

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Gambaran Umum Data Penelitian

Bab ini menjelaskan gambaran umum data yang digunakan dalam penelitian analisis keandalan sistem CPP. Data penelitian diperoleh untuk mendukung proses identifikasi komponen, pemetaan hubungan penyebab kerusakan, serta penyusunan model analisis keandalan berbasis pendekatan yang digunakan pada penelitian ini. Data yang dikumpulkan berasal dari kegiatan lapangan dan dokumen teknis perusahaan, sehingga informasi yang diperoleh bersifat faktual dan relevan terhadap kondisi aktual sistem CPP yang diteliti.

4.1.1 Identifikasi Pengumpulan Data

Pengumpulan data penelitian dilakukan melalui dua cara utama, yaitu pengamatan langsung di lapangan dan pengambilan data perusahaan. Kedua sumber data tersebut digunakan secara saling melengkapi untuk memperoleh pemahaman menyeluruh mengenai sistem CPP, baik dari sisi operasional maupun dari sisi teknis dan riwayat kerusakannya.

1. Pengamatan di Lapangan

- a. Pengamatan dilakukan secara langsung untuk mengetahui kondisi aktual sistem perawatan dan operasional CPP. Melalui kegiatan ini, penulis memperoleh informasi mengenai prosedur kerja di lapangan, metode perawatan yang diterapkan, serta cara perusahaan menangani kondisi breakdown atau gangguan pada sistem. Hasil pengamatan ini digunakan sebagai dasar untuk memahami mekanisme terjadinya kegagalan serta faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja sistem secara nyata.

2. Data Perusahaan

- a. Data spesifikasi CPP, yang digunakan untuk mengetahui konfigurasi sistem dan komponen utama yang terdapat pada sistem mekanik, hidrolik, serta kontrol.
- b. Data operasional, yang digunakan untuk melihat pola penggunaan sistem CPP serta riwayat operasionalnya pada periode tertentu..
- c. Data kerusakan sistem, yang digunakan untuk mengetahui frekuensi gangguan, jenis kerusakan yang dominan, dan kecenderungan masalah yang sering terjadi pada sistem CPP.

Data-data tersebut menjadi landasan utama dalam penyusunan pembahasan pada tahap analisis, karena memberikan informasi teknis sekaligus mendukung proses evaluasi keandalan sistem secara lebih terukur.

4.1.2 Periode Pengamatan dan Kondisi Operasional CPP

3. Obyek Penelitian : Sistem *Controllable Pitch Propeller*, pada kapal jenis Anchor Handling Tug Supply, penelitian ini difokuskan pada sistem mekanik, hidrolik, dan kontrol CPP.
4. Lokasi Pengambilan Data : PT. X, Batam, Indonesia.
5. Waktu Pengambilan Data : Sept 2025 – Des 2025
6. Kondisi Operasional : 1 Januari 2015 – 31 Desember 2015
7. Spesifikasi sistem CPP :



Gambar 4. 1 Controllable Pitch Propeller AHTS (Sumber: Penulis, 2025)

Tabel 4. 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

4.1.2 Definisi Sistem

Definisi sistem meliputi pembagian grup fungsional, sistem, subsistem, dan komponen. Pembagian tiap komponen dilakukan dengan menggunakan pedekan top to down sampai tingkat rincian tercapai untuk mengidentifikasi batas-batas tiap komponen. Daftar asset dari penelitian ini

dapat ditunjukkan pada **Lampiran 1** dan hirarki fungsi ditunjukkan pada **Lampiran 2**.

4.1.3 Data Kejadian Alarm CPP

Data kejadian alarm sistem *Controllable Pitch Propeller* pada penelitian ini diperoleh dari logbook alarm dan catatan operasional kapal selama periode pengamatan tahun 2015. Data tersebut mencatat berbagai kejadian alarm yang muncul selama operasi sistem CPP, termasuk waktu kejadian, kondisi operasi kapal, jenis alarm yang muncul, komponen yang terlibat, serta keterangan terkait penyebab gangguan yang terjadi.

Berdasarkan data tersebut, tercatat 63 kejadian alarm yang berkaitan dengan gangguan pada sistem CPP. Setiap kejadian alarm menggambarkan kondisi abnormal yang terjadi pada komponen atau subsistem tertentu selama sistem beroperasi. Informasi mengenai tanggal kejadian, waktu alarm, kondisi operasi sistem, jenis alarm, serta komponen yang terlibat digunakan sebagai dasar dalam proses identifikasi kegagalan sistem.

Dari data yang diperoleh, kejadian alarm pada sistem CPP melibatkan beberapa komponen utama yang tersebar pada berbagai subsistem, antara lain *Seal Oil System, Pitch Control System, Hydraulic Oil System, Hydraulic Accumulator, Servo Hydraulic System, Hydraulic Power Unit, Oil Cooler, Proportional Valve, Servo Valve, serta Electrical System*. Alarm yang muncul umumnya berkaitan dengan kondisi seperti kebocoran seal oil, kegagalan pengendali pitch, tekanan hidrolik yang tidak stabil, peningkatan temperatur oli, kegagalan katup hidrolik, serta gangguan pada sistem pendingin.

Data kejadian alarm ini kemudian digunakan sebagai dasar dalam proses identifikasi kegagalan sistem CPP serta dalam penyusunan struktur *Fault Tree Analysis* untuk menentukan hubungan sebab-akibat antar komponen yang berpotensi menyebabkan kegagalan sistem. Tabel data kejadian alarm sistem CPP tahun 2015 disajikan pada **Lampiran 3**.

4.2 Identifikasi Kegagalan Sistem CPP

4.2.1 Kegagalan Sistem CPP

Berdasarkan data kejadian alarm yang diperoleh dari logbook mesin dan sistem monitoring kapal selama periode pengamatan, teridentifikasi berbagai kejadian kegagalan yang terjadi pada sistem *Controllable Pitch Propeller*. Data tersebut kemudian diklasifikasikan berdasarkan jenis alarm, frekuensi kejadian, tingkat *critical failure*, subsistem, serta komponen utama yang terlibat.

Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa selama periode pengamatan terdapat 63 kejadian alarm yang berkaitan dengan sistem CPP. Kejadian tersebut tersebar pada beberapa subsistem utama, yaitu subsistem mekanik, subsistem hidrolik, dan subsistem kontrol. Setiap kejadian alarm merepresentasikan indikasi gangguan operasi pada komponen tertentu yang berpotensi mempengaruhi kinerja sistem propulsi kapal. Rekapitulasi kejadian kegagalan sistem CPP beserta frekuensi kemunculannya ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Table 4. 1 Klasifikasi Kejadian Alarm Sistem CPP, Sumber : Penulis. 2026

No	CPP Alarm Event	Frequency	Critical Failure	Subsystem	Primary Component
1	CPP Seal Oil Low / Leak	21	No	Mechanical	Hub Seal
2	CPP Pitch Control Fail / Trip	4	Yes	Control	Pitch Controller
3	Oil Cooler Seawater Flow Low	3	No	Hydraulic	Seawater Cooling Line
4	CPP Trip – Pitch Runaway	3	Yes	Hydraulic	Hydraulic Control Valve
5	Servo Pressure Low / Unstable	3	No	Hydraulic	Servo Hydraulic System
6	CPP Trip – Pitch Cannot Increase	3	Yes	Hydraulic	Pitch Actuator
7	CPP Trip – High Oil Temperature	2	Yes	Hydraulic	Hydraulic Oil System
8	Accumulator Precharge Low	2	No	Hydraulic	Hydraulic Accumulator
9	Pressure Relief Valve Stuck Open	2	No	Hydraulic	Relief Valve
10	Oil Filter Differential Pressure High	2	No	Hydraulic	Hydraulic Oil Filter
11	Pump Motor Overcurrent	2	Yes	Hydraulic	HPU Electric Motor
12	Proportional Valve Current High	2	Yes	Control	Proportional Control Valve
13	Servo Valve Sticking	2	Yes	Control	Servo Valve
14	Hydraulic Oil Temperature High	2	Yes	Hydraulic	Oil Temperature Sensor
15	CPP Emergency Trip – Overspeed	2	Yes	Control	Overspeed Protection System

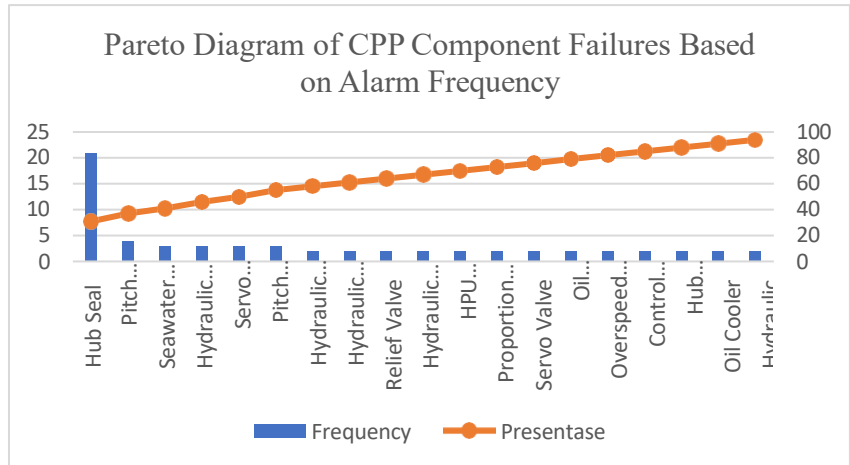
16	CPP Trip – Electrical Power Loss	2	Yes	Control	Control Power Supply
17	CPP Trip – Low Lubricating Oil Pressure to Hub	2	Yes	Mechanical	Hub Lubrication System
18	Oil Cooler Efficiency Low	2	No	Hydraulic	Oil Cooler
19	Low HPU Pressure Fluctuation	2	No	Hydraulic	Hydraulic Power Unit
	Total	63			

Berdasarkan Tabel 4.2, komponen Hub Seal merupakan komponen dengan frekuensi kegagalan tertinggi, yaitu 21 kejadian dari total 63 kejadian alarm. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem seal oil pada hub propeller merupakan komponen yang paling sering mengalami gangguan pada sistem CPP. Kegagalan pada komponen ini umumnya berkaitan dengan kebocoran oli pelumas (seal oil leakage) yang dapat mengganggu sistem pelumasan hub serta berpotensi menyebabkan kontaminasi air laut ke dalam sistem.

Selain itu, komponen Pitch Controller juga menunjukkan frekuensi kegagalan yang relatif tinggi dengan 4 kejadian, yang dikategorikan sebagai critical failure karena berhubungan langsung dengan sistem pengendalian perubahan sudut pitch. Gangguan pada komponen ini dapat menyebabkan kegagalan pengaturan sudut pitch propeller, sehingga sistem propulsi tidak dapat beroperasi secara optimal.

Beberapa komponen lain yang juga menunjukkan frekuensi kegagalan yang cukup signifikan adalah Seawater Cooling Line, Hydraulic Control Valve, Servo Hydraulic System, dan Pitch Actuator, yang masing-masing mengalami 3 kejadian kegagalan. Komponen-komponen tersebut merupakan bagian dari subsistem hidrolis yang berperan dalam menyediakan tekanan fluida hidrolis untuk menggerakkan mekanisme perubahan sudut pitch pada propeller.

Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai distribusi kegagalan komponen, dilakukan analisis menggunakan diagram Pareto berdasarkan frekuensi kejadian alarm pada setiap komponen. Diagram Pareto ini digunakan untuk mengidentifikasi komponen yang paling dominan berkontribusi terhadap kegagalan sistem CPP.



Gambar 4. 2 Diagram Pareto Kejadian Kegagalan Sistem CPP, Sumber: Penulis. 2026

Berdasarkan diagram Pareto, terlihat bahwa sebagian besar kejadian kegagalan sistem CPP disebabkan oleh sejumlah kecil komponen dengan frekuensi kegagalan yang relatif tinggi. Komponen *Hub Seal* memberikan kontribusi terbesar terhadap total kejadian kegagalan sistem. Hal ini menunjukkan bahwa komponen tersebut merupakan komponen kritis yang perlu menjadi prioritas dalam kegiatan inspeksi dan pemeliharaan sistem CPP.

Secara keseluruhan, hasil identifikasi ini menunjukkan bahwa kegagalan sistem CPP tidak hanya disebabkan oleh satu komponen tertentu, tetapi merupakan hasil interaksi berbagai komponen yang terdapat pada subsistem mekanik, hidrolik, dan kontrol. Oleh karena itu, analisis lanjutan menggunakan *Fault Tree Analysis* dilakukan untuk memodelkan hubungan sebab-akibat antar kejadian kegagalan serta mengidentifikasi kombinasi kegagalan yang dapat menyebabkan terjadinya kegagalan sistem CPP.

Hasil identifikasi kegagalan ini selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam penyusunan model *Fault Tree Analysis* untuk mengidentifikasi hubungan sebab-akibat antar komponen yang dapat memicu terjadinya kegagalan sistem CPP

4.3 Pembuatan Reality Block Diagram

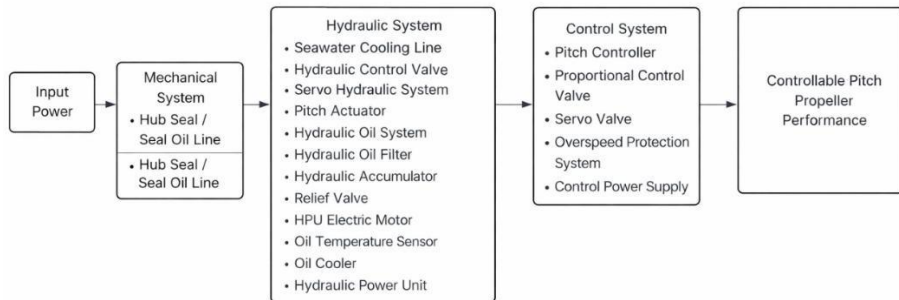
Untuk memodelkan hubungan fungsional antar komponen pada sistem *Controllable Pitch Propeller*, dilakukan pemodelan sistem menggunakan *Reliability Block Diagram*. Metode RBD digunakan untuk merepresentasikan struktur sistem serta menggambarkan keterkaitan antar komponen yang berperan dalam menjaga kinerja sistem secara keseluruhan. Melalui pendekatan ini, hubungan keandalan antar komponen dapat dianalisis berdasarkan konfigurasi operasional sistem.

Reliability Block Diagram merupakan metode yang umum digunakan dalam reliability engineering untuk memodelkan hubungan fungsional antar komponen dalam suatu sistem. Dalam RBD, setiap blok merepresentasikan suatu komponen atau subsistem yang berkontribusi terhadap keberhasilan operasi sistem. Hubungan antar blok menunjukkan bagaimana kegagalan suatu komponen dapat mempengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan.

Pada penelitian ini, struktur RBD disusun berdasarkan manual book sistem CPP serta data historis kegagalan komponen yang diperoleh dari logbook, laporan perawatan,

dan catatan operasional kapal selama periode pengamatan. Informasi tersebut digunakan untuk mengidentifikasi komponen utama sistem serta menentukan hubungan operasional antar komponen yang berkontribusi terhadap kinerja sistem CPP.

Berdasarkan referensi teknis tersebut, sistem CPP dimodelkan ke dalam beberapa subsistem utama yang bekerja secara berurutan, yaitu subsistem mekanik, subsistem hidrolik, dan subsistem kontrol. Pemodelan ini dilakukan untuk menggambarkan alur kerja sistem serta menunjukkan keterkaitan fungsional antar subsistem dalam mendukung operasi sistem propulsi kapal.



Gambar 4. 3 Reliability Block Diagram Sistem CPP, Sumber: Pennulis. 2026

Berdasarkan Gambar 4.3, alur operasi sistem dimulai dari input power yang diteruskan ke subsistem mekanik, yang pada penelitian ini direpresentasikan oleh komponen Hub Seal / Seal Oil Line dan Hub Lubrication System. Komponen ini berfungsi untuk menjaga sistem pelumasan serta mencegah terjadinya kebocoran oli pada mekanisme hub propeller. Gangguan pada komponen tersebut dapat menyebabkan kebocoran oli yang berpotensi mengganggu kinerja sistem CPP.

Energi kemudian diteruskan ke subsistem hidrolik, yang berfungsi sebagai sumber tenaga utama dalam menggerakkan mekanisme perubahan sudut *pitch propeller*. Subsistem ini terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu Seawater Cooling Line, Hydraulic Control Valve, Servo Hydraulic System, Pitch Actuator, Hydraulic Oil System, Hydraulic Oil Filter, Hydraulic Accumulator, Relief Valve, HPU Electric Motor, Oil Temperature Sensor, Oil Cooler, dan Hydraulic Power Unit. Komponen-komponen tersebut bekerja secara terintegrasi untuk menghasilkan dan mengatur tekanan hidrolik yang digunakan dalam proses pengaturan sudut pitch propeller.

Setelah energi hidrolik tersedia, proses pengaturan sudut pitch propeller dikendalikan oleh subsistem kontrol. Subsistem ini terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu Pitch Controller, Proportional Control Valve, Servo Valve, Overspeed Protection System, dan Control Power Supply. Komponen-komponen tersebut berperan dalam mengendalikan serta memonitor kondisi operasi sistem CPP.

Pitch Controller berfungsi sebagai unit pengendali utama yang mengatur perubahan sudut pitch propeller, sedangkan Servo Valve mengatur aliran fluida hidrolik menuju aktuator pitch. Selain itu, Oil Temperature Sensor digunakan untuk memonitor suhu oli hidrolik agar tetap berada pada kondisi operasi yang aman, sementara Oil Cooler berfungsi menjaga temperatur oli agar tidak melebihi batas yang diizinkan.

Ketiga subsistem tersebut dimodelkan dalam konfigurasi seri pada Reliability Block Diagram, yang menunjukkan bahwa keberhasilan operasi sistem CPP bergantung pada kinerja setiap subsistem yang terlibat. Dengan konfigurasi ini, kegagalan pada salah satu subsistem dapat menyebabkan terganggunya kinerja sistem CPP secara keseluruhan.

4.4 Hasil Identifikasi Kegagalan Sistem CPP Menggunakan FTA

Pada tahap ini dilakukan identifikasi kegagalan pada sistem *Controllable Pitch Propeller* menggunakan metode *Fault Tree Analysis*. Metode FTA digunakan untuk menganalisis hubungan sebab-akibat dari suatu kegagalan sistem secara sistematis dan logis, dimulai dari kejadian puncak hingga ke komponen penyebab dasar.

Struktur FTA disusun berdasarkan data kegagalan yang diperoleh dari logbook kapal, laporan perawatan, serta catatan operasional kapal selama periode pengamatan. Data tersebut kemudian diklasifikasikan ke dalam beberapa subsistem utama, yaitu subsistem mekanik, subsistem hidrolik, dan subsistem kontrol.

Selanjutnya ditentukan *top event*, *intermediate event*, dan *basic event* yang membentuk struktur fault tree. Hubungan antar kejadian disusun menggunakan logic gate berupa OR gate, yang menggambarkan hubungan fungsional antar komponen dalam sistem CPP.

Hasil analisis FTA ini kemudian digunakan sebagai dasar dalam penyusunan struktur Bayesian Network, khususnya dalam menentukan hubungan ketergantungan antar node serta dalam penentuan probabilitas kegagalan komponen.

4.4.1 Penetapan Top Event Kegagalan CPP

Pada penelitian ini, top event ditetapkan sebagai kegagalan sistem *Controllable Pitch Propeller* yang menyebabkan sistem propulsi kapal tidak dapat beroperasi secara normal. Penetapan *top event* didasarkan pada fungsi utama sistem CPP, yaitu mengatur sudut *pitch* baling-baling untuk menghasilkan gaya dorong sesuai dengan kebutuhan operasi kapal.

Apabila sistem CPP mengalami kegagalan, maka kapal dapat mengalami beberapa kondisi berikut:

1. Kapal tidak dapat menghasilkan gaya dorong.
2. Kapal tidak dapat mengatur kecepatan secara optimal.
3. Kapal kehilangan kemampuan manuver.
4. Kapal berpotensi mengalami kondisi darurat akibat kehilangan propulsi.

Berdasarkan kondisi tersebut, top event dalam penelitian ini didefinisikan sebagai “Kegagalan Sistem CPP”, yang mencakup seluruh bentuk kegagalan yang mengganggu fungsi utama sistem propulsi kapal.

Table 4. 2 Top Event Sistem CPP Pada Struktur FTA, Sumber: Penulis 2026

TOP EVENT	CODE
KEGAGALAN SISTEM CPP	TE

Penetapan *top event* ini bertujuan untuk memberikan fokus yang jelas pada analisis Fault Tree Analysis, sehingga seluruh kejadian yang berada pada tingkat di bawahnya dapat diidentifikasi sebagai penyebab langsung maupun tidak langsung dari kegagalan sistem CPP.

4.4.2 Penyusunan Intermediate Event dan Basic Event

Setelah *top event* ditentukan, dilakukan identifikasi terhadap kejadian-kejadian yang berkontribusi terhadap terjadinya kegagalan tersebut. Kejadian yang teridentifikasi kemudian diklasifikasikan menjadi dua kategori, yaitu *intermediate event* dan *basic event*.

1. Intermediate Event

Intermediate event merupakan kejadian antara yang terjadi akibat kombinasi beberapa kejadian lain di bawahnya. Dalam penelitian ini,

intermediate event diidentifikasi berdasarkan komponen dan subsistem utama pada sistem Controllable Pitch Propeller.

Berdasarkan hasil identifikasi, *intermediate event* kemudian diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok subsistem utama, yaitu subsistem mekanik, subsistem hidrolik, dan subsistem kontrol. Setiap *intermediate event* merepresentasikan potensi kegagalan pada komponen atau kelompok komponen yang memiliki fungsi tertentu dalam sistem CPP.

Daftar *intermediate event* yang teridentifikasi beserta subsistem dan kode kejadian ditunjukkan pada Tabel berikut.

Table 4. 3 Daftar Intermediate Event Sistem CPP Pada Struktur FTA,
Sumber: Penulis 2026

INTERMEDIATE EVENT	Subsystem	IE CODE
Hub Seal / Seal Oil Line	Mechanical	IE - 01
Pitch Controller	Control	IE - 02
Seawater Cooling Line	Hydraulic	IE - 03
Hydraulic Control Valve	Hydraulic	IE - 04
Servo Hydraulic System	Hydraulic	IE - 05
Pitch Actuator / Hydraulic Filter	Hydraulic	IE - 06
Hydraulic Oil System	Hydraulic	IE - 07
Hydraulic Accumulator	Hydraulic	IE - 08
Relief Valve	Hydraulic	IE - 09
Hydraulic Oil Filter	Hydraulic	IE - 10
HPU Electric Motor	Hydraulic	IE - 11
Proportional Control Valve	Control	IE - 12
Servo Valve	Control	IE - 13
Oil Temperature Sensor	Hydraulic	IE - 14
Overspeed Protection System	Control	IE - 15
Control Power Supply	Control	IE - 16
Hub Lubrication System	Mechanical	IE - 17
Oil Cooler	Hydraulic	IE - 18
Hydraulic Power Unit	Hydraulic	IE - 19

2. Basic Event

Berdasarkan identifikasi komponen dan data kegagalan yang terjadi selama periode pengamatan, diperoleh sejumlah basic event yang merepresentasikan kegagalan dasar pada komponen sistem *Controllable Pitch Propeller*. Setiap *basic event* menggambarkan jenis kerusakan spesifik yang dapat berkontribusi terhadap terjadinya kegagalan sistem. Daftar *basic event* yang digunakan dalam penyusunan model fault tree pada penelitian ini disajikan pada Tabel 4.4

Table 4. 4 Daftar Basic Event Sistem CPP Pada Struktur FTA, Sumber: Penulis 2026

BASIC EVENT	BE CODE	
Shaft seal wear / leakage	BE 1	IE 1
Seal oil pipe leakage	BE 2	
Pitch controller malfunction	BE 3	IE 2
Control signal failure	BE 4	
Seawater strainer blockage	BE 5	IE 3
Cooling pipeline obstruction	BE 6	
Hydraulic control valve failure	BE 7	IE 4
Pitch actuator malfunction	BE 8	
Hydraulic internal leakage	BE 9	IE 5
Servo pump pressure loss	BE 10	
Pitch actuator jam	BE 11	IE 6
Control valve malfunction	BE 12	
Cooling system inefficiency	BE 13	IE 7
Hydraulic oil degradation	BE 14	
Nitrogen gas leakage	BE 15	IE 8
Accumulator bladder damage	BE 16	
Relief valve spring fatigue	BE 17	IE 9
Valve contamination	BE 18	
Filter clogging	BE 19	IE 10
Filter bypass valve malfunction	BE 20	
Motor overload	BE 21	IE 11
Motor bearing wear	BE 22	
Valve coil overheating	BE 23	IE 12
Electrical control malfunction	BE 24	
Valve spool contamination	BE 25	IE 13
Valve internal wear	BE 26	
Oil cooler fouling	BE 27	IE 14
Hydraulic oil overheating	BE 28	
Governor malfunction	BE 29	IE 15
Speed sensor error	BE 30	
Power supply interruption	BE 31	IE 16
Control circuit failure	BE 32	
Lubrication pump failure	BE 33	IE 17

Hub oil leakage	BE 34	
Heat exchanger fouling	BE 35	IE 18
Cooling water flow reduction	BE 36	
Hydraulic pump instability	BE 37	IE 19
Pressure regulator malfunction	BE 38	

Penyusunan intermediate event dan basic event secara sistematis memungkinkan penulis untuk merepresentasikan struktur penyebab kegagalan sistem CPP secara lengkap dan terstruktur.

4.4.3 Struktur Logika Kegagalan

Berdasarkan hasil identifikasi data kegagalan sistem CPP, penulis menyusun struktur logika pada diagram *Fault Tree Analysis* menggunakan **OR gate** sebagai hubungan utama antar kejadian.

Table 4. 5 Struktur Logika Kegagalan Pada FTA, Sumber: Penulis. 2026

LOGIC GATE	
TOP EVENT - INTERMEDIATE EVENT	OR
INTERMEDIATE EVENT - BASIC EVENT	OR

Nb: OR Gate (salah satu kejadian menyebabkan kegagalan), menurut IEC 61025: OR gate digunakan ketika satu saja dari beberapa penyebab dapat menyebabkan kejadian di atasnya.

Penggunaan OR gate didasarkan pada hasil analisis data yang menunjukkan bahwa sebagian besar kegagalan komponen terjadi secara mandiri. Kegagalan pada satu komponen saja sudah cukup untuk menyebabkan kegagalan pada subsistem terkait, sehingga hubungan antar basic event direpresentasikan dengan OR gate.

Struktur yang sama juga diterapkan pada hubungan antara intermediate event dan top event. Hasil analisis menunjukkan bahwa kegagalan pada salah satu subsistem, baik mekanik, hidrolis, maupun kontrol, sudah dapat menyebabkan kegagalan sistem CPP secara keseluruhan.

Dengan demikian, diagram FTA yang disusun menunjukkan bahwa kegagalan sistem CPP merupakan hasil dari salah satu jalur kegagalan yang ada. Penggunaan OR gate pada seluruh struktur FTA membuat model kegagalan lebih sederhana dan sesuai dengan pola kerusakan yang ditemukan pada data penelitian.

4.4.4 Pembuatan Fault Tree Diagram

Berdasarkan data kerusakan dan kegagalan fungsi komponen pada sistem Controllable Pitch Propeller, langkah selanjutnya dalam penelitian ini adalah menyusun Fault Tree Diagram untuk mengidentifikasi hubungan sebab-akibat yang menyebabkan terjadinya kegagalan sistem. Top event yang digunakan pada fault tree adalah kegagalan sistem CPP pada kapal AHTS. Diagram fault tree yang menggambarkan hubungan antara kegagalan

komponen dan kegagalan fungsi sistem CPP secara keseluruhan disajikan pada **Lampiran 5**.

Dalam struktur Fault Tree Analysis, top event dihubungkan dengan sejumlah intermediate event melalui logic gate sesuai dengan simbol yang digunakan dalam metode FTA. Hubungan ini menunjukkan bahwa top event dapat terjadi apabila satu atau lebih intermediate event mengalami kegagalan. Selanjutnya, setiap intermediate event dapat disebabkan oleh satu atau lebih basic event yang merepresentasikan penyebab dasar kegagalan komponen pada sistem CPP.

Metode Fault Tree Analysis merupakan metode analisis deduktif yang menggunakan pendekatan top-down, yaitu analisis dimulai dari top event kemudian ditelusuri hingga ke penyebab dasar kegagalan pada tingkat komponen. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi hubungan logika kegagalan sistem secara sistematis dan hierarkis. Selain itu, fault tree merupakan representasi grafis terstruktur yang menggambarkan kondisi atau faktor yang berkontribusi terhadap terjadinya suatu kegagalan sistem.

Dalam bidang reliability engineering, analisis kegagalan pada sistem yang kompleks umumnya dilakukan menggunakan pendekatan dekomposisi subsistem agar struktur hubungan kegagalan dapat dimodelkan secara lebih terstruktur dan mudah dianalisis. Standar Fault Tree Analysis IEC 61025 juga menyebutkan bahwa metode FTA sangat sesuai digunakan untuk menganalisis sistem yang terdiri dari beberapa subsistem yang saling berkaitan secara fungsional, sehingga hubungan kegagalan antar komponen dapat direpresentasikan secara hierarkis dari tingkat sistem hingga komponen (International Electrotechnical Commission, 2006).

Karena sistem Controllable Pitch Propeller merupakan sistem yang kompleks dan terdiri dari banyak komponen yang saling berinteraksi, penyajian fault tree secara keseluruhan akan menghasilkan diagram yang sangat besar dan sulit ditampilkan dalam satu halaman. Oleh karena itu, untuk meningkatkan keterbacaan diagram serta mempermudah proses analisis kegagalan, struktur fault tree pada penelitian ini dibagi ke dalam beberapa subsistem utama, yaitu subsistem mekanik, subsistem hidrolis, dan subsistem kontrol. Pembagian ini memungkinkan hubungan kegagalan pada masing-masing bagian sistem dapat ditampilkan secara lebih jelas tanpa mengurangi keterkaitan antar komponen dalam sistem CPP secara keseluruhan.

4.4.5 *Minimal Cut Set*

Penentuan *minimal cut set* dilakukan melalui analisis kualitatif menggunakan pendekatan aljabar Boolean terhadap struktur *fault tree* yang telah disusun pada **Lampiran 5**. Pada tahap ini, struktur logika dari *fault tree diagram* ditransformasikan ke dalam bentuk persamaan Boolean untuk memperoleh kombinasi *basic event* yang secara logis menyebabkan terjadinya *top event*. Hubungan antar kejadian dinyatakan sebagai berikut:

1. Gerbang **OR** direpresentasikan dengan operator penjumlahan (+)

Dengan demikian, apabila suatu *intermediate event* IE_i tersusun dari beberapa kejadian melalui gerbang OR, maka secara matematis dinyatakan sebagai:

$$IE_i = BE_1 + BE_2 + \dots + BE_n$$

Selanjutnya, *top event* (TE) dinyatakan sebagai fungsi Boolean dari seluruh *intermediate event* tingkat pertama:

$$TE = IE_1 + IE_2 + IE_3$$

Ekspresi tersebut kemudian disubstitusikan secara bertahap hingga seluruh variabel dinyatakan dalam bentuk *basic event*. Proses substitusi ini menghasilkan fungsi Boolean dalam bentuk majemuk yang masih mengandung kombinasi berulang dan suku redundan. Untuk lebih jelas mengenai analisa kualitatif dengan menggunakan persamaan aljabar Boolean berdasarkan pada **lampiran 5** adalah sebagai berikut:

1. *Minimal Cut Set Top Event*

$$TE = IE\ 01\ \text{or}\ IE\ 02\ \text{or}\ IE\ 03\ \text{or}\ IE\ 04\ \text{or}\ IE\ 05\ \text{or}\ IE\ 06\ \text{or}\ IE\ 07\ \text{or}\ IE\ 08\ \text{or}\ IE\ 09\ \text{or}\ IE\ 10\ \text{or}\ IE\ 11\ \text{or}\ IE\ 12\ \text{or}\ IE\ 13\ \text{or}\ IE\ 14\ \text{or}\ IE\ 15\ \text{or}\ IE\ 16\ \text{or}\ IE\ 17\ \text{or}\ IE\ 18\ \text{or}\ IE\ 19.$$

2. *Minimal Cut Set Intermediate Event*

$$\begin{aligned} IE\ 01 &= BE\ 1\ \text{or}\ BE\ 2. \\ IE\ 02 &= BE\ 3\ \text{or}\ BE\ 4. \\ IE\ 03 &= BE\ 5\ \text{or}\ BE\ 6. \\ IE\ 04 &= BE\ 7\ \text{or}\ BE\ 8. \\ IE\ 05 &= BE\ 9\ \text{or}\ BE\ 10. \\ IE\ 06 &= BE\ 11\ \text{or}\ BE\ 12. \\ IE\ 07 &= BE\ 13\ \text{or}\ BE\ 14. \\ IE\ 08 &= BE\ 15\ \text{or}\ BE\ 16. \\ IE\ 09 &= BE\ 17\ \text{or}\ BE\ 18. \\ IE\ 10 &= BE\ 19\ \text{or}\ BE\ 20. \\ IE\ 11 &= BE\ 21\ \text{or}\ BE\ 22. \\ IE\ 12 &= BE\ 23\ \text{or}\ BE\ 24. \\ IE\ 13 &= BE\ 25\ \text{or}\ BE\ 26. \\ IE\ 14 &= BE\ 27\ \text{or}\ BE\ 28. \\ IE\ 15 &= BE\ 29\ \text{or}\ BE\ 30. \\ IE\ 16 &= BE\ 31\ \text{or}\ BE\ 32. \\ IE\ 17 &= BE\ 33\ \text{or}\ BE\ 34. \\ IE\ 18 &= BE\ 35\ \text{or}\ BE\ 36. \\ IE\ 19 &= BE\ 37\ \text{or}\ BE\ 38. \end{aligned}$$

Untuk memperoleh kombinasi kegagalan yang minimal, dilakukan proses pengembangan dan reduksi persamaan menggunakan hukum-hukum aljabar Boolean, yang meliputi:

- Hukum distributif : $a(b + c) = ab + ac$
- Hukum idempoten : $a + a = a$ dan $a \cdot a = a$
- Hukum penyerapan : $a + ab = a$
- Hukum komplemen : $a + a' = 1$

Melalui penerapan hukum distributif, persamaan Boolean dikembangkan hingga berbentuk *Sum of Product*, yaitu penjumlahan dari hasil perkalian beberapa *basic event*. Setiap suku hasil perkalian tersebut

merepresentasikan suatu kombinasi kegagalan yang secara logis dapat menyebabkan terjadinya *top event*.

Selanjutnya dilakukan proses reduksi dengan menghilangkan suku yang tidak minimal. Suatu kombinasi dinyatakan tidak minimal apabila masih mengandung *basic event* yang secara logika dapat dieliminasi menggunakan hukum penyerapan atau hukum idempoten. Proses reduksi ini dilakukan secara sistematis hingga tidak terdapat lagi suku yang dapat disederhanakan.

Hasil akhir dari proses pengembangan dan reduksi tersebut berupa sekumpulan kombinasi *basic event* yang tidak dapat direduksi lebih lanjut. Kombinasi ini dinyatakan sebagai minimal cut set, yaitu kombinasi kegagalan terkecil yang secara logis cukup untuk menyebabkan terjadinya top event pada sistem *Controllable Pitch Propeller*.

Berdasarkan analisis menggunakan persamaan aljabar Boolean, diperoleh minimal cut set dari *basic event* yang dapat menyebabkan terjadinya gangguan atau kegagalan pada sistem CPP AHTS, sebagaimana disajikan pada Tabel 4.6

Table 4. 6 Minimal Cut Set, Sumber: Penulis. 2026

No	<i>Minimal Cut Set</i>
1.	BE01 or BE02 or BE03 or BE04 or BE05 or BE06 or BE07 or BE08 or BE09 or BE10 or BE11 or BE12 or BE13 or BE14 or BE15 or BE16 or BE17 or BE18 or BE19 or BE20 or BE21 or BE22 or BE23 or BE24 or BE25 or BE26 or BE27 or BE28 or BE29 or BE30 or BE31 or BE32 or BE33 or BE34 or BE35 or BE36 or BE37 or BE38.

Secara struktural, minimal cut set yang diperoleh menunjukkan bahwa seluruh basic event, yaitu BE01 sampai dengan BE38, terhubung melalui gerbang logika OR. Hal ini menunjukkan bahwa setiap *basic event* memiliki potensi untuk secara langsung menyebabkan kegagalan pada tingkat di atasnya.

Dengan demikian, kegagalan pada salah satu *basic event* saja sudah cukup untuk memicu terjadinya top event tanpa memerlukan kombinasi dengan *basic event* lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa setiap *basic event* secara individual telah memenuhi syarat sebagai minimal cut set.

Pada tahap penentuan minimal cut set ini diketahui bahwa jumlah *basic event* yang dapat menyebabkan terjadinya top event pada sistem adalah sebanyak 38 kejadian kegagalan. Setiap *basic event* merepresentasikan peristiwa kerusakan atau kegagalan fungsi pada komponen sistem yang secara langsung berkontribusi terhadap terjadinya kegagalan sistem *Controllable Pitch Propeller*.

Hasil ini menunjukkan bahwa struktur fault tree sistem CPP pada kapal AHTS didominasi oleh hubungan logika OR pada tingkat dasar. Oleh karena itu, kegagalan satu komponen saja sudah cukup untuk memicu terjadinya top event atau kegagalan sistem secara keseluruhan.

4.4.6 Perhitungan Prior Probability Basic Event

Setelah model Fault Tree Analysis disusun dan seluruh basic event berhasil diidentifikasi, langkah selanjutnya adalah menentukan nilai prior probability dari masing-masing basic event. Nilai probabilitas awal ini digunakan sebagai input awal pada pemodelan Bayesian Network yang akan digunakan untuk menghitung probabilitas pada intermediate event dan top event.

Pada penelitian ini, perhitungan probabilitas kegagalan dilakukan menggunakan pendekatan empirical failure probability, yaitu berdasarkan data historis kejadian kegagalan yang terjadi selama periode observasi. Pendekatan ini digunakan agar nilai probabilitas yang diperoleh dapat merepresentasikan kondisi operasional sistem secara aktual di lapangan.

Probabilitas basic event dihitung dengan membandingkan jumlah kejadian kegagalan suatu komponen terhadap total periode observasi sistem. Nilai probabilitas tersebut kemudian digunakan sebagai prior probability dalam model Bayesian Network, sehingga proses inferensi probabilistik pada jaringan dapat dilakukan secara lebih representatif terhadap kondisi sistem yang sebenarnya.

Secara matematis, probabilitas basic event dirumuskan sebagai berikut:

$$P(B) = \frac{\text{frekuensi kejadian basic event}}{\text{total waktu pengamatan}}$$

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data kerusakan atau kegagalan fungsi pada sistem Controllable Pitch Propeller kapal AHTS selama tahun 2015. Berdasarkan data operasional yang tersedia, total waktu operasi sistem CPP selama periode observasi adalah 323 hari kerja. Frekuensi kejadian untuk masing-masing basic event diperoleh dengan mengidentifikasi data kerusakan yang tercatat pada **Lampiran 4**. Sebagai contoh, perhitungan probabilitas untuk basic event B01 adalah sebagai berikut:

$$P(B01) = \frac{13}{323} = 0,0402$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kegagalan basic event B01 terjadi sebanyak 13 kali selama 323 hari operasi, sehingga probabilitas kegagalannya adalah sebesar 0,04 atau sekitar 4%.

Dengan menggunakan metode perhitungan yang sama, diperoleh nilai prior probability untuk seluruh basic event dalam sistem CPP. Nilai probabilitas ini selanjutnya digunakan sebagai parameter input pada pemodelan Bayesian Network untuk menghitung probabilitas kejadian pada tingkat intermediate event dan top event melalui proses inferensi probabilistik. Berikut adalah perhitungan probabilitas kegagalan komponen *basic event* seluruhnya:

$$\begin{aligned} P(B01) &= \frac{13}{323} = 0,0402 \\ P(B02) &= \frac{8}{323} = 0,0248 \\ P(B03) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\ P(B04) &= \frac{4}{323} = 0,0124 \\ P(B05) &= \frac{3}{323} = 0,0093 \\ P(B06) &= \frac{3}{323} = 0,0093 \\ P(B07) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\ P(B08) &= \frac{3}{323} = 0,0093 \\ P(B09) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P(B10) &= \frac{3}{323} = 0,0093 \\
P(B11) &= \frac{3}{323} = 0,0093 \\
P(B12) &= \frac{3}{323} = 0,0093 \\
P(B13) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B14) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B15) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B16) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B17) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B18) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B19) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B20) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B21) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B22) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B23) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B24) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B25) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B26) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B27) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B28) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B29) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B30) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B31) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B32) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B33) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B34) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B35) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B36) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B37) &= \frac{2}{323} = 0,0062 \\
P(B38) &= \frac{2}{323} = 0,0062
\end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai prior probability untuk seluruh *basic event* pada sistem Controllable Pitch Propeller. Nilai probabilitas tersebut merepresentasikan peluang terjadinya kegagalan masing-masing komponen berdasarkan data historis kerusakan selama periode pengamatan sebanyak 323 hari operasi.

Probabilitas yang diperoleh dari analisis Fault Tree Analysis ini selanjutnya digunakan sebagai parameter awal dalam proses pemodelan

Bayesian Network. Melalui pendekatan ini, struktur hubungan sebab-akibat yang sebelumnya telah diidentifikasi dalam model FTA dapat direpresentasikan dalam bentuk jaringan probabilistik pada BN.

Dengan demikian, nilai prior probability basic event yang telah diperoleh akan digunakan sebagai input untuk melakukan proses inferensi probabilistik guna menghitung probabilitas kejadian pada tingkat intermediate event hingga top event, sehingga analisis keandalan sistem CPP dapat dilakukan secara lebih komprehensif.

4.5 Pemodelan Bayesian Networks

Pemodelan *Bayesian Network* pada penelitian ini dilakukan sebagai pengembangan dari hasil analisis *Fault Tree Analysis* yang telah diperoleh pada tahap sebelumnya. Struktur logika kegagalan yang direpresentasikan dalam bentuk *fault tree* kemudian ditransformasikan ke dalam bentuk graf berarah tanpa siklus atau *Directed Acyclic Graph*. Pendekatan ini memungkinkan analisis probabilistik dilakukan secara lebih dinamis melalui proses inferensi Bayesian, sehingga pengaruh masing-masing *basic event* terhadap probabilitas kegagalan sistem secara keseluruhan dapat dianalisis secara lebih komprehensif.

Model Bayesian Network dibangun dengan mempertahankan hubungan kausalitas antara *basic event*, *intermediate event*, dan *top event* sebagaimana yang telah didefinisikan pada model FTA. Selanjutnya, setiap node dalam jaringan diberikan parameter probabilitas melalui *Conditional Probability Table*. Dengan demikian, sistem dapat dianalisis baik dalam kondisi probabilitas awal (*prior probability*) maupun setelah dilakukan pembaruan informasi melalui proses inferensi (*posterior probability*).

4.5.1 Menentukan *Directed Acyclic Graph*

Pada tahap ini, penulis menyusun struktur *Directed Acyclic Graph* sebagai representasi hubungan ketergantungan antar komponen dalam sistem *Controllable Pitch Propeller*. DAG digunakan dalam model *Bayesian Network* untuk menggambarkan hubungan sebab-akibat antar variabel yang direpresentasikan dalam bentuk node dan arah panah. Setiap node merepresentasikan kondisi kegagalan suatu komponen atau subsistem, sedangkan arah panah menunjukkan pengaruh suatu kejadian terhadap kejadian lainnya.

Penyusunan struktur DAG pada penelitian ini dilakukan berdasarkan hasil identifikasi kegagalan sistem CPP dari analisis *Fault Tree Analysis*, data historis kegagalan, serta hubungan fungsional antar komponen yang diperoleh dari manual book sistem CPP. Dengan pendekatan tersebut, hubungan antar node dapat merepresentasikan mekanisme kegagalan sistem secara lebih realistis.

Dalam model yang dibangun, node utama direpresentasikan sebagai *CPP_Failure*, yang menggambarkan kondisi kegagalan sistem CPP secara keseluruhan. Node ini dipengaruhi oleh beberapa komponen utama yang berperan langsung dalam pengoperasian sistem CPP, antara lain *Pitch_Actuator*, *Servo_Hydraulic_System*, *Proportional_Control_Valve*, *Hydraulic_Oil_System*, dan *Hub_Seal*. Kegagalan pada komponen-komponen tersebut dapat menyebabkan gangguan pada mekanisme pengaturan sudut *pitch propeller*, sehingga berpotensi memicu kegagalan sistem propulsi kapal.

Pada subsistem hidrolis, beberapa komponen utama yang mempengaruhi kinerja sistem antara lain *Hydraulic_Oil_System*,

Hydraulic Accumulator, Hydraulic Oil Filter, Hydraulic Control Valve, serta Hydraulic Power Unit. Komponen-komponen ini berperan dalam menyediakan tekanan fluida hidrolik yang digunakan untuk menggerakkan mekanisme perubahan sudut *pitch*. Gangguan pada sistem hidrolik dapat menyebabkan tekanan oli tidak stabil sehingga sistem aktuator tidak dapat bekerja secara optimal.

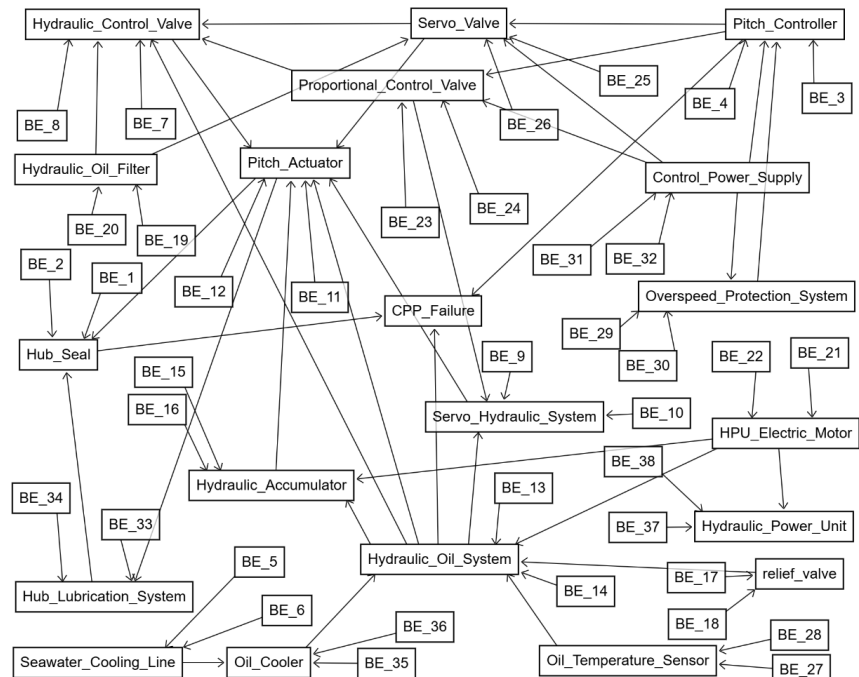
Selain itu, subsistem kontrol juga memiliki peran penting dalam pengaturan operasi CPP. Komponen seperti *Pitch Controller, Servo Valve, Proportional Control Valve, Control Power Supply, serta Overspeed Protection System* membentuk jaringan kontrol yang mengatur perintah perubahan sudut *pitch propeller*. Kegagalan pada komponen kontrol dapat menyebabkan sistem tidak mampu merespons perintah pengoperasian secara tepat, sehingga berpotensi menimbulkan kegagalan operasi CPP.

Pada bagian mekanis, komponen seperti *Hub Seal* dan *Hub Lubrication System* berperan dalam menjaga sistem pelumasan pada mekanisme hub propeller. Kegagalan pada komponen ini dapat menyebabkan kebocoran oli pelumas atau penurunan tekanan pelumasan yang dapat mempengaruhi kinerja mekanisme pengaturan *pitch*.

Selain node komponen utama, model DAG juga memuat *sejumlah basic event* yang merepresentasikan penyebab dasar kegagalan pada setiap komponen. *Basic event* tersebut digambarkan sebagai node awal yang tidak memiliki parent node dan secara langsung mempengaruhi komponen yang bersangkutan. Hubungan antara basic event dan node komponen menunjukkan bagaimana kegagalan dasar dapat berkembang menjadi kegagalan komponen yang lebih kompleks hingga akhirnya memicu kegagalan sistem CPP.

Struktur DAG yang dihasilkan pada penelitian ini menggambarkan hubungan ketergantungan antar komponen sistem CPP secara terintegrasi, mulai dari basic event, kegagalan komponen, hingga kegagalan sistem secara keseluruhan. Dengan struktur ini, model Bayesian Network dapat digunakan untuk melakukan analisis probabilistik terhadap kemungkinan kegagalan sistem CPP serta mengidentifikasi komponen yang memiliki kontribusi terbesar terhadap kegagalan sistem.

Struktur Directed Acyclic Graph yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Struktur Directed Acyclic Graph Hubungan Antar Komponen Sistem CPP. Sumber: Penulis. 2026

Melalui struktur DAG tersebut, hubungan sebab-akibat antar komponen sistem CPP dapat dimodelkan secara sistematis, sehingga memudahkan proses perhitungan probabilitas kegagalan pada tahap penyusunan *Conditional Probability Table* serta analisis inferensi pada model *Bayesian Network*.

4.5.2 Conditional Probability Table

Conditional Probability Table merupakan komponen kuantitatif utama dalam pemodelan Bayesian Network yang berfungsi untuk mendefinisikan probabilitas suatu node berdasarkan kondisi node induknya. Pada penelitian ini, penyusunan CPT dilakukan dengan mengacu pada struktur hubungan kegagalan yang diperoleh dari hasil *Fault Tree Analysis* pada sistem *Controllable Pitch Propeller*.

Dalam model *Bayesian Network* yang dibangun, node terdiri dari tiga kategori utama yaitu *Basic Event*, *Intermediate Event*, dan *Top Event*. *Basic Event* merepresentasikan penyebab dasar kegagalan komponen, *Intermediate Event* merepresentasikan kegagalan subsistem, sedangkan *Top Event* merepresentasikan kegagalan sistem CPP secara keseluruhan. Penyusunan CPT dilakukan secara sistematis untuk memastikan konsistensi antara struktur logika kegagalan pada FTA dan representasi probabilistik pada *Bayesian Network*.

Untuk node yang tidak memiliki parent, nilai probabilitas ditetapkan sebagai prior probability berdasarkan probabilitas kegagalan empiris yang telah dihitung pada tahap *Fault Tree Analysis*. Sementara itu, untuk node yang memiliki satu atau lebih parent, nilai probabilitas kondisional disusun

berdasarkan hubungan logika kegagalan yang merepresentasikan gerbang OR pada *fault tree*.

Dengan pendekatan ini, setiap hubungan sebab-akibat antar komponen yang telah diidentifikasi pada *fault tree* dapat direpresentasikan dalam bentuk probabilitas kondisional pada model *Bayesian Network*. Penyusunan CPT pada masing-masing node dijelaskan sebagai berikut.

1. *Conditional Probability Table Basic Event*

Basic Event merupakan node yang tidak memiliki parent dalam struktur Bayesian Network sehingga berfungsi sebagai node akar. Probabilitas pada Basic Event ditetapkan sebagai prior probability yang diperoleh dari hasil perhitungan probabilitas kegagalan pada tahap Fault Tree Analysis. Setiap basic event memiliki dua state yaitu:

- Normal
- Failure

Probabilitas state Failure diperoleh dari hasil perhitungan probabilitas kegagalan komponen berdasarkan data kegagalan yang tersedia. Sementara itu probabilitas state Normal diperoleh dari nilai komplemen probabilitas kegagalan sesuai dengan prinsip teori probabilitas yang dikemukakan oleh Kolmogorov, yaitu:

$$P(\text{Normal}) = 1 - P(\text{Failure})$$

Dengan demikian jumlah probabilitas pada setiap node basic event selalu bernilai satu. Sebagai contoh, probabilitas pada salah satu basic event dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel berikut.

Table 4. 7 Perhitungan Conditional Probability Table, Sumber: Penulis.
2026

Node	State	Probabilitas
BE_1	Failure	$P(BE_1)$
BE_1	Normal	$1 - P(BE_1)$

Sebagai contoh implementasi, apabila probabilitas kegagalan basic event BE_1 diperoleh sebesar 0,019 maka CPT yang terbentuk adalah sebagai berikut.

Table 4. 8 Conditional Table Probability Basic Event, Sumber: Penulis.
2026

Node	State	Probabilitas
BE_1	Failure	0.0402
BE_1	Normal	0.9598

Perhitungan probabilitas pada seluruh *basic event* dalam penelitian ini dilakukan dengan pendekatan yang sama seperti contoh tersebut. Setiap basic event yang tidak memiliki parent diberikan probabilitas awal berdasarkan hasil perhitungan probabilitas kegagalan pada tahap *Fault Tree Analysis*. State *Failure* merepresentasikan probabilitas kegagalan komponen, sedangkan state *Normal* merupakan nilai komplemennya yang diperoleh dari hubungan $1 - P(\text{Failure})$. Dengan demikian seluruh basic event dalam model Bayesian Network memiliki struktur CPT yang seragam

dan memenuhi kaidah dasar teori probabilitas.

2. *Conditional Probability Table Intermediate Event*

Intermediate Event merupakan node yang memiliki satu atau lebih parent dan merepresentasikan kegagalan subsistem pada sistem Controllable Pitch Propeller. Pada tahap Fault Tree Analysis, intermediate event digunakan untuk menggambarkan hubungan logika antar komponen yang menyebabkan terjadinya kegagalan sistem. Dalam penelitian ini, tahap FTA hanya digunakan untuk mengidentifikasi struktur hubungan kegagalan antar komponen, tanpa melakukan perhitungan probabilitas pada intermediate event maupun top event.

Pada tahap pemodelan Bayesian Network, probabilitas hanya dimasukkan pada node basic event sebagai *prior probability*. Sementara itu, probabilitas pada node intermediate event tidak ditentukan secara langsung, melainkan dihitung secara otomatis melalui proses inferensi Bayesian berdasarkan probabilitas pada basic event serta hubungan kausal antar node yang direpresentasikan dalam Conditional Probability Table.

Hubungan antar node dalam model ini mengikuti struktur logika yang diperoleh dari Fault Tree Analysis. Berdasarkan hasil identifikasi struktur fault tree, hubungan antar komponen dalam penelitian ini direpresentasikan menggunakan gerbang OR (OR gate). Secara logika Boolean, hubungan tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$Q = P_1 \vee P_2 \vee \dots \vee P_n$$

yang berarti bahwa suatu intermediate event akan terjadi apabila minimal satu parent mengalami kegagalan.

Karena hubungan yang digunakan adalah OR deterministik, maka penyusunan Conditional Probability Table pada intermediate event mengikuti aturan Kolmogorov sebagai berikut.

Table 4. 9 Aturan Conditional Probability Table Intermediate Event,

Sumber:Penulis. 2026

Kondisi Parent	Status Intermediate Event
Seluruh Parent = Normal	Normal
Minimal satu parent = Failure	Failure

Sebagai ilustrasi, salah satu intermediate event pada model penelitian ini adalah Hydraulic Oil Filter yang dipengaruhi oleh dua basic event yaitu BE₁₉ dan BE₂₀. Struktur hubungan kegagalan tersebut dapat dinyatakan sebagai:

- Hydraulic Oil Filter = BE₁₉ OR BE₂₀

Berdasarkan hubungan tersebut, maka Conditional Probability Table yang terbentuk adalah sebagai berikut.

Table 4. 10 Conditional Probability Table Intemerdiat Event, Sumber:

Penulis. 2026

BE ₁₉	BE ₂₀	Hydraulic Oil Filter	Hydraulic Oil
------------------	------------------	----------------------	---------------

		(Failure)	Filter (Failure)
Normal	Normal	0	1
Normal	Failure	1	0
Failure	Normal	1	0
Failure	Failure	1	0

Tabel tersebut menunjukkan bahwa intermediate event hanya berada pada kondisi Normal apabila seluruh parent berada pada kondisi normal. Apabila salah satu atau lebih parent berada pada kondisi Failure, maka intermediate event dinyatakan gagal.

Jumlah kombinasi kondisi dalam CPT ditentukan oleh jumlah parent yang dimiliki suatu node. Jika suatu node memiliki k parent dan masing-masing memiliki dua state, maka jumlah kombinasi kondisi dalam CPT adalah:

$$2^k$$

Sebagai contoh:

- 2 parent menghasilkan $2^2 = 4$ kombinasi
- 3 parent menghasilkan $2^3 = 8$ kombinasi
- 4 parent menghasilkan $2^4 = 16$ kombinasi

Meskipun jumlah kombinasi meningkat seiring bertambahnya parent, pola CPT tetap konsisten karena hanya satu kombinasi yang menghasilkan kondisi Normal, sedangkan seluruh kombinasi lainnya menghasilkan kondisi Failure.

Dengan demikian, CPT pada intermediate event dalam penelitian ini disusun berdasarkan struktur logika kegagalan yang diperoleh dari Fault Tree Analysis, sementara probabilitas kegagalan intermediate event akan dihitung secara otomatis melalui proses inferensi pada model Bayesian Network.

3. *Conditional Probability Table Top Event*

Top Event dalam penelitian ini merepresentasikan kegagalan sistem Controllable Pitch Propeller secara keseluruhan. Dalam model Bayesian Network, Top Event dinyatakan sebagai node CPP Failure yang dipengaruhi oleh beberapa intermediate event sebagai parent node.

Pada tahap Fault Tree Analysis, top event digunakan untuk menggambarkan kejadian kegagalan sistem yang berada pada tingkat paling atas dari struktur fault tree. Dalam penelitian ini, tahap FTA digunakan untuk mengidentifikasi struktur hubungan logika antar komponen dan subsistem yang dapat menyebabkan kegagalan sistem CPP. Oleh karena itu, pada tahap FTA tidak dilakukan perhitungan probabilitas untuk top event.

Dalam pemodelan Bayesian Network, probabilitas kegagalan sistem tidak dimasukkan secara langsung sebagai nilai numerik pada node top event. Sebaliknya, probabilitas tersebut diperoleh melalui proses inferensi Bayesian berdasarkan probabilitas prior pada masing-masing basic event serta struktur hubungan antar node yang direpresentasikan dalam bentuk Conditional Probability Table.

Hubungan antara Top Event dengan node parent dalam penelitian ini mengikuti struktur logika yang diperoleh dari Fault Tree Analysis, yaitu menggunakan gerbang OR (OR gate). Secara logika Boolean hubungan tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$CPP\ Failure = IE1 \vee IE2 \vee IE3$$

yang berarti bahwa kegagalan sistem CPP terjadi apabila minimal satu subsistem mengalami kegagalan.

Karena hubungan yang digunakan adalah OR deterministik, maka penyusunan Conditional Probability Table pada Top Event mengikuti aturan bahwa Top Event berada pada kondisi Failure apabila minimal satu parent berada pada kondisi Failure, dan berada pada kondisi Normal hanya apabila seluruh parent berada pada kondisi Normal.

Apabila node Top Event memiliki tiga parent dan masing-masing memiliki dua state: Normal dan Failure, maka jumlah kombinasi kondisi yang terbentuk adalah:

$$2^3 = 8$$

CPT untuk node CPP Failure dapat ditunjukkan pada tabel berikut.

Table 4. 11 Conditional Probability Table Top Event, Sumber: Penulis. 2026

IE ₁	IE ₂	IE ₃	CPP Failure	CPP Normal
Normal	Normal	Normal	0	1
Normal	Normal	Failure	1	0
Normal	Failure	Normal	1	0
Normal	Failure	Failure	1	0
Failure	Normal	Normal	1	0
Failure	Normal	Failure	1	0
Failure	Failure	Normal	1	0
Failure	Failure	failure	1	0

Tabel tersebut menunjukkan bahwa sistem CPP hanya berada pada kondisi Normal apabila seluruh subsistem berada dalam kondisi normal. Apabila salah satu atau lebih subsistem mengalami kegagalan, maka sistem secara keseluruhan dinyatakan mengalami kegagalan.

Dengan demikian, Conditional Probability Table pada node Top Event disusun berdasarkan struktur logika kegagalan yang diperoleh dari Fault Tree Analysis, sedangkan probabilitas kegagalan sistem secara keseluruhan dihitung melalui proses inferensi pada model Bayesian Network berdasarkan probabilitas prior pada masing-masing basic event.

4.5.3 Pembangunan Model Bayesian Network

Pembangunan model *Bayesian Network* pada penelitian ini dilakukan berdasarkan struktur hubungan kegagalan yang diperoleh dari tahap *Fault Tree Analysis*. Struktur *fault tree* tersebut kemudian ditransformasikan ke dalam bentuk *Directed Acyclic Graph* yang merepresentasikan hubungan sebab-akibat antar komponen pada sistem *Controllable Pitch Propeller*. Dalam model

ini, setiap *node* merepresentasikan komponen atau subsistem, sedangkan arah panah menunjukkan hubungan ketergantungan yang memengaruhi terjadinya kegagalan sistem.

Proses pemodelan BN dilakukan menggunakan perangkat lunak GeNIe Academic 5.0, yang mendukung pembangunan struktur graf serta pengisian *Conditional Probability Table* secara sistematis. Penggunaan perangkat lunak ini memungkinkan proses inferensi probabilistik dilakukan secara akurat dan efisien.

Model BN yang dibangun terdiri atas tiga jenis *node*, yaitu *basic event*, *intermediate event*, dan *top event*. *Basic event* merepresentasikan penyebab dasar kegagalan komponen. *Intermediate event* merepresentasikan kegagalan subsistem yang dipengaruhi oleh beberapa komponen. Sementara itu, *top event* merepresentasikan kegagalan sistem CPP secara keseluruhan. Hubungan antar *node* mengikuti struktur logika kegagalan yang diperoleh dari FTA sehingga hubungan kausal antar komponen dapat direpresentasikan secara sistematis dalam model probabilistik.

Dalam model yang dibangun, *node* CPP Failure berperan sebagai *top event* yang merepresentasikan kegagalan sistem *Controllable Pitch Propeller* secara keseluruhan. *Node* ini dipengaruhi oleh beberapa komponen utama, yaitu *Pitch Actuator*, *Servo Valve*, dan *Pitch Controller*, yang berperan dalam pengaturan sudut *pitch* propeller serta sistem kontrol hidrolik. Kegagalan pada salah satu subsistem tersebut dapat menyebabkan kegagalan sistem CPP secara keseluruhan.

Subsistem *Pitch Actuator* merupakan komponen utama yang berfungsi mengatur perubahan sudut *pitch* pada baling-baling kapal. Subsistem ini dipengaruhi oleh beberapa komponen, antara lain *Hydraulic Control Valve*, *Hydraulic Accumulator*, *Servo Hydraulic System*, serta beberapa *basic event* yang merepresentasikan kegagalan komponen pada sistem aktuator. Kegagalan pada salah satu komponen tersebut dapat menyebabkan sistem aktuator tidak mampu mengubah sudut *pitch* secara normal.

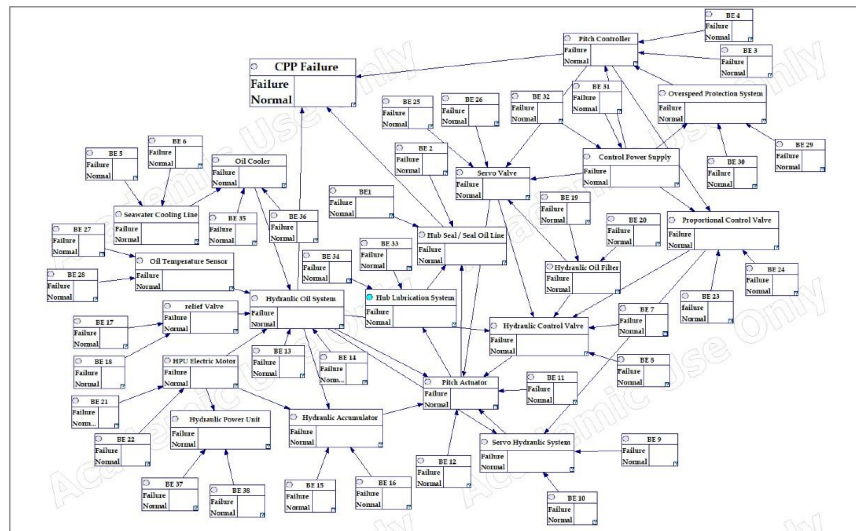
Selain itu, subsistem *Hydraulic Oil System* berperan dalam menyediakan tekanan hidrolik yang dibutuhkan oleh sistem penggerak *pitch*. Subsistem ini dipengaruhi oleh beberapa komponen, seperti *Oil Cooler*, *Relief Valve*, *Oil Temperature Sensor*, dan *HPU Electric Motor*. Komponen-komponen tersebut bekerja secara terintegrasi untuk menjaga kestabilan tekanan dan temperatur fluida hidrolik. Apabila salah satu komponen mengalami kegagalan, performa sistem hidrolik dapat menurun dan berpotensi menyebabkan gangguan pada sistem pengaturan *pitch*.

Pada bagian sistem kontrol, *node* *Pitch Controller* berfungsi mengatur perintah perubahan sudut *pitch* berdasarkan kondisi operasi kapal. *Node* ini dipengaruhi oleh beberapa komponen, seperti *Control Power Supply*, *Overspeed Protection System*, serta beberapa *basic event* yang merepresentasikan kegagalan pada perangkat kontrol. Kegagalan pada sistem kontrol dapat menyebabkan sistem pengaturan *pitch* tidak bekerja sesuai dengan kondisi operasi yang diinginkan.

Model *Bayesian Network* yang dibangun dalam penelitian ini terdiri atas 38 *basic event*, beberapa *intermediate event* yang merepresentasikan subsistem utama, serta satu *top event*, yaitu CPP Failure. Struktur hubungan antar *node* membentuk graf berarah tanpa siklus yang memungkinkan dilakukannya proses inferensi probabilistik untuk menghitung probabilitas

kegagalan sistem berdasarkan probabilitas kegagalan masing-masing komponen.

Gambar 4.5 menunjukkan struktur *Bayesian Network* yang merepresentasikan hubungan ketergantungan antar komponen pada sistem *Controllable Pitch Propeller*.



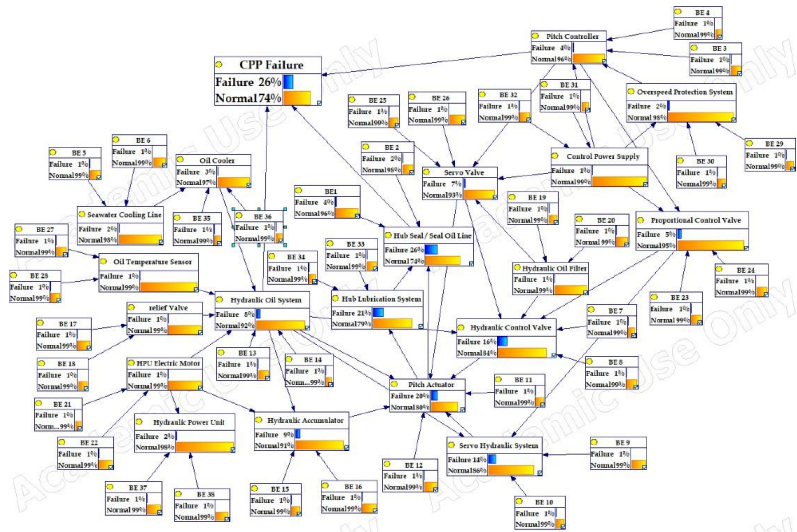
Gambar 4. 5 Model Bayesian Network Sistem CPP, Sumber: Penulis. 2026

Melalui model ini, probabilitas kegagalan sistem dapat dihitung dengan mempertimbangkan pengaruh setiap komponen terhadap subsistem dan sistem secara keseluruhan. Pendekatan ini memungkinkan analisis keandalan sistem dilakukan secara lebih komprehensif karena mampu merepresentasikan hubungan ketergantungan antar komponen yang tidak dapat dianalisis secara langsung menggunakan metode FTA saja.

4.5.4 Analisis Probabilitas Kegagalan Sistem dan Subsistem Controllable Pitch Propeller

Analisis probabilitas kegagalan sistem dilakukan menggunakan model *Bayesian Network* yang dibangun berdasarkan struktur hubungan kegagalan antar komponen pada sistem *Controllable Pitch Propeller*. Model BN memungkinkan evaluasi probabilitas kegagalan sistem secara lebih komprehensif karena mampu merepresentasikan hubungan sebab-akibat antar komponen serta mekanisme propagasi kegagalan dari tingkat komponen hingga ke tingkat sistem.

Dalam model yang dibangun, setiap *basic event* merepresentasikan penyebab dasar kegagalan komponen, sedangkan *intermediate event* merepresentasikan kegagalan subsistem yang terbentuk dari kombinasi beberapa komponen. Selanjutnya, *node* CPP Failure berfungsi sebagai *top event* yang menggambarkan kegagalan sistem CPP secara keseluruhan. Probabilitas pada setiap *node* diperoleh melalui proses inferensi Bayesian yang menggabungkan probabilitas awal pada *basic event* dengan struktur hubungan kausal antar *node* dalam jaringan.



Gambar 4. 6 Analisis Probabilitas Sistem Controllable Pitch Propeller, Sumber: Penulis. 2026

Gambar 4.6 merepresentasikan hubungan ketergantungan antar komponen dalam sistem CPP dalam bentuk graf berarah tanpa siklus DAG. Setiap *node* dalam model memiliki dua kondisi, yaitu *Failure* dan *Normal*, yang masing-masing menunjukkan kondisi kegagalan dan kondisi operasional normal dari komponen maupun subsistem. Representasi ini memungkinkan analisis probabilistik dilakukan secara biner sehingga memudahkan evaluasi kontribusi setiap komponen terhadap kegagalan sistem secara keseluruhan.

1. Probabilitas Kegagalan Sistem dan Komponen CPP

Berdasarkan hasil inferensi pada model *Bayesian Network* yang diimplementasikan menggunakan perangkat lunak GeNIe Academic 5.0, diperoleh probabilitas kegagalan sistem *Controllable Pitch Propeller* sebesar 0,26 (26%), sedangkan probabilitas sistem berada dalam kondisi normal sebesar 0,74 (74%). Nilai probabilitas tersebut merepresentasikan tingkat risiko kegagalan sistem yang dihasilkan dari kombinasi kegagalan berbagai komponen dan subsistem dalam sistem CPP.

Table 4. 12 Probabilitas Kegagalan Sistem CPP, Sumber: Penulis. 2026

No	Sistem	Failure (Desimal)	Failure (%)
1	CPP Failure	0.26	26 %

Nilai probabilitas tersebut menunjukkan bahwa sistem CPP masih memiliki potensi kegagalan yang cukup signifikan. Probabilitas kegagalan sebesar 0,26 atau 26% mengindikasikan bahwa risiko kegagalan sistem tetap perlu diperhatikan, terutama karena kegagalan dapat dipicu oleh interaksi antar komponen dan subsistem dalam sistem.

Selain probabilitas kegagalan sistem secara keseluruhan, model *Bayesian Network* juga memberikan informasi mengenai probabilitas kegagalan pada setiap subsistem yang membentuk sistem CPP. Analisis ini

bertujuan untuk mengidentifikasi komponen pada subsistem yang memiliki kontribusi terbesar terhadap kegagalan sistem, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam penentuan prioritas perawatan serta strategi mitigasi risiko kegagalan.

Table 4. 13 Probabilitas Kegagalan Komponen CPP, Sumber: Penulis. 2026

No	Primary Komponen	Failure (Desimal)	Failure (%)
1	Hub Seal	0.26	26%
2	Hub Lubrication System	0.21	21%
3	Pitch Actuator	0.20	20%
4	Hydraulic Control Valve	0.16	16%
5	Servo Hydraulic System	0.14	14%
6	Hydraulic Oil System	0.08	8%
7	Servo Valve	0.06	6%
8	Proportional Control Valve	0.05	5%
9	Pitch Controller	0.04	4%
10	Oil Cooler	0.03	3%
11	Overspeed Protection System	0.02	2%
12	Seawater Cooling Line	0.02	2%
13	Hydraulic Power Unit	0.02	2%
14	Control Power Supply	0.01	1%
15	Oil temperatur Sensor	0.01	1%
16	Relief Valve	0.01	1%
17	HPU Electric Motor	0.01	1%
18	Hydraulic Accumulator	0.09	9%
19	Hydraulic Oil Filter	0.01	1%

Berdasarkan tabel probabilitas kegagalan komponen pada sistem *Controllable Pitch Propeller*, terlihat bahwa setiap komponen memiliki nilai probabilitas kegagalan yang berbeda-beda, yang mencerminkan tingkat kontribusi masing-masing terhadap potensi kegagalan sistem secara keseluruhan. Nilai probabilitas ini diperoleh melalui hasil inferensi pada model *Bayesian Network* yang merepresentasikan hubungan kausal antar komponen dalam sistem.

Hasil analisis menunjukkan bahwa komponen dengan probabilitas kegagalan tertinggi adalah Hub Seal sebesar 0,26 (26%), diikuti oleh Hub Lubrication System sebesar 0,21 (21%), dan Pitch Actuator sebesar 0,20 (20%). Nilai tersebut mengindikasikan bahwa ketiga komponen memiliki tingkat kerentanan yang relatif tinggi dalam sistem CPP, terutama karena berperan langsung dalam mekanisme mekanis dan sistem pelumasan pada *hub propeller*.

Selanjutnya, komponen seperti Hydraulic Control Valve sebesar 0,16 (16%), Servo Hydraulic System sebesar 0,14 (14%), serta Hydraulic Accumulator sebesar 0,09 (9%) juga menunjukkan probabilitas kegagalan yang signifikan. Komponen-komponen ini merupakan bagian dari sistem hidrolis yang berfungsi dalam transmisi serta pengaturan tekanan fluida,

sehingga kegagalan pada subsistem ini dapat berdampak langsung terhadap kinerja aktuasi *pitch*.

Komponen dengan tingkat kegagalan menengah meliputi Hydraulic Oil System sebesar 0,08 (8%), Servo Valve sebesar 0,06 (6%), dan Proportional Control Valve sebesar 0,05 (5%). Meskipun kontribusinya tidak sebesar komponen utama, kegagalan pada komponen tersebut tetap berpotensi mengganggu stabilitas sistem kontrol hidrolis.

Sementara itu, beberapa komponen lain seperti Pitch Controller (0,04), Oil Cooler (0,03), serta Overspeed Protection System, Seawater Cooling Line, dan Hydraulic Power Unit masing-masing memiliki probabilitas kegagalan sebesar 0,02 (2%). Adapun komponen dengan probabilitas kegagalan terendah, yaitu Control Power Supply, Oil Temperature Sensor, Relief Valve, HPU Electric Motor, dan Hydraulic Oil Filter, memiliki nilai sebesar 0,01 (1%), yang menunjukkan kontribusi kegagalan relatif kecil dalam model.

Secara keseluruhan, distribusi probabilitas ini menunjukkan bahwa kegagalan sistem CPP didominasi oleh komponen pada subsistem mekanis (*hub*) dan hidrolis, yang memiliki nilai probabilitas kegagalan lebih tinggi dibandingkan dengan komponen pada sistem kontrol dan komponen pendukung. Temuan ini menegaskan bahwa interaksi antar komponen pada subsistem utama memiliki peran dominan dalam membentuk risiko kegagalan sistem secara keseluruhan.

Meskipun analisis pada tingkat komponen telah memberikan gambaran kontribusi masing-masing komponen terhadap kegagalan sistem CPP, pendekatan tersebut belum sepenuhnya menggambarkan akar penyebab kegagalan. Oleh karena itu, analisis dilanjutkan pada tingkat kejadian dasar (*basic event*) yang merupakan elemen fundamental dalam *Fault Tree Analysis*. Probabilitas kegagalan pada *basic event* dihitung untuk mengidentifikasi sumber kegagalan secara lebih spesifik, sekaligus sebagai input utama dalam penyusunan model *Bayesian Network*.

Table 4. 14 Probabilitas Kegagalan Basic Event, Sumber Penulis. 2026

No	Basic Event	Failure (Desimal)	Failure (%)
1	Shaft seal wear / leakage	0.0402	4%
2	Seal oil pipe leakage	0.0248	2%
3	Pitch controller malfunction	0.0062	1%
4	Control signal failure	0.0124	1%
5	Seawater strainer blockage	0.0093	1%
6	Cooling pipeline obstruction	0.0093	1%
7	Hydraulic control valve failure	0.0062	1%
8	Control valve malfunction	0.0093	1%
9	Hydraulic internal leakage	0.0062	1%
10	Servo pump pressure loss	0.0093	1%
11	Pitch actuator jam	0.0093	1%
12	Pitch Actuator malfunction	0.0093	1%
13	Cooling system inefficiency	0.0062	1%
14	Hydraulic oil degradation	0.0062	1%
15	Nitrogen gas leakage	0.0062	1%
16	Accumulator bladder damage	0.0062	1%

17	Relief valve spring fatigue	0.0062	1%
18	Valve contamination	0.0062	1%
19	Filter clogging	0.0062	1%
20	Filter bypass valve malfunction	0.0062	1%
21	Motor overload	0.0062	1%
22	Motor bearing wear	0.0062	1%
23	Valve coil overheating	0.0062	1%
24	Electrical control malfunction	0.0062	1%
25	Valve spool contamination	0.0062	1%
26	Valve internal wear	0.0062	1%
27	Oil cooler fouling	0.0062	1%
28	Hydraulic oil overheating	0.0062	1%
29	Governor malfunction	0.0062	1%
30	Speed sensor error	0.0062	1%
31	Power supply interruption	0.0062	1%
32	Control circuit failure	0.0062	1%
33	Lubrication pump failure	0.0062	1%
34	Hub oil leakage	0.0062	1%
35	Heat exchanger fouling	0.0062	1%
36	Cooling water flow reduction	0.0062	1%
37	Hydraulic pump instability	0.0062	1%
38	Pressure regulator malfunction	0.0062	1%

Berdasarkan hasil inferensi pada model *Bayesian Network*, diperoleh probabilitas kegagalan pada tingkat *basic event* sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.15. Nilai probabilitas ini mencerminkan peluang terjadinya masing-masing kejadian dasar dengan mempertimbangkan struktur ketergantungan antar variabel dalam jaringan.

Hasil inferensi menunjukkan bahwa *basic event* dengan probabilitas kegagalan tertinggi adalah shaft seal wear/leakage sebesar 0,0402 (4%), diikuti oleh seal oil pipe leakage sebesar 0,0248 (2%). Tingginya probabilitas pada kedua kejadian tersebut mengindikasikan bahwa potensi kegagalan pada sistem sealing dan kebocoran fluida memiliki kontribusi signifikan terhadap risiko kegagalan sistem CPP.

Selanjutnya, beberapa *basic event* seperti seawater strainer blockage, cooling pipeline obstruction, control valve malfunction, servo pump pressure loss, serta pitch actuator jam dan pitch actuator malfunction masing-masing memiliki probabilitas kegagalan sebesar 0,0093 (1%). Kejadian-kejadian ini umumnya berkaitan dengan gangguan pada sistem pendingin, sistem hidrolik, serta mekanisme aktuasi pitch yang berperan penting dalam menjaga kinerja sistem propulsi.

Sementara itu, sebagian besar *basic event* lainnya memiliki probabilitas kegagalan sebesar 0,0062 (1%), yang menunjukkan kontribusi kegagalan yang relatif kecil secara individual. Namun demikian, kejadian-kejadian tersebut tetap perlu diperhatikan karena secara kolektif dapat meningkatkan risiko kegagalan sistem, terutama dalam kondisi operasi yang kompleks dan saling bergantung.

Secara keseluruhan, hasil inferensi ini menunjukkan bahwa kegagalan sistem CPP merupakan hasil dari interaksi berbagai kejadian dasar yang saling terhubung dalam model *Bayesian Network*. Oleh karena

itu, analisis pada tingkat *basic event* menjadi penting untuk mengidentifikasi sumber risiko secara lebih spesifik serta mendukung evaluasi keandalan sistem secara menyeluruh. Nilai probabilitas ini juga menjadi dasar dalam analisis sensitivitas dan identifikasi *critical Components* dalam sistem CPP.

2. Perhitungan Nilai Realibility

Setelah melakukan perhitungan probabilitas kerusakan, tahap selanjutnya adalah melakukan perhitungan nilai keandalan komponen. Hasil dari perhitungan probabilitas kerusakan tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan nilai keandalan (*reliability*) masing-masing komponen. Hal ini sejalan dengan konsep keandalan yang menyatakan bahwa keandalan merupakan probabilitas suatu sistem atau komponen dapat berfungsi tanpa mengalami kegagalan dalam interval waktu tertentu.

Secara matematis, hubungan antara probabilitas kegagalan dan keandalan dinyatakan melalui fungsi keandalan $R(t)$, yaitu:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

Artinya:

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

Dengan demikian, nilai keandalan diperoleh dari peluang bahwa komponen tidak mengalami kegagalan selama periode operasi yang ditinjau.

Berdasarkan hubungan tersebut, hasil perhitungan probabilitas kegagalan yang telah diperoleh sebelumnya dapat langsung digunakan untuk menghitung nilai keandalan setiap komponen. Nilai keandalan ini selanjutnya menjadi dasar dalam analisis performa sistem serta penentuan strategi perawatan yang optimal. Berikut adalah contoh perhitungan nilai keandalan komponen.

$$R(\text{Hub Seal}) = 1 - P(\text{Hub Seal}) = 1 - 0.26 = 0.74 = 74\%$$

Berdasarkan perhitungan tersebut dapat diketahui bahwa nilai keandalan komponen Hub Seal adalah sebesar 74%.

Berikut adalah perhitungan nilai keandalan untuk semua komponen:

$$\begin{aligned}
 R(\text{Hub Seal}) &= 1 - P(\text{Hub Seal}) = 1 - 0.26 = 0.74 = 74\% \\
 R(\text{Hub Lubrication System}) &= 1 - P(\text{Hub Lubrication System}) = 1 - 0.21 = 0.79 = 79\% \\
 R(\text{Pitch Actuator}) &= 1 - P(\text{Pitch Actuator}) = 1 - 0.20 = 0.80 = 80\% \\
 R(\text{Hydraulic Control Valve}) &= 1 - P(\text{Hydraulic Control Valve}) = 1 - 0.16 = 0.84 = 84\% \\
 R(\text{Servo Hydraulic System}) &= 1 - P(\text{Servo Hydraulic System}) = 1 - 0.14 = 0.86 = 86\% \\
 R(\text{Hydraulic Oil System}) &= 1 - P(\text{Hydraulic Oil System}) = 1 - 0.08 = 0.92 = 92\% \\
 R(\text{Servo Valve}) &= 1 - P(\text{Servo Valve}) = 1 - 0.06 = 0.94 = 94\% \\
 R(\text{Proportional Control Valve}) &= 1 - P(\text{Proportional Control Valve}) = 1 - 0.05 = 0.95 = 95\%
 \end{aligned}$$

R(Pitch Controller)	=1 - P (Pitch Controller)	= 1 - 0.04 = 0.96 = 96%
R(Oil Cooler)	=1 - P (Oil Cooler)	= 1 - 0.03 = 0.97 = 97%
R(Overspeed Protection System)	=1 - P (Overspeed Protection Sys)	= 1 - 0.02 = 0.98 = 98%
R(Seawater Cooling Line)	=1 - P (Seawater Cooling Line)	= 1 - 0.02 = 0.98 = 98%
R(Hydraulic Power Unit)	=1 - P (Hydraulic Power Unit)	= 1 - 0.02 = 0.98 = 98%
R(Control Power Supply)	=1 - P (Control Power Supply)	= 1 - 0.01 = 0.99 = 99%
R(Oil Temperature Sensor)	=1 - P (Oil Temperature Sensor)	= 1 - 0.01 = 0.99 = 99%
R(Relief Valve)	=1 - P (Relief Valve)	= 1 - 0.01 = 0.99 = 99%
R(HPU Electric Motor)	=1 - P (HPU Electric Motor)	= 1 - 0.01 = 0.99 = 99%
R(Hydraulic Accumulator)	=1 - P (Hydraulic Accumulator)	= 1 - 0.09 = 0.91 = 91%
R(Hydraulic Oil Filter)	=1 - P (Hydraulic Oil Filter)	= 1 - 0.01 = 0.99 = 99%

Berikut adalah perhitungan nilai keandalan untuk sistem Controllable Pitch Propeller:

$$R(\text{Controllable Pitch Propeller}) = 1 - P(\text{Controllable Pitch Propeller}) = 1 - 0.26 = 0.74 = 74\%$$

Nilai keandalan sistem *Controllable Pitch Propeller* sebesar 0,74 (74%) menunjukkan bahwa sistem memiliki probabilitas beroperasi dalam kondisi normal sebesar 74%, dengan probabilitas kegagalan sebesar 26%. Nilai tersebut merupakan hasil propagasi kegagalan dari seluruh komponen yang saling terhubung dalam model *Bayesian Network*, sehingga merepresentasikan keandalan sistem secara keseluruhan.

Analisis pada tingkat komponen menunjukkan bahwa keandalan sistem dipengaruhi oleh 19 komponen utama yang membentuk sistem CPP. Komponen dengan nilai keandalan terendah adalah Hub Seal sebesar 0,74 (74%), diikuti oleh Hub Lubrication System sebesar 0,79 (79%) dan Pitch Actuator sebesar 0,80 (80%). Nilai keandalan yang rendah pada komponen tersebut menunjukkan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan probabilitas kegagalan sistem.

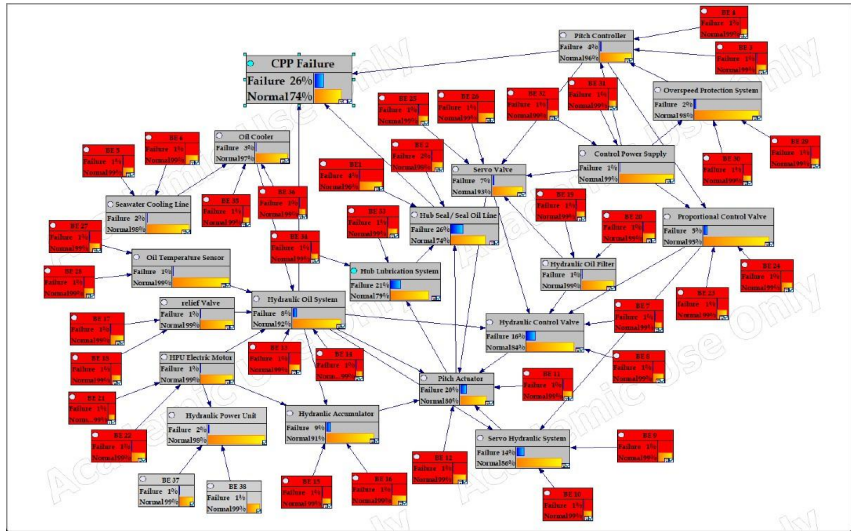
Komponen Hydraulic Control Valve (0,84) dan Servo Hydraulic System (0,86) juga menunjukkan tingkat keandalan yang relatif lebih rendah dibandingkan komponen lainnya. Komponen tersebut berada pada subsistem hidrolis yang berperan dalam pengaturan tekanan dan aliran fluida, sehingga memiliki pengaruh langsung terhadap kinerja sistem pengaturan *pitch*.

Sebagian besar komponen lainnya memiliki nilai keandalan di atas 0,90, yang menunjukkan kontribusi kegagalan yang relatif kecil terhadap sistem. Interaksi antar komponen tetap berpotensi mempengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan.

Hasil ini menunjukkan bahwa keandalan sistem CPP didominasi oleh kinerja komponen pada subsistem mekanis dan hidrolis. Komponen dengan nilai keandalan rendah menjadi faktor utama yang menentukan tingkat keandalan sistem. Komponen tersebut perlu diprioritaskan dalam strategi pemeliharaan untuk meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan.

4.5.5 Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengidentifikasi komponen yang memiliki pengaruh paling signifikan terhadap kegagalan sistem *Controllable Pitch Propeller*. Pada penelitian ini, node CPP Failure ditetapkan sebagai *target node*, sehingga analisis difokuskan pada pengaruh perubahan kondisi setiap *basic event* terhadap probabilitas kegagalan sistem secara keseluruhan melalui proses inferensi pada model *Bayesian Network*.



Gambar 4. 7 Hasil Analisis Sensitivitas terhadap Node CPP Failure, Sumber: Penulis. 2026

Node berwarna merah pada gambar 4.7 merepresentasikan *basic event* yang diuji dalam skenario kegagalan, di mana setiap *basic event* diberikan nilai probabilitas awal sebesar 0,01 (1%). Kondisi ini digunakan untuk mengevaluasi bagaimana perubahan pada kejadian dasar mempengaruhi node target melalui mekanisme propagasi dalam jaringan.

Meskipun seluruh node berwarna merah berada pada tingkat *basic event*, hasil analisis sensitivitas tidak diinterpretasikan secara langsung pada level tersebut. Hal ini dikarenakan dalam struktur *Bayesian Network*, pengaruh dari *basic event* terlebih dahulu teragregasi pada node komponen utama (*intermediate node*) sebelum mempengaruhi node CPP Failure. Oleh karena itu, pembahasan sensitivitas difokuskan pada 19 komponen utama yang merepresentasikan subsistem dalam model CPP.

Hasil analisis menunjukkan bahwa perubahan kondisi pada *basic event* memberikan pengaruh signifikan terhadap beberapa komponen utama, khususnya Hub Seal / Seal Oil Line, Hub Lubrication System, Pitch Actuator, dan Hydraulic Control Valve. Komponen-komponen ini kemudian berkontribusi secara langsung terhadap peningkatan probabilitas kegagalan pada node CPP Failure melalui hubungan kausal dalam struktur jaringan.

Berdasarkan hasil inferensi, probabilitas kegagalan sistem (CPP Failure) diperoleh sebesar 0,26 (26%). Nilai ini merupakan hasil propagasi kegagalan dari berbagai *basic event* yang saling terhubung dan terakumulasi pada komponen utama dalam sistem. Temuan ini menegaskan bahwa kegagalan

sistem CPP bersifat multi-komponen, di mana tidak terdapat satu penyebab tunggal yang dominan, melainkan hasil interaksi antar komponen dalam sistem.

Selain itu, analisis sensitivitas menunjukkan bahwa komponen pada subsistem mekanis (hub) dan hidrolik memiliki tingkat pengaruh yang lebih tinggi dibandingkan komponen pada sistem kontrol dan pendukung. Komponen seperti Hub Seal, Hub Lubrication System, dan Pitch Actuator menunjukkan tingkat sensitivitas yang tinggi karena berperan langsung dalam mekanisme perubahan sudut *pitch* serta transmisi gaya pada propeller.

Dalam perspektif *reliability engineering*, hasil ini menunjukkan bahwa keandalan sistem CPP sangat bergantung pada kinerja sistem pelumasan hub dan sistem aktuator hidrolik. Gangguan pada komponen-komponen tersebut dapat menyebabkan degradasi fungsi pengaturan *pitch*, yang pada akhirnya meningkatkan probabilitas kegagalan sistem secara keseluruhan.

Dengan demikian, meskipun analisis sensitivitas dilakukan pada tingkat *basic event*, interpretasi hasil menunjukkan bahwa komponen utama (intermediate node) merupakan elemen kunci dalam menentukan kegagalan sistem. Oleh karena itu, komponen-komponen dengan tingkat sensitivitas tinggi dapat dikategorikan sebagai komponen kritis dan perlu diprioritaskan dalam kegiatan pemeliharaan preventif, inspeksi berkala, serta strategi *risk-based maintenance*.

Secara keseluruhan, analisis sensitivitas berbasis *Bayesian Network* memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai mekanisme propagasi kegagalan dari *basic event* menuju kegagalan sistem, serta menegaskan peran dominan komponen utama dalam membentuk risiko kegagalan sistem CPP.

4.5.6 Identifikasi Komponen Kritis

Identifikasi komponen kritis dilakukan untuk menentukan komponen yang memiliki kontribusi paling signifikan terhadap kegagalan sistem *Controllable Pitch Propeller*. Pada penelitian ini, identifikasi dilakukan berdasarkan hasil analisis sensitivitas dan hasil inferensi pada model *Bayesian Network*, dengan node CPP Failure sebagai *target node*. Pendekatan ini memungkinkan penentuan komponen yang paling berpengaruh terhadap perubahan probabilitas kegagalan sistem secara keseluruhan.

Berdasarkan hasil inferensi, diperoleh probabilitas kegagalan pada masing-masing komponen utama yang membentuk sistem CPP. Komponen-komponen tersebut kemudian diurutkan berdasarkan nilai probabilitas kegagalannya untuk merepresentasikan tingkat sensitivitas terhadap node CPP Failure. Hasil pengurutan tersebut ditunjukkan pada table berikut.

Table 4. 15 Ranking Komponen Kritis terhadap CPP Failure, Sumber: Penulis. 2026

Ranking	Komponen	Probabilitas Failure	Probabilitas Normal
1	Hub Seal	0.26	0.74
2	Hub Lubrication System	0.21	0.79
3	Pitch Actuator	0.20	0.80
4	Hydraulic Control valve	0.16	0.84

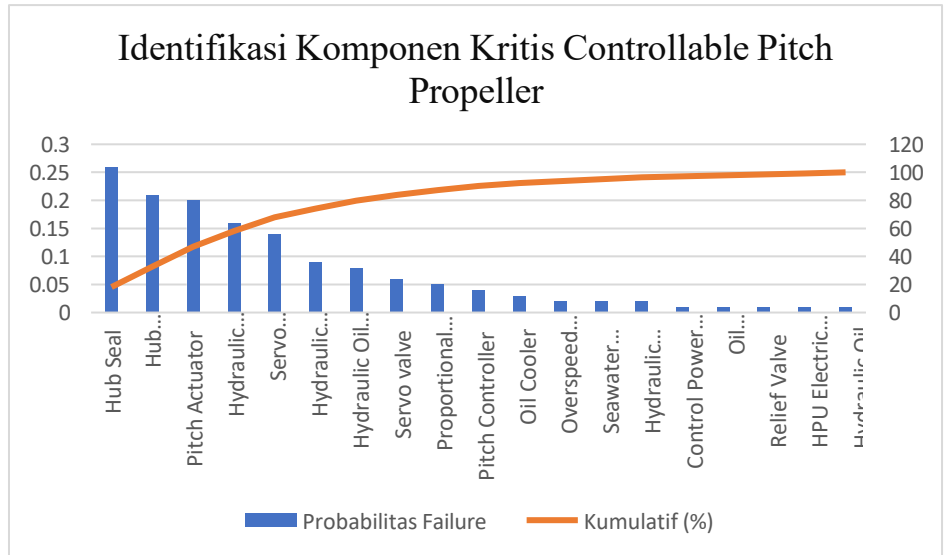
5	Servo Hydraulic System	0.14	0.86
6	Hydraulic Accumulator	0.09	0.91
7	Hydraulic Oil System	0.08	0.92
8	Servo valve	0.06	0.93
9	Proportional Control valve	0.05	0.95
10	Pitch Controller	0.04	0.96
11	Oil Cooler	0.03	0.97
12	Overspeed Protection System	0.02	0.98
13	Seawater Cooling Line	0.02	0.98
14	Hydraulic Power Unit	0.02	0.98
15	Control Power Supply	0.01	0.99
16	Oil Temperatur Sensor	0.01	0.99
17	Relief Valve	0.01	0.99
18	HPU Electric Motor	0.01	0.99
19	Hydraulic Oil Filter	0.01	0.99

Berdasarkan tabel 4.15, terlihat bahwa distribusi probabilitas kegagalan tidak merata pada seluruh komponen, melainkan terkonsentrasi pada beberapa komponen utama. Komponen dengan probabilitas kegagalan tertinggi adalah Hub Seal sebesar 0,26, diikuti oleh Hub Lubrication System sebesar 0,21 dan Pitch Actuator sebesar 0,20. Nilai ini menunjukkan bahwa ketiga komponen tersebut memiliki tingkat sensitivitas paling tinggi terhadap kegagalan sistem CPP.

Komponen Hydraulic Control Valve (0,16) dan Servo Hydraulic System (0,14) juga menunjukkan kontribusi yang signifikan. Secara fungsional, komponen-komponen ini berperan dalam pengaturan tekanan dan aliran fluida hidrolik yang secara langsung mempengaruhi mekanisme aktuasi *pitch*. Oleh karena itu, gangguan pada subsistem ini dapat meningkatkan probabilitas kegagalan sistem secara signifikan.

Selanjutnya, komponen seperti Hydraulic Accumulator (0,09), Hydraulic Oil System (0,08), dan Servo Valve (0,06) berada pada tingkat sensitivitas menengah. Meskipun kontribusinya lebih rendah dibandingkan komponen utama, komponen-komponen ini tetap memiliki peran penting dalam menjaga stabilitas sistem hidrolik.

Untuk memperjelas distribusi kontribusi kegagalan, dilakukan analisis menggunakan diagram Pareto sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Diagram Pareto Komponen Kritis Sistem CPP, Sumber: Penulis. 2026

Berdasarkan gambar 4.8, dilakukan analisis menggunakan diagram Pareto untuk mengidentifikasi komponen yang memberikan kontribusi dominan terhadap kegagalan sistem *Controllable Pitch Propeller*. Diagram tersebut menampilkan hubungan antara probabilitas kegagalan masing-masing komponen dan persentase kumulatif kontribusinya terhadap total kegagalan sistem.

Analisis ini mengacu pada prinsip Pareto 80/20, yang menyatakan bahwa sekitar 80% dampak kegagalan sistem umumnya disebabkan oleh sekitar 20% penyebab utama. Dalam konteks ini, komponen yang berada hingga batas kumulatif $\pm 80\%$ dikategorikan sebagai komponen dengan pengaruh dominan terhadap kegagalan sistem.

	Standar yang Digunakan
Metode :	Pareto Analysis
Prinsip :	80/20 Rule (Pareto Principle)
Kriteria :	1. $\leq 80\%$ kumulatif \rightarrow Sangat Kritis 2. $> 80\%$ kumulatif \rightarrow Menengah

Hasil analisis menunjukkan bahwa komponen Hub Seal, Hub Lubrication System, Pitch Actuator, Hydraulic Control Valve, Servo Hydraulic System, Hydraulic Accumulator, Hydraulic Oil System, dan Servo Valve secara kumulatif telah mencapai lebih dari 80% kontribusi terhadap kegagalan sistem CPP. Dengan demikian, komponen-komponen tersebut dapat dikategorikan sebagai:

Komponen Sangat Kritis ($\leq 80\%$ kumulatif)

1. Hub Seal
2. Hub Lubrication System
3. Pitch Actuator
4. Hydraulic Control Valve
5. Servo Hydraulic System

6. Hydraulic Accumulator
7. Hydraulic Oil System
8. Servo Valve

Komponen pada kategori ini memiliki kontribusi paling signifikan terhadap kegagalan sistem, sehingga menjadi prioritas utama dalam strategi pemeliharaan dan pengendalian risiko.

Sementara itu, komponen yang berada setelah batas kumulatif 80% memiliki kontribusi yang relatif lebih kecil terhadap kegagalan sistem, namun tetap berperan dalam mendukung kinerja sistem secara keseluruhan. Komponen tersebut dikategorikan sebagai:

Komponen Menengah (> 80% kumulatif)

1. Proportional Control Valve
2. Pitch Controller
3. Oil Cooler
4. Overspeed Protection System
5. Seawater Cooling Line
6. Hydraulic Power Unit
7. Control Power Supply
8. Oil Temperature Sensor
9. Relief Valve
10. HPU Electric Motor
11. Hydraulic Oil Filter

Hasil diagram Pareto menunjukkan bahwa kegagalan sistem CPP tidak disebabkan secara merata oleh seluruh komponen, melainkan didominasi oleh sejumlah kecil komponen utama yang berada pada subsistem mekanis dan hidrolis. Komponen seperti Hub Seal dan Pitch Actuator menjadi faktor paling dominan karena berhubungan langsung dengan mekanisme perubahan *pitch* dan sistem pelumasan.

Temuan ini menegaskan bahwa pendekatan pemeliharaan berbasis risiko (*risk-based maintenance*) perlu difokuskan pada komponen dengan kategori sangat kritis, karena peningkatan keandalan pada komponen tersebut akan memberikan dampak paling signifikan terhadap peningkatan keandalan sistem CPP secara keseluruhan.

4.6 Strategi Perawatan Komponen Sistem Controllable Pitch Propeller

4.6.1 Dasar Penentuan Strategi

Penentuan strategi perawatan pada sistem *Controllable Pitch Propeller* dalam penelitian ini didasarkan pada integrasi hasil analisis *Bayesian Network* dan diagram Pareto sebagai dasar pengambilan keputusan pemeliharaan.

Dalam penelitian ini, metode Bayesian Network digunakan dengan memanfaatkan parameter probabilitas kegagalan untuk menilai tingkat risiko pada setiap komponen. Nilai probabilitas tersebut merepresentasikan kemungkinan terjadinya kegagalan, sehingga dapat digunakan untuk mengidentifikasi komponen yang memiliki tingkat kerentanan lebih tinggi terhadap kegagalan sistem CPP.

Selanjutnya, nilai probabilitas kegagalan tersebut dianalisis menggunakan prinsip Pareto 80/20 untuk menentukan komponen yang memiliki kontribusi dominan terhadap kegagalan sistem. Komponen yang berada dalam batas kumulatif 80% dikategorikan sebagai komponen kritis, karena memberikan pengaruh terbesar terhadap keandalan sistem.

Berdasarkan pendekatan tersebut, penentuan strategi perawatan dalam

penelitian ini mengacu pada dua aspek utama, yaitu:

1. Bayesian Network sebagai dasar dalam kuantifikasi risiko kegagalan melalui parameter probabilitas.
2. Diagram Pareto sebagai dasar dalam penentuan prioritas komponen berdasarkan kontribusi terhadap kegagalan sistem.

Integrasi kedua metode tersebut menghasilkan pendekatan yang sistematis dalam penentuan strategi perawatan, di mana keputusan pemeliharaan tidak hanya didasarkan pada tingkat kemungkinan kegagalan, tetapi juga pada tingkat pengaruh komponen terhadap sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, strategi perawatan yang disusun bersifat berbasis risiko dan difokuskan pada komponen dengan tingkat kekritisan tertinggi.

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini bersifat *probabilistic-based*, di mana parameter probabilitas kegagalan yang digunakan dalam model *Bayesian Network* diperoleh dari data historis kegagalan komponen pada sistem CPP. Dengan demikian, penentuan strategi perawatan tidak hanya didasarkan pada asumsi teoritis, tetapi juga merepresentasikan kondisi aktual sistem di lapangan. Pendekatan ini memungkinkan pengambilan keputusan pemeliharaan yang lebih realistis dan berbasis data.

4.6.2 Penentuan Strategi Perawatan

Berdasarkan hasil analisis probabilitas kegagalan menggunakan *Bayesian Network* dan tingkat kekritisan komponen berdasarkan diagram Pareto, kriteria penentuan strategi perawatan dalam penelitian ini dirumuskan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.16.

Table 4. 16 Penentuan Strategi Perawatan, Sumber: Penulis. 2026

Parameter	Kondisi	Kategori	Strategi Perawatan
Probabilitas kegagalan tinggi + Pareto $\leq 80\%$	Risiko tinggi & kritis	Sangat Kritis	<i>Condition-Based Maintenance</i>
Probabilitas kegagalan menengah + Pareto $> 80\%$	Risiko sedang	Menengah	<i>Preventive Maintenance</i>

Tabel tersebut menunjukkan bahwa pemilihan strategi perawatan dalam penelitian ini tidak dilakukan secara umum, melainkan berdasarkan kombinasi tingkat risiko kegagalan dan prioritas komponen. Komponen dengan risiko tinggi dan termasuk kategori kritis ditetapkan menggunakan *condition-based maintenance*, sedangkan komponen dengan risiko menengah menggunakan *preventive maintenance*. Pendekatan ini menjadi dasar dalam penentuan strategi perawatan pada masing-masing komponen yang disajikan pada subbab berikutnya.

4.6.3 Strategi Perawatan Komponen CPP

Strategi perawatan komponen pada sistem *controllable pitch propeller* dalam penelitian ini ditentukan berdasarkan hasil analisis yang terintegrasi antara *Bayesian Network* dan diagram Pareto. Dalam hal ini, *Bayesian Network* digunakan untuk menghasilkan probabilitas kegagalan berdasarkan data historis, yang merepresentasikan tingkat risiko masing-masing komponen.

Selanjutnya, nilai probabilitas tersebut digunakan sebagai dasar dalam penyusunan diagram Pareto untuk menentukan prioritas komponen berdasarkan kontribusinya terhadap kegagalan sistem.

Dengan demikian, penentuan strategi perawatan dalam penelitian ini tidak dilakukan secara terpisah antara kedua metode tersebut, melainkan berdasarkan kombinasi antara tingkat risiko kegagalan dan tingkat prioritas komponen. Komponen yang berada dalam batas kumulatif $\leq 80\%$ Pareto dikategorikan sebagai komponen kritis, sedangkan komponen di luar batas tersebut dikategorikan sebagai non-kritis.

Berdasarkan hasil analisis tersebut, komponen kritis dengan tingkat risiko tinggi ditetapkan menggunakan strategi *condition-based maintenance*, karena komponen tersebut memiliki kontribusi dominan terhadap kegagalan sistem dan memerlukan pemantauan kondisi secara berkelanjutan. Sementara itu, komponen non-kritis dengan tingkat risiko menengah ditetapkan menggunakan *preventive maintenance*. Hasil penentuan strategi perawatan untuk masing-masing komponen sistem CPP disajikan pada Tabel 4.17

Table 4. 17 Strategi Perawatan Pada Komponen Sistem CPP, Sumber: Penulis, 2026

No.	Komponen	Kategori (Pareto)	Tingkat Risiko (BN)	Strategi	Tindakan Pemeliharaan
1	Hub Seal	Kritis	Tinggi	CBM	Monitoring kebocoran dan inspeksi seal
2	Hub Lubrication System	Kritis	Tinggi	CBM	Analisis dan kontrol kualitas oli
3	Pitch Actuator	Kritis	Tinggi	CBM	Monitoring aktuasi dan inspeksi mekanisme
4	Hydraulic Control Valve	Kritis	Tinggi	CBM	Pembersihan dan pengecekan valve
5	Servo Hydraulic System	Kritis	Tinggi	CBM	Monitoring tekanan dan kebocoran
6	Hydraulic Accumulator	Kritis	Tinggi	CBM	Pemeriksaan tekanan dan fungsi
7	Hydraulic Oil System	Kritis	Tinggi	CBM	Monitoring kondisi dan kualitas oli
8	Servo Valve	Kritis	Tinggi	CBM	Kalibrasi dan inspeksi valve
9	Proportional Control Valve	Non-Kritis	Menengah	PM	Kalibrasi dan inspeksi berkala

10	Pitch Controller	Non-Kritis	Menengah	PM	Pengujian fungsi sistem kontrol
11	Oil Cooler	Non-Kritis	Menengah	PM	Pembersihan heat exchanger
12	Overspeed Protection System	Non-Kritis	Menengah	PM	Pengujian sistem proteksi
13	Seawater Cooling Line	Non-Kritis	Menengah	PM	Inspeksi korosi dan fouling
14	Hydraulic Power Unit	Non-Kritis	Menengah	PM	Monitoring tekanan dan performa sistem
15	Control Power Supply	Non-Kritis	Menengah	PM	Pemeriksaan sistem kelistrikan
16	Oil Temperature Sensor	Non-Kritis	Menengah	PM	Kalibrasi sensor
17	Relief Valve	Non-Kritis	Menengah	PM	Pengujian tekanan dan fungsi
18	HPU Electric Motor	Non-Kritis	Menengah	PM	Inspeksi motor dan kondisi operasi
19	Hydraulic Oil Filter	Non-Kritis	Menengah	PM	Penggantian saat terjadi penurunan fungsi

Berdasarkan Tabel 4.17, strategi perawatan yang dihasilkan dalam penelitian ini telah mempertimbangkan secara simultan tingkat risiko kegagalan dan prioritas komponen. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi *Bayesian Network* dan diagram Pareto mampu menghasilkan pendekatan pemeliharaan yang lebih terarah, berbasis data, dan sesuai dengan kondisi aktual sistem, sehingga berpotensi meningkatkan keandalan sistem CPP secara keseluruhan.

4.7 Luaran Penelitian

Penelitian mengenai analisis keandalan sistem *Controllable Pitch propeller* pada kapal AHTS NORTH SILVER tidak hanya menghasilkan analisis teknis mengenai tingkat keandalan sistem, tetapi juga menghasilkan beberapa luaran penelitian yang memiliki nilai akademik dan praktis. Luaran tersebut meliputi publikasi ilmiah, penyusunan modul pembelajaran perhitungan keandalan sistem, serta pendaftaran Hak Kekayaan Intelektual terhadap modul yang dihasilkan. Luaran penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang rekayasa perkapalan serta menjadi referensi dalam penerapan metode analisis keandalan pada sistem propulsi kapal.

4.7.1 Paper Publikasi pada Jurnal International Terindeks Scopus Q1

Salah satu luaran utama dari penelitian ini adalah artikel ilmiah yang disusun untuk dipublikasikan pada jurnal internasional, yaitu *Journal of Ocean Engineering and Science*. Artikel tersebut mengangkat hasil penelitian mengenai analisis keandalan sistem *Controllable Pitch Propeller* dengan pendekatan integrasi dua metode, yaitu *Fault Tree Analysis* dan *Bayesian Networks*. Integrasi kedua metode ini digunakan untuk memodelkan hubungan sebab-akibat kegagalan sekaligus menangani ketidakpastian dalam sistem secara lebih komprehensif.

Penyusunan artikel bertujuan untuk mendiseminasikan hasil penelitian kepada komunitas akademik dan praktisi di bidang teknik perkapalan, serta memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan metode analisis keandalan pada sistem propulsi kapal. Publikasi ini juga diharapkan dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya, khususnya dalam pengembangan strategi pemeliharaan berbasis risiko pada sistem propulsi kapal. Sebagai bukti luaran, artikel ilmiah tersebut telah *submitted* ke jurnal *Journal of Ocean Engineering and Science*, dan bukti pengajuan tersebut disertakan pada bagian **Lampiran 6**.

4.7.2 Modul Pembelajaran: Tinjauan Keandalan Sistem Controllable Pitch Propeller Pada Kapal Anchor Handling Tug Supply

Luaran penelitian berikutnya adalah penyusunan modul pembelajaran mengenai tinjauan keandalan sistem *Controllable Pitch Propeller* pada kapal *Anchor Handling Tug Supply*. Modul ini disusun sebagai panduan praktis yang menjelaskan langkah-langkah perhitungan keandalan sistem berdasarkan data jam operasi dan jumlah kejadian kegagalan yang tercatat pada sistem CPP. Modul tersebut memuat penjelasan konsep dasar keandalan sistem, metode *Fault Tree Analysis*, dan *Bayesian Network*, disertai contoh perhitungan serta interpretasi hasil analisis keandalan.

Penyusunan modul ini bertujuan untuk mempermudah pemahaman dan penerapan metode FTA dan BN dalam analisis keandalan sistem teknik, khususnya pada sistem propulsi bantu kapal. Dengan adanya modul ini, pengguna dapat melakukan analisis keandalan secara sistematis berdasarkan data operasional dan data kegagalan yang tersedia. Selain itu, modul ini dapat digunakan sebagai bahan pembelajaran maupun referensi teknis bagi mahasiswa, peneliti, dan praktisi yang ingin menerapkan metode FTA atau BN dalam analisis keandalan sistem kapal. Modul Pembelajaran tersebut disajikan pada **Lampiran 7**.

4.7.3 HKI Modul Pembelajaran: Tinjauan Keandalan Sistem Controllable Pitch Propeller Pada Kapal Anchor Handling Tug Supply

Sebagai bentuk perlindungan terhadap karya intelektual yang dihasilkan dalam penelitian ini, Modul Pembelajaran *Tinjauan Keandalan Sistem Controllable Pitch Propeller pada Kapal Anchor Handling Tug Supply* diajukan untuk memperoleh perlindungan Hak Kekayaan Intelektual. Pendaftaran HKI bertujuan untuk memberikan pengakuan resmi atas inovasi yang dihasilkan sekaligus melindungi hak kepemilikan intelektual terhadap modul yang telah disusun.

Pendaftaran HKI ini juga menunjukkan bahwa luaran penelitian tidak hanya memiliki nilai akademik, tetapi juga memiliki potensi implementasi praktis dalam bidang pendidikan dan industri maritim. Dengan adanya perlindungan HKI, modul tersebut dapat dikembangkan lebih lanjut sebagai media pembelajaran serta sebagai alat bantu dalam analisis keandalan sistem

pada berbagai aplikasi teknik. Sertifikat HKI sebagai bukti legal atas perlindungan karya intelektual tersebut disajikan pada **Lampiran 8**.