model sistem massa-pegas, percepatan maksimum terjadi saat kecepatan massa mendekati nol, yaitu di titik ekstrem getaran. Ketika kecepatan mencapai nilai tertingginya di tengah-tengah ayunan, percepatan menjadi nol. Nilai percepatan ini biasanya dinyatakan dalam satuan “g”, yaitu percepatan gravitasi bumi, di mana 1 g setara dengan sekitar $9,80665 \text{ m/s}^2$ atau sering dibulatkan menjadi 10 m/s^2 .

2.4.1 Sumber Getaran Kapal

Kapal merupakan struktur elastis yang cukup rumit, di mana getaran yang muncul dapat disebabkan oleh berbagai faktor, dengan salah satu penyebab utama berasal dari putaran baling-baling atau sistem permesinannya. Secara umum, sumber getaran pada kapal dapat dikategorikan sebagai berikut:

Sumber dari dalam kapal

- Getaran dapat muncul akibat perbedaan frekuensi kerja antara mesin utama dan mesin-mesin bantu, yang menciptakan gaya tak seimbang (unbalanced force).
- Jika pembuatan baling-baling tidak presisi, terutama dalam hal distribusi beratnya, maka titik beratnya tidak berada di pusat rotasi. Hal ini memicu gaya dorong yang tidak merata saat berputar.
- Meskipun distribusi berat baling-baling sudah tepat, perbedaan sudut pitch di antara daun-daunnya dapat menyebabkan distribusi dorongan air yang tidak seragam.

- Ketidaksempurnaan dalam proses pemasangan atau penyelarasan (alignment) baling-baling juga bisa menyebabkan torsi yang tidak diinginkan.
- Pada kapal dengan dua baling-baling (twin screw), getaran bisa timbul bila aliran fluida yang melewati masing-masing baling-baling dan badan kapal (hull) tidak seimbang.
- Terjadinya pusaran air (vortex), baik pada baling-baling maupun pada bagian kemudi, turut menyumbang pada timbulnya getaran.
- Ketidaksesuaian ukuran baling-baling dengan bentuk buritan kapal dapat menyebabkan tekanan air yang berlebihan, sehingga memicu getaran tambahan.

Sumber dari luar kapal (gelombang laut)

- **Hempasan gelombang:** Ketika kapal menghantam gelombang secara langsung, dapat terjadi fenomena seperti *slamming*, *bow flare*, dan *shipping green*, yang memicu getaran jenis *whipping vibration*.
- **Alunan gelombang:** Gelombang yang berkelanjutan dan berukuran kecil dapat menyebabkan getaran lambung kapal yang dikenal sebagai *springing vibration*, yang dalam kondisi tertentu bisa memicu resonansi.

2.5 Getaran Kapal

Getaran kapal merupakan salah satu bagian dari masalah yang tercakup dalam dinamika kapal (*ship dynamics*). Secara garis besar, getaran kapal terjadi ditinjau dalam 2 hal yaitu:

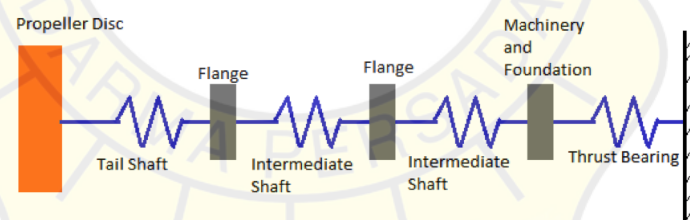
- Lenturan badan kapal akibat dari getaran yang terutama disebabkan oleh gelombang dan baling-baling.
- Getaran lokal system konstruksi maupun komponen-komponen mesin diantaranya getaran pelat, poros, tiang mast, pompa, dan lain-lain (Putranto & Imron, 2018).

Dalam proses Pembangunan kapal baru di Indonesia, saat ini belum melakukan pemeriksaan getaran sebagai bagian dari prosedur standar operasi (SOP), karena memang belum ada ketentuan klasifikasi yang rigid mengatur tentang hal tersebut (Ref).(Imron, 2014)

2.6 Getaran Mesin (Machinery Vibration)

Kondisi kapal akan mempengaruhi tingkat getaran yang terjadi di kapal. Getaran yang terjadi selama kapal beroperasi akan menyebabkan keausan pada bagian yang bergetar, munculnya ketidak-seimbangan pada permesinan, dan kemunduran kinerja sistem propulsi (Putranto, 2017). Apabila konstruksi pada bagian sistem propulsi diberi penguat untuk meredam getaran akibat eksitasi baling-baling, maka tingkat getaran yang dihasilkan akan mengalami penurunan (Priatmoko, 2013).

Getaran yang berasal dari mesin dan komponen terkait yang beroperasi di dalam kapal, seperti mesin utama, baling-baling, *gearbox*, dan pompa. Ketika mesin beroperasi, bagian-bagian yang bergerak menciptakan frekuensi getaran yang dapat mempengaruhi keseluruhan struktur kapal. Getaran ini sering kali menjadi sumber ketidaknyamanan bagi awak kapal dan dapat menyebabkan kelelahan material jika tidak dikelola dengan baik.(Setiawan et al., 2020)



Sumber. Setiawan et al., 2020)

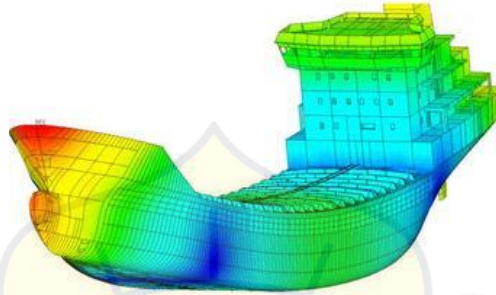
Gambar 2.5 Machinery Vibration

2.7 Getaran Lambung Kapal (Hull Vibration)

Getaran ini terjadi akibat interaksi antara lambung kapal dan gelombang laut serta gaya eksitasi dari mesin. Getaran lambung dapat dibagi menjadi getaran global, yang mempengaruhi seluruh badan kapal, dan getaran lokal, yang hanya

mempengaruhi bagian tertentu dari kapal. Getaran global biasanya dirasakan oleh awak kapal dan dapat berdampak pada kinerja operasional.(Setiawan et al., 2020)

Getaran yang terjadi pada kapal dapat memberukan yang pengaruh cukup besar terhadap ketahanan kontruksi kapal itu sendiri. Kontruksi kapal yang terus mengalami getaran beresiko besar mengalami kegagalan struktur karena getaran itu sendiri bersifat merusak. (Arifin et al., 2017b)



Sumber: Setiawan et al., 2020

Gambar 2.6 Hull Vibration

2.8 Jenis Getaran Pada kapal

Getaran bebas dan getaran paksa merupakan 2 kelompok getaran yang secara umum diketahui. Getaran bebas terjadi saat sistem beresilasi karena gaya yang ada dalam sistem itu sendiri (*inherent*) dan saat tidak ada gaya luar yang mempengaruhi. Sedangkan getaran paksa adalah getaran yang terjadi karena adanya rangsangan gaya luar yang berisolasi dengan sistem sehingga sistem dipaksa untuk bergetar pada frekuensi rangsangan.(Wulandari et al., 2021)

- Getaran bebas adalah getaran yang terjadi pada suatu sistem tanpa adanya gaya eksternal yang bekerja terus-menerus setelah gangguan awal diberikan. Pada kondisi ini, sistem akan bergetar pada frekuensi alaminya, yaitu frekuensi yang bergantung pada massa dan kekakuan sistem tersebut. Ketika sebuah benda atau struktur diberi gangguan, seperti simpangan awal atau kecepatan awal, benda tersebut akan mengalami getaran bebas sampai energi yang dimilikinya habis akibat redaman internal atau eksternal.
- Getaran paksa terjadi pada suatu sistem ketika gaya eksternal secara kontinu diterapkan pada sistem tersebut. Frekuensi getaran sistem pada kasus ini akan dipengaruhi oleh frekuensi gaya eksternal. Jika gaya eksternal diterapkan

pada frekuensi yang mendekati frekuensi alami sistem, maka akan terjadi fenomena resonansi, yang menyebabkan amplitudo getaran meningkat secara signifikan. Hal ini bisa berdampak merusak sistem jika tidak dikendalikan dengan baik.

2.9 Frekuensi Natural

Frekuensi alami pada struktur kapal adalah frekuensi di mana struktur kapal bergetar secara alami tanpa adanya gaya eksternal yang diterapkan. Setiap struktur memiliki satu atau lebih frekuensi alami yang ditentukan oleh massa dan kekakuan materialnya. Ketika struktur dikenakan gaya, seperti dari mesin atau gelombang laut, jika frekuensi gaya tersebut mendekati salah satu frekuensi alami, resonansi dapat terjadi, yang dapat menyebabkan amplitudo getaran meningkat secara signifikan. (Wulandari et al., 2022)

Perubahan dalam kondisi pembebanan kapal dapat menyebabkan frekuensi berbagai mode getaran saling berdekatan atau bahkan bertumpang tindih. Oleh karena itu, tidaklah realistis untuk sepenuhnya menghilangkan semua kemungkinan resonansi—karena jika demikian, pengoperasian kapal menjadi tidak memungkinkan. Namun, jika frekuensi-frekuensi tersebut telah diperhitungkan dengan cermat dan diamati secara empiris, maka penggabungan data dapat diperluas guna memberikan margin toleransi terhadap potensi kesalahan dalam perhitungan.

Sejumlah studi dan eksperimen telah dipublikasikan untuk mengembangkan metode yang mampu memperkirakan frekuensi alami kapal, dengan tujuan utama menghindari terjadinya resonansi. Frekuensi serta amplitudo relatif dari mode lentur vertikal maupun transversal pada struktur kapal dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor utama berikut:

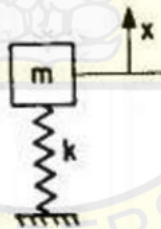
- a. Penyebaran beban sepanjang panjang kapal.
- b. Distribusi beban air tambahan di sekitar badan kapal.
- c. Distribusi kekakuan kapal terhadap beban lentur yang memanjang.
- d. Distribusi kekakuan terhadap tekanan yang diterima sepanjang struktur kapal.
- e. Pengaruh gerakan memanjang kapal yang berkaitan dengan efek inersia rotasi (rotary inertia).

- f. Penambahan gaya inersia akibat posisi amplitudo lokal yang berada di atas amplitudo dasar lambung kapal, terutama di area *sheer strake*.
- g. Deformasi lateral dan vertikal yang berkaitan dengan tegangan, sebagaimana dijelaskan melalui *Poisson's Ratio*.
- h. Pengaruh kekakuan tambahan yang dihasilkan dari daya apung kapal (buoyancy stiffness effect).

Penentuan frekuensi alami biasanya dilakukan melalui:

- Analisis numerik menggunakan *Finite Element Analysis* (FEA), untuk mendapatkan mode bentuk (*mode shapes*) dan frekuensi modal.
- Uji eksperimental modal (*Experimental Modal Analysis/EMA*), menggunakan *accelerometer* atau *hammer test*.

Dalam praktiknya, menurut Senjanović et al. (2010) dan Yudo et al. (2022), akurasi prediksi frekuensi natural sangat tergantung pada pemodelan distribusi massa, kekakuan, dan interaksi dengan fluida (*hydroelasticity*). Oleh karena itu, dilakukan optimasi desain agar frekuensi alami tidak berimpitan dengan frekuensi eksitasi dominan.



Gambar 2.6 Ilustrasi Frekwensi Natural

2.10 Frekuensi Eksistensi

Frekuensi eksitasi adalah frekuensi yang dihasilkan oleh suatu sumber gaya dinamis eksternal yang bekerja secara kontinu terhadap struktur. Dalam konteks kapal, sumber utama eksitasi biasanya berasal dari mesin induk, sistem propulsi (*propeller*), poros, serta komponen berputar lainnya. Ketika frekuensi eksitasi mendekati atau sama dengan frekuensi alami (*natural frequency*) dari struktur kapal, maka dapat terjadi resonansi, yang menyebabkan amplitudo getaran meningkat tajam dan berpotensi menimbulkan kerusakan struktural.

Jika frekuensi ini berimpit dengan salah satu mode bentuk (*mode shape*) struktur kapal, seperti pelat dasar kamar mesin, maka getaran resonansi dapat terjadi. Oleh karena itu, perhitungan frekuensi eksitasi menjadi sangat penting dalam desain dan evaluasi struktural kapal.

Menurut Setiawan et al. (2020), baling-baling kapal menghasilkan gaya dinamis secara kontinu yang dapat menyebabkan getaran resonansi apabila putarannya mendekati frekuensi alami struktur lambung kapal. Sementara itu, Putra et al. (2018) menekankan pentingnya evaluasi frekuensi eksitasi sebagai bagian dari modal analysis untuk menghindari resonansi pada struktur lokal dan global kapal.

Analisis numerik seperti *Finite Element Analysis* (FEA) juga memungkinkan prediksi interaksi antara frekuensi eksitasi dan respons dinamis struktur, sehingga dapat ditentukan apakah sistem berada dalam kondisi aman atau berisiko mengalami resonansi. Dalam peraturan klasifikasi seperti BKI Pt.1 Vol.III, juga disebutkan bahwa sistem propulsi harus dirancang agar frekuensi alami komponen struktural menjauhi frekuensi eksitasi yang umum terjadi selama operasi kapal.

2.11 Existing FEM

Existing FEM adalah Model Analisis Elemen Hingga yang sudah dijalankan sebelumnya untuk memeriksa kinerja struktur kapal. Model ini digunakan untuk mengevaluasi respons dinamis struktur terhadap eksitasi dari mesin, shaft, atau baling-baling. Hasil dari existing FEM biasanya mencakup data frekuensi natural, mode shape, dan kontur distribusi tegangan. (Yudo et al., 2022)

Metode Elemen Hingga (MEH) adalah metode numerik untuk mendapatkan solusi permasalahan diferensial, baik persamaan diferensial biasa (*Ordinary Differential Equation*) maupun persamaan diferensial parsial (*Partial Differential Equation*). Karena persamaan diferensial seringkali digunakan sebagai model permasalahan engineering maka penting bagi para insinyur untuk dapat memahami dan mampu menerapkan MEH. Saat ini MEH merupakan salah satu metode numerik paling versatile untuk memecahkan

problem dalam domain kontinum. Pada awalnya MEH dikembangkan untuk memecahkan problem dibidang mekanika benda padat (*Solid Mechanics*), tetapi kini MEH sudah merambah ke hampir semua *problem engineering* seperti mekanika

fluida (*fluid mechanics*), perpindahan panas (*heat transfer*), elektromagnetik (*electro magnetism*), getaran (*vibration*), analisis modal (*modal analysis*), dan banyak lagi *problem engineering* lainnya. Proses inti MEH adalah membagi problem yang kompleks menjadi bagian-bagian kecil atau elemen-elemen dari mana solusi yang lebih sederhana dapat dengan mudah diperoleh. Solusi dari setiap elemen jika digabungkan akan menjadi solusi problem secara keseluruhan.

Untuk mendapatkan solusi elemental, MEH menggunakan fungsi interpolasi untuk mengaproksimalkan solusi elemen. Untuk contoh ini suatu fungsi linear yang sederhana dipergunakan sebagai fungsi interpolasi. Setelah solusi setiap elemen diperoleh, dengan menggabungkan solusi-solusi elemen maka solusi keseluruhan problem dapat diperoleh. Dengan menggunakan fungsi polinomial seperti fungsi kuadrat sebagai fungsi interpolasi, solusi yang lebih akurat bisa diperoleh.

2.12 Kebisingan

Bising adalah bunyi yang ditimbulkan oleh gelombang suara dengan intensitas dan frekuensi yang tidak menentu. Berdasarkan frekuensi, tingkat tekanan bunyi, tingkat bunyi dan tenaga bunyi maka bising dibagi dalam 3 kategori:

1. *Occupational noise* (bising yang berhubungan dengan pekerjaan) yaitu bising yang disebabkan oleh bunyi mesin di tempat kerja, misal bising dari mesin ketik.
2. *Audible noise* (bising pendengaran) yaitu bising yang disebabkan oleh frekuensi bunyi antara 31,5 – 8.000 Hz.
3. *Impuls noise* (*Impact noise* = bising impulsif) yaitu bising yang terjadi akibat adanya bunyi yang menyentak, misal pukulan palu, ledakan meriam, tembakan bedil.

Dalam kapal suara terbesar berasal dari kamar mesin, karena di dalamnya terdapat mesin induk, mesin bantu, pompa-pompa dan peralatan lain yang semuanya menyebabkan kebisingan, terutama pada saat kapal berlayar. Kebisingan dengan tingkat intensitas tinggi yang tidak disadari menyebabkan dampak serius bagi ABK serta ketidaknyamanan untuk setiap penumpang.

Contoh kebisingan yang ditimbulkan oleh kapal yang berpengaruh langsung pada kenyamanan penumpang antara lain dari main engine itu sendiri yang

merupakan sumber kebisingan terbesar, exhaust gas outlet pada dek serta auxiliary machinery dan lain-lain.

Pada waktu mendatang, kebisingan akan menjadi masalah yang sangat penting, karena akan berimbas langsung pada kesehatan dan kenyamanan manusia. Contohnya, menyebabkan pola dan pelaksanaan pekerjaan menjadi terganggu atau mengurangi konsentrasi, komunikasi, dan hasil tidak optimal. Sehingga peraturan-peraturan dan rekomendasi-rekomendasi baru akan semakin ketat mengatur mengenai pengaturan level getaran dan kebisingan maksimum untuk berbagai ruangan di kapal.

Tabel 2.2 kebisingan maksimum di ruang kapal mesin menurut ABS

No.	Ruangan	Tingkat dB(A)
1	Kamar mesin dengan ABK berada terus menerus di dalam kamar mesin	100 dB(A)
2	Kamar mesin dengan ABK yang tidak terus menerus di dalam kamar mesin	110 dB(A)
3	Workshop (ruang yang biasa digunakan untuk perbaikan, alat-alat bengkel)	100 dB(A)
4	Ruang control (ruangan yang digunakan untuk mengontrol ruangan lain, mengontrol permesinan)	100 dB(A)
5	Ruang kipas (ruangan yang terdapat kipas untuk ventilasi, menghisap dan meniupkan udara)	100 dB(A)

Sumber: ABS Guide For Crew Habitability On Ship Section 4

Kebisingan di bawah air yang disebabkan oleh propeller terjadi disebabkan adanya kavitasi. Kebisingan yang terjadi langsung di transmisikan ke air. Kebisingan yang dihasilkan dari kapal-kapal besar seperti tanker bernilai 190 dB lebih, sedangkan untuk kapal ukuran sedang menghasilkan sekitar 150-170 dB. *International Council for the Exploration of the Sea (ICES) 209* secara efektif membentuk standar kebisingan melalui kapal ikan yang dijadikan kapal penelitian. Untuk itu perlu analisis tingkat radiasi kebisingan yang bersumber dari propeller. Batas standar maksimum kebisingan kapal menurut ICES 209 yaitu 135 dB.

2.13 Resonansi

Resonansi pada struktur kapal adalah fenomena yang terjadi ketika frekuensi eksitasi dari sumber luar (seperti mesin atau gelombang laut) mendekati atau sama dengan frekuensi alami dari struktur kapal. Ketika kondisi ini terpenuhi, amplitudo getaran pada struktur dapat meningkat secara signifikan, yang berpotensi menyebabkan kerusakan atau kegagalan struktural. (Poernomo et al., 2023)

Secara umum, saat sebuah kapal berlayar di tengah lautan, struktur lambung kapal (hull) akan menerima berbagai gaya dari interaksi dengan gelombang laut, baik berupa hempasan keras maupun alunan yang berkelanjutan—terutama ketika gelombang datang dari arah haluan kapal. Hempasan ini biasanya terjadi jika kapal berada di lautan dengan ketinggian gelombang mencapai 2 hingga 3 meter, dan arah gelombang menghadap langsung ke haluan.

Hempasan tersebut biasanya mengenai bagian haluan kapal, khususnya area *bow flare* dan bagian bawah lambung (*bottom*) sekitar 60% di bawah garis sarat. Dampak pada *bow flare* dikenal sebagai *bow flare impact*, sementara yang terjadi di bagian bawah disebut *bottom impact*. Kedua kejadian ini dikategorikan sebagai *slamming impact*.

Dalam kondisi cuaca buruk, gelombang tinggi bahkan bisa mencapai geladak atas di haluan kapal. Fenomena ini disebut *shipping green water*, yaitu ketika air laut menghantam dan mengalir di atas geladak. Ketiga jenis kejadian ini—*slamming* dan *green water*—berpotensi menyebabkan kerusakan serius pada struktur kapal, terutama di area haluan dan geladak atas, serta memicu jenis getaran yang dikenal sebagai *whipping vibration*.

Berbeda dari ketiganya, ketika kapal mengalami alunan gelombang yang stabil tanpa pukulan langsung, dapat terjadi fenomena *springing*, yakni getaran lambung kapal akibat gelombang yang terjadi secara kontinu. Ini merupakan jenis getaran resonansi yang dikenal sebagai *wave-induced hull vibration*. Jika resonansi ini menghasilkan amplitudo getaran yang melebihi batas toleransi, maka getaran yang terjadi, disebut *steady-state vibration*, dapat menimbulkan kerusakan struktural atau kelelahan material (*fatigue*).

Berdasarkan data empiris, sekitar 80% getaran pada kapal berasal dari baling-baling, meskipun analisisnya tidak sesederhana pendekatan pada sistem *power*

plant di darat karena adanya fenomena *blade rate frequency*, yang tidak umum ditemukan dalam sistem darat (Vorus, 2010).

Dua kriteria berikut umum digunakan secara empiris (Vorus, 2010):

- Jika frekuensi getaran yang terdeteksi sama dengan nilai putaran poros (RPM) dikalikan jumlah daun baling-baling, dan frekuensi ini berubah mengikuti perubahan RPM, maka sangat mungkin baling-baling merupakan sumber utama getaran.
- Sebaliknya, jika frekuensi tersebut atau kelipatannya tidak teridentifikasi, maka kemungkinan besar baling-baling bukanlah penyebab utama getaran.

2.14 Redaman

Sebuah sistem yang mengalami getaran bebas (*free vibration*) secara alami akan menunjukkan penurunan amplitudo seiring waktu. Penurunan ini terjadi akibat adanya sifat peredaman (*damping*) yang melekat pada material. Berdasarkan karakteristik peredamannya, redaman dalam sistem mekanik dapat diklasifikasikan ke dalam tiga jenis utama:

1. Redaman Viskus (Viscous Damping)

Jenis redaman ini terjadi ketika sebuah benda beresilasi di dalam fluida yang memiliki tingkat kekentalan tertentu. Selama gerakan osilasi, benda tersebut mengalami gesekan dengan molekul-molekul fluida, yang menghambat pergerakan. Gaya redaman viskus umumnya sebanding dengan kecepatan benda tersebut.

2. Redaman Coulomb (Dry Friction Damping)

Redaman ini timbul akibat gesekan kinetik antara dua permukaan padat yang saling bersentuhan dalam kondisi kering. Gaya yang dihasilkan bersifat konstan, tidak tergantung pada kecepatan, dan sering dijumpai pada sistem mekanik yang melibatkan kontak antarpermukaan kering.

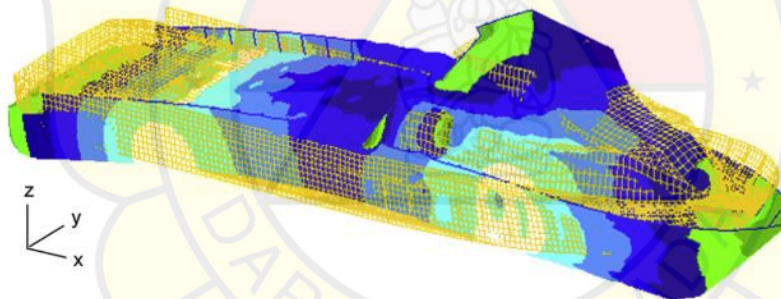
3. Redaman Padat (Solid atau Hysteretic Damping)

Jenis ini muncul karena gesekan internal di dalam material padat ketika mengalami deformasi. Redaman terjadi akibat histeresis, yaitu energi yang hilang dalam satu siklus tegangan-regangan. Besarnya redaman ini umumnya diukur melalui amplitudo tegangan (*stress amplitude*).

Ketiga tipe redaman tersebut bekerja dengan cara mengurangi energi getaran secara perlahan, sehingga sistem tidak terus bergetar dengan amplitudo konstan. Pemahaman terhadap karakteristik masing-masing redaman sangat penting dalam merancang struktur kapal, guna mencegah terjadinya resonansi serta mengurangi risiko kelelahan material (*fatigue*).

2.15 Finite Element Analysis

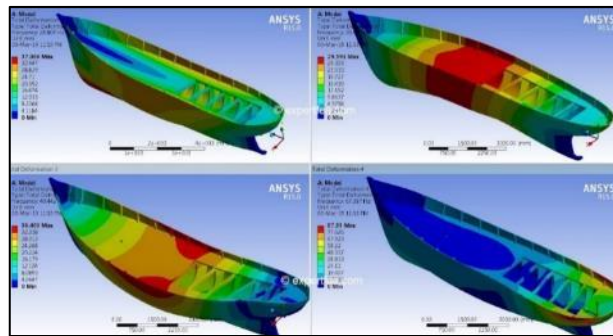
Finite Element Analysis (FEA) adalah sebuah metode numerik yang digunakan untuk memecahkan masalah-masalah kompleks dalam bidang teknik dan fisika, seperti analisis struktur, perpindahan panas, aliran fluida, elektromagnetisme, dan lain-lain. FEA bekerja dengan membagi suatu objek atau sistem yang kompleks menjadi bagian-bagian kecil yang lebih sederhana, yang disebut elemen hingga (*finite elements*). Setiap elemen ini kemudian dianalisis secara individu, dan hasilnya digabungkan untuk mendapatkan solusi keseluruhan dari sistem tersebut. (Susianto, 2023)



Sumber. *A study of vibration and vibration control of ship structures*

Gambar 2.7. *The two-node vertical vibration mode of the 30 m crew vessel*

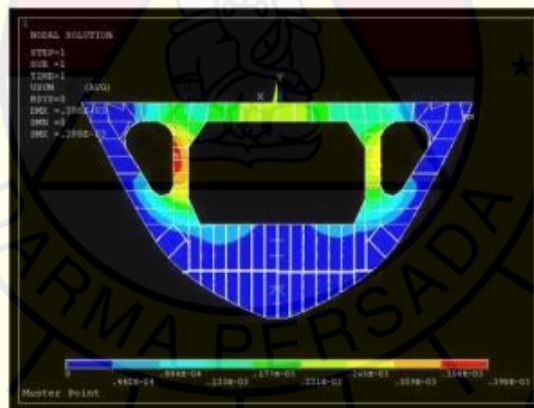
Penggunaan *Finite Element Analysis* (FEA) dalam analisis getaran kapal sangat penting untuk memahami dan mengelola perilaku dinamik struktur kapal. FEA dimulai dengan pembuatan model geometri kapal yang akurat. FEA memungkinkan simulasi respons dinamik dari struktur kapal terhadap beban dinamis yang bervariasi, seperti getaran dari mesin induk dan baling-baling. Dengan melakukan analisis ini dapat mengevaluasi bagaimana struktur berperilaku di bawah kondisi operasional yang berbeda. (Poernomo et al., 2023)



Sumber : (Poernomo et al., 2023)

Gambar 2.8 Finite Element Analysis

Pemodelan struktur kapal menggunakan metode elemen hingga (FEM) adalah proses analisis yang membagi struktur kapal menjadi elemen-elemen kecil untuk mempelajari perilaku dinamik dan respons terhadap berbagai beban. Tujuan dari pemodelan ini adalah untuk mengidentifikasi titik lemah, menghitung tegangan, dan memastikan bahwa desain memenuhi standar keselamatan dan kinerja. (Yudo et al., 2022)



Sumber : (Yudo et al., 2022)

Gambar 2.9 Finite Element Method

2.16 Evaluasi Getaran Berdasarkan ISO 6954 dan BKI

ISO 6954: Standar Getaran pada Kapal

ISO 6954:2000 adalah standar internasional yang mengatur batas ambang getaran yang dapat diterima di ruang akomodasi dan area kerja kapal dari sudut

pandang kenyamanan manusia. Standar ini sangat penting digunakan dalam desain dan evaluasi getaran, terutama pada kapal niaga dan kapal negara non-perang.

Standar ini mengukur kecepatan getaran efektif (v_{eff}) dalam satuan mm/s RMS dan membaginya ke dalam tiga zona:

Tabel 2.3 Zona Kecepatan Getaran Efektif

Zona Evaluasi	Tingkat Getaran	Keterangan Umum
Area A	< 1.8 mm/s	Getaran sangat rendah, tidak terasa oleh manusia
Area B	1.8–4.5 mm/s	Getaran terasa ringan, namun masih dalam batas kenyamanan
Area C	> 4.5 mm/s	Getaran signifikan, dapat menyebabkan ketidaknyamanan dan perlu dievaluasi

Sumber: ISO 6954:2000

Dalam konteks *Finite Element Analysis* (FEA), hasil simulasi getaran (misalnya kecepatan RMS di titik ruang mesin atau geladak) akan dibandingkan terhadap standar ISO ini. Jika nilai melebihi Area B atau Area C, maka dapat disimpulkan bahwa struktur perlu dimodifikasi atau direduksi resonansinya.

2.13 Getaran Menurut BKI (Biro Klasifikasi Indonesia)

Berdasarkan *BKI Rules for Hull – Volume II – Bab F.1*, struktur kapal harus dirancang agar bebas dari resonansi dalam kondisi operasi utama. BKI juga menganjurkan penggunaan ISO 6954 sebagai acuan evaluasi getaran, terutama untuk:

Getaran (vibration) pada kapal didefinisikan sebagai gerakan osilasi mekanis yang dapat terjadi pada struktur kapal atau komponen mesin akibat gaya dinamis internal maupun eksternal. Getaran ini bisa bersifat periodik (berulang dengan frekuensi tertentu) maupun acak.

Dalam dokumen teknis BKI (misalnya *Rules for the Classification and Construction of Sea-going Ships*), BKI menetapkan batasan dan panduan sebagai berikut:

- Batas getaran diterima secara umum (untuk kenyamanan awak):
 - Akselerasi getaran $\leq 0.1 - 0.3$ g (tergantung lokasi dan fungsi ruang).
 - Kecepatan getaran ≤ 4.5 mm/s RMS untuk kenyamanan (ISO 6954, acuan umum dalam pengukuran getaran kapal).
- Fokus BKI dalam pengendalian getaran:
 - Rekomendasi desain struktur kapal agar frekuensi alami tidak beresonansi dengan frekuensi kerja mesin atau propeller.
 - Penempatan dan penopangan mesin harus memperhatikan isolasi getaran.
 - Penilaian getaran dilakukan melalui analisis numerik (FEA – Finite Element Analysis) atau pengujian langsung (*vibration measurement*).

Evaluasi dari hasil FEM harus:

- Membandingkan kecepatan RMS getaran dengan ISO 6954 (Area A–C)
- Memastikan frekuensi alami pelat dan penegar tidak berimpit dengan f_{blade}
- Jika nilai simulasi menunjukkan potensi resonansi atau getaran tinggi (> 4.5 mm/s), maka rekomendasi desain seperti penambahan *stiffener*, peningkatan kekakuan lokal, atau penggunaan peredam dapat diajukan.