

# Penerapan Aljabar Boolean dan *Directed Acyclic Graph* untuk Menyelidiki Kegagalan Suatu Sistem

Nayotama Pradipta - 13520089  
Program Studi Teknik Informatika  
Sekolah Teknik Elektro dan Informatika  
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10 Bandung 40132, Indonesia  
13520089@std.stei.itb.ac.id

**Abstract**— Fault Tree Analysis atau Analisis Pohon Kesalahan adalah sebuah metode yang digunakan untuk melakukan analisis terhadap keamanan, kekuatan, dan kelemahan sebuah sistem. Metode ini memanfaatkan aljabar boolean untuk mengetahui potensi kegagalan suatu sistem. Dalam aplikasinya, FTA juga memanfaatkan teori graf, khususnya *directed acyclic graph* dalam pemodelan kegagalan sistem. FTA dimanfaatkan pada semua bidang rekayasa karena fungsinya yang sangat krusial sebagai pelajaran dari kesalahan-kesalahan yang telah dilakukan manusia sebelumnya.

**Keywords**— Analisis Pohon Kesalahan, Aljabar Boolean, Graf, Kegagalan Sistem.

## I. PENDAHULUAN

Sistem adalah gabungan dari elemen-elemen yang saling terkait dan berinteraksi sebagai satu kesatuan yang bertujuan untuk mengeksekusi suatu proses tertentu. Cakupan dari sistem sangatlah luas dan bervariasi, mulai dari sistem kecil seperti sistem transaksi pada bank, hingga sistem kompleks dan besar seperti sistem saraf manusia, sistem transportasi, dll. Dalam kehidupan sehari-hari, manusia hidup bersebelahan dengan sistem-sistem yang saling terkoneksi.

Sistem tentunya perlu dipelihara, dijaga, dan terus diperbaiki agar bisa berjalan sesuai tujuannya. Sistem yang dibuat oleh manusia tentunya akan memiliki kelemahan dan sangat berkemungkinan untuk gagal. Hal ini yang menjadi penyebab diperlukannya analisis pohon kesalahan. Fungsi utama dari analisis pohon kesalahan adalah untuk memahami kesalahan-kesalahan yang telah terjadi pada suatu sistem agar ke depannya kesalahan tersebut tidak akan terulang. Analisis ini sangatlah bermanfaat untuk memecah suatu permasalahan pada sistem yang kompleks menjadi bagian-bagian yang sederhana.

*Fault Tree Analysis* atau analisis pohon kesalahan telah digunakan di bidang rekayasa seperti analisis kecelakaan pesawat, analisis bencana Chernobyl, analisis bencana Bhopal, dan masih banyak lagi. FTA membantu manusia dalam pembuatan protokol-protokol keamanan bagi pekerja yang bekerja di bidang rekayasa tersebut. FTA juga dapat digunakan di bidang kesehatan seperti analisis kematian akibat Covid-19. Sifat FTA yang begitu fleksibel menjadi salah satu alasan mengapa metode ini banyak sekali digunakan di berbagai sektor pekerjaan.

Isi dari sebuah FTA dapat bervariasi, akan tetapi, konsepnya akan selalu sama. Konsep yang digunakan pada FTA adalah penggabungan aljabar boolean dengan graf, khususnya *directed acyclic graph*. Keduanya merupakan teori yang datang dari bidang ilmu informatika. Hal ini menunjukkan bahwa ilmu Informatika merupakan ilmu yang dapat mendukung berbagai sektor lain.

Pada makalah ini, akan dibahas penerapan FTA pada sektor penerbangan, sektor pembangkit listrik, sektor kesehatan, serta sektor esports. Penulis memilih keempat sektor ini yang cenderung acak untuk menekankan kembali fleksibilitas FTA dan penerapannya di dunia nyata.

## II. LANDASAN TEORI

### A. Aljabar Boolean

Aljabar boolean adalah bentuk aljabar yang berhubungan dengan bilangan biner dan operasi logika. Aljabar boolean ditemukan oleh seorang matematikawan dari Inggris bernama George Boole pada tahun 1854. Tujuan utama dari aljabar boolean adalah untuk menganalisis sirkuit digital. Aljabar boolean berbeda dengan aljabar biasa karena aljabar boolean secara khusus membahas mengenai seluruh operasi logika seperti konjungsi, disjungsi, dan negasi. Sebuah boolean hanya dapat bernilai true atau false, dan keduanya direpresentasikan dengan bilangan biner 1 (true) dan 0 (false).

Secara formal, definisi aljabar boolean adalah sebagai berikut:

Misalkan  $B$  adalah himpunan yang didefinisikan pada dua operator biner,  $+$  dan  $\cdot$ , sebuah operator uner,  $'$ , serta 0 dan 1 adalah dua elemen yang berbeda dari  $B$ . Maka, tuple

$$\langle B, +, \cdot, ', 0, 1 \rangle$$

disebut sebagai aljabar boolean jika untuk setiap  $a, b, c \in B$  berlaku aksioma berikut:

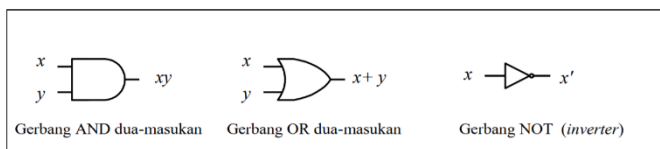
1. Identitas
  - (i)  $a + 0 = a$
  - (ii)  $a \cdot 1 = a$
2. Komutatif
  - (i)  $a + b = b + a$
  - (ii)  $a \cdot b = b \cdot a$
3. Distributif
  - (i)  $a \cdot (b + c) = (a \cdot b) + (a \cdot c)$
  - (ii)  $a + (b \cdot c) = (a + b) \cdot (a + c)$
4. Komplemen

Untuk setiap  $a \in B$ , terdapat elemen unik  $a' \in B$  sehingga

- (i)  $a + a' = 1$
- (ii)  $a \cdot a' = 0$

### B. Gerbang Logika

Gerbang logika merupakan penerapan lanjut dari aljabar boolean. Konsep utama yang digunakan sebuah gerbang logika adalah menerima input yang berupa bilangan biner, lalu menghasilkan sinyal output sesuai dengan sifat gerbang logika tersebut. Terdapat beberapa jenis gerbang logika seperti gerbang AND, gerbang OR, gerbang NOT, gerbang NAND, gerbang NOR, gerbang XOR, dan gerbang XNOR, akan tetapi gerbang yang paling mendasar adalah gerbang AND, gerbang OR, dan gerbang NOT.



**Gambar 2.1** Ilustrasi Gerbang AND, OR, dan NOT(inverter), diambil dari [3]

Ketiga gerbang diatas memiliki ciri khas sendiri ketika diberi input, dan outputnya dapat dilihat pada tabel kebenaran berikut.

#### 1. Tabel Kebenaran AND 2-input

INPUT		OUTPUT
X	Y	
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

#### 2. Tabel Kebenaran OR 2-input

INPUT		OUTPUT
X	Y	
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

#### 3. Tabel Kebenaran NOT

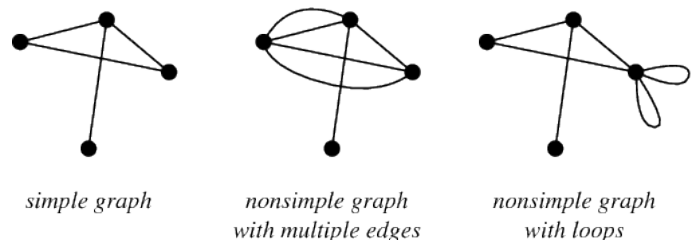
INPUT	OUTPUT
X	
0	1
1	0

### C. Teori Graf

Teori Graf merupakan salah satu cabang matematika yang berhubungan dengan himpunan titik-titik(simpul) yang dihubungkan dengan garis(sisi). Secara matematis, graf G didefinisikan sebagai  $G = (V, E)$ , dengan V adalah himpunan

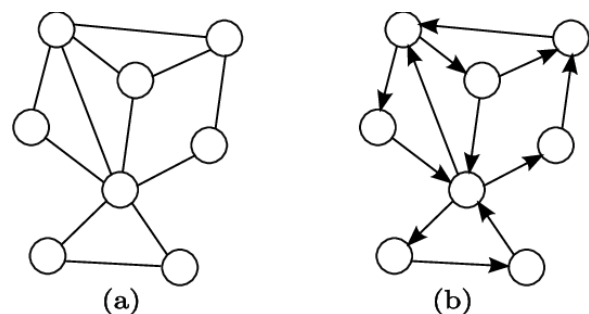
tidak kosong dari simpul-simpul dan E adalah himpunan sisi yang menghubungkan sepasang simpul.

Graf dapat diklasifikasikan berdasarkan ada tidaknya gelang atau sisi ganda pada suatu graf, serta berdasarkan orientasi arah pada sisi. Pada klasifikasi berdasarkan ada tidaknya gelang atau sisi ganda, graf dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu graf sederhana dan graf tak-sederhana. Graf sederhana merupakan graf yang tidak mengandung gelang maupun sisi ganda, sedangkan graf tak-sederhana adalah graf yang mengandung salah satu atau keduanya. Graf yang mengandung sisi ganda dinamakan graf ganda, sedangkan graf yang mengandung sisi gelang dinamakan graf semu.



**Gambar 2.2** Ilustrasi graf sederhana, graf ganda, dan graf semu, diambil dari [1]

Pada penggolongan berdasarkan orientasi arah pada sisi, graf juga dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu graf tak-berarah dan graf berarah. Graf tak-berarah memiliki sisi yang tidak mempunyai orientasi arah, sedangkan graf berarah semua sisinya memiliki orientasi arah.



**Gambar 2.3** Ilustrasi graf(a) tak-berarah dan graf(b) berarah, diambil dari [5]

Selain penggolongan diatas, graf juga dapat dibagi berdasarkan ada tidaknya lintasan dan sirkuit Euler. Terdapat beberapa terminologi yang perlu dibahas untuk memahami lebih lanjut mengenai Euler:

#### 1. Lintasan (Path)

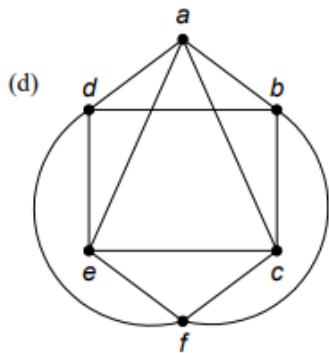
Lintasan yang panjangnya  $n$  dari simpul awal  $v_0$  ke simpul tujuan  $v_n$  pada graf  $G$  adalah barisan berselang-seling simpul-simpul dan sisi-sisi yang berbentuk  $v_0, e_1, v_1, e_2, v_2, \dots, v_{n-1}, e_n, v_n$ . Panjang lintasan adalah jumlah sisi dalam lintasan tersebut

#### 2. Sirkuit (Circuit) atau Siklus (Cycle)

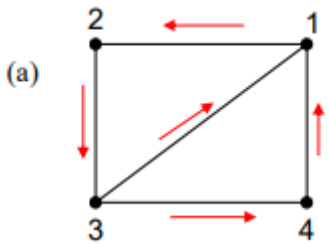
Sirkuit atau siklus adalah lintasan yang berawal dan berakhir pada simpul yang sama. Panjang lintasan adalah jumlah sisi dalam sirkuit tersebut

Lintasan Euler merupakan lintasan yang melalui semua sisi di dalam graf sebanyak satu kali. Sirkuit Euler adalah sirkuit yang

melewati semua sisi pada graf sebanyak satu kali. Graf dengan sirkuit Euler dinamakan graf Euler, sedangkan graf dengan lintasan Euler dinamakan graf semi-Euler.

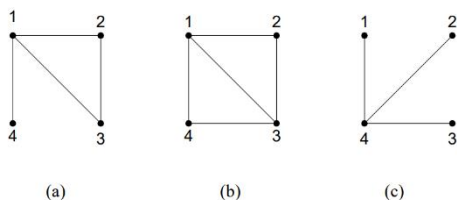


**Gambar 2.4** Contoh Graf Euler dengan sirkuit  $a-c-f-e-c-b-d-e-a-d-f-b-a$ , diambil dari [4]



**Gambar 2.5** Contoh Graf Semi Euler dengan lintasan 3-1-2-3-4-1, diambil dari [4]

Penggolongan graf yang terakhir dan yang paling berhubungan dengan FTA adalah ada tidaknya lintasan dan sirkuit Hamilton. Lintasan Hamilton didefinisikan sebagai lintasan yang melalui semua simpul pada graf sebanyak satu kali. Sirkuit Hamilton didefinisikan sebagai sirkuit yang melalui setiap simpul pada graf sebanyak satu kali, kecuali simpul asal (juga sebagai simpul akhir) yang dilalui dua kali. Graf dengan sirkuit Hamilton dinamakan graf Hamilton sedangkan graf yang hanya memiliki lintasan Hamilton dinamakan graf semi-Hamilton.



- (a) graf yang memiliki lintasan Hamilton (misal: 3, 2, 1, 4)
- (b) graf yang memiliki sirkuit Hamilton (1, 2, 3, 4, 1)
- (c) graf yang tidak memiliki lintasan maupun sirkuit Hamilton

**Gambar 2.6** Ilustrasi graf semi-Hamilton(a), graf Hamilton(b), dan graf yang bukan keduanya (c), diambil dari [4]

#### D. Fault Tree Analysis

Fault Tree Analysis atau Analisis Pohon Kesalahan

merupakan sebuah metode berbasis graf untuk melakukan analisis atau eksplorasi terhadap kesalahan, kelemahan, dan kegagalan suatu sistem dengan level tertentu. Metode ini memanfaatkan teori graf dan aljabar boolean untuk mendekomposisi suatu sistem yang kompleks menjadi sederhana. Analisis pohon kesalahan pertama kali ditemukan oleh H. Watson dan A. Mearns pada Bell Laboratories. Konsep ini kemudian dimanfaatkan oleh perusahaan penerbangan terbesar yaitu Boeing dan perusahaan-perusahaan lain seperti perusahaan mobil, kimia, nuklir, dan tentunya perangkat lunak.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, FTA memanfaatkan DAG atau Directed Acyclic Graph untuk merepresentasikan dekomposisi permasalahan. Directed Acyclic Graph sendiri merupakan graf yang berarah dan tidak bersifat *cyclic*. Hal ini berarti sebuah DAG bukanlah graf Hamilton. Masing-masing sisi pada DAG memiliki keterurutan, atau dengan kata lain dapat disebut sebagai pengurutan topologi (*topological ordering*).

FTA seringkali digunakan oleh perusahaan untuk menguji kecacatan sebuah sistem ataupun untuk belajar dari kesalahan yang telah terjadi. Penerapan FTA pada sistem yang kompleks memudahkan para teknisi untuk melihat masalah-masalah yang muncul dari sudut pandang yang logis. FTA juga memungkinkan untuk meninjau efisiensi dari sistem yang digunakan.

Simbol yang digunakan pada FTA dikelompokkan menjadi dua, yaitu simbol *event* dan simbol gerbang. Simbol *event* merupakan simbol-simbol yang digunakan untuk merepresentasikan kondisi-kondisi sebuah sistem, sedangkan simbol gerbang meliputi simbol-simbol aljabar boolean.

S.No	Event Symbol	Description
1		Primary or basic failure event. It is a random event and sufficient data is available
2		State of system, subsystem or component event
3		Secondary failure or under developed event, can be explored further
4		Conditional event and is associated with the occurrence of some other event
5		House event representing either occurrence or non-occurrence of an event
6		Transfer in and transfer out symbols used to replicate a branch or sub-tree of the FTA

**Gambar 2.7** Ilustrasi dan deskripsi simbol *event* pada FTA, diambil dari [7]

S.No	Gate Symbol	Description
1		AND Gate The output event occurs when all the input events occur
2		OR Gate The output event occurs when at least one of the input events occur
3		Priority AND Gate The output event occurs when all the input events occur in the order from left to right
4		Exclusive OR gate The output event occurs if either of the two input events occur but not both
5		Inhibit gate The output event occurs when the input event occurs and the attached condition is satisfied

**Gambar 2.8** Ilustrasi dan deskripsi simbol gerbang pada FTA, diambil dari [7]

Analisis Pohon Kesalahan sebagai suatu metode tentunya memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihan dari metode ini adalah pohon kesalahan dapat memberikan gambaran kegagalan secara visual sehingga mudah dipahami. FTA juga bersifat *to-the-point* atau fokus ke inti masalah. Selain itu, FTA juga

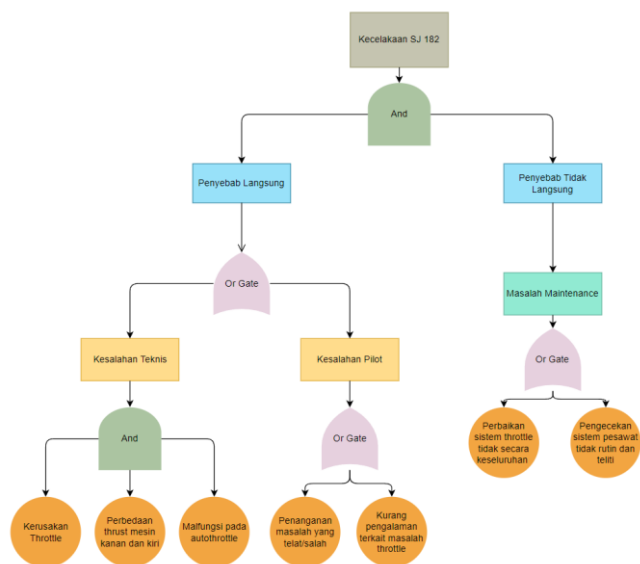
memperhitungkan *human error*. Secara keseluruhan, FTA membantu pembaca untuk memahami langkah-langkah prioritas saat ingin memecahkan masalah.

Kelemahan dari FTA salah satunya masalah yang dianalisis hanya satu. Selain itu, masalah yang umum biasanya sulit untuk diketahui penyebabnya. Dari segi konsepnya, seorang pembaca FTA juga harus memahami konsep dasar dari gerbang logika dan graf.

### III. APLIKASI FAULT TREE ANALYSIS DI DUNIA NYATA

#### A. Sektor Penerbangan

Fault Tree Analysis seringkali digunakan di sektor penerbangan sebagai suatu metode untuk menganalisis penyebab jatuhnya suatu pesawat. FTA merupakan salah satu penyebab mengapa kecelakaan pesawat pada zaman sekarang semakin jarang terjadi. Manusia belajar dari kesalahan-kesalahan yang dilakukan sebelumnya dan membuat terobosan baru dalam menciptakan alat transportasi yang aman. Akan tetapi, hal tersebut bukan berarti pesawat komersial sudah 100% aman untuk ditumpangi. Buktinya saja, Indonesia mengalami 23 kecelakaan pesawat selama satu dekade yang lalu (2011-2021). Pada tahun 2021 sendiri, Indonesia memulai tahunnya dengan kecelakaan pesawat Sriwijaya 182 yang menewaskan 62 penumpang beserta awak pesawat. Pada saat makalah ini ditulis, penyebab kecelakaan Sriwijaya Air belum sepenuhnya dipublikasi karena black box yang ditemukan masih diproses oleh badan yang bersangkutan. Oleh karena itu, FTA yang penulis buat akan mengacu pada hasil investigasi awal KNKT. Berikut FTA untuk kecelakaan Sriwijaya Air 182.

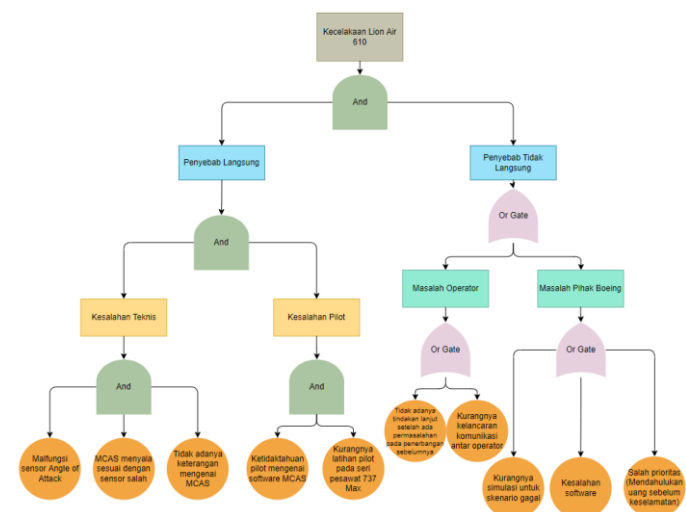


**Gambar 3.1** FTA pada kecelakaan Sriwijaya Air 182 dengan beberapa asumsi

FTA diatas dibuat dengan beberapa asumsi berdasarkan data yang penulis dapat, sehingga besar kemungkinannya bahwa FTA diatas kurang tepat. Data yang penulis dapat adalah terdapat perbedaan *thrust level* yang tercatat pada black box, berhentinya auto-pilot setelah pesawat mencapai *bank angle* sebesar 45 derajat, serta adanya permasalahan throttle pada logbook pesawat. Perlu digarisbawahi bahwa untuk membuat

FTA yang lengkap dan tepat pada Sriwijaya Air 182, diperlukan data yang lengkap dari KNKT.

Selanjutnya pada tahun 2018, Indonesia juga mengalami kecelakaan pesawat kedua paling parah dalam sejarah, yaitu Lion Air 610. Pada kecelakaan ini, sebanyak 189 orang meninggal setelah pesawat jatuh pada laut Jawa. Black box pada pesawat ini berhasil ditemukan sehingga data penyebab jatuhnya pesawat menjadi sangat jelas dan mendetail. Metode FTA sangatlah cocok untuk digunakan pada kasus ini karena data yang didapat sudah lengkap dan deskriptif, serta permasalahannya cukup kompleks. Secara garis besar, jatuhnya pesawat ini dikarenakan permasalahan pada software MCAS (*Maneuvering Characteristics Augmentation System*). Boeing tidak menjelaskan ke umum mengenai penambahan software tersebut yang dapat secara otomatis menurunkan sudut pesawat. Permasalahan ini yang kemudian menyebabkan perusahaan Boeing dituntut di kemudian hari. Berikut FTA untuk kecelakaan tersebut.



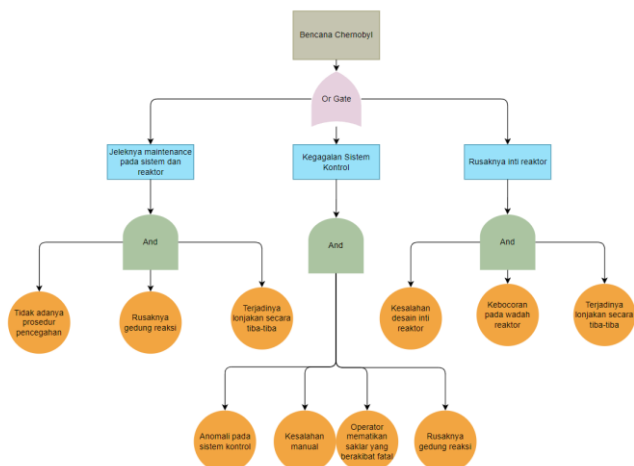
**Gambar 3.2** FTA pada kecelakaan Lion Air 610

FTA pada gambar 3.2 menjelaskan secara keseluruhan mengenai penyebab kecelakaan yang menimpa Lion Air. Kecelakaan tersebut disebabkan oleh penyebab yang bersifat langsung dan tidak langsung. Penyebab langsung menyangkut kesalahan teknis dan kesalahan pilot. Kesalahan teknis menyangkut kesalahan sensor AoA, yang kemudian memberikan data yang salah kepada MCAS, yang kemudian menurunkan sudut pesawat tanpa sepengetahuan pilot. Kesalahan pilot adalah ketidaktahuan mengenai MCAS dan kurangnya latihan penerbangan pada pesawat Boeing seri terbaru. Tampak bahwa semua kesalahan yang disebutkan semuanya menggunakan operator AND karena semuanya terjadi secara bersamaan dan berhubungan. Di sisi lain, penyebab tidak langsung berasal dari kesalahan operator atau dari pihak boeing. Masalah dari pihak operator berupa tidak ada tindakan lanjut ataupun kurangnya kelancaran komunikasi. Masalah pihak boeing adalah kurangnya simulasi untuk skenario gagal, kesalahan software, dan kesalahan prioritas. Salah satu dari masalah tersebut sudah cukup untuk menyebabkan kecelakaan Lion Air sehingga digunakan operator OR. Satu hal yang perlu digarisbawahi adalah permasalahan yang sama juga terjadi pada Ethiopian Airline 302 yang menyebabkan semua pesawat

bertipe 737-MAX dilarang untuk terbang. Dengan ditemukannya sumber-sumber masalah ini dibantu dengan FTA, Boeing menjadi lebih perhatian terhadap MCAS hingga sekarang seri 737-MAX layak untuk terbang kembali.

### B. Sektor Pembangkit Listrik

Salah satu kasus bencana paling populer yang terkait dengan pembangkit adalah bencana Chernobyl. Bencana Chernobyl merupakan bencana yang melibatkan pembangkit listrik tenaga nuklir di Ukraina. Kejadian ini bermula saat teknisi ingin melakukan eksperimen pada reaktor untuk memastikan bahwa reaktor dapat menyalakan pipa pendingin. Eksperimen ini dilakukan dengan mematikan sistem keamanan darurat. Saat eksperimen, reaktor menjadi tidak stabil serta meledak. Dampak dari meledaknya reaktor ini sangatlah masif karena ledakannya bersifat radioaktif dan mematikan. Jumlah korban yang mati ditempat adalah sekitar 30an, akan tetapi jumlah kematian karena terpapar radiasi jauh lebih banyak. Bagi yang tidak meninggal, banyak sekali rakyat Ukraina yang mengalami kecacatan fisik ataupun kecacatan turunan. Kasus ini menjadi pelajaran penting bagi sektor pembangkit terutama yang bertenaga listrik. Tentunya sistem pembangkit terdiri atas subsistem yang sangat banyak dan kompleks, oleh karena itu, permasalahan ini perlu didekomposisi menjadi permasalahan-permasalahan kecil. Cara yang paling mudah adalah menggunakan Fault Tree Analysis. Berikut adalah FTA untuk bencana Chernobyl.

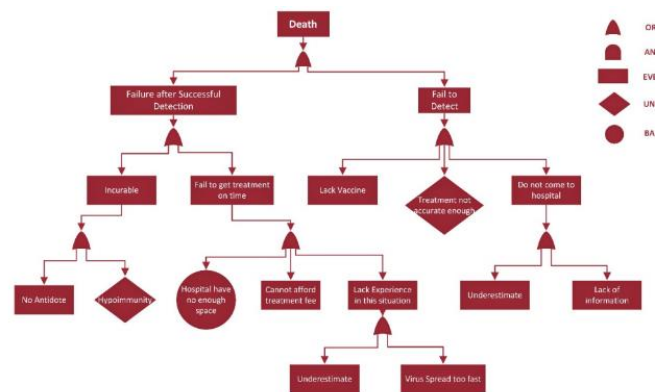


Gambar 3.3 FTA untuk bencana Chernobyl

Pada FTA diatas, tampak bahwa ada tiga penyebab yang menyebabkan terjadinya bencana Chernobyl, yaitu kurangnya maintenance, gagalnya sistem control, dan rusaknya inti reaktor. Salah satu penyebab tersebut cukup untuk menyebabkan bencana Chernobyl. Masing-masing penyebab dapat di dekomposisi menjadi beberapa penyebab yang saling bersangkutan yang dihubungkan dengan operator AND. FTA pada gambar 3.3 menggarisbawahi bahwa bencana Chernobyl diakibatkan oleh kelalaian operator dan juga kesalahan pada desain inti reaktor. Tentunya bencana ini menjadi pelajaran yang besar bagi seluruh dunia, khususnya mereka yang bergerak di sektor pembangkit listrik tenaga nuklir.

### C. Sektor Kesehatan

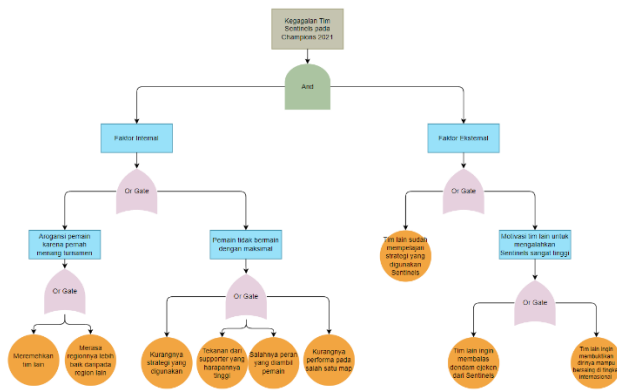
Sektor kesehatan telah dihantam dengan Covid-19 sejak tahun 2020. Jumlah kasus positif dan kematian bertambah seiring bertambahnya hari. Manusia tentunya mencari solusi untuk menangani pandemi tersebut. Salah satu solusi adalah dengan menggunakan vaksin. Solusi lain dapat berupa mencari penyebab dari kematian, karena pada dasarnya jika seorang pasien Covid-19 dirawat dengan tepat, maka pasien tersebut kemungkinan besar akan selamat. Untuk menyelesaikan permasalahan ini, penyebab kematian dapat dimodelkan dalam bentuk graf. Kematian Covid-19 bisa terjadi sebelum terdeteksi ataupun setelah terdeteksi. Kasus kematian setelah terdeteksi cenderung jarang tetapi tetap ada. Untuk itu, berikut FTA untuk memodelkan penyebab kematian karena Covid-19.



Gambar 3.4 FTA untuk penyebab kematian Covid-19, diambil dari [11]

### D. Sektor Esports

Tidak dapat dipungkiri bahwa sektor esports atau pertandingan game online tumbuh secara eksponensial, baik di luar negeri maupun dalam negeri, telah tumbuh secara eksponensial. Dalam esports terdapat turnamen dan kompetisi yang dilakukan oleh berbagai tim ataupun individu. Tentunya dalam kompetisi ini banyak yang gagal dan sedikit yang berhasil. Kegagalan ini dapat dianalisis menggunakan metode FTA untuk memperbaiki diri pada turnamen atau kompetisi yang akan datang. Perlu digarisbawahi bahwa konsep ini juga dapat berlaku pada tim-tim yang mengikuti kompetisi selain esports seperti competitive programming, capture the flag, dll. Sebuah tim yang bertanding pada turnamen dapat dianggap sebagai suatu sistem karena terdiri atas beberapa orang sehingga faktor-faktor yang memengaruhi kesuksesan tim sangat bervariasi. Untuk memberikan contoh penerapan FTA pada dunia esports, penulis akan mengacu pada kegagalan tim Sentinels pada turnamen Valorant Champions 2021 yang dilaksanakan pada bulan Desember di Berlin. Berikut FTA untuk kegagalan tim Sentinels.



**Gambar 3.5** FTA untuk memodelkan penyebab kegagalan Sentinels pada turnamen Champions 2021.

**IV. QUANTITATIVE FAULT TREE ANALYSIS**

Fault Tree Analysis dapat juga dilengkapi dengan nilai-nilai kemungkinan gagal pada masing-masing simpul yang berguna untuk mendapatkan minimal cut set. Minimal cut set pada FTA adalah kejadian paling minimal yang akan tetap menyebabkan kegagalan sistem. Ketika minimal cut sets telah didapatkan, maka dapat dihitung jumlah kemungkinan terjadinya kegagalan sistem. Rumus untuk menghitung kemungkinan kegagalan adalah sebagai berikut:

$$P_0(t) = 1 - \prod_{i=1}^k [1 - P_i(t)]$$

dengan  $P_i$  adalah kemungkinan kegagalan minimal cut set.

Perhitungan ini berguna untuk dijadikan patokan saat ingin mengetahui batas minimal yang perlu dihindari agar sebuah kegagalan sistem tidak terjadi.

**V. KESIMPULAN**

FTA merupakan metode yang sangat berguna untuk menganalisis penyebab kegagalan sebuah sistem dengan metode Top Down dan memanfaatkan aljabar boolean dan teorema graf. FTA bersifat fleksibel, yang berarti dapat digunakan pada sistem apapun dan pada sektor apapun. Hal ini terbukti karena telah diberikan contoh FTA pada sektor penerbangan, pembangkit listrik, kesehatan, bahkan tim esports. FTA yang diterapkan secara quantitative akan memberikan insight tambahan akan probabilitas terjadinya kegagalan sebuah sistem. FTA dapat digunakan sebagai bahan pelajaran manusia dalam membuat sistem serta membuat protokol keselamatan. Hal ini membuktikan bahwa materi yang diajarkan pada Matematika Diskrit bersifat aplikatif di kehidupan sehari-hari.

**VI. UCAPAN TERIMA KASIH**

Pertama-tama, penulis ingin mengucapkan puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan rahmatnya. Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Bu Harlili selaku dosen Matematika Diskrit yang selama ini telah membimbing penulis dalam memahami dan mempelajari semua

pelajaran yang disampaikan pada perkuliahan. Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Bapak Rinaldi Munir yang telah menyediakan powerpoint berisi materi perkuliahan sehingga mahasiswa dapat mengaksesnya dengan mudah.

**REFERENCES**

- [1] <https://mathworld.wolfram.com/SimpleGraph.html> (Diakses pada 12 Desember 2021)
- [2] <https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/Matdis/2020-2021/Graf-2020-Bagian1.pdf> (Diakses pada 14 Desember 2021)
- [3] [https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/Matdis/2020-2021/Aljabar-Boolean-\(2020\)-bagian1.pdf](https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/Matdis/2020-2021/Aljabar-Boolean-(2020)-bagian1.pdf) (Diakses pada 14 Desember 2021)
- [4] <https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/Matdis/2020-2021/Graf-2020-Bagian3.pdf> (Diakses pada 14 Desember 2021)
- [5] [https://www.researchgate.net/figure/a-An-example-of-undirected-graph-and-b-an-example-of-directed-graph\\_fig3\\_50591619](https://www.researchgate.net/figure/a-An-example-of-undirected-graph-and-b-an-example-of-directed-graph_fig3_50591619) (Diakses pada 13 Desember 2021)
- [6] <https://www.techopedia.com/definition/5739/directed-acyclic-graph-dag> (Diakses pada 13 Desember 2021)
- [7] <https://sixsigmastudyguide.com/fault-tree-analysis/> (Diakses pada 14 Desember 2021)
- [8] <https://www.nytimes.com/2021/02/10/world/asia/indonesia-plane-crash-report.html> (Diakses pada 14 Desember 2021)
- [9] <https://www.nytimes.com/2019/10/23/world/asia/boeing-737-max-lion-air-crash.html> (Diakses pada 14 Desember 2021)
- [10] <https://slideplayer.com/slide/6387827/> (Diakses pada 14 Desember 2021)
- [11] <https://web.cortland.edu/matresearch/Covid-19FTAGrp5.pdf> (Diakses pada 14 Desember 2021)
- [12] <https://www.sportskeeda.com/valorant/5-reasons-sentinels-eliminated-valorant-champions-2021> (Diakses pada 14 Desember 2021)

**PERNYATAAN**

Dengan ini saya menyatakan bahwa makalah yang saya tulis ini adalah tulisan saya sendiri, bukan saduran, atau terjemahan dari makalah orang lain, dan bukan plagiasi.

Bandung, 14 Desember 2021

Nayotama Pradipta - 13520089