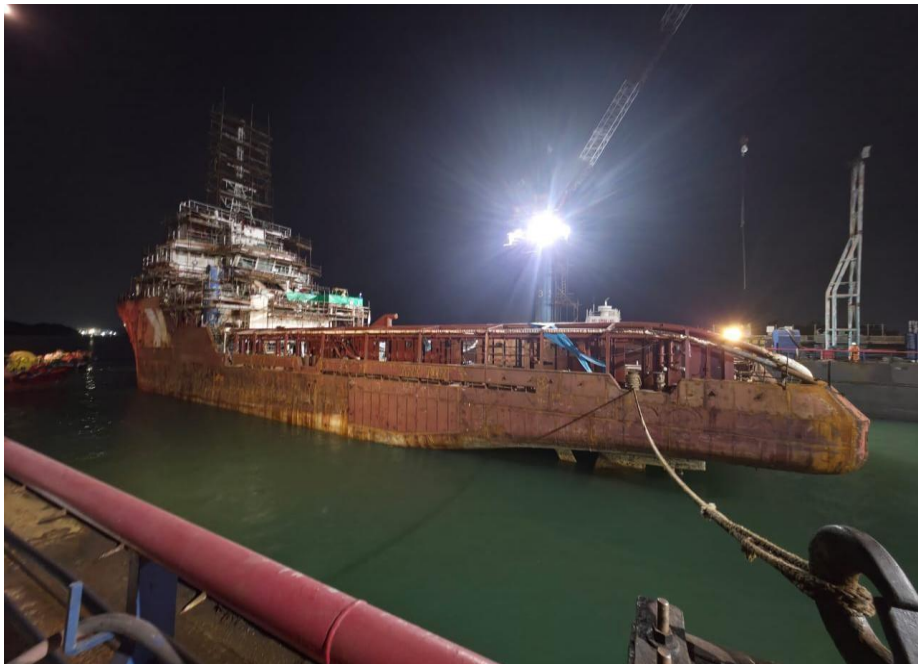


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Anchor Handling Tug Supply

AHTS merupakan jenis kapal khusus dalam kategori *offshore support vessel* yang dirancang untuk mendukung operasi di laut lepas, terutama pada industri minyak dan gas bumi serta berbagai proyek lepas pantai lainnya. Kapal ini memiliki karakteristik dan fungsi yang berbeda dengan kapal biasa karena dirancang untuk menangani tugas-tugas berat dan kompleks di lingkungan laut yang ekstrem (Sutisna et al., 2017). Dalam kajian teknik perkapalan, kapal AHTS digambarkan sebagai kapal yang memiliki peran ganda: selain menangani jangkar dan rantai untuk penambatan rig atau struktur terapung, juga memiliki kemampuan menarik/towing, serta menyediakan suplai logistik dan peralatan ke unit offshore.

Dalam konteks operasional offshore, AHTS sering dipandang sebagai unit multifungsi yang meliputi tugas penempatan jangkar, penarikan platform atau barge, sampai distribusi material dan personel ke lokasi kerja lepas pantai. Kapal AHTS biasanya dilengkapi dengan peralatan kerja khusus seperti towing winch, anchor handling winch, dan sistem propulsi dengan bollard pull tinggi untuk menanggung beban tarikan besar. Selain itu, kapal ini dapat dilengkapi dengan *Dynamic Positioning system* untuk mempertahankan posisi kapal secara akurat di tengah laut tanpa perlu jangkar, terutama saat melakukan operasi penanganan beban atau dekat struktur laut. Dalam literatur teknik perkapalan, fungsi kapal AHTS tidak hanya berhenti pada penanganan jangkar dan suplai logistik, melainkan juga mencakup dukungan operasional rig, *offshore construction*, sampai berbagai kegiatan teknis lain yang memerlukan kapal dengan *bollard pull*, dek luas, serta sistem kerja maritim yang kuat dan aman (Ahmed et al., 2025).



Gambar 2. 1 Anchor Handling Tug Supply (Sumber: Penulis, 2025)

2.2 Sistem Propulsi

Sistem propulsi kapal merupakan sistem utama yang berfungsi menghasilkan gaya dorong (*thrust*) untuk menggerakkan kapal di perairan. Sistem ini bekerja dengan mentransmisikan energi mekanik dari mesin penggerak utama menuju baling-baling (*propeller*), sehingga menghasilkan gaya reaksi terhadap air yang mendorong kapal bergerak maju atau mundur. Kinerja sistem propulsi sangat menentukan performa operasional kapal, termasuk kecepatan, efisiensi bahan bakar, kemampuan manuver, serta stabilitas operasi pada berbagai kondisi pelayaran (Tran & Shaheen, 2025).

Secara umum, sistem propulsi kapal terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu mesin penggerak utama (*main engine*), sistem transmisi daya seperti *gearbox* dan poros penggerak (*shafting system*), serta baling-baling (*propeller*) sebagai komponen yang secara langsung menghasilkan gaya dorong. Energi yang dihasilkan oleh mesin utama diteruskan melalui sistem poros menuju baling-baling, yang kemudian mengubah energi rotasi menjadi gaya dorong melalui interaksi hidrodinamika antara daun baling-baling dan air laut. Dalam perkembangan teknologi perkapalan, sistem propulsi kapal dirancang untuk mencapai efisiensi energi yang tinggi serta kemampuan manuver yang optimal. Salah satu pengembangan sistem propulsi adalah penggunaan *Controllable Pitch Propeller* yang memungkinkan perubahan sudut daun baling-baling selama operasi kapal berlangsung. Sistem ini memberikan fleksibilitas dalam pengaturan gaya dorong tanpa harus mengubah kecepatan putar mesin utama, sehingga dapat meningkatkan efisiensi operasional dan respons manuver kapal pada berbagai kondisi operasi (Lumbanraja et al., 2021; Purnama & Alghifari, 2023).

Selain aspek performa, sistem propulsi juga memiliki peran penting dalam aspek keandalan dan keselamatan operasi kapal. Kegagalan pada komponen propulsi dapat menyebabkan penurunan kemampuan manuver kapal, gangguan operasi, hingga potensi risiko keselamatan pelayaran. Oleh karena itu, analisis keandalan sistem propulsi menjadi penting untuk mengidentifikasi potensi kegagalan komponen serta merancang strategi pemeliharaan yang efektif guna menjaga kontinuitas operasi kapal (Ugoji et al., 2022).

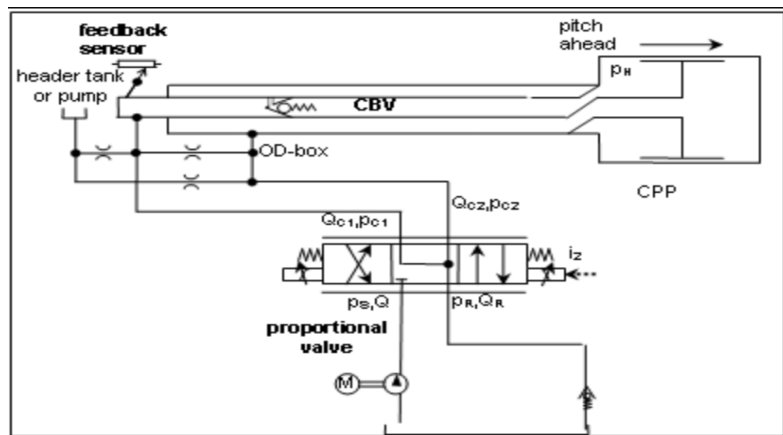
2.3 Controllable Pitch Propeller

Controllable Pitch Propeller merupakan salah satu jenis *propeller* dalam sistem propulsi kapal yang memungkinkan *pitch* dari bilah-bilah *propeller* diubah secara aktif selama operasi, tanpa harus mengubah kecepatan putar poros utama mesin kapal. Mekanisme perubahan *pitch* dilakukan oleh sistem aktuasi di dalam *hub propeller* yang terhubung dengan sistem kontrol di ruang kendali kapal. Perubahan *pitch* ini memberikan tingkatan kontrol dorong *thrust* yang lebih baik pada berbagai kondisi beban dan kecepatan, serta meningkatkan manuver kapal dan efisiensi bahan bakar (Tupper, 2013a).

Dalam kajian marine engineering, CPP dijelaskan sebagai *propeller* yang dilengkapi dengan mekanisme yang memungkinkan pengaturan sudut bilah *propeller* melalui aktuasi hidraulik atau mekanis, sehingga kapal dapat menyesuaikan gaya dorong sesuai kebutuhan operasional tanpa perubahan signifikan pada putaran mesin. Perubahan *pitch* ini juga dapat memproduksi *thrust* ke belakang tanpa memerlukan *reversing gear* pada mesin utama, sehingga sederhana dari segi operasional dan meningkatkan respons manuver dalam situasi sempit seperti berlabuh atau keluar masuk Pelabuhan. Secara teknis, CPP memungkinkan kecepatan poros utama dijaga konstan, sedangkan daya *thrust* diatur melalui modifikasi *pitch* bilah, sehingga kerja mesin tetap optimal dan konsumsi bahan bakar dapat ditekan lebih efisien dibandingkan dengan *fixed-pitch propeller* yang hanya mengandalkan perubahan RPM untuk mengubah *thrust* (J. Carlton, 2007; Tupper, 2013b)

2.3.1 Prinsip Kerja CPP

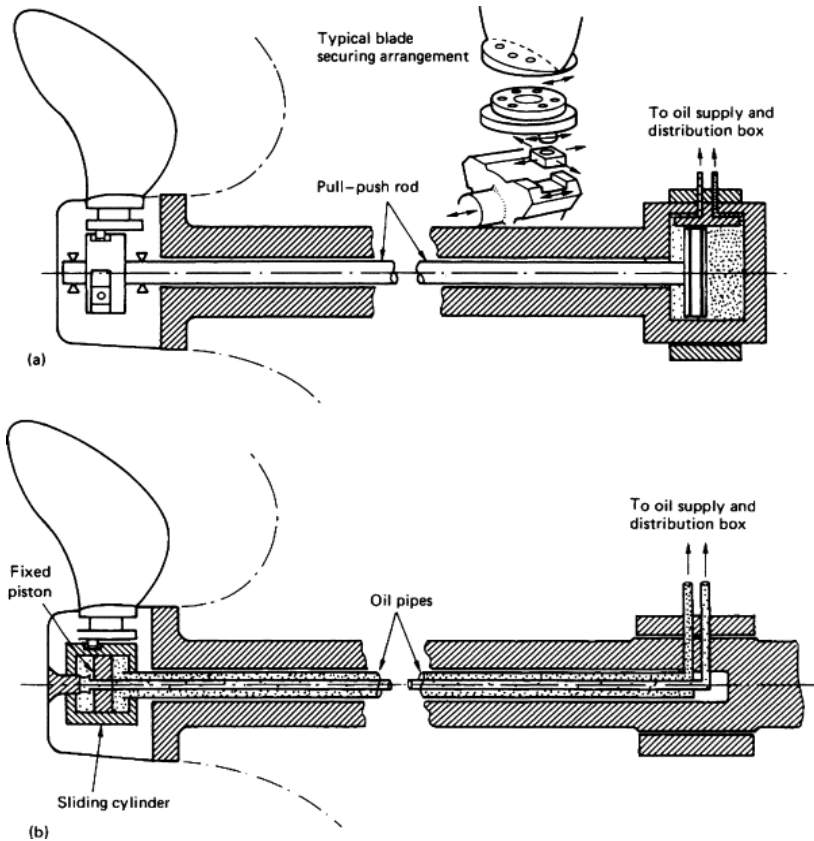
Prinsip kerja Propeler Sudut Kemiringan Terkendali *Controllable Pitch Propeller* didasarkan pada sistem hidraulik, yang melibatkan pengaliran cairan oli ke rumah yang terletak pada poros propeller. Di dalam rumah tersebut terdapat rotor yang terhubung dengan bilah-bilah propeler. Ketika cairan oli diarahkan ke depan, oli mendorong sirip pemisah pada rotor, menyebabkan bilah-bilah berputar pada sudut tertentu. Sebaliknya, jika arah aliran dibalik, bilah-bilah akan berputar ke arah yang berlawanan. Operasi ini dapat dilakukan menggunakan dua sistem: sistem batang tarik-dorong dan sistem piston poros. Pada sistem batang tarik-dorong, batang panjang menghubungkan poros kapal dengan poros baling-baling. Di sisi lain, sistem piston poros menempatkan batang piston di dalam poros baling-baling (J. S. Carlton, 2007a, 2007b).



Gambar 2. 2 Prinsip Kerja Controllable Pitch Propeller
(Sumber: Manual Book MAN Diesel VBS-Propeller-Mk3, 2001)

2.3.2 Proses Kerja CPP

Sudut bilah CPP dikendalikan secara hidraulik melalui sistem yang meliputi cincin pompa, piston, kepala silinder, dan poros bilah. Cincin piston, kepala silinder, dan poros bilah terletak di pusat propeler. Minyak hidraulik bertekanan tinggi bekerja pada kedua sisi piston, mendorongnya secara aksial ke poros propeler. Piston terhubung ke batang piston yang terhubung ke kepala silinder, yang bergerak secara aksial bersama piston. Blok geser masuk ke slot mesin pada kepala silinder dan sejajar dengan pin yang ditempatkan secara eksentrik pada cincin poros engkol. Saat kepala silinder bergerak bolak-balik di dalam poros, blok geser bergerak dalam busur, yang juga menggerakkan pin eksentrik dan memutar cincin poros engkol tempat bilah CPP dipasang dengan baut. Sudut kemiringan dan kecepatan dikendalikan oleh tuas. Sudut kemiringan dan kecepatan dapat disesuaikan secara otomatis untuk mengubah sudut kemiringan saat propeler beroperasi, sehingga mencapai efisiensi keseluruhan yang optimal dan memungkinkan tenaga mesin utama digunakan sepenuhnya dalam berbagai kondisi (J. S. Carlton, 2007c; Tupper, 2013a).



Gambar 2. 3 Proses Kerja Controllable Pitch Propeller
(Sumber: The Maritime Engineering Reference Book, 2008)

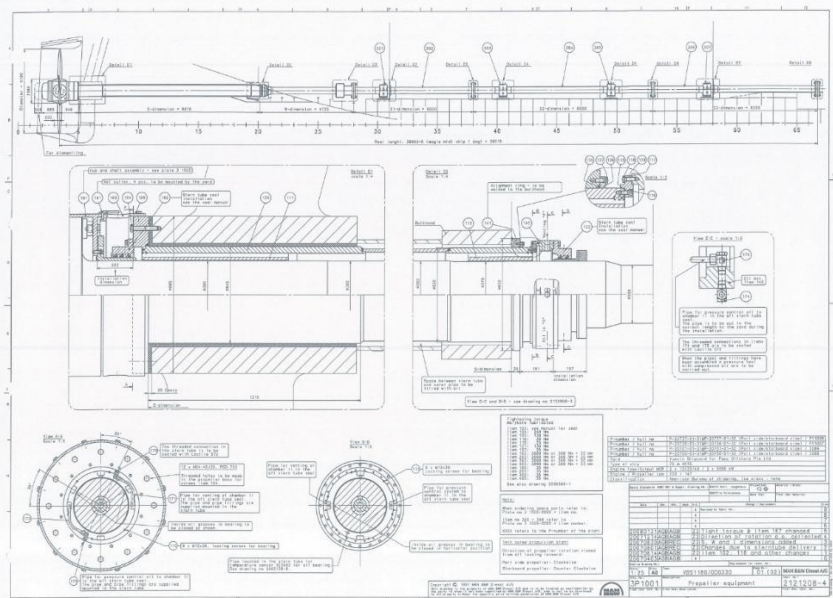
2.3.3 Spesifikasi CPP

Kapal AHTS dilengkapi dengan dua CPP yang dirancang khusus untuk meningkatkan kemampuan manuvernya di perairan terbuka maupun sempit. Kehadiran dua CPP ini memungkinkan kapal melakukan perubahan arah dengan lebih presisi dan responsif, sehingga mendukung operasi penarikan, penempatan jangkar, dan tugas-tugas lepas pantai lainnya. Setiap propeller bekerja secara independen namun terkoordinasi, memberikan fleksibilitas dalam pengaturan kecepatan dan arah dorongan. Spesifikasi dari CPP tersebut adalah sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Spesifikasi Controllable Pitch Propeller AHTS (Sumber: Manual Book MAN Diesel VBS-Propeller-Mk3, 2001)

<i>Shipyard</i>	:	Yuexin Shipyard, Newb. 3088, 3089, PY1007 and PY1008
<i>Classification society</i>	:	ABS
<i>Propeller type</i>	:	VBS1180, ODG33
<i>Engine type</i>	:	2x12V32/40
<i>Gear Type</i>	:	Reintjes type LAF 7750

<i>Seal Type</i>	:	Siimplex compact SC2B420, SC2Z400
<i>Rpm engine/propeller</i>	:	750/147
<i>Maker</i>	:	MAN B&W Diesel A/S
<i>Number of propeller blades</i>	:	4
<i>HUB Diameter</i>	:	1180 mm
<i>Propeller Diameter</i>	:	4100 mm
<i>Weight of thruster and tunnel (dry)</i>	:	8500 kg



Gambar 2. 4 Drawing Controllable Pitch Propeller

(Sumber: Manual Book MAN Diesel VBS-Propeller-Mk3, 2001)

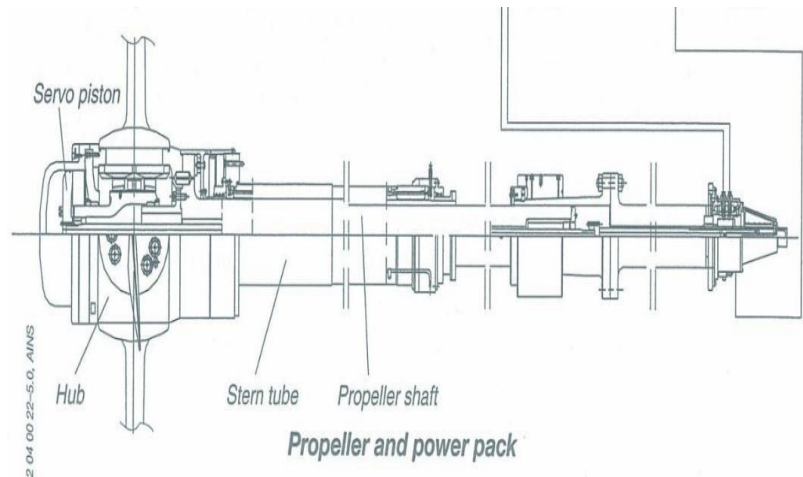
2.3.4 Komponen Utama CPP

Sistem propulsi CPP merupakan sistem terintegrasi yang tersusun atas beberapa subsistem dengan fungsi yang saling berkaitan. Berdasarkan *Instruction Manual Propeller MAN Diesel VBS-Propeller-Mk3*, sistem CPP dapat dikelompokkan ke dalam tiga kategori utama, yaitu sistem mekanik, sistem hidrolik, serta sistem kontrol. Pengelompokan ini dilakukan untuk memudahkan analisis fungsi, keandalan, serta interaksi antar subsistem dalam mendukung kinerja propulsi kapal:

1. Sitem Mekanis Propeller

Sistem mekanis pada CPP merupakan fondasi dari kemampuan propeller untuk mengubah sudut bilah. Intinya, bilah propeller tidak statis seperti pada FPP, tetapi dapat diputar pada porosnya untuk menyesuaikan *pitch angle* sesuai kebutuhan thrust dan efisiensi propulsi. Mekanisme ini melibatkan *hub propeller*, *blade bearing*, dan linkage yang menghubungkan aktuator dengan bilah propeller sehingga gerakan pitch dapat diteruskan secara akurat ke setiap blade. Secara teoritis, desain

mekanis harus mempertimbangkan beban hidrodinamik, torsi, dan gaya sentrifugal pada tiap blade saat perubahan pitch berlangsung untuk meminimalkan keausan komponen dan menjaga kestabilan thrust di berbagai kondisi operasi kapal. CPP memungkinkan perubahan thrust tanpa perlu memutar arah putaran poros penggerak, sehingga sangat mendukung manuver dan efisiensi operasional kapal (X. Zhang et al., 2025).



Gambar 2. 5 Sistem Mekanis pada Controllable Pitch Propeller (Sumber: Manual Book MAN Diesel VBS-Propeller-Mk3, 2001)

Komponen utama yang termasuk dalam sistem mekanik CPP ini ialah:

a. *Propeller shaft*

propeller shaft merupakan poros utama yang berfungsi sebagai media transmisi torsi dari mesin dan gearbox menuju propeller. Pada sistem propulsi kapal, propeller shaft menerima momen puntir dari mesin penggerak dan meneruskannya ke propeller sehingga propeller dapat berputar menghasilkan gaya dorong. Secara mekanik, propeller shaft bekerja dalam kondisi beban dinamis yang kompleks karena tidak hanya menerima torsi putar, tetapi juga mengalami gaya aksial dan beban lentur yang dipengaruhi kondisi operasi, variasi thrust, serta interaksi hidrodinamika propeller dengan air. Pada sistem CPP, keberadaan poros menjadi semakin penting karena sistem ini sering dioperasikan pada kondisi kecepatan putar tertentu namun dengan variasi thrust yang dihasilkan dari perubahan pitch. Kondisi tersebut dapat menyebabkan variasi beban pada sistem shafting dan menuntut kestabilan poros yang baik untuk menjaga performa serta mengurangi potensi getaran dan ketidaksejajaran. Selain itu, integritas shaft juga sangat menentukan kestabilan sistem ketika mekanisme pitch di dalam hub melakukan perubahan sudut daun secara simultan (Energy Solutions, n.d.).

b. *Hub Propeller*

hub propeller merupakan bagian pusat propeller yang berfungsi sebagai rumah mekanisme pengubah pitch sekaligus dudukan pemasangan daun propeller. Hub pada CPP tidak hanya berperan sebagai penghubung antara propeller shaft dengan daun

propeller, tetapi juga sebagai bagian struktural yang menahan gaya hidrodinamika serta menampung komponen mekanik penggerak pitch. Secara teknis, hub CPP memiliki desain yang lebih kompleks dibandingkan fixed pitch propeller karena di dalam hub terdapat mekanisme yang memungkinkan daun berputar terhadap sumbunya, bahwa pada CPP berukuran kecil, mekanisme penggerak pitch dapat menggunakan push-pull rod yang tersambung dari hub menuju gearbox atau shaftline. Sementara pada CPP berukuran besar, sistem servo cylinder dapat diintegrasikan langsung ke dalam hub.

Prinsip perbedaan tekanan di dalam dan luar hub juga menjadi aspek penting dari desain hub CPP. Tekanan di dalam hub dibuat lebih tinggi dibandingkan tekanan lingkungan luar untuk mencegah kebocoran air laut masuk ke dalam hub, sehingga mekanisme internal tetap terlindungi (Wartsila, 2026).

Dengan demikian, hub propeller pada CPP dapat dipahami sebagai pusat sistem mekanik yang menjalankan dua fungsi utama, yaitu:

1. fungsi struktural sebagai pengikat dan penyalur gaya, dan
2. fungsi mekanis sebagai rumah mekanisme pengubah pitch.

c. Propeller Blade

Daun propeller merupakan komponen yang secara langsung berinteraksi dengan fluida untuk menghasilkan gaya dorong kapal. Daun propeller pada CPP dipasang secara individual pada hub melalui sistem bearing dan spindle yang memungkinkan daun melakukan rotasi pada sumbunya. Rotasi daun inilah yang menyebabkan sudut pitch berubah. Secara ilmiah, perubahan pitch memengaruhi sudut serang (angle of attack) terhadap aliran air sehingga menghasilkan variasi gaya angkat hidrodinamika pada daun (Arifin & Felayati, 2023).

Variasi ini kemudian menghasilkan perubahan thrust dan torsi yang bekerja pada sistem propulsi. Pada kondisi pitch yang lebih besar, umumnya thrust meningkat, namun hal ini harus dikendalikan agar tidak menimbulkan kavitasi berlebih maupun beban torsi yang terlalu besar pada poros dan mesin. ScienceDirect menjelaskan bahwa CPP tersusun dari hub dan daun propeller yang terpisah, serta terdapat mekanisme internal yang memungkinkan daun bergerak secara simultan melalui lintasan tertentu untuk mengubah pitch angle.

d. Pitch Link

Pitch link merupakan salah satu komponen utama dalam mekanisme pengaturan sudut pada sistem *Controllable Pitch Propeller*. Komponen ini berfungsi sebagai elemen penghubung antara aktuator hidrolik di dalam hub propeller dengan daun baling-baling. Secara mekanis, pitch link mentransmisikan gerakan aksial yang dihasilkan oleh piston hidrolik menjadi gerakan rotasi pada masing-masing blade, sehingga sudut pitch dapat berubah sesuai dengan perintah sistem kendali.

Dalam operasinya, pitch link menerima beban aksial dan beban dinamis akibat variasi gaya hidrodinamis selama kapal beroperasi. Oleh karena itu, komponen ini dirancang dengan mempertimbangkan kekuatan material, ketahanan terhadap beban siklik (*fatigue strength*), serta ketahanan terhadap korosi dan keausan. Kegagalan pada pitch link dapat menyebabkan ketidaksesuaian sudut

pitch antar blade, menurunnya efisiensi propulsi, serta berpotensi menimbulkan getaran berlebih pada sistem propeller (Yurtseven & Aktay, 2023).

e. *Sliding block*

Sliding block merupakan komponen mekanis dalam sistem CPP yang berfungsi sebagai pengubah dan penerus gerakan dari aktuator hidrolis menuju mekanisme pengaturan sudut blade. Komponen ini bergerak secara aksial mengikuti pergerakan piston hidrolis di dalam hub, kemudian meneruskan gerakan tersebut ke pitch link melalui mekanisme kontak atau sambungan tertentu.

Desain *sliding block* menuntut tingkat presisi yang tinggi guna memastikan pergerakan yang stabil, minim gesekan, dan terhindar dari fenomena *sticking* atau keausan berlebih. Mengingat komponen ini bekerja dalam sistem tertutup yang terisi oli hidrolis, maka aspek pelumasan, tekanan kerja, serta kualitas material menjadi faktor penting dalam menjamin keandalan operasional. Gangguan pada *sliding block* dapat menghambat respons perubahan pitch dan berdampak pada performa sistem propulsi secara keseluruhan (Zhu & Guo, 2024).

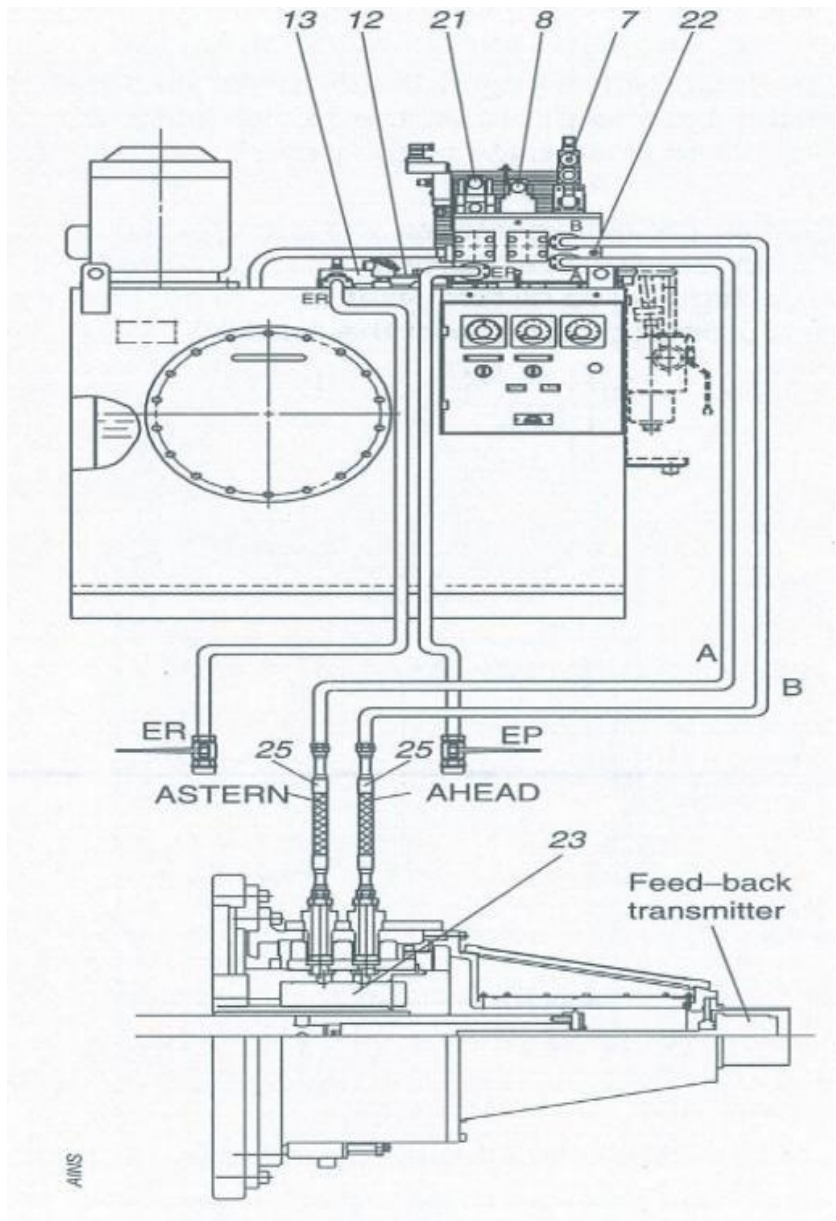
f. *Yoke*

Yoke merupakan komponen mekanis berbentuk garpu yang berfungsi sebagai penghubung antara *sliding block* dan pitch link dalam mekanisme pengaturan sudut blade pada sistem CPP. Komponen ini berperan dalam mendistribusikan gaya dari *sliding block* secara merata ke seluruh pitch link, sehingga perubahan sudut pitch pada setiap blade dapat terjadi secara simultan dan seimbang (Q. Zhang et al., 2021).

Dalam kondisi operasional, *yoke* menerima beban dinamis akibat perubahan sudut blade dan variasi beban hidrodinamis yang timbul selama kapal berlayar. Oleh karena itu, perancangan *yoke* harus memperhatikan distribusi tegangan, kekuatan struktural, serta ketahanan terhadap kelelahan material (*fatigue*). Kerusakan atau deformasi pada *yoke* berpotensi menyebabkan ketidakseimbangan sudut pitch antar blade yang dapat menurunkan efisiensi propulsi dan meningkatkan risiko getaran pada sistem (Dubbioso & Ortolani, 2020).

2. Sistem Hidrolis

Sistem hidrolis CPP adalah sumber tenaga utama untuk menggerakkan perubahan pitch pada bilah propeller. Mayoritas desain CPP modern menggunakan tekanan oli hidrolis yang dihasilkan oleh pompa untuk memindahkan piston dalam silinder aksi, yang kemudian mengubah sudut bilah secara kontinu atau bertahap. Sistem ini mencakup pompa hidrolis bertekanan tinggi, valve kontrol, aktuator piston, serta pipa dan seal yang harus tahan terhadap tekanan tinggi dan korosi. Pengaturan tekanan hidrolis yang presisi sangat penting karena langsung menentukan kecepatan dan akurasi perubahan pitch, serta mempengaruhi respon sistem saat manuver tajam atau perubahan arah thrust. Penelitian reliabilitas menunjukkan bahwa hidrolis merupakan salah satu subsistem kritis dalam CPP, karena gangguan pada jaringan hidrolis akan berdampak langsung pada kemampuan kapal untuk mengubah thrust saat dibutuhkan (Bai et al., 2023)



Gambar 2. 6 Sistem Hidrolik pada Controllable Pitch Propeller
(Sumber: Manual Book MAN Diesel VBS-Propeller-Mk3, 2001)

Komponen utama yang termasuk dalam sistem hidrolik CPP ialah:

a. *Hydraulic power unit*

Hydraulic Power Unit merupakan sumber tenaga utama dalam sistem hidrolik pada *Controllable Pitch Propeller*. Unit ini berfungsi untuk menghasilkan, menyimpan, dan mengatur tekanan fluida hidrolik yang digunakan dalam proses pengaturan sudut pitch baling-baling. Secara umum, HPU terdiri atas tangki oli (*reservoir*),

pompa hidrolis, motor penggerak, filter, katup pengaman (*relief valve*), akumulator, serta instrumen pengukuran tekanan dan temperatur.

Dalam operasinya, HPU bekerja dengan mensirkulasikan fluida hidrolis bertekanan menuju sistem aktuator di dalam hub propeller. Tekanan yang dihasilkan harus stabil dan sesuai dengan spesifikasi desain agar perubahan sudut pitch dapat berlangsung secara responsif dan presisi. Keandalan HPU sangat menentukan kinerja sistem CPP secara keseluruhan, sehingga aspek perawatan, kebersihan fluida, serta pengendalian tekanan menjadi faktor penting dalam menjaga kontinuitas operasi.

b. Pompa Hidrolis

Pompa hidrolis merupakan komponen utama dalam HPU yang berfungsi mengubah energi mekanis dari motor penggerak menjadi energi hidrolis dalam bentuk aliran fluida bertekanan. Pada sistem CPP, pompa hidrolis berperan dalam menyediakan debit dan tekanan yang diperlukan untuk menggerakkan piston aktuator di dalam hub propeller.

Jenis pompa yang umum digunakan pada sistem hidrolis kapal antara lain pompa roda gigi (*gear pump*), pompa piston, dan pompa vane, yang dipilih berdasarkan kebutuhan tekanan dan kapasitas aliran sistem. Kinerja pompa dipengaruhi oleh faktor efisiensi volumetrik, kondisi pelumasan, serta tingkat kebocoran internal. Penurunan performa pompa dapat menyebabkan tekanan sistem tidak tercapai secara optimal, sehingga respons perubahan pitch menjadi lambat atau tidak stabil.

c. Katup kontrol

Katup kontrol dalam sistem hidrolis CPP berfungsi untuk mengatur arah aliran, tekanan, dan debit fluida hidrolis sesuai dengan perintah sistem kendali. Katup ini memastikan bahwa fluida bertekanan dialirkan ke sisi aktuator yang tepat untuk menghasilkan gerakan maju atau mundur pada sudut pitch baling-baling.

Beberapa jenis katup yang umum digunakan meliputi katup pengarah (*directional control valve*), katup pengatur tekanan (*pressure control valve*), dan katup pengatur aliran. Kinerja katup kontrol sangat menentukan presisi perubahan sudut pitch, sehingga desain dan pemeliharaannya harus memperhatikan faktor kebocoran internal, kontaminasi fluida, serta respons waktu aktuator. Gangguan pada katup kontrol dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem dan berpotensi menimbulkan kegagalan operasi propulsi.

d. Pipa dan seal hidrolis

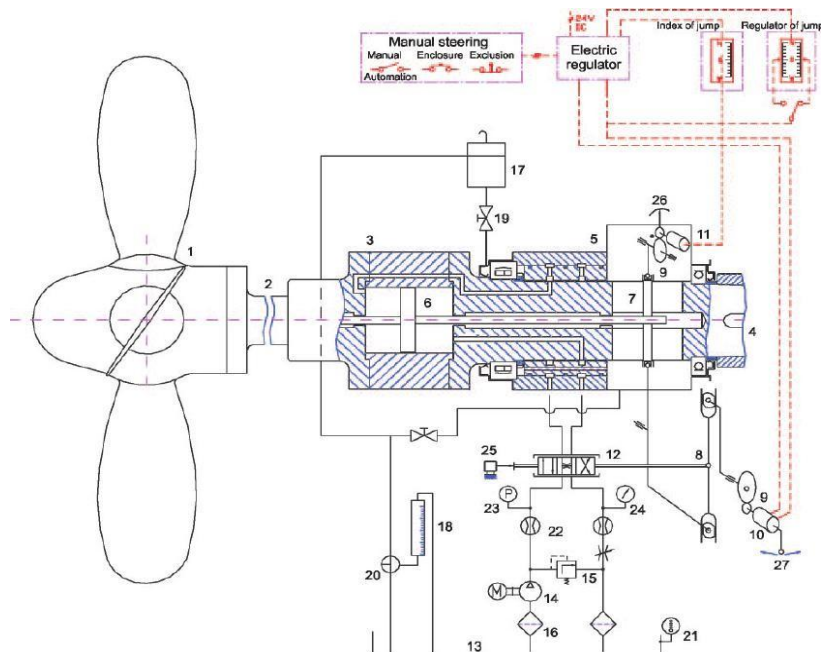
Pipa hidrolis berfungsi sebagai media penyalur fluida bertekanan dari HPU menuju aktuator di dalam hub propeller serta kembali ke reservoir. Pipa ini harus mampu menahan tekanan kerja sistem serta tahan terhadap korosi dan getaran yang timbul selama kapal beroperasi. Perancangan sistem perpipaan hidrolis harus mempertimbangkan diameter pipa, ketebalan dinding, serta tata letak instalasi guna meminimalkan kehilangan tekanan (*pressure loss*).

Seal hidrolis berfungsi untuk mencegah terjadinya kebocoran fluida pada sambungan maupun komponen bergerak dalam sistem. Jenis seal yang umum digunakan antara lain *O-ring*, *lip seal*, dan

mechanical seal, yang dipilih sesuai dengan tekanan kerja dan kondisi operasional. Kegagalan pada pipa maupun seal dapat menyebabkan penurunan tekanan sistem, kontaminasi lingkungan, serta menurunnya keandalan sistem CPP secara keseluruhan.

3. Sistem Kontrol

Sistem kontrol CPP berfungsi menerjemahkan perintah dari *bridge control* ke gerakan pitch yang tepat. Komponen utamanya mencakup control lever/joystick di jembatan kapal, unit kontrol elektronik atau pneumatik, serta feedback sensor yang memberi informasi posisi pitch aktual dari bilah propeller kembali ke sistem kontrol. Sistem ini dapat berupa kontrol manual di mana operator mengatur pitch langsung, atau sistem otomatis yang terintegrasi dengan *ship automation system* dan engine governor untuk menjaga efisiensi bahan bakar dan respon thrust optimal. Studi terbaru tentang *embedded controller* CPP menunjukkan bahwa algoritma kontrol modern, seperti *model predictive control*, mampu meningkatkan akurasi perubahan pitch dan mengurangi gangguan eksternal saat operasi dinamis. Ini penting untuk performa kapal dalam berbagai kondisi laut dan beban kerja (Su et al., 2024).



Gambar 2. 7 Sistem Kontrol Controllable Pitch Propeller
(Sumber: POLISH MARITIME RESEARCH, No 1/2008)

Komponen utama yang termasuk dalam sistem kontrol CPP ialah:

a. Control lever

Control lever merupakan perangkat antarmuka utama antara operator dan sistem pengendali *Controllable Pitch Propeller*. Komponen ini berfungsi untuk memberikan perintah perubahan sudut pitch baling-baling sesuai dengan kebutuhan manuver dan kecepatan kapal. Melalui pergerakan tuas secara mekanis maupun elektrik (pada

sistem modern berbasis elektro-hidrolik), sinyal perintah dikirimkan ke unit kendali untuk diproses lebih lanjut.

Dalam sistem konvensional, control lever bekerja melalui transmisi mekanis atau hidrolik langsung, sedangkan pada sistem modern sinyal dikonversi menjadi sinyal listrik yang diteruskan ke sistem kontrol elektronik. Akurasi dan sensitivitas *control lever* sangat berpengaruh terhadap respons sistem propulsi, khususnya dalam kondisi manuver presisi seperti saat sandar atau navigasi di perairan sempit.

b. Control unit

Control unit merupakan pusat pengolahan dan pengendalian pada sistem CPP. Komponen ini menerima sinyal masukan dari control lever serta berbagai sensor, kemudian memprosesnya untuk menghasilkan perintah aktuasi pada sistem hidrolik pengatur pitch. Pada sistem modern, control unit umumnya berbasis *electronic control system* yang dilengkapi dengan modul logika, penguat sinyal, serta perangkat keselamatan.

Fungsi utama control unit meliputi pengaturan sudut pitch sesuai perintah operator, sinkronisasi dengan sistem mesin induk, serta perlindungan terhadap kondisi abnormal seperti tekanan hidrolik rendah atau kegagalan sensor. Keandalan control unit sangat menentukan stabilitas dan keselamatan operasional sistem propulsi kapal.

c. Sensor tekanan dan posisi

Sensor tekanan dan posisi merupakan elemen penting dalam sistem umpan balik (*feedback system*) pada CPP. Sensor tekanan berfungsi untuk memantau tekanan fluida hidrolik dalam sistem, sehingga dapat dipastikan bahwa gaya yang dibutuhkan untuk menggerakkan mekanisme pitch tersedia secara memadai. Sementara itu, sensor posisi digunakan untuk mendeteksi sudut aktual blade atau posisi piston di dalam hub propeller.

Data yang diperoleh dari sensor ini dikirimkan ke control unit sebagai dasar evaluasi kesesuaian antara perintah (*command*) dan kondisi aktual (*actual position*). Apabila terjadi deviasi yang signifikan, sistem dapat melakukan koreksi otomatis atau mengaktifkan mekanisme perlindungan. Dengan demikian, sensor tekanan dan posisi berperan penting dalam menjaga akurasi, stabilitas, dan keselamatan sistem CPP.

d. Sistem alarm dan interlock

Sistem alarm dan interlock merupakan bagian dari sistem proteksi pada CPP yang dirancang untuk mencegah terjadinya kerusakan lebih lanjut akibat kondisi operasional yang tidak normal. Sistem alarm memberikan peringatan visual dan/atau auditori kepada operator apabila terdeteksi parameter yang berada di luar batas yang diizinkan, seperti tekanan hidrolik rendah, kegagalan sensor, atau ketidaksesuaian sudut pitch.

Sementara itu, sistem interlock berfungsi sebagai mekanisme pengamanan otomatis yang membatasi atau menghentikan operasi sistem ketika kondisi tertentu terpenuhi. Contohnya, interlock dapat mencegah perubahan pitch apabila tekanan hidrolik tidak mencukupi atau apabila terjadi kegagalan pada sistem kontrol. Implementasi

sistem alarm dan interlock bertujuan untuk meningkatkan keselamatan operasional serta mengurangi risiko kegagalan sistem propulsi secara keseluruhan.

2.4 Konsep Keandalan

Keandalan didefinisikan oleh (Lewis, 1987), (Moubray, 2001), dan (Ebeling, 1987) sebagai peluang suatu komponen atau sistem untuk dapat memenuhi fungsi yang dibutuhkan dalam periode waktu tertentu dan dalam kondisi operasi yang telah ditentukan. Dengan kata lain, keandalan merupakan probabilitas tidak terjadinya kegagalan selama sistem atau fasilitas tersebut dioperasikan. Terminologi *item* dalam definisi ini dapat mencakup komponen, subsistem, maupun sistem secara keseluruhan yang dipandang sebagai satu kesatuan.

Dalam konteks rekayasa, keandalan juga didefinisikan sebagai kemampuan suatu komponen, unit, atau sistem untuk melaksanakan fungsi yang ditetapkan tanpa mengalami kegagalan selama periode waktu tertentu di bawah kondisi operasi tertentu. Keandalan dinyatakan dalam bentuk probabilitas dengan nilai antara 0 hingga 1, di mana nilai yang semakin mendekati 1 menunjukkan tingkat keandalan yang semakin tinggi (Deighton, 2016). Definisi ini diperkuat oleh berbagai penelitian di bidang *reliability engineering* yang menyatakan bahwa keandalan merupakan probabilitas suatu sistem atau produk dapat berfungsi dengan baik tanpa kegagalan dalam interval waktu tertentu (Dykha et al., 2025).

Konsep keandalan memiliki empat parameter utama, yaitu peluang, kinerja (*performance*) yang memadai, waktu, dan kondisi operasi. Probabilitas berperan sebagai input numerik utama dalam analisis keandalan serta sebagai indeks kuantitatif untuk menilai kelayakan suatu sistem. Namun demikian, dalam kajian teknik, probabilitas bukan satu-satunya parameter, karena kinerja, waktu, dan kondisi operasi juga merupakan parameter penting dalam analisis *engineering*. Waktu operasi dapat bersifat kontinu, sedangkan kondisi operasi dapat bersifat seragam (*uniform*) maupun bervariasi, seperti pada fase *take-off*, *cruising*, dan *landing* pada sistem penerbangan.

Variabel utama dalam analisis keandalan adalah waktu hingga terjadinya kegagalan (*time to failure*). Secara matematis, fungsi keandalan dirumuskan oleh (Lewis, 1987) sebagai berikut:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt \quad (2.1)$$

dengan:

- $R(t)$: keandalan pada waktu t
- $F(t)$: fungsi distribusi kumulatif
- $f(t)$: fungsi densitas kegagalan

Selain itu, probabilitas suatu komponen mengalami kegagalan sebelum waktu t dinyatakan sebagai fungsi distribusi kumulatif (*Cumulative Distribution Function*) sebagai berikut:

$$F(t) = P(X \leq t) \quad (2.2)$$

Sumber: (Lewis, 1987)

Sehingga, probabilitas keandalan dapat dinyatakan sebagai peluang sistem tetap berfungsi hingga waktu t , yaitu:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2.3)$$

Artinya:

- $R(t)$ = keandalan (probabilitas tidak gagal sampai waktu t)
- $F(t)$ = probabilitas kegagalan kumulatif sampai waktu t

Sumber: (Lewis, 1987)

Secara teknis, fungsi keandalan tersebut menunjukkan probabilitas bahwa waktu hidup suatu sistem T lebih besar dari waktu operasi t , sehingga interpretasi ini menegaskan bahwa keandalan tidak hanya menggambarkan kondisi berfungsi atau tidaknya suatu sistem, tetapi juga mencakup dimensi waktu (*time-to-failure*) yang didasarkan pada distribusi statistik kegagalan (Ameer Issa & Haddi Hassan, 2021).

Dalam penerapannya, keandalan menjadi parameter krusial dalam manajemen pemeliharaan, peningkatan produktivitas, serta penentuan interval perawatan preventif yang optimal pada sistem produksi modern (Ishak et al., 2023). Hal ini sejalan dengan kajian dalam *reliability engineering* yang menekankan bahwa pengendalian keandalan tidak hanya berfokus pada kemampuan sistem untuk menghindari kegagalan, tetapi juga mencakup perencanaan dan evaluasi siklus hidup sistem untuk meminimalkan risiko kegagalan, meningkatkan kinerja, serta menekan biaya operasional (Friederich & Lazarova-Molnar, 2024).

2.5 Fault Tree Analysis

2.5.1 Pengertian FTA

Fault tree adalah model grafis dari beberapa kombinasi kesalahan yang berurutan maupun paralel yang mengakibatkan terjadinya peristiwa tidak diinginkan yang ditentukan sebelumnya. Kesalahan dapat berupa kejadian yang berhubungan dengan kerusakan komponen, kesalahan, kesalahan software, atau kejadian lain yang berhubungan yang mengarah pada peristiwa tidak diinginkan. Fault tree menggambarkan hubungan logis antara basic event yang mengarah pada peristiwa tidak diinginkan yang merupakan top event dari fault tree (Stamatelatos et al., 2002).

FTA dapat dijelaskan sederhana sebagai teknik analisis dimana kondisi yang tidak diinginkan dari sistem ditentukan (biasanya kondisi kritis dari sudut pandang keamanan dan keandalan), dan sistem kemudian di analisis dalam hubungan dengan lingkungan dan operasinya untuk mencari semua hal realistis yang dapat menyebabkan top event terjadi. Event potensial yang menyebabkan kegagalan dari suatu sistem engineering dan probabilitas terjadinya event tersebut dapat ditentukan dengan FTA. Sebuah top event yang merupakan definisi dari kegagalan suatu sistem (system failure), harus ditentukan terlebih dahulu dalam mengkonstruksi FTA. Sistem kemudian dianalisa untuk menemukan semua kemungkinan yang didefinisikan pada top event. Fault tree adalah sebuah model grafis yang terdiri dari beberapa kombinasi kesalahan (fault) secara paralel dan secara berurutan yang mungkin menyebabkan awal dari failure event yang sudah ditetapkan.

2.5.2 Konsep Dasar

Konsep dasar FTA berlandaskan pada tiga prinsip utama, yaitu:

1. Pendekatan Deduktif

FTA menggunakan pendekatan deduktif (top-down), dimana analisis dimulai dari kegagalan sistem (top event), kemudian ditelusuri ke tingkat penyebab yang lebih spesifik hingga mencapai kejadian dasar (*basic events*).

2. Failure-Based Analysis

FTA berfokus pada ruang kegagalan (*failure space*), bukan ruang keberhasilan. Pendekatan ini dipilih karena kegagalan lebih mudah didefinisikan secara jelas dibandingkan keberhasilan sistem.

3. Logika Boolean

Hubungan antar kejadian dalam FTA dimodelkan menggunakan operasi logika Boolean seperti AND dan OR. Secara matematis:

- Gerbang OR:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \quad (2.4)$$

- Gerbang AND (untuk kejadian independen):

$$P(A \cap B) = P(A) \times P(B) \quad (2.5)$$

Untuk kejadian dengan probabilitas kecil (*rare event approximation*), persamaan OR dapat disederhanakan menjadi:

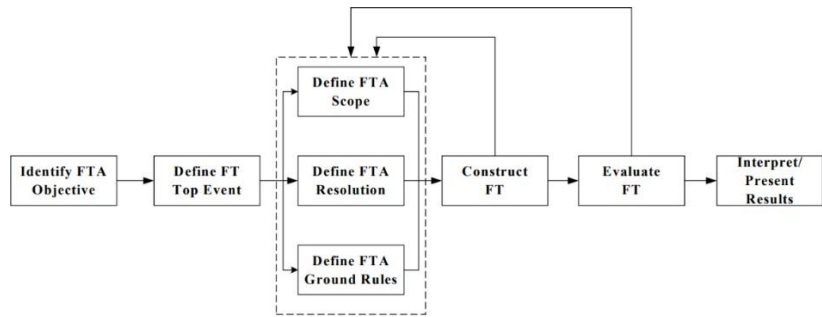
$$P(A \cup B) \approx P(A) + P(B) \quad (2.6)$$

Konsep ini sering digunakan dalam analisis keandalan sistem karena probabilitas kegagalan komponen umumnya kecil.

2.5.3 Langkah Penyusunan FTA

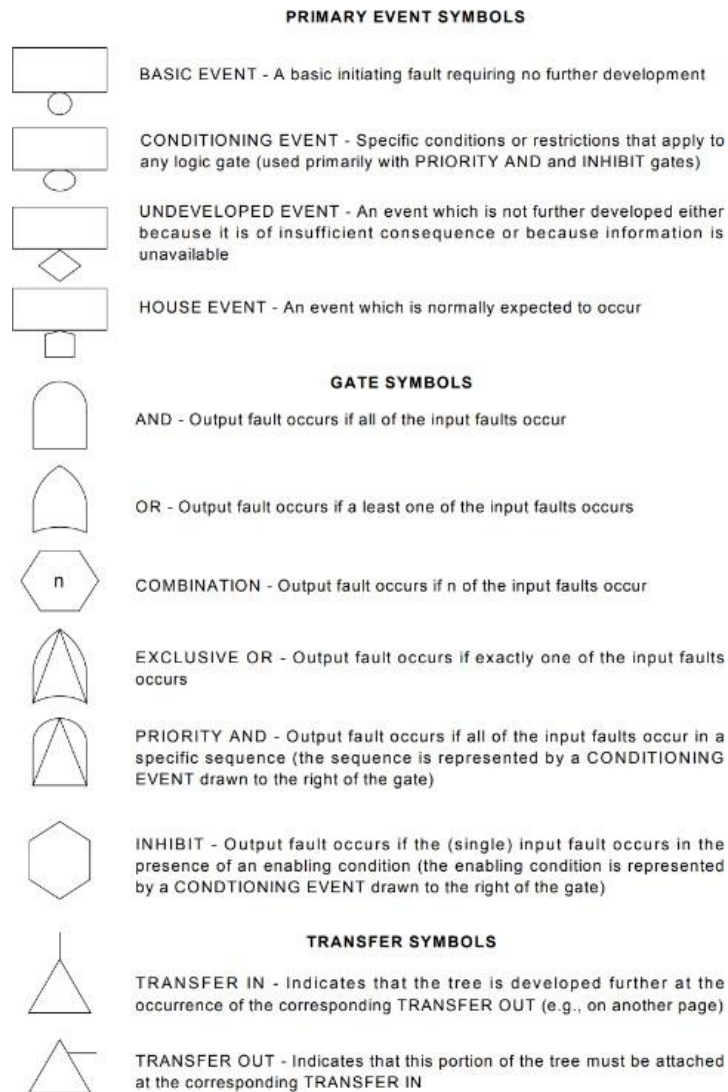
Prosedure pembuatan fault tree yang terdiri dari 8 langkah yaitu sebagai berikut:

1. Mendefinisikan kepentingan sistem: mendefinisikan batas kepentingan agar analisis yang dibuat mendekati kondisi sistem.
2. Mendefinisikan top event sistem: menetapkan masalah yang dianalisis.
3. Mendefinisikan struktur tree top: mendefinisikan peristiwa dan kondisi yang mengarah pada top event.
4. Menyelidiki masing – masing cabang dalam level yang berurutan: menentukan peristiwa dan kondisi yang mengarah pada intermediate event dan terus mengulang proses ini di level berurutan yang berbeda hingga fault tree dilengkapi.
5. Memecahkan fault tree untuk kombinasi peristiwa yang menyebabkan top event: menentukan semua peristiwa dan kondisi yang diperlukan untuk top event terjadi dan mengembangkan minimal cut set.
6. Mengidentifikasi potensi failure dependent yang penting dan membuat model yang tepat: mempelajari peristiwa dan menemukan ketergantungan antar peristiwa yang dapat menyebabkan peristiwa dan kondisi tunggal atau multiple terjadi secara terus menerus.
7. Melakukan analisis kuantitatif menggunakan data statistik lampau untuk mengevaluasi atau memperkirakan kinerja sistem di masa depan.
8. Menggunakan hasil dalam pembuatan keputusan: menemukan kondisi dimana sistem dalam bahaya yang sangat potensial dan memilih tindakan yang tepat serta memberikan rekomendasi untuk menghadapi resiko tersebut.



Gambar 2. 8 Langkah - Langkah Fault Tree Analysis. (Sumber: Stematelatos. 2002)

Fault tree tersusun dari entitas yang dikenal sebagai gate yang memperlihatkan hubungan event yang dibutuhkan untuk terjadinya event lain yang lebih tinggi. Peristiwa yang lebih tinggi adalah output dari gate sedangkan peristiwa yang lebih rendah adalah input untuk gate. Simbol – simbol pada fault tree dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2. 9 Simbol Fault Tree Analysis. (Sumber: Stematelatos. 2002)

FTA merupakan alat yang paling efektif untuk menilai resiko, tetapi ketika digunakan untuk sistem yang kompleks yang melibatkan jumlah variabel komponen dan proses yang besar, fault tree akan menjadi sangat besar dan membutuhkan waktu yang lama untuk menyelesaikannya. Selain itu, keuntungan menggunakan fault tree analysis adalah metode FTA dimulai dari top event yang dipilih oleh pengguna untuk menentukan kepentingan dan pohon yang dikembangkan akan mengidentifikasi akar penyebab. Fault tree analysis memiliki kemampuan untuk digunakan bersamaan dengan komputer dan hasil penggunaan aplikasi komputer memberikan analisis yang lebih baik ((Stamatelatos et al., 2002)).

Hasil dari FTA yaitu berupa probabilitas tiap event, perhitungan

probabilitas dapat menggunakan pendekatan *empirical failure probability*, yaitu berdasarkan data historis kejadian kegagalan selama periode observasi. Pendekatan ini digunakan agar nilai probabilitas mencerminkan kondisi aktual sistem di lapangan.

Probabilitas setiap *basic event* dihitung dengan membandingkan jumlah kejadian kegagalan terhadap total periode observasi. Nilai ini kemudian digunakan sebagai dasar dalam perhitungan probabilitas pada tingkat *intermediate event* dan selanjutnya hingga *top event*, sesuai dengan struktur logika pada model *Fault Tree Analysis*.

Probabilitas kegagalan untuk setiap *basic event* dihitung dengan membandingkan jumlah kejadian kegagalan terhadap total periode observasi atau total waktu operasi sistem. Secara matematis dirumuskan sebagai berikut:

$$P(B) = \frac{\text{frekuensi basic event yang terjadi}}{\text{total waktu pengamatan}} \quad (2.7)$$

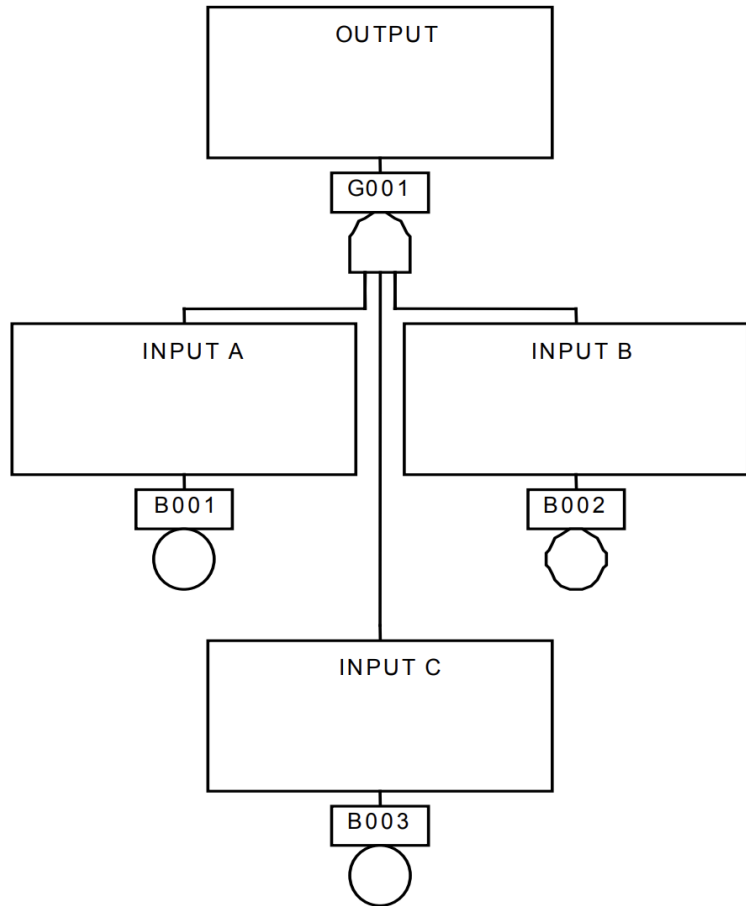
2.5.4 Evaluasi Kualitatif dan Formula Dasar Probilitas

Pada tahap evaluasi kualitatif, analisis dilakukan dengan mengaplikasikan aljabar Boolean ke dalam struktur fault tree untuk memperoleh persamaan logika dari masing-masing gate yang telah dideskripsikan. Secara umum, kategori gate dalam fault tree terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu *AND gate* dan *OR gate*. Selanjutnya, aturan-aturan dalam aljabar Boolean diterapkan untuk menyederhanakan struktur fault tree hingga diperoleh suatu bentuk yang disebut *Minimal Cut Set*. Hasil minimal cut set ini kemudian digunakan sebagai dasar dalam evaluasi kualitatif maupun evaluasi kuantitatif pada tahap selanjutnya.

Minimal cut set merupakan bentuk penyederhanaan fault tree menggunakan pendekatan Boolean yang bertujuan untuk mengidentifikasi kombinasi minimal dari basic event yang dapat menyebabkan terjadinya top event. Dengan kata lain, minimal cut set menunjukkan kombinasi kegagalan paling sederhana yang masih cukup untuk memicu peristiwa puncak dalam sistem. Pendekatan ini menyoroti kombinasi kerusakan atau kegagalan yang paling signifikan serta memperlihatkan bagian sistem yang berpotensi mengalami kerentanan desain. Melalui identifikasi MCS, dapat diketahui dimana perubahan desain atau tindakan perbaikan dapat dilakukan untuk mengeliminasi atau mengurangi kombinasi kegagalan yang tidak diinginkan. Selain itu, minimal cut set juga mendukung proses validasi fault tree, khususnya untuk memastikan bahwa kombinasi basic event yang dihasilkan secara logis benar-benar dapat menyebabkan terjadinya top event. Minimal cut set yang dominan selanjutnya menjadi dasar dalam penentuan prioritas tindakan perbaikan, yaitu dengan memperbaiki setidaknya satu basic event dalam kombinasi kegagalan tersebut.

Secara konseptual, fault tree merupakan diagram logika yang menggambarkan peristiwa-peristiwa tertentu yang harus terjadi agar suatu peristiwa lain dapat terjadi. Peristiwa yang disebabkan oleh peristiwa lain disebut sebagai *fault*, sedangkan peristiwa pemicu utama disebut sebagai *basic event*. Fault tree menghubungkan peristiwa-peristiwa tersebut menggunakan simbol logika yang disebut *gate*, dimana setiap gate memiliki masukan (input) dan keluaran (output). Output gate merepresentasikan peristiwa kegagalan tingkat atas yang sedang dianalisis, sedangkan input gate merupakan peristiwa kegagalan tingkat bawah yang lebih mendasar dan berkontribusi

terhadap output tersebut. Dalam penyusunannya, fault tree dikembangkan dari peristiwa tingkat atas menuju peristiwa yang lebih dasar (dari output ke input). Selama proses ini, teknik analisis digunakan untuk menentukan kategori gate yang sesuai, yaitu AND gate atau OR gate. Karena hubungan antar peristiwa dalam gate identik dengan operasi dalam aljabar Boolean, maka terdapat kesesuaian satu-ke-satu antara representasi aljabar Boolean dan representasi fault tree.



Gambar 2. 10 Gambar Hubungan Antar Peristiwa Pada Fault Tree Analysis.
(Sumber: Stamatelatos. 2002)

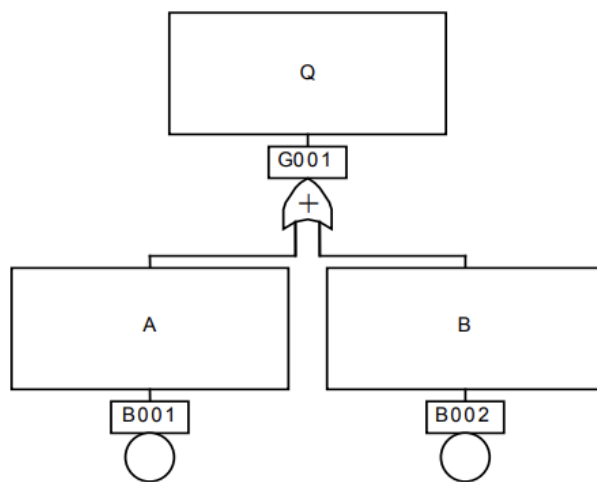
Seperti yang dijelaskan pada gambar 2.10, Simbol pohon kesalahan adalah gerbang OR yang mewakili gabungan dari peristiwa yang terhubung ke gerbang tersebut. Salah satu atau lebih dari peristiwa masukan harus terjadi agar peristiwa di atas gerbang tersebut terjadi. Gerbang OR setara dengan simbol Boolean “+.” Misalnya, gerbang OR dengan dua peristiwa masukan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10, setara dengan ekspresi Boolean $Q=A+B$.

Salah satu atau kedua peristiwa A atau B harus terjadi agar Q terjadi. Karena kesetaraannya dengan operasi gabungan Boolean yang dilambangkan dengan simbol “+”, gerbang OR terkadang digambar dengan simbol “+” di dalam simbol gerbang, seperti pada Gambar 2.10. Untuk n peristiwa masukan yang terhubung ke gerbang OR, ekspresi Boolean yang setara adalah $Q=A_1+A_2+A_3+\dots+A_n$. Dalam istilah probabilitas,

$$P(Q) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$$

Or

$$= P(A) + P(B) - P(A)P(B|A)$$



Gambar 2. 11 Contoh Fault Tree. (Sumber: Stamatelatos. 2002)

Berikut ini beberapa pengamatan yang dapat dilakukan:

1. Jika A dan B adalah peristiwa yang saling eksklusif, maka $P(A \cap B) = 0$ dan $P(Q) = P(A) + P(B)$;
2. Jika A dan B adalah peristiwa yang saling independen, maka $P(B|A) = P(B)$ dan $P(Q) = P(A) + P(B) - P(A)P(B)$;
3. Jika peristiwa B sepenuhnya bergantung pada peristiwa A, yaitu setiap kali A terjadi, B juga terjadi, maka $P(B|A) = 1$ dan

- ii. $P(Q) = P(A) + P(B) - P(A)$

- iii. $P(Q) = P(B)$;

4. Perkiraan $P(Q) \cong P(A) + P(B)$ adalah, dalam semua kasus, perkiraan konservatif untuk probabilitas peristiwa keluaran Q, yaitu,

- iv. $P(A) + P(B) \geq P(A) + P(B) - P(A \cap B)$ untuk semua A, B;

5. Jika A dan B adalah peristiwa yang saling independen dan memiliki

- a. probabilitas rendah (misalnya $P(A)$, $P(B) < 10^{-1}$), maka $P(A \cap B)$ adalah kecil dibandingkan dengan $P(A) + P(B)$, sehingga $P(A) + P(B)$ merupakan perkiraan yang akurat untuk $P(Q)$.
6. Dalam gerbang EXCLUSIVE OR dengan dua masukan A dan B, peristiwa keluaran Q terjadi jika peristiwa A terjadi atau peristiwa B terjadi, tetapi tidak keduanya. Ekspresi probabilitas untuk peristiwa keluaran Q dari gerbang EXCLUSIVE OR adalah:

$$P(Q)_{\text{EXCLUSIVE OR}} = P(A) + P(B) - 2P(A \cap B).$$

2.5.5 Evaluasi Kuantitatif

Evaluasi kuantitatif pada suatu *fault tree* umumnya dilakukan menggunakan dua pendekatan utama, yaitu pendekatan aljabar Boolean (*Boolean algebra approach*) dan pendekatan perhitungan numerik langsung (*direct numerical approach*). Kedua metode tersebut digunakan untuk menghitung probabilitas terjadinya top event serta menentukan tingkat kepentingan dari setiap basic event yang terdapat dalam sistem (Stamatelatos et al., 2002).

Dalam analisis *fault tree*, *top event* merupakan hasil kombinasi dari beberapa minimal cut set. Oleh karena itu, nilai probabilitas *top event* dapat diperkirakan dengan menjumlahkan probabilitas dari masing-masing *minimal cut set*. Karena setiap *minimal cut set* tersusun dari beberapa basic event, maka probabilitas dari *minimal cut set* tersebut diperoleh dari kombinasi probabilitas masing-masing *basic event* penyusunnya.

Perhitungan laju kegagalan komponen dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\lambda = \lambda_o d + \lambda_n(1 - d)$$

Keterangan:

- d = siklus kerja mesin (waktu operasi dibandingkan dengan waktu rencana kerja)
- λ_o = tingkat kerusakan komponen saat berada dalam kondisi operasi
- λ_n = tingkat kerusakan komponen saat berada dalam kondisi tidak beroperasi

Sumber: (Stamatelatos et al., 2002)

Data masukan yang digunakan dalam penentuan basic event pada analisis *fault tree* umumnya berasal dari empat jenis data utama (Stamatelatos et al., 2002), yaitu sebagai berikut.

4. Probabilitas Kerusakan Komponen

Perhitungan probabilitas kerusakan komponen memerlukan data berupa tingkat kerusakan komponen serta waktu rencana operasi sebagai parameter masukan. Waktu tersedia merupakan total waktu yang mencakup kondisi operasi dan kondisi tidak operasi. Kondisi operasi adalah keadaan ketika komponen menjalankan fungsi utamanya dalam sistem, seperti proses perpindahan energi, sinyal, maupun informasi. Sementara itu, kondisi tidak operasi merupakan kondisi ketika komponen berada dalam keadaan tidak aktif atau tidak bekerja.

5. Probabilitas Terjadinya Peristiwa

Probabilitas terjadinya suatu peristiwa dianggap sama dengan probabilitas kegagalan komponen. Untuk menghitung probabilitas tersebut diperlukan data berupa tingkat kejadian peristiwa serta interval waktu pengamatan.

6. Probabilitas *Unavailability* Komponen

Probabilitas *unavailability* menggambarkan kemungkinan suatu komponen tidak tersedia atau tidak dapat beroperasi pada saat dibutuhkan. Perhitungan probabilitas ini membutuhkan data tingkat kerusakan komponen serta waktu perbaikan komponen.

7. Probabilitas *Pure Event*

Pure event probability merupakan probabilitas yang dinyatakan secara langsung untuk suatu tindakan atau kejadian tertentu. Probabilitas ini tidak diturunkan dari parameter yang lebih dasar dan dapat digunakan secara langsung sebagai nilai input untuk beberapa peristiwa dalam analisis.

2.6 Bayesian Network

Bayesian Network adalah model grafis probabilistik yang merepresentasikan himpunan variabel acak sebagai node dan hubungan ketergantungannya sebagai Directed Acyclic Graph, sehingga keterkaitan antar-variabel dapat dibaca secara struktural sekaligus dihitung secara probabilistik (Juliani & Maciel, 2024). Model ini pada dasarnya menggambarkan hubungan kausal antar variabel melalui simpul dan tepi, serta efektif digunakan untuk analisis prediksi maupun penalaran pada kondisi data yang tidak lengkap, ambigu, atau tidak pasti. Dalam BN, setiap node memiliki Conditional Probability Table yang menyatakan peluang suatu keadaan node dengan syarat keadaan parent-nya, sehingga model bersama seluruh sistem dapat diuraikan menjadi perkalian peluang bersyarat yang lebih sederhana (Ruiz-Tagle et al., 2022).

Secara teknis, BN memanfaatkan teorema Bayes dan aturan faktorisasi pada DAG untuk mengelola ketidakpastian serta interdependency pada sistem kompleks, sehingga cocok untuk analisis yang menuntut penalaran berbasis bukti dan pengetahuan awal (Wang et al., 2025). Teorema Bayes dinyatakan sebagai:

$$P(E | F) = \frac{P(F | E)P(E)}{P(F)}$$

Di mana, (E) dan (F) masing-masing merupakan probabilitas tidak nol untuk peristiwa E dan F (Yazdi et al., 2023). Selain itu, untuk n peristiwa E1, E2, ..., En di mana $P(E_i) \neq 0$, untuk $1 \leq i \leq n$, probabilitas gabungan dapat dinyatakan sebagai:

$$P(E_i | F) = \frac{P(F | E_i)P(E_i)}{P(F|E1)P(E1) + \dots + P(F|En)P(En)}$$

Konsep ini digunakan ketika probabilitas bersyarat yang diinginkan tidak dapat dihitung secara langsung. Selain itu, konsep kemandirian bersyarat (conditional independence) menjadi dasar penting dalam BN, di mana dua variabel Adan Bdikatakan independen bersyarat terhadap Cjika:

$$P(A | B, C) = P(A | C)$$

Dalam BN, distribusi probabilitas gabungan dari variabel x_1, \dots, x_n dapat difaktorkan berdasarkan struktur DAG sebagai:

$$P(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i | \pi_{x_i})$$

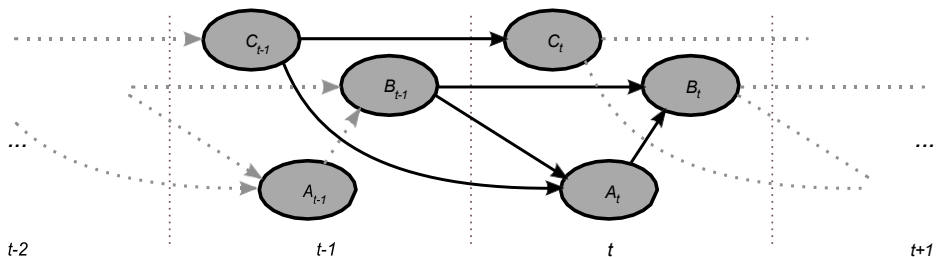
Di mana, probabilitas gabungan variabel-variabel tersebut dilambangkan dengan $P(x_1, \dots, x_n)$, sedangkan π_{x_i} menunjukkan nilai kuantitatif dari himpunan penyebab untuk variabel x_i . Misalnya, jika variabel B bergantung pada A dan variabel C bergantung pada A dan B, probabilitas gabungan tersebut dapat dinyatakan sesuai dengan hubungan berikut (Adabavazeh et al., 2026).

$$P(A, B, C) = P(A) \cdot P(B | A) \cdot P(C | A, B)$$

Dalam konteks aplikasi teknik dan keputusan, BN sering diposisikan sebagai kerangka decision support karena mampu menggabungkan data observasi (evidence) dengan prior knowledge guna menghasilkan pembaruan peluang yang konsisten (Ruiz-Tagle et al., 2022). Proses penalaran BN dilakukan melalui inference dengan memasukkan evidence pada node tertentu lalu menghitung probabilitas posterior pada node target. Secara komputasional, inference dapat dilakukan dengan algoritma exact maupun approximate, yang dipilih berdasarkan ukuran jaringan, densitas koneksi, dan kebutuhan akurasi versus waktu komputasi (Canonaco et al., 2025).

Pembangunan BN umumnya mencakup dua tahap utama, yaitu structure learning dan parameter learning, yang dapat berbasis data, berbasis pakar, atau kombinasi keduanya agar tetap realistis pada kondisi data terbatas (Canonaco et al., 2025). Dalam praktik analisis sistem, mekanisme pembaruan peluang ini menjadikan BN unggul dalam memodelkan ketergantungan antar-komponen serta ketidakpastian pengukuran yang sering tidak terakomodasi oleh pendekatan deterministik (Ruiz-Tagle et al., 2022). Selain untuk klasifikasi dan prediksi, BN juga digunakan dalam analisis sensitivitas dan identifikasi faktor kritis melalui evaluasi perubahan probabilitas posterior akibat variasi evidence atau parameter, sehingga dapat mendukung prioritas strategi mitigasi maupun pemeliharaan.

Dengan demikian, secara konseptual BN menyediakan kerangka pemodelan yang mengintegrasikan hubungan sebab-akibat dan perhitungan probabilitas, sekaligus menyediakan mekanisme inferensi untuk memperbarui keyakinan berbasis evidence dalam mendukung pengambilan keputusan di bawah ketidakpastian (Juliani & Maciel, 2024).



Gambar 2. 12 Konsep Bayesian Network (Sumber: bayesserver.com, 2011)

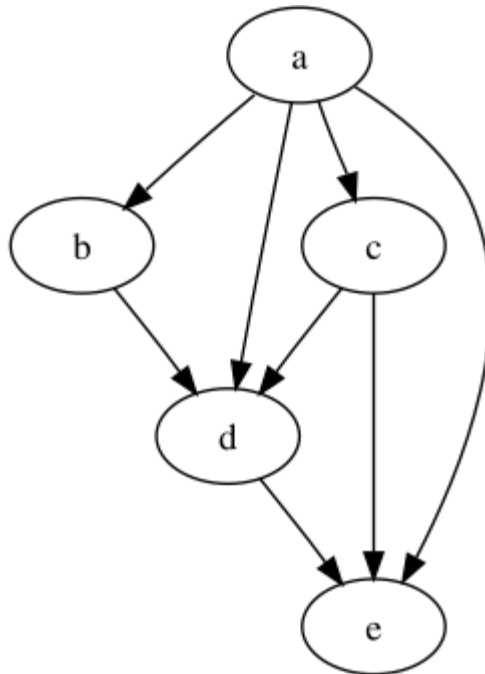
Sebagai tindak lanjut penjelasan BN, pembahasan difokuskan pada dua elemen utama, yaitu struktur hubungan kausal melalui DAG dan parameter probabilistik melalui

CPT.

2.6.1 Directed Acyclic Graph

Directed acyclic graph merupakan struktur graf berarah yang digunakan dalam Bayesian Network untuk merepresentasikan hubungan ketergantungan antar variabel secara sistematis. Dalam DAG, setiap variabel dinyatakan sebagai sebuah *node*, sedangkan hubungan antar variabel direpresentasikan melalui *edge* atau panah yang memiliki arah tertentu. Arah panah menunjukkan hubungan ketergantungan, di mana suatu variabel dapat dipengaruhi oleh variabel lain yang berada sebelumnya. Istilah *acyclic* menunjukkan bahwa struktur graf tidak membentuk siklus tertutup. Dengan kata lain, tidak terdapat lintasan yang memungkinkan suatu node kembali ke dirinya sendiri. Sifat ini penting karena menjamin bahwa hubungan antar variabel dapat diurutkan secara logis dan tidak menimbulkan ambiguitas dalam penalaran probabilistik.

Secara konseptual, DAG berfungsi sebagai representasi struktural yang menggambarkan bagaimana suatu variabel saling berkaitan dalam suatu sistem. Struktur ini tidak hanya menunjukkan keterhubungan antar variabel, tetapi juga menyampaikan makna semantik mengenai pola ketergantungan yang ada. Oleh karena itu, DAG sering dipahami sebagai peta hubungan antar variabel yang menjadi dasar dalam proses analisis dan inferensi pada *Bayesian Network*. Dengan adanya DAG, hubungan antar variabel dapat divisualisasikan secara jelas, sehingga memudahkan pemahaman terhadap struktur model, baik dari sisi teknis maupun konseptual. Struktur ini menjadi fondasi utama sebelum dilakukan perhitungan probabilitas pada tahap selanjutnya.



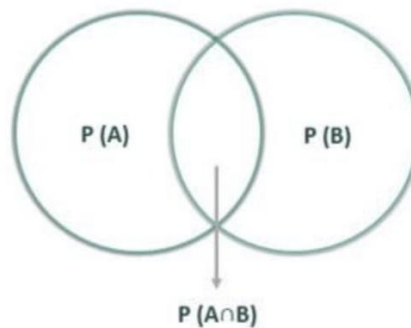
Gambar 2. 13 Konsep Directed Acyclic Graph
(Sumber: Wikipedia; Directed acyclic graph, 2026)

2.6.2 Conditional Probability Table

CPT merupakan tabel yang berisi probabilitas suatu variabel berada pada kondisi tertentu dengan mempertimbangkan kondisi variabel lain yang memengaruhinya. Untuk variabel yang tidak memiliki ketergantungan dengan variabel lain, CPT dinyatakan sebagai probabilitas awal. Sementara itu, untuk variabel yang dipengaruhi oleh satu atau lebih variabel lain, CPT menyajikan probabilitas bersyarat terhadap setiap kemungkinan kombinasi kondisi variabel tersebut. Melalui CPT, hubungan antar variabel yang sebelumnya digambarkan secara struktural dalam DAG diterjemahkan ke dalam bentuk kuantitatif. Dengan demikian, CPT memungkinkan perhitungan peluang kejadian secara sistematis dan konsisten sesuai dengan struktur hubungan yang telah ditetapkan. Seluruh probabilitas dalam CPT disusun sehingga memenuhi kaidah probabilitas, di mana jumlah probabilitas untuk setiap kemungkinan kondisi bernilai satu.

Secara umum, CPT berperan sebagai komponen penting yang memungkinkan Bayesian Network melakukan penalaran probabilistik. Kombinasi antara struktur DAG dan CPT menjadikan Bayesian Network mampu merepresentasikan hubungan antar variabel sekaligus mengakomodasi ketidakpastian yang melekat pada sistem yang dianalisis.

Conditional Probability Concept



Gambar 2. 14 Konsep Conditional Probability Table
(Sumber: Wikipedia; Conditional Probability table, 2026)

Secara keseluruhan, Bayesian Network dibangun dari dua komponen utama yang saling melengkapi, yaitu DAG dan CPT. DAG berperan sebagai representasi struktural yang menggambarkan pola ketergantungan antar variabel secara terarah dan sistematis, sedangkan CPT berfungsi untuk menerjemahkan hubungan tersebut ke dalam bentuk probabilitas bersyarat yang mencerminkan tingkat ketidakpastian. Kombinasi antara struktur DAG dan parameter CPT memungkinkan *Bayesian Network* tidak hanya memodelkan keterkaitan antar variabel, tetapi juga melakukan penalaran probabilistik secara konsisten dan terukur. Oleh karena itu, pemahaman terhadap kedua komponen ini menjadi dasar penting dalam penggunaan *Bayesian Network* sebagai alat analisis dan pengambilan keputusan pada berbagai sistem yang kompleks dan tidak pasti.

2.7 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu bertujuan agar mendapatkan dan mengetahui perbandingan pada penelitian saat ini, selain itu agar penelitian saat ini menghindari kesamaan dengan penelitian terdahulu. Oleh sebab itu dalam tinjauan pustaka ini penulis mencatatkan hasil dari dari penelitian terdahulu sebagai berikut:

Penilaian keandalan sistem propulsi Baling-baling Sudut Serang Terkendali CPP melibatkan ketidakpastian yang timbul akibat interaksi antar komponen dan variasi kondisi operasi; oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang mampu memodelkan ketidakpastian tersebut guna mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan. Jaringan Bayesian dianggap lebih unggul daripada metode konvensional karena dapat memberikan inferensi adaptif dengan akurasi yang lebih tinggi tanpa bergantung pada data historis dalam jumlah besar. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis keandalan sistem CPP untuk evaluasi dan prediksi kegagalan, di mana pendekatan Jaringan Bayesian telah terbukti efektif dalam memodelkan kompleksitas sistem, termasuk dinamika degradasi dan saling ketergantungan antar komponen melalui integrasi Teori Bukti Dempster-Shafer dan Jaringan Bayesian Dinamis [13], serta penggunaan Jaringan Bayesian Adaptif untuk memodelkan interaksi kegagalan nonlinier dan memprediksi probabilitas secara dinamis [14], serta kemampuan untuk mengidentifikasi faktor risiko dominan melalui inferensi probabilistik [15]. Selain itu, integrasi dengan metode lain, seperti Analisis Pohon Kegagalan, meningkatkan ketelitian analisis dengan memungkinkan pembaruan probabilitas dan analisis sensitivitas dalam menentukan peristiwa dasar yang kritis [16]. Pada saat yang sama, Jaringan Bayesian juga mampu merepresentasikan hubungan kausal dalam sistem maritim [17], dan dapat dipadukan dengan Pohon Keputusan untuk memetakan hubungan sebab-akibat dan skenario operasional [18], serta dengan Analisis Mode dan Efek Kegagalan untuk menghasilkan peta risiko yang lebih realistis melalui pemodelan ketergantungan dan pembaruan probabilitas berbasis bukti [19]. Secara keseluruhan, Jaringan Bayesian merupakan pendekatan yang andal dan fleksibel untuk menganalisis keandalan sistem kompleks berdasarkan ketidakpastian, sehingga sangat relevan untuk diterapkan pada sistem CPP.

Berdasarkan penelitian terdahulu, belum terdapat penelitian yang mengembangkan model Bayesian Network terintegrasi untuk analisis keandalan CPP secara menyeluruh pada kapal AHTS, yang mampu merepresentasikan interaksi kausal antar subsistem CPP dalam kondisi operasional aktual. Kesenjangan ini menegaskan perlunya penelitian yang secara khusus mengkaji keandalan CPP pada AHTS berbasis data operasional nyata melalui pendekatan Bayesian Network terintegrasi.