masih minim dalam konteks reparasi kapal di Indonesia, khususnya untuk kasus seperti KM. Dharma Ferry 2. Penelitian ini bertujuan mengisi celah tersebut dengan menyajikan model analisis kegagalan yang kuat secara struktural dan dapat dipertanggungjawabkan secara kuantitatif.

2.2 Reparasi Kapal

Pengecekkan ketahanan kapal untuk menjaga atau mempertahankan *performance* dilakukan agar *lifetime* dari kapal tersebut dapat berjalan secara lancar dan optimal. Tujuan utama dari kegiatan reparasi kapal adalah melakukan perawatan agar kapal tetap memenuhi standar yang yang diatur melalui konvensi internasional, seperti IMO (*International Maritime Organization*), yang meliputi regulasi dalam SOLAS (*Safety of Life at Sea*) serta MARPOL (*Marine Pollution*). Selain itu, kapal juga harus mematuhi ketentuan dari lembaga klasifikasi, baik dari dalam negeri maupun luar negeri [9].

Menurut Yusuf et al. (10) Kapal baru maupun kapal lama yang berlayar di perairan Indonesia wajib terdaftar pada Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan harus mengikuti kegiatan survey yang telah ditetapkan. Berdasarkan waktunya, survey pada kapal dibagi menjadi beberapa waktu diantaranya :

1. *Annual Survey* (AS), dilaksanakan setiap tahun dengan tujuan mengecek bagian lambung, instalasi mesin, dan instalasi listrik.
2. *Intermediate Survey* (IS), survei ini biasa disebut juga dengan survei antara yang dilakukan saat menginjak tahun ketiga (2.5 tahun) dari lima tahun.
3. *Renewal Survey/Special Survey* (SS), survei ini disebut juga dengan survey pembaruan kelas dan dilakukan setiap lima tahun sekali setiap akan habis masa dari sertifikat klas dan dilakukan di atas dok.

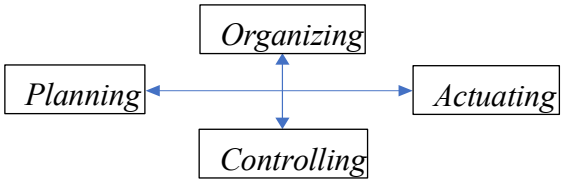
Hasil dari survei-survei yang dilakukan meliputi struktur kapal, peralatan permesinan, instalasi listrik, bagian lambung kapal, dan lain-lain. Setelah dilakukan survei, *surveyor* akan mengarahkan langkah dan hal apa yang selanjutnya harus ditempuh oleh kapal tersebut dan pasti kapal yang telah di survey akan naik dok, jika tidak naik dok kapal akan direparasi secara terapung saja bukan pada *graving dock*.

2.3 Pengertian Manajemen

Manajemen didefinisikan sebagai suatu disiplin ilmu yang mengintegrasikan prinsip kepemimpinan dengan teknik pengelolaan sumber daya terbatas melalui empat fungsi inti: perencanaan (*planning*), pengorganisasian (*organizing*), pelaksanaan (*actuating*), dan pengendalian (*controlling*) [11]. Fungsi-fungsi ini membentuk siklus berkesinambungan (Gambar 2.1) untuk mencapai tujuan organisasi secara efektif dan efisien [2].

Tujuan utama manajemen adalah mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya untuk menghasilkan:

a. Ketepatan proses (*process accuracy*)



Gambar 2. 1 Hubungan Kegiatan Manajemen

b. Efisiensi temporal (*time efficiency*)

c. Optimalisasi biaya (*cost optimization*)

d. Kesesuaian standar keselamatan (*safety compliance*) [3]

2.3.1 Perencanaan (*Planning*)

Perencanaan merupakan tahap fundamental dalam manajemen yang melibatkan penyusunan strategi komprehensif untuk mengantisipasi berbagai skenario operasional. Proses ini mencakup penetapan tujuan strategis dan sasaran operasional organisasi, disertai dengan formulasi kebijakan pelaksanaan yang rinci. Selanjutnya dilakukan penyusunan program kerja terstruktur yang mencakup penjadwalan waktu pelaksanaan, penyiapan prosedur administratif dan teknis, serta alokasi sumber daya finansial dan non-finansial secara optimal. Tahap perencanaan yang matang menjadi kunci keberhasilan implementasi berbagai inisiatif organisasi. Perencanaan yang efektif tidak hanya mempengaruhi hasil akhir, tetapi juga dapat meningkatkan efisiensi kerja dan keselarasan antara strategi bisnis dan teknologi informasi dalam organisasi [12].

2.3.2 Pengorganisasian (Organizing)

Pengorganisasian mencakup penentuan struktur organisasi, pembagian kerja, dan pendelegasian wewenang. Mulyono [13] mencatat bahwa struktur organisasi yang tumpang tindih menyebabkan kebingungan pelaporan dan keterlambatan eksekusi pekerjaan.

2.3.3 Pelaksanaan (Actuating)

Pelaksanaan adalah proses menjalankan pekerjaan sesuai perencanaan. Ini melibatkan koordinasi, pengarahan, dan pengawasan tim lapangan. Kegagalan sosialisasi SOP atau keterlambatan instruksi kerja dapat mengganggu pelaksanaan [14].

2.3.4 Pengendalian (Controlling)

Fungsi pengendalian merupakan mekanisme vital dalam manajemen yang bertujuan

memastikan seluruh program dan regulasi kerja dilaksanakan sesuai dengan standar yang telah ditetapkan. Proses ini difokuskan pada pemantauan dan evaluasi terhadap berbagai penyimpangan yang mungkin terjadi selama implementasi, sekaligus menyediakan sistem koreksi untuk meminimalkan deviasi dari rencana awal. Hasil akhir yang diharapkan dari fungsi pengendalian yang efektif adalah tercapainya tujuan organisasi dengan tingkat optimalisasi sumber daya yang maksimal dan hasil kerja yang memenuhi ekspektasi kualitas. Pengendalian dilakukan dengan monitoring pekerjaan dan membandingkan progres dengan baseline plan. Jika terjadi deviasi, harus dilakukan koreksi. Zanri dan Santosa [15] menyarankan pemanfaatan Critical Path Method (CPM) sebagai alat kontrol jadwal yang efisien.

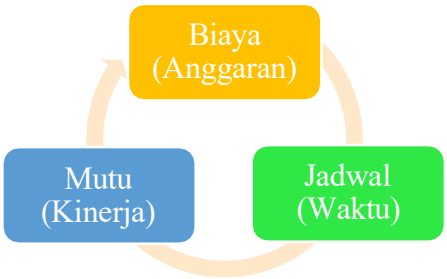
2.4 Pengertian Proyek (Project)

Secara konseptual, proyek merupakan rangkaian aktivitas terstruktur yang dilaksanakan dalam periode waktu terbatas dengan menggunakan berbagai sumber daya yang telah dialokasikan sebelumnya. Proyek dikatakan berhasil jika manajemen proyek yang digunakan dapat diimplementasikan untuk memenuhi tujuan suatu proyek[14]. Dalam *me-manage* suatu proyek perlu memperhatikan beberapa hal yaitu: mutu pekerjaan, *schedule,* biaya yang dikeluarkan, serta dapat memenuhi keinginan dari *stakeholder* [15].

Ketepatan waktu penyelesaian pekerjaan sangat penting dalam menentukan keberhasilan maupun kegagalan suatu proyek. Keterlambatan suatu proyek dapat merugikan pemilik dan pelaksana proyek dalam segi biaya maupun waktu [16].

Kesepakatan telah dibuat sebelum berlangsungnya suatu proyek. Industri galangan kapal seringkali mengalami keterlambatan dalam pembangunan atau reparasi kapal, maka akibat dari keterlambatan tersebut pihak galangan harus membayar sejumlah denda *(penalty)* yang sudah ditentukan [17].

Untuk mencapai tujuan dari sasaran proyek, perlu memperhatikan 3 parameter antara lain;



Gambar 2. 2 Target Proyek

Biasanya suatu proyek terjadi setelah dilakukannya *tender* atau pelelangan. *Tender* suatu proyek adalah sistem pengadaan barang dan jasa yang diselenggarakan untuk memperoleh pemenang yang dapat melakukan pekerjaan sesuai dengan persyaratan dan harga yang sudah disepakati.[18]

2.5 Keterlambatan Proyek

Keterlambatan proyek merupakan kondisi ketika aktivitas dalam proyek mengalami perpanjangan waktu atau menimbulkan dampak yang menyebabkan proses pengerjaan tidak selesai sesuai jadwal yang telah direncanakan sebelumnya. Ketika keterlambatan terjadi pada proyek konstruksi, hal ini dapat memperpanjang masa pelaksanaan proyek dan mengakibatkan peningkatan biaya, baik secara langsung maupun tidak langsung. Bagi pemilik proyek atau klien, keterlambatan ini berdampak pada hilangnya peluang untuk memanfaatkan sumber daya pada proyek lain. Selain itu, biaya tambahan seperti gaji pekerja, sewa alat, dan pengeluaran lain juga akan meningkat, yang akhirnya dapat mengurangi tingkat keuntungan yang diperoleh [19].

2.5.1 Faktor-Faktor Penyebab Keterlambatan Proyek

Dalam konteks industri galangan kapal maupun konstruksi secara umum, keterlambatan seringkali dipicu oleh hambatan operasional dan teknis. Wahyuningsih dan Mulyatno mengungkapkan bahwa beberapa penyebab dominan keterlambatan dalam proyek perbaikan kapal meliputi ketidaktepatan jadwal kerja, keterlambatan distribusi material, dan minimnya tenaga kerja yang kompeten [16]. Selain itu, hasil studi oleh Mangare dan Pratasis dalam proyek pembangunan Mall di Manado mengidentifikasi faktor-faktor seperti kekurangan bahan bangunan, spesifikasi yang berubah, keterlambatan pembayaran dari pemilik proyek, hingga Secara garis besar, penyebab keterlambatan dalam pelaksanaan proyek dapat diklasifikasikan menjadi sejumlah kategori pokok :

1) Masalah Pengadaan dan Material
   Waktu tunggu material yang panjang, keterlambatan pengiriman, serta perubahan spesifikasi teknis menyebabkan jadwal pekerjaan mundur dari rencana [16,20].
2) Kekurangan Tenaga Kerja
   Tidak tersedianya cukup tenaga kerja ahli atau terampil menyebabkan backlog pekerjaan yang berdampak pada jalur kritis proyek [20].
3) Kondisi Alat dan Mesin
   Kegagalan alat berat atau fasilitas galangan yang tidak beroperasi optimal berdampak langsung terhadap keterlambatan aktivitas lapangan [20].
4) Permasalahan Keuangan
   Tidak tersedianya dana operasional yang cukup atau keterlambatan proses pembayaran dari pemberi kerja (owner) turut menjadi penyebab keterlambatan proyek [20].
5) Kesalahan dalam Manajemen Proyek
   Kesalahan penjadwalan, kurangnya sinkronisasi antar divisi, serta lemahnya sistem pengendalian menjadi penyumbang besar keterlambatan [16].
6) Faktor Eksternal
   Hal-hal di luar kendali seperti kondisi cuaca ekstrem dan ketergantungan terhadap inspeksi pihak ketiga juga mempengaruhi waktu pelaksanaan [16].

Setiap proyek memiliki kombinasi faktor yang unik, tergantung pada kompleksitas, lokasi, dan jenis pekerjaan yang dilaksanakan. Oleh sebab itu, pendekatan manajemen risiko berbasis struktur

logika seperti *Fault Tree Analysis* (FTA) dapat membantu dalam identifikasi akar penyebab dan penentuan prioritas penanganan [16].

2.5.2 Dampak Keterlambatan Proyek

Keterlambatan dalam pelaksanaan proyek dapat menimbulkan berbagai konsekuensi negatif, tidak hanya terhadap pencapaian target waktu, tetapi juga berdampak langsung pada aspek finansial dan reputasi pihak-pihak yang terlibat, termasuk kontraktor, konsultan, dan pemilik proyek (owner). Menurut Praptapa dan Alamsyah, dampak keterlambatan dalam proyek konstruksi maupun reparasi kapal dapat meluas ke hilangnya peluang, meningkatnya beban biaya, dan terganggunya siklus proyek selanjutnya [21].

1. Pihak Kontraktor

   Terlambatnya penyelesaian proyek berdampak pada naiknya biaya overhead akibat durasi pelaksanaan proyek yang melebihi rencana jadwal semula. Biaya overhead mencakup pengeluaran tetap perusahaan seperti biaya administrasi, bunga pinjaman, serta dampak inflasi terhadap bahan dan upah kerja. Selain itu, keterlambatan dapat membuat kontraktor tidak dapat segera memulai proyek baru karena sumber daya masih terikat [21,20].
2. Pihak Konsultan

   Bagi pihak konsultan, keterlambatan proyek berarti penggunaan waktu dan tenaga yang lebih besar dari yang diperhitungkan dalam kontrak kerja. Hal ini menyebabkan terganggunya jadwal kerja konsultan untuk proyek lain yang sudah dijadwalkan sebelumnya. Menurut Mangare dan Pratasis, konsultan kerap mengalami konflik waktu dan kesulitan menyusun ulang jadwal pengawasan jika proyek berjalan tidak sesuai rencana [20].
3. Pihak Owner

   Pemilik proyek akan mengalami kerugian dalam bentuk hilangnya potensi pendapatan dari aset yang belum bisa dimanfaatkan atau disewakan. Dalam proyek fasilitas umum seperti rumah sakit atau pelabuhan, keterlambatan juga berdampak sosial karena menunda pelayanan kepada masyarakat [16]. Selain itu, jika proyek dibiayai dengan pinjaman atau dana investasi, maka biaya pinjaman dapat terus berjalan meskipun fasilitas belum menghasilkan.

2.6 *Fault Tree Analisis* (FTA)

Fault Tree Analysis (FTA) adalah suatu pendekatan terstruktur yang digunakan untuk mengenali dan mengevaluasi potensi penyebab terjadinya peristiwa yang tidak diharapkan dalam suatu sistem, khususnya berkaitan dengan aspek keandalan dan keselamatan sistem teknik [17]. FTA banyak digunakan dalam industri perkapalan dan proyek konstruksi sebagai alat bantu evaluasi risiko serta pengambilan keputusan terkait perencanaan mitigasi risiko [22].

Menurut Wahyuningsih dan Mulyatno [16], metode FTA dapat digunakan untuk menelusuri

penyebab keterlambatan proyek kapal dengan menyusun hubungan antar kejadian penyebab secara logika. Hal serupa dikemukakan oleh Darwis et al. [23], yang memanfaatkan FTA untuk menganalisis keterlambatan dalam proyek pembangunan bendungan.

Manfaat penggunaan FTA antara lain:

a. Menilai keandalan sistem secara kualitatif maupun kuantitatif.
b. Menyederhanakan sistem kompleks menjadi struktur logika penyebab kegagalan.
c. Mengidentifikasi akar penyebab utama dari top event.
d. Membantu pemangku kepentingan dalam membuat rencana pengendalian risiko [22,16].

2.6.1 Definisi metode FTA

Fault Tree Analysis (FTA) yaitu metode analisis risiko yang dikembangkan untuk mengidentifikasi hubungan logis antara berbagai kejadian penyebab dan suatu kejadian puncak (top event) yang tidak diinginkan. Metode ini bersifat deduktif, yaitu dimulai dari suatu peristiwa yang sudah terjadi atau mungkin terjadi, dan kemudian ditelusuri berbagai kemungkinan penyebabnya secara sistematis [17].

FTA umumnya digambarkan dalam bentuk diagram pohon logika yang menggunakan simbol-simbol *Boolean Logic* seperti *AND* dan *OR* gate. Struktur ini memungkinkan perancang sistem untuk memahami bagaimana kombinasi beberapa kejadian dasar (*basic events*) dapat menyebabkan suatu sistem gagal atau tidak berfungsi sebagaimana mestinya [22].

Dalam dunia rekayasa, termasuk industri konstruksi dan perkapalan, FTA digunakan untuk mengidentifikasi potensi gangguan pada sistem sejak tahap desain, serta membantu proses pengambilan keputusan dalam perencanaan mitigasi risiko. Misalnya, dalam proyek perbaikan kapal, FTA dapat digunakan untuk menganalisis akar penyebab keterlambatan proyek, dari faktor material, peralatan, SDM, hingga manajemen [16].

Secara kuantitatif, metode FTA juga dapat dimanfaatkan untuk menghitung *probability value* terjadinya *top event* berdasarkan peluang terjadinya basic event. Hal ini menjadikan FTA tidak hanya berguna dalam identifikasi risiko, tetapi juga dalam evaluasi reliabilitas dan pengendalian kualitas sistem secara menyeluruh [22,23].

Berbeda dari metode *bottom-up* seperti *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), FTA bekerja dari atas ke bawah. Metode ini sangat berguna saat fokus utama analisis sudah diketahui, yaitu suatu kegagalan atau peristiwa kritis yang ingin dihindari [17,16].

2.6.2 Komponen dalam FTA

Fault Tree Analysis (FTA) dikembangkan melalui identifikasi *top event* (kejadian utama) dan *basic causes* (penyebab dasar) yang saling terkait, dengan menggunakan sistem penomoran khusus. Proses ini menghasilkan diagram pohon kesalahan yang memungkinkan identifikasi minimal cut set - kombinasi penyebab terkecil yang dapat memicu top event. Menurut

literatur, komponen utama FTA meliputi [24] :

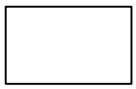
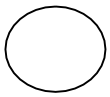
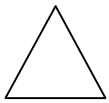
1. Variable Boolean

   Dalam *Fault Tree Analysis* (FTA), kejadian dasar direpresentasikan sebagai *basic event* yang mengikuti logika Boolean. Sebuah *basic event* bernilai benar (TRUE) ketika kejadian tersebut terjadi, dan salah (FALSE) ketika tidak terjadi. Penyederhanaan persamaan logika dalam FTA mengacu pada aturan Aljabar Boolean, dimana operator "×" merepresentasikan operasi AND dan "+" menyatakan operasi OR.

2. Simbol Boolean

   Dalam FTA, digunakan simbol-simbol untuk peristiwa (event) dan gerbang logika (gate). Rincian simbol tersebut dapat ditemukan pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.8.

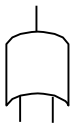
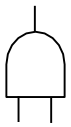
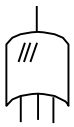
Tabel 2. 1 simbol-simbol Event

Simbol	Nama	Keterangan
	Rectangle	Berisi penjelasan suatu kejadian risiko pada pohon kesalahan. Digunakan untuk mendeskripsikan kejadian utama (top event) yang tidak diinginkan dan juga kejadian yang menghasilkan kesalahan (*intermediete event*). Dibatasi oleh gerbang logika (*gates*) berupa simbol.
	Circle	Menunjukkan *basic event* yang merupakan komponen kegagalan tingkat terendah atau akar penyebab masalah.
	Transfer	Menunjukkan bahwa komponen kejadian dipindahkan ke diagram terpisah.

Sumber : Fault Tree Handbook (1981)

Sifat dari setiap kejadian dalam sistem dijelaskan dengan simbol kejadian ini, yang memudahkan identifikasi mereka. Top event disebut sebagai kejadian teratas atau paling tinggi. Kejadian-kejadian ini kemudian diikuti oleh kejadian-kejadian intermediet dan dapat ditelusur ke bawah untuk menemukan sumber masalah yang paling penting.

Tabel 2. 2 Lanjutan Simbol-Simbol Event

Simbol	Nama	Keterangan
	OR	Output kesalahan berlaku jika salah satu input terjadi. Yakni ketika input bersifat *individually*.
	AND	Output kesalahan berlaku jika semua input terjadi. Yakni ketika semua input bersifat *collectivally*.
	Vote	Output kesalahan berlaku jika semua input terjadi. Yakni ketika terdapat mutualisasi antara beberapa input.

Diadaptasi dari Fault Tree Handbook (1981)

Simbol gate menggambarkan hubungan antar peristiwa dalam sebuah sistem.. Simbol ini menunjukkan bahwa suatu kejadian terjadi sebagai hasil dari satu kejadian atau bersama-sama dengan kejadian lain.

2.6.3 Analisis pada FTA

Kelebihan teknik ini dapat digunakan untuk analisis kuantitatif dan kualitatif, sehingga tingkat subyektifitas dapat dikurangi. Teknik analisis yang digunakan adalah berikut dibawah ini :

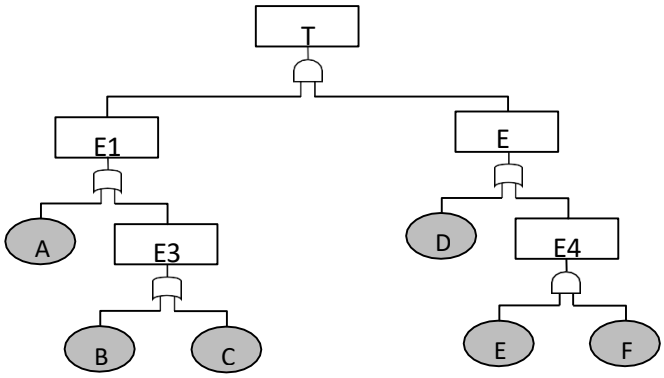
2.6.3.1 Analisis Kualitatif pada FTA

merupakan analisis FTA dengan ekspresi logika yang memanfaatkan variabel serta lambang-lambang aljabar. Beberapa metode yang digunakan antara lain sebagai berikut :

1. Analisis *Top To Bottom* dalam FTA

Pendekatan ini diawali dari kejadian utama (Top Event) di puncak, lalu dilanjutkan ke level menengah (Intermediate Event) hingga mencapai kejadian dasar (Basic Event)*)*. Dalam proses ini, lambang gerbang dipakai merepresentasikan logika kualitatif. seperti yang digambarkan pada

Gambar 2.3 :



Gambar 2. 3 Bentuk Diagram FTA

((diadaptasi dari Apsari, 2014 melalui laman https://justme.ft- uim.ac.id/index.php/JUSTME/article/view/60))

1. Analisis *Bottom Up* dalam FTA

Pendekatan *Bottom-Up* digunakan untuk menyusun ekspresi logika Boolean yang mewakili keterkaitan antara berbagai kejadian dasar dan kejadian utama (*top event*). Dengan pendekatan ini, analisis dilakukan dari level paling bawah (*basic events*), lalu hasilnya digunakan untuk menyusun level menengah dan akhirnya mencapai *top event.*

Setiap node dalam diagram *fault tree* yang terhubung dengan *logic gate* (seperti OR dan AND gate) dapat direpresentasikan dalam bentuk logika Boolean. Misalnya, untuk kejadian yang melibatkan OR gate, digunakan operasi union (∪), sedangkan untuk AND gate digunakan operasi interseksi (∩).

Merujuk pada Gambar 2.3, analisis yang didapatkan adalah sebagai berikut:

Pada tingkat bawah, hasilnya adalah :

E3 = B U C ; E4 = A ∩ B.....(2.6)

Pada tingkat menengah, didapatkan :

E1 = A U E3 ; E2 = D U E4.....(2.7)

Pada tingkat atas, diperoleh hasil :

T = E1 ∩ E2..... (2.8)

Selanjutnya, setelah mensubstitusi persamaan 2.1 ke dalam 2.3, maka :

T = (A U E3) ∩ (D U E4).....(2.9)

Dengan demikian, diperoleh bentuk logika untuk Top Event :

T = (A U (B U C)) ∩ (D U (E ∩ F)).....(2.10)

2.6.3.2 Analisis Kuantitatif pada FTA

Analisis Fault Tree Analysis (FTA) tidak hanya diterapkan untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan sistem secara kualitatif, tetapi juga dapat dikembangkan menjadi bentuk analisis kuantitatif. Dalam pendekatan ini, probabilitas kegagalan dari setiap *basic event* dihitung dan dikombinasikan secara logis untuk mengetahui kemungkinan terjadinya top event atau kejadian puncak. Dalam pendekatan kuantitatif, FTA menggabungkan logika Boolean dan probabilitas untuk menghitung kemungkinan terjadinya top event [24]. Pendekatan ini memberikan nilai numerik terhadap risiko yang dianalisis, sehingga memudahkan pengambil keputusan dalam proses mitigasi risiko yang terukur dan terstruktur.

A. Pendekatan Frekuensi Index (FI) DNV (*Det Norske Veritas*)

Salah satu acuan yang sering digunakan dalam analisis kuantitatif FTA adalah pendekatan berbasis *Frequency Index* (FI) yang direkomendasikan oleh DNV (*Det Norske Veritas*). DNV ini mengelompokkan kemungkinan kejadian menjadi beberapa kategori kualitatif yang kemudian dikonversi menjadi nilai probabilitas kuantitatif [25]. Dalam pendekatan ini, digunakan indeks frekuensi (Frequency Index/FI) yang mengelompokkan kejadian berdasarkan tingkat kemungkinannya secara kualitatif dan dikonversi menjadi nilai kuantitatif [26]. Indeks FI membantu dalam mengestimasi probabilitas kejadian berdasarkan pengalaman praktisi, terutama ketika data aktual tidak tersedia.

Tabel 2. 3 Indeks Frekuensi Berdasarkan Aturan DNV [26]

FI	Rating	Interpretation	Kuantitatif
5	*Frequent*	Kejadian terjadi hampir tiap reparasi kapal	10^{-1}
4	Reasonably Probable	Terjadinya kejadian tiap rentang 5 kali dalam proyek reparasi	10^{-2}
3	Remote	Terjadinya kejadian tiap rentang 25 kali dalam proyek reparasi	10^{-3}
2	Extremely Remote	Terjadinya kejadian tiap rentang 75 kali dalam pryek reparasi	10^{-4}
1	Improbable	Terjadinya kejadian tiap rentang 100 kali dalam pryek reparasi	10^{-5}

B. Perhitungan Probabilitas Berdasarkan Konversi Frequency Index (FI)

Dalam pendekatan kuantitatif *Fault Tree Analysis* (FTA), probabilitas masing-masing kejadian dasar (*basic event*) dapat diperoleh melalui metode penilaian pakar (*expert judgment*). Salah satunya pendekatan yang umum digunakan adalah dengan mengonversi skala *Frequency Index* (FI) ke dalam bentuk nilai probabilitas numerik [27]. Klasifikasi FI ini didasarkan pada panduan yang diberikan oleh DNV-RP-A203 [26], yang menetapkan hubungan antara tingkat

kemungkinan kejadian (seperti *Frequent, Remote, Improbable*) dan nilai probabilitas tertentu.

Untuk mendapatkan nilai probabilitas digunakan rumus berikut :

$$P = \frac{\sum Pi}{n}$$

Dimana:

P = Probabilitas kejadian

Pi = Nilai probabilitas dari responden ke-i

n = Jumlah total responden

C. Kombinasi Probabilitas Berdasarkan Logika Boolean

Dalam Fault Tree Analysis (FTA), struktur logika dimanfaatkan untuk merepresentasikan keterkaitan sebab dan akibat antar kejadian yang dapat menyebabkan kegagalan sistem secara keseluruhan. komponen logika utama yang digunakan mencakup Gerbang AND menunjukkan bahwa seluruh kejadian penyebab wajib terjadi supaya top event bisa terjadi, sedangkan gerbang OR menunjukkan bahwa cukup salah satu peristiwa terjadi untuk memicu top event.

Model logika ini digunakan untuk membentuk kombinasi jalur kegagalan atau yang dikenal dengan minimal cut set, yakni gabungan paling sederhana dari peristiwa dasar (*basic events)* yang dapat menyebabkan kegagalan utama dalam sistem.

Penelitian oleh Nadim et al. (2024) menunjukkan bahwa penerapan logika Boolean dalam struktur pohon kesalahan dapat mengidentifikasi jalur kegagalan paling kritis dalam sistem fotovoltaik skala besar. Dengan menggunakan kombinasi AND dan OR gates, mereka mampu menyusun model reliabilitas dan menilai tingkat kritikalitas tiap elemen sistem. Pendekatan ini kemudian diperkuat dengan fuzzy logic untuk mengakomodasi ketidakpastian data, sehingga perhitungan probabilitas kegagalan menjadi lebih akurat [29].

1) Kombinasi OR Gate (∪)

Menyatakan bahwa cukup satu dari beberapa kejadian penyebab terjadi, maka top event akan terjadi. Untuk dua kejadian A dan B, probabilitasnya dapat di rumuskan sebagai berikut [16] :

$$P(T) = P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A) \cdot P(B)$$

Dimana :

P(T) = probabilitas terjadinya *top event*

P(A) = probabilitas terjadinya kejadian *basic event*

2) AND Gate (∩)

Menyatakan bahwa semua kejadian penyebab harus terjadi secara bersbarengan agar *top event* dapat terjadi. Untuk dua kejadian A dan B, jika keduanya harus terjadi untuk memicu top event, maka probabilitasnya dihitung dengan [16] :

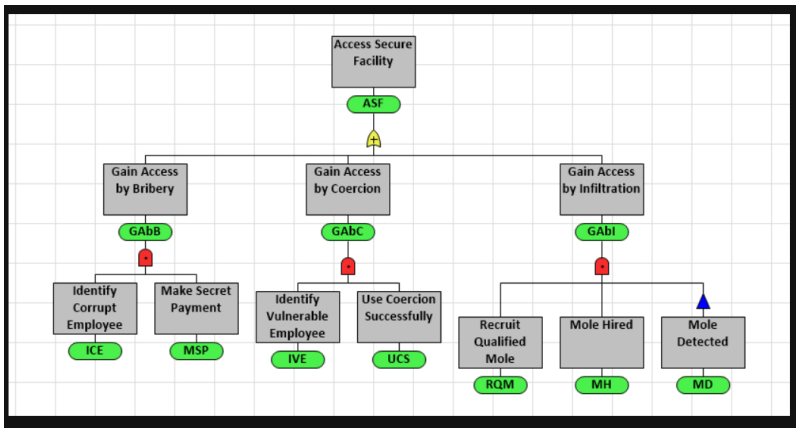
$$P(T) = P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B)$$

Dimana :

P(T) = probabilitas terjadinya *top event*

P(A) = probabilitas terjadinya kejadian *basic event*

2.7 DPL *Fault Tree*



Gambar 2. 4 Tampilan Software DPL 9 Fault Tree

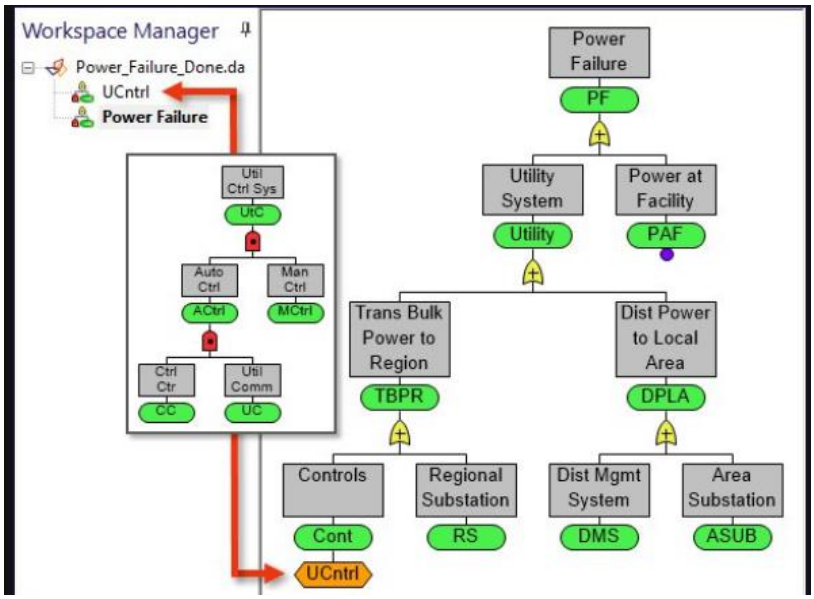
(Sumber : https://www.syncopation.com/products/dpl-fault-tree/)

Pohon Kesalahan (Fault Tree) adalah model hierarkis yang digunakan untuk menganalisis probabilitas suatu peristiwa akan terjadi. Peristiwa ini biasanya probabilitas rendah, risiko konsekuensi tinggi atau hasil seperti kegagalan sistem kritis atau pelanggaran keamanan. DPL 9 Fault Tree menyediakan semua alat yang diperlukan untuk membangun representasi grafis dari masalah skala besar dengan anggun sehingga Anda dapat memahami risiko yang terlibat dalam sistem tertentu. Hal ini mengarah pada penilaian risiko yang lebih akurat dan metode kuantitatif untuk menilai tindakan yang dapat mengurangi risiko. Pohon Kesalahan DPL yang ditunjukkan di atas memecah pelanggaran fasilitas yang aman [29].

Pohon kesalahan (*Fault Tree*) digunakan dalam berbagai aplikasi termasuk menganalisis keamanan pembangkit listrik tenaga nuklir, keandalan kendaraan peluncuran, dan keamanan jaringan komputer.

2.7.1 Module Embedding

A fault tree module dapat disematkan dalam pohon kesalahan lain ketika hendak membagi model yang lebih besar dan kompleks menjadi beberapa bagian yang lebih kecil. Modules juga dapat bertindak sebagai gerbang kustom yang dapat muncul beberapa kali di pohon kesalahan yang sama.



Gambar 2. 5 *Module Embeding*

(Sumber : https://www.syncopation.com/products/dpl-fault-tree/)

Pada gambar diatas, DPL Fault Tree menganalisis risiko kegagalan daya di lokasi industri kritis. Salah satu peristiwa yang dapat mempengaruhi keandalan sistem tenaga adalah kegagalan kontrol transmisi (sudut kiri bawah). Peristiwa Kontrol di pohon kesalahan Kegagalan Daya akan bergantung pada referensi modul ke pohon kesalahan Sistem Kontrol Utilitas (UCntrl) [29].

2.8 Minimal Cut Set

Analisis utama dalam pohon kesalahan/FTA adalah perhitungan minimal *cut sets*. Minimal *Cut Set* (MCS) mengacu pada kombinasi yang paling kecil dari *event* dasar yang jika terjadi secara berbarengan, maka akan menyebabkan terjadinya peristiwa utama atau *top event*. Dengan kata lain, MCS adalah jalur kritis paling sederhana yang dapat memicu terjadinya kegagalan sistem secara keseluruhan. Karena itu, identifikasi MCS menjadi salah satu aspek paling vital dalam proses evaluasi risiko.

Konsep MCS berfungsi sebagai alat bantu penting untuk memahami bagaimana elemen-elemen dasar di dalam sistem saling berinteraksi dalam menciptakan potensi kegagalan. Setiap cut set merupakan jalur unik dari akar peristiwa menuju top event, dan yang disebut minimal karena tidak ada bagian dari jalur tersebut yang dapat dihilangkan tanpa menghilangkan potensi kegagalannya. Manfaat utama MCS dalam konteks analisis sistem antara lain :

- Membantu mengidentifikasi elemen sistem yang paling berisiko.
- Menyediakan dasar kuantitatif untuk pengambilan keputusan mitigasi.
- Digunakan dalam simulasi atau penilaian reliabilitas secara menyeluruh.

Wahab et al. (2021) menambahkan bahwa kombinasi antara MCS dan data probabilitas memungkinkan pengguna untuk mengevaluasi tingkat kegagalan sistem secara lebih presisi. Hal ini sangat berguna dalam konteks sistem energi modern, seperti pembangkit listrik berbasis energi terbarukan [30].

Cut set didefinisikan sebagai sekumpulan kegagalan komponen yang dapat menyebabkan

kegagalan sistem. Suatu *cut set* disebut minimal jika tidak terdapat kegagalan tambahan yang tidak diperlukan. DPL *Fault Tree* menggunakan algoritma khusus yang cepat untuk menghitung minimal *cut set,* dan hasilnya dapat ditampilkan dalam bentuk tabel atau diagram. Melalui tampilan tersebut, probabilitas terjadinya kegagalan serta biaya yang terkait dengan setiap cut set dapat diketahui. Pengurutan *cut set* berdasarkan biaya memungkinkan identifikasi titik kegagalan yang paling "murah", yaitu cara paling mudah yang dapat dimanfaatkan oleh pihak lawan untuk menyerang sistem [29].