

High Blow-By Pressure Failure Quantification of Doosan Excavator DX300LCA Using Bayesian Network

Kuantifikasi *High Blow-By Pressure* pada Doosan Excavator DX300LCA Menggunakan *Bayesian Network*

Abdul Maajid Al Banna¹, Adhitya Ryan Ramadhani^{1*}

Abstract

Various types of failure are likely to occur in heavy equipment operating in the mining sector, such as high blow-by pressure. The impact of this failure is a loss of engine power so that the unit cannot be used. This has the potential for work accidents to occur because the unit stops operating in a hazardous area. Therefore, the factors and dependencies that influence the occurrence of high blow by pressure will be discussed using the Fault Tree Analysis method and then the results will be used in the Bayesian Network method to do failure quantification. Meanwhile, the probability of high blow-by pressure occurring has a value of 0.0049 with the main cause being failure to compress the air with a sensitivity value of 80%. These results require companies to focus preventive maintenance activities on the engine combustion chamber to prevent similar things from happening.

Keywords

Blow-by Pressure, Bayesian Network, Fault Tree Analysis

Abstrak

Beragam jenis kegagalan sangat mungkin terjadi pada alat berat yang beroperasi di sektor tambang, seperti *high blow-by pressure*. Dampak dari kegagalan ini ialah hilangnya tenaga mesin sehingga unit tidak dapat digunakan. Hal tersebut berpotensi untuk terjadinya kecelakaan kerja karena unit berhenti beroperasi di *hazardous area*. Maka dari itu, faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya *high blow by pressure* dan keterkaitannya akan dibahas menggunakan metode *Fault Tree Analysis* yang kemudian hasilnya akan digunakan pada metode *Bayesian Network* untuk dilakukan kuantifikasi kegagalan. Adapun, probabilitas terjadinya *high blow-by pressure* ini memiliki nilai sebesar 0,0049 dengan penyebab utama karena adanya kegagalan dalam mengompresi udara dengan nilai sensitivitas sebesar 80%. Hal tersebut mengharuskan perusahaan untuk memfokuskan kegiatan *preventive maintenance* pada ruang bakar mesin untuk mencegah hal serupa terjadi.

Kata Kunci

Blow-by Pressure, Bayesian Network, Fault Tree Analysis

¹ Departemen Teknk Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Pertamina
Jl. Teuku Nyak Arief, Simprug, Kebayoran Lama, Jakarta Selatan

* adhitya.rr@universitaspertamina.ac.id

Submitted : October 11, 2023. Accepted : November 11, 2023. Published : November 13, 2023.

PENDAHULUAN

Eksplorasi pertambangan merupakan hal yang sangat lumrah dilakukan di Indonesia. Sebab, negara menguasai dan menggunakan Sumber Daya Alam (SDA) yang meliputi batubara, emas, tembaga, migas, dan lainnya untuk kemakmuran rakyat [1]. Hal tersebut dipertegas pada UUD 1945 pasal 33 ayat 3, bahwasannya bumi, air, dan kekayaan alam yang terkandung di dalamnya digunakan dan dikuasai oleh negara untuk kemakmuran rakyat [2].

Perlu diketahui, bahwasannya salah satu komoditas energi terpenting di Indonesia pada 10 tahun terakhir dimiliki oleh batubara yang disebabkan oleh pertumbuhan perusahaan pertambangan yang sangat pesat karena adanya faktor *demand* yang meningkat [3].

Dalam pelaksanaannya, tenaga manusia saja tidak cukup diandalkan dalam melakukan kegiatan eksplorasi pertambangan. Oleh karena itu, alat berat digunakan untuk mempermudah pekerjaan manusia [4]. Di zaman sekarang, alat berat telah berkembang dan memiliki beragam jenis serta fungsinya masing-masing, salah satunya yang akan di bahas pada penelitian ini adalah jenis *excavator*. *Excavator* merupakan salah satu jenis alat berat yang digunakan digunakan untuk melakukan pengerukan tanah dengan volume yang besar. Jadi, tak heran apabila *excavator* merupakan alat berat yang cukup vital bagi perusahaan. Dalam pengoperasiannya, sangat mungkin *excavator* untuk mengalami berbagai macam masalah akibat intensitas pekerjaan yang tinggi, salah satu masalah yang mungkin timbul adalah *high blow-by pressure*.

Masalah *high blow-by pressure* yang terjadi pada kendaraan, khususnya alat berat merupakan hal yang cukup serius untuk ditindak lanjuti. Sebab, dampak yang diberikan apabila mesin mengalami jenis kegagalan tersebut ialah mesin akan mengalami kehilangan tenaga sehingga mesin ataupun unit tidak dapat digunakan [5]. Jika suatu perusahaan pertambangan memiliki unit yang mengalami masalah serupa, maka kerugian utama yang akan terjadi adalah berkurangnya volume pekerjaan serta meningkatnya *cost* untuk melakukan perbaikan pada *engine* atau menggantinya dengan *engine* yang baru.

Kondisi *high blow-by* ini dapat terjadi diawali dengan piston pada mesin bakar yang tidak akan mampu mengompresikan udara dari Titik Mati Bawah (TMB) ke Titik Mati Atas (TMA) hingga 100%. Hal tersebut menyebabkan adanya beberapa partikel udara yang terbangun melalui lubang *breather* dan muncul fenomena yang disebut *blow-by pressure* [6]. Hal tersebut merupakan fenomena yang lazim untuk terjadi. Namun, akan menjadi masalah apabila *blow-by gas* yang terbangun melebihi batas ketentuan, sehingga fenomena tersebut berubah menjadi *high engine blow-by pressure*.

Dalam penelitian Sribantolo & Suharnadi, telah dibahas kegagalan mesin pada unit *crawler dozer* tipe *straight tilt* yang mengalami *high blow-by pressure* menggunakan analisis kualitatif [7]. Hasilnya, ditemukan banyak kontaminan pada *oil engine* yang diduga disebabkan oleh gesekan berlebih dan didapatkan *over-clearance* pada beberapa komponen. Juga, pada komponen *bearing* didapatkan adanya keausan *adhesive* yang diakibatkan oleh pelumasan buruk.

Kemudian, metode Fault Tree Analysis telah dilakukan penelitiannya oleh Chen terkait kegagalan yang mungkin terjadi pada automated driving [8]. FTA tersebut digunakan untuk menganalisis kegagalan pada ADS (Automated Driving System) dan kegagalan pada human driver. Adapun, ditemukan faktor penyebab kegagalan pada ADS adalah terjadinya kegagalan pada hardware, software, dan mechanical. Sedangkan penyebab kegagalan yang ditemukan pada human driver adalah kegagalan dalam perencanaan dan eksekusi. Juga, metode FTA telah dibahas pada penelitian Nurfatha & Herwanto tentang pengendalian kualitas pada unit SV-521 [9]. Pada penelitian tersebut, didapatkan hasil bahwa terdapat 10 cacat yang terjadi pada saat proses produksi. Serta, Nuryono juga pernah melakukan penelitian dengan metode serupa untuk keselamatan kerja pada proses produksi saus [10]. Didapatkan hasilnya, bahwa

akar penyebab dari kecelakaan kerja terbanyak disebabkan oleh kelalaian pekerja dan pekerja yang tidak menerapkan SOP kerja.

Sementara itu pada metode *Bayesian Network* telah dilakukan penelitiannya oleh Xu terkait risiko kapal yang melalui rute laut utara [11]. Adapun, faktor paling berpengaruh terhadap risiko kapal yang melalui laut utara adalah konsentrasi es, kondisi saluran es, serta pengalaman navigator. Juga, metode BN ini telah dilakukan penelitiannya oleh Zhou untuk melakukan penilaian risiko pipa bawah tanah [12]. Didapatkan hasilnya bahwa sumber api, gempa bumi, dan kesalahan pengoperasian menjadi penyebab risiko paling utama. Serta, Li pernah menggunakan metode BN untuk analisis risiko pada *pipeline* gas yang mengalami korosi eksternal [13]. Hasilnya, didapatkan bahwa risiko paling besar dari terjadinya risiko paling besar dimiliki oleh *coating*, *cathodic protection parts*, dan *cathodic protection lines*.

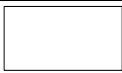
Berdasarkan penelitian pendahulu tersebut, dapat disimpulkan bahwa metode *Fault Tree Analysis* (FTA) dan metode *Bayesian Network* (BN) cocok untuk digunakan bersama. Sebab kedua metode dapat saling melengkapi, dikarenakan kedua metode tersebut memiliki tujuan yang sama [14]. Yakni, untuk menentukan penyebab kegagalan yang terjadi dari suatu peristiwa. Maka dari itu, kedua metode tersebut digunakan pada penelitian ini untuk membahas kegagalan yang terjadi pada salah satu unit *excavator* yang beroperasi di tambang nikel milik PT ABC. Di mana, unit yang mengalami *trouble* tersebut merupakan *excavator* keluaran Doosan tipe DX300LCA dengan mesin diesel tipe DE08TIS. Unit tersebut memiliki diagnosis adanya *abnormal sound* yang berasal dari area silinder 1 dan 2, terdapat banyak *blow by gas* yang keluar dari mesin, juga ditemukan banyak *white gram* di *oil filter*. Namun, dikarenakan PT ABC tidak memiliki data kuantitatif dalam menentukan setiap kemungkinan kegagalan yang terjadi pada setiap unit alat berat yang dimiliki, maka penilaian probabilitas kegagalan pada unit tersebut mengacu pada buku OREDA (*Offshore Reliability Data Handbook*) [15]. Perlu diketahui, bahwa kegagalan *high blow-by pressure* merupakan peristiwa yang bersifat *dependent*. Dalam arti, untuk terjadinya peristiwa tersebut memerlukan beberapa faktor yang saling terikat. Maka dari itu, metode BN (*Bayesian Network*) digunakan karena metode ini mampu menghitung probabilitas suatu peristiwa yang bergantung pada bukti dari peristiwa lain [16].

Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini ialah melakukan kuantifikasi kegagalan terkait *high blow-by pressure* dan menentukan hubungan antar faktor penyebabnya berdasarkan bukti kerusakan yang terjadi dengan menggunakan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) dan *Bayesian Network*. Penentuan faktor penyebab merupakan suatu proses penting, sebab untuk dapat melakukan kuantifikasi perlu adanya analisis terhadap rangkaian kegagalan yang terjadi agar proses perhitungan menjadi lebih akurat. Dengan harapan, para industri yang mengoperasikan alat berat dapat menghemat *cost* serta memaksimalkan produksi kerja mereka dengan memperbaiki program perawatan yang dimiliki berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh.

Fault Tree Analysis (FTA)

FTA merupakan salah satu teknik analisis yang dapat digunakan untuk melakukan pencegahan kecelakaan dengan menggunakan pendekatan kualitatif maupun kuantitatif [17]. Metode ini dilakukan dengan cara merancang pohon kesalahan dengan melibatkan beberapa simbol dan *gate* [18]. Adapun, simbol dan *gate* yang umum digunakan dalam perancangan FTA ditampilkan pada Tabel 1 [19].

Tabel 1. Simbol Pada Fault Tree Analysis

Simbol	Nama	Keterangan
	<i>Top Event/ Intermediate Event</i>	Peristiwa yang masih membutuhkan analisis lanjutan
	<i>Or Gate</i>	Suatu peristiwa disebabkan oleh satu atau lebih peristiwa sebelumnya
	<i>And Gate</i>	Suatu peristiwa disebabkan oleh seluruh peristiwa sebelumnya
	<i>Basic Event</i>	Akar masalah
	<i>Transfer Event</i>	Pemisah peristiwa

Dalam pengaplikasiannya, suatu kejadian puncak (*top event*) akan di-*breakdown* dengan sangat rinci hingga akar permasalahannya (*basic event*), dengan tujuan untuk menentukan faktor penyebab beserta tahapan dari terjadinya suatu kegagalan [20]. Di mana, dibutuhkan setidaknya 3 langkah dalam merancang FTA, diantaranya adalah sebagai berikut [21]:

1. Mengidentifikasi permasalahan yang terjadi

Pada kasus ini, proses identifikasi permasalahan yang terjadi ditampilkan pada Gambar 1. Di mana, identifikasi masalah didapatkan dari data laporan kerusakan (*technical service report*) yang berisi temuan kerusakan pada unit, Program Analisa Pelumas (PAP) yang berisi tentang data kualitas oli setelah terjadi kegagalan, dan data overhaul *engine* yang berupa pengukuran serta dokumentasi setelah *engine* dilakukan overhaul.

2. Merancang *fault tree*

Setelah melakukan identifikasi masalah, *fault tree* dapat dirancang. Di mana, hubungan dari setiap *event*/faktor dapat dinotasikan menggunakan *and gate* (suatu peristiwa disebabkan oleh seluruh peristiwa sebelumnya) juga *or gate* (suatu peristiwa disebabkan oleh satu atau lebih peristiwa sebelumnya).

3. Evaluasi *fault tree*

Evaluasi ini bermakna bahwa perlu adanya identifikasi lanjutan untuk mengatasi kegagalan dari setiap rangkaian *fault tree* yang telah dibangun. Ini bertujuan untuk memastikan apakah *fault tree* yang telah dibangun sudah sesuai atau tidak.

Bayesian Network

Bayesian Network (BN) adalah metode perhitungan yang memiliki kemampuan untuk menghadapi suatu ketidakpastian [13]. *Bayesian Network* ditampilkan dalam bentuk *Directed Acyclic Graph* (DAG). Di mana, DAG mencakup dua jenis *node* (*parent* dan *child*) yang masing-masing *node* tersebut ditunjukkan dependensinya menggunakan *Conditional Probability Tables* (CPT) [12]. Pada penyusunan BN, diperlukan informasi keterkaitan antar faktor-faktor penyebab terjadinya kegagalan yang disusun sebelumnya dengan menggunakan *Fault Tree*. Metode BN memiliki beberapa komponen penting, diantaranya [11]:

1. *Node*

Berfungsi untuk menunjukkan variabel bebas berupa *parent* (variabel yang menyebabkan terjadinya variabel baru) dan *child* (variabel yang tercipta dari dua atau lebih variabel di atasnya).

2. *Arc*

Berfungsi untuk menunjukkan hubungan sebab akibat pada setiap *node*.

3. *Conditional Probability Tables* (CPT)

Berfungsi untuk memberikan nilai pada setiap hubungan antar *node* berupa probabilitas bersyarat.

Adapun, persamaan probabilitas pada *Bayesian Network* ditampilkan pada Persamaan (1).

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \quad (1)$$

Pada Persamaan (1), $P(A)$ dan $P(B)$ masing-masing mewakili probabilitas kejadian A dan B. Kemudian, $P(B|A)$ merupakan probabilitas B ketika peristiwa A terjadi, sedangkan $P(A|B)$ adalah probabilitas A ketika peristiwa B terjadi (*posterior probability*) [12]. Setiap nilai variabel diekspresikan oleh distribusi probabilitas. Di mana, distribusi *posterior probability* dapat di-estimasi ketika setiap informasi variabel terakumulasi. Sehingga, distribusi probabilitas akan menjadi stabil dikarenakan ketidakpastian berkurang [22].

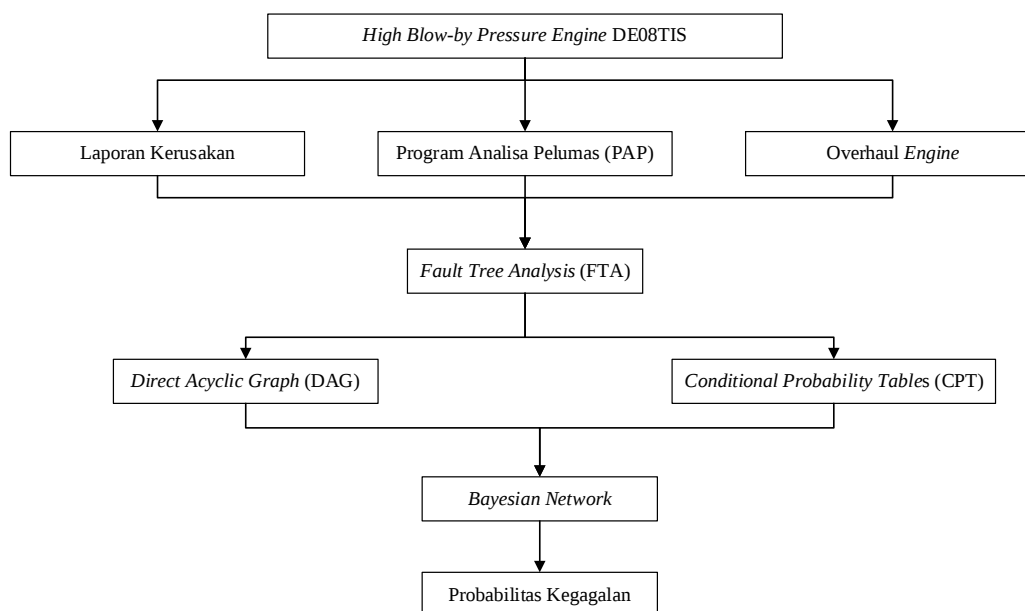
Pada *Conditional Probability Tables* (CPT), nilai probabilitas pada *probability distribution* dari kumpulan variabel acak dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2) [11].

$$P(A) = \sum P(A|B) P(B) \quad (2)$$

Persamaan (2) menunjukkan, bahwa untuk menentukan probabilitas terjadinya peristiwa A ($P(A)$) dapat menjumlahkan hasil perkalian setiap skenario antara probabilitas terjadinya peristiwa A dengan syarat terjadinya peristiwa B ($P(A|B)$) dengan probabilitas terjadinya peristiwa B ($P(B)$).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan gabungan dari penelitian kualitatif dan kuantitatif. Di mana, penelitian kualitatif akan dilakukan menggunakan metode *Fault Tree Analysis*, sedangkan penelitian kuantitatif akan dilakukan menggunakan metode *Bayesian Network*. Adapun model konseptual dalam menyelesaikan permasalahan ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Model konseptual

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, penelitian ini dimulai dengan menyelidiki data kegagalan berdasarkan laporan kerusakan yang berisi penyebab atau indikasi kegagalan apa saja yang telah/mungkin terjadi, kemudian Program Analisa Pelumas (PAP) yang berisi tentang kontaminasi apa saja yang telah merusak *oil engine*, serta data overhaul *engine* yang berisi dampak dari terjadinya kegagalan pada setiap komponen dalam bentuk dokumentasi

dan pengukuran. Sehingga, hasil yang didapatkan dari ketiga data tersebut akan ditentukan korelasinya dan ditampilkan dalam bentuk pohon kesalahan dengan tujuan untuk melihat proses serta hubungan dari setiap faktor penyebab yang terjadi.

Kemudian, hasil yang didapatkan dari metode FTA akan digambarkan dalam bentuk *Direct Acyclic Graph* (DAG), sedangkan skenario kegagalannya akan dirancang dalam bentuk *Conditional Probability Tables* (CPT). Sehingga, *output* yang dihasilkan ialah probabilitas kegagalan *high blow-by pressure* pada *engine* DE08TIS yang didapatkan dari metode *Bayesian Network*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi pasca terjadinya kegagalan pada unit *excavator* DX300LCA dengan mesin diesel DE08TIS ini dilakukan untuk mencari nilai probabilitas pada terjadinya kegagalan tersebut, serta menentukan proses serta hubungan antar faktor yang terlibat terhadap terjadinya kegagalan *high blow-by pressure engine*.

Hasil

Berdasarkan data laporan kerusakan, diesel *engine* DE08TIS ini mengalami kegagalan pada 666,2 HM dengan *complaint* terdapat *engine noise* dan *high blow-by pressure*. Adapun hasil inspeksi yang didapatkan pada pemeriksaan pada unit ialah didapatkan *blow-by smokes* yang terlalu banyak pada *engine*, adanya *abnormal sound* pada *cylinder* nomor 1 dan 2, serta ditemukannya *white grams* yang sangat banyak pada pelumas.

Engine tersebut dapat digolongkan pada kategori tidak normal, sebab pada standar perawatan, *engine* akan dilakukan perbaikan berupa overhaul pertama kali ialah pada saat waktu pemakaian *engine* telah menyentuh angka 8.000 HM pertama [23]. Kemudian, pada data PAP dilakukan pengecekan kontaminan menggunakan metode ASTM D5185 dan ditemukan adanya kontaminan *magnesium*, *zinc*, *calcium*, *phosphorus*, *molybdenum*, dan *boron* pada *oil engine* dengan kontaminan paling banyak dimiliki oleh *calcium* sebesar 2.671 ppm. Di mana, ke-enam kontaminan tersebut diduga berasal dari material *cooling water* dan bahan bakar yang mengalami kebocoran [24]. Dugaan tersebut diperkuat ketika dilakukan *physical test* pada *oil engine*, di mana ketika dilakukan pengecekan menggunakan metode ASTM E412 ditemukan adanya kandungan air sebanyak 1%. Nilai tersebut merupakan nilai yang sangat bahaya, mengingat air tidak boleh sama sekali ada menurut standar ASTM E412. Temuan tersebut mengakibatkan viskositas pada *oil engine* menjadi terganggu, sehingga proses pelumasan menjadi buruk dan laju korosi pada setiap komponen menjadi meningkat.

Selanjutnya, pada pengukuran *crankshaft* pada data overhaul *engine* ditemukan adanya penebalan komponen akibat dari panas tidak terkontrol yang disebabkan oleh pelumasan yang buruk. Di mana, standar *journal* diameter yang dimiliki oleh *crankshaft* milik mesin DE08TIS ini memiliki rentang antara 83,966 mm hingga 83,988 mm dengan toleransi maksimum sebesar 83,000 mm. sedangkan pada pin diameternya memiliki rentang diameter antara 70,971 mm hingga 70,990 mm dengan toleransi maksimum sebesar 70,000 mm. Namun, *journal* dan pin *crankshaft* nomor 2 yang dimiliki pada unit DX300LCA ini memiliki diameter yang melebihi standar hingga 84,091 mm dan 71.000 mm. Temuan data tersebut dapat menjawab atas kegagalan berupa *abnormal sound* seperti yang dituliskan pada laporan kerusakan.

Pembahasan

Berdasarkan hasil investigasi tersebut, didapatkan beberapa alasan atau penyebab yang yang terjadi pada kegagalan *high blow-by*, diantaranya:

1. Pengoperasian Buruk

Kegagalan mesin, cedera serius, serta kematian dapat disebabkan oleh pengoperasian mesin di lokasi berbahaya (*hazardous area*) [25]. Maka dari itu, operator merupakan garda terdepan bagi perusahaan untuk menjaga performa mesin. Sangat penting bagi operator untuk memahami keselamatan kerja dan pengoperasian. Selain untuk faktor teknis, keterampilan dan pengetahuan operator juga berpengaruh terhadap faktor non-teknis seperti *cost* perusahaan.

2. Kegagalan Mengompresi Udara

Pada faktanya, piston tidak akan mampu mengompresi udara di dalam combustion chamber secara penuh [26]. Namun, pada kondisi ini udara yang gagal dikompresi jumlahnya melebihi batas ketentuan. Sehingga, dugaan penyebab dari kegagalan tersebut ialah cylinder liner memiliki goresan yang terlalu banyak atau piston ring memiliki celah terlalu besar. Ini sangat berpotensi untuk terjadinya kegagalan mesin dalam melakukan pembakaran sempurna.

3. Celah Besar Pada *Piston Ring*

Kualitas dan kuantitas volume udara pada *combustion chamber* dipengaruhi oleh *piston ring* [27]. Sama halnya dengan kegagalan mengompresi udara, celah pada *piston ring* mempunyai peran penting dalam terjadinya kegagalan pembakaran di dalam ruang bakar.

4. *Cylinder Liner* Rusak

Berdasarkan data PAP, *oil engine* yang terkandung memiliki banyak kontaminan hingga merusak viskositas. Hal ini memicu terjadi korosi pada komponen, seperti *cylinder liner*. Sebab, komponen *engine* yang mengalami panas yang tidak terkontrol akan menciptakan kerusakan baru pada komponen lainnya [28]. Maka dari itu, kerusakan pada *cylinder liner* berimbas pada terjadinya kegagalan dalam mengompresi udara.

5. Korosi Pada Komponen

Korosi pada komponen mesin umumnya disebabkan oleh beban panas, suhu pengoperasian, interval pengurusan oli yang terlalu panjang, gesekan, dan keausan [29]. Namun, karena adanya proses pelubrikasi atau pendinginan yang buruk, maka komponen dari *engine* ini mengalami korosi. Dugaan tersebut didapatkan dari data PAP, sebab viskositas oli menjadi rusak karena adanya kebocoran pada jalur bahan bakar dan kebocoran *cooling water*.

6. Lubrikasi Buruk

Umumnya, pelubrikasi yang buruk terjadi karena penggunaan oli berkualitas rendah, ketidakpatuhan terhadap periode penggantian oli dan filter, penggunaan elemen sistem yang berlebihan, tekanan oli rendah, dan lain sebagainya [30]. Namun, pada kasus ini, kegagalan terjadi karena ditemukannya kontaminasi dari *cooling water* dan bahan bakar yang mengalami kebocoran. Hal tersebut menjadi salah satu dari penyebab terjadinya kerusakan pada setiap komponen.

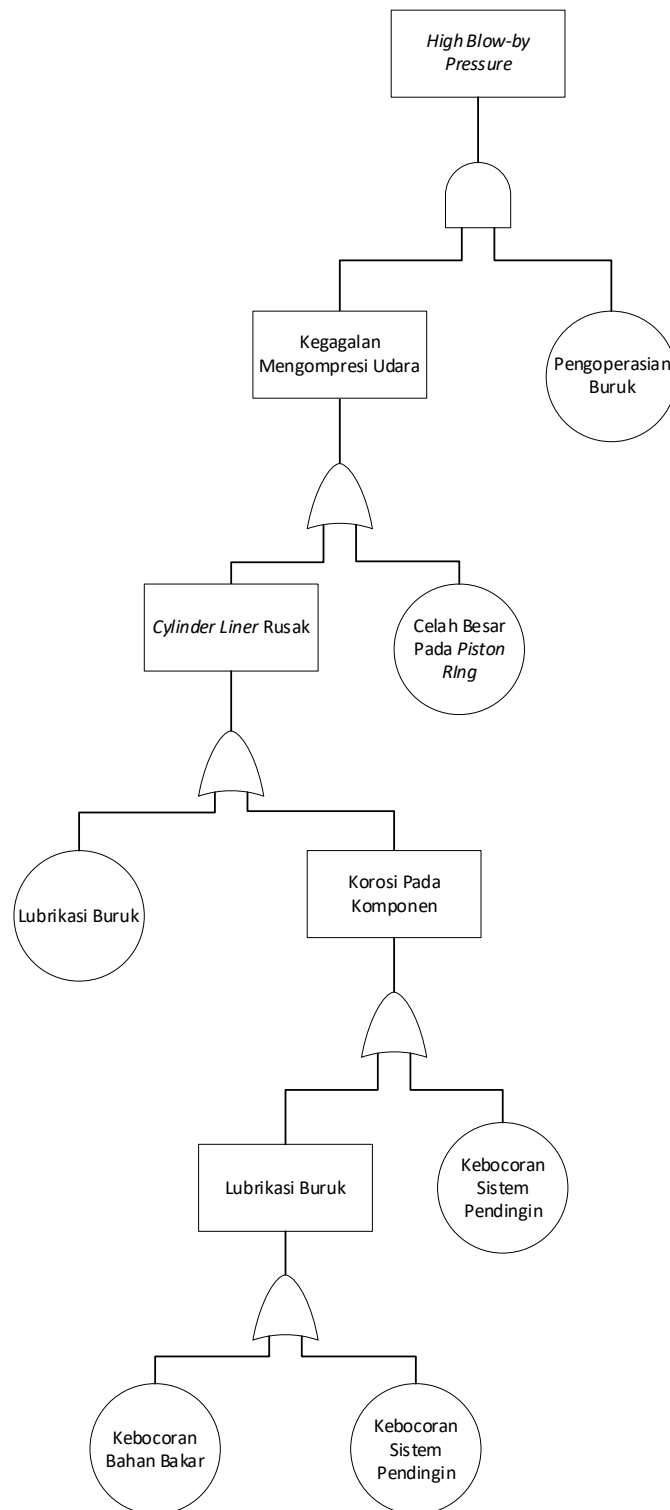
7. Kebocoran Bahan Bakar

Secara fundamental, suplai bahan bakar pada mesin diesel dilakukan oleh *injector* dengan cara memberikan tekanan tinggi hingga terjadi proses pengkabutan [31]. Namun berdasarkan data PAP, proses penyaluran bahan bakar pada diesel *engine* DE08TIS ini tidak berjalan secara sempurna karena mengalami kebocoran hingga masuk ke dalam *oil pan* dan merusak kandungan oli di dalamnya.

8. Kebocoran Sistem Pendingin

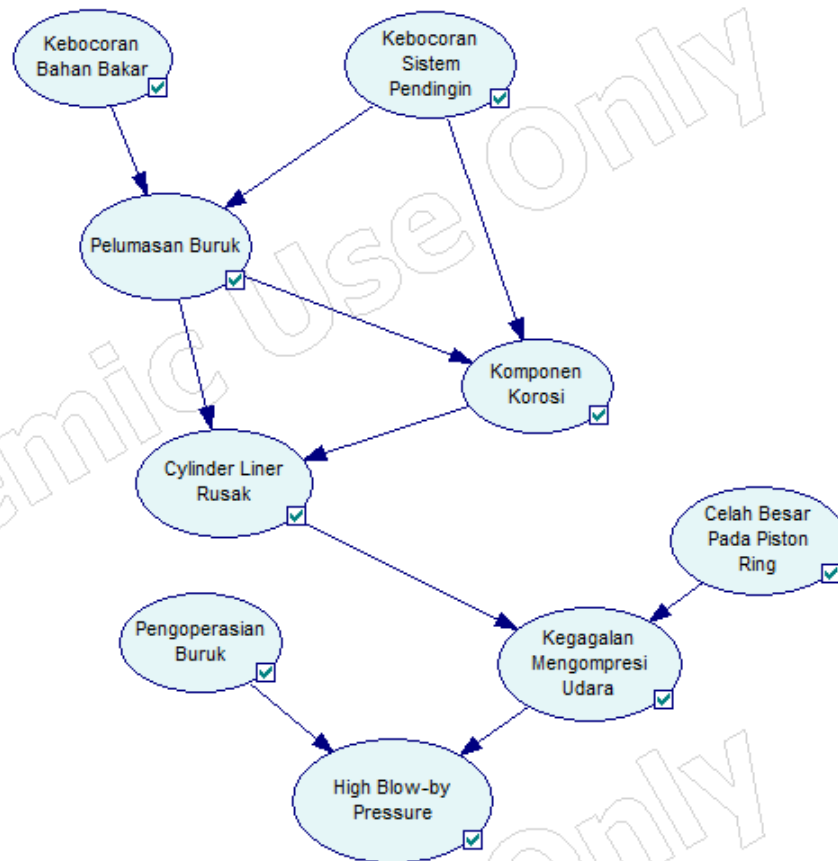
Salah satu peran penting dari adanya *cooling water* pada *internal combustion engine* adalah dapat menjaga suhu pada setiap silinder dan *cooling water* [32]. Namun, karena ditemukan adanya kebocoran pada jalur *cooling water* pada data PAP, maka laju korosi dari komponen *engine* menjadi meningkat lebih cepat.

Penyebab dari terjadinya *high blow-by* tersebut kemudian dapat disimpulkan dalam bentuk pohon kesalahan (*fault tree*) yang dapat diamati pada Gambar 2.



Gambar 2. Penyebab Terjadinya *High Blow-By Pressure*

Kemudian, setelah didapatkan pohon kesalahannya, maka analisis selanjutnya adalah melakukan kuantifikasi kegagalan pada terjadinya *top event*, yakni *high blow-by pressure*. Adapun DAG pada kasus kegagalan ini ditampilkan pada [Gambar 3](#).



Gambar 3. DAG Pada High Blow-By Pressure

Selanjutnya, nilai probabilitas pada setiap basic event pada kasus high blow-by pressure ini didapatkan dengan merujuk pada buku OREDA bagian combustion engines–Diesel engine [15] dikarenakan PT ABC tidak memiliki data penilaian kegagalan pada setiap faktor/jenis kegagalan. Adapun nilai probabilitas pada setiap basic event ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Probabilitas Pada Setiap Basic Event

Basic Event	Rata-Rata Laju Kerusakan ($\times 10^{-6}$ Hours)	Probabilitas Kegagalan ($t=666,2$ Hours)
Kebocoran Bahan Bakar	1,33	0,0008
Kebocoran Sistem Pendingin	12,1	0,0080
Celah Besar Pada Piston Ring	0,58	0,0003
Pengoperasian Buruk	17,8	0,0117

Sedangkan pada skenario kegagalan yang dirancang pada DAG *high blow-by pressure* dibangun dengan menggunakan logika *true* (benar) dan *false* (salah) dengan sistem penilaian yang diadopsi dari teori probabilitas, yakni probabilitas memiliki rentang nilai dari 0 hingga 1 [33]. Di mana, nilai terendah menunjukkan probabilitas dari suatu peristiwa tidak mungkin terjadi, sedangkan nilai tertinggi menunjukkan probabilitas dari suatu peristiwa pasti terjadi. Adapun, skenario tersebut dirancang berdasarkan ketetapan PT ABC dan ditampilkan pada *Conditional Probability Tables* (CPT) yang dapat diamati pada Tabel 3, Tabel 4, Tabel 5, Tabel 6 dan Tabel 7.

1. Pelumasan Buruk

Tabel 3. Skenario Kegagalan Pelumasan Buruk

Kebocoran Sistem Pendingin	Benar		Salah	
Kebocoran Bahan Bakar	Benar	Salah	Benar	Salah
Benar	1	0,8	0,3	0
Salah	0	0,2	0,7	1

2. Komponen Korosi

Tabel 4. Skenario Kegagalan Komponen Korosi

Pelumasan Buruk	Benar		Salah	
Kebocoran Sistem Pendingin	Benar	Salah	Benar	Salah
Benar	1	0,8	0,4	0
Salah	0	0,2	0,6	1

3. Cylinder Liner Rusak

Tabel 5. Skenario Kegagalan Cylinder Liner Rusak

Komponen Korosi	Benar		Salah	
Pelumasan Buruk	Benar	Salah	Benar	Salah
Benar	1	0,9	0,6	0
Salah	0	0,1	0,4	1

4. Kegagalan Mengompresi Udara

Tabel 6. Skenario Kegagalan Mengompresi Udara

Cylinder Liner Rusak	Benar		Salah	
Celah Besar Pada Piston Ring	Benar	Salah	Benar	Salah
Benar	1	0,6	0,9	0
Salah	0	0,4	0,1	1

5. High Blow-By Pressure

Tabel 7. Skenario Kegagalan Pada High Blow-By Pressure

Pengoperasian Buruk	Benar		Salah	
Kegagalan Mengompresi Udara	Benar	Salah	Benar	Salah
Benar	1	0,1	0,8	0
Salah	0	0,9	0,2	1

Dengan menggunakan Persamaan (2), maka akan didapatkan nilai probabilitas pada masing-masing skenario kegagalan. Proses kuantifikasi ini dilakukan menggunakan sistem *top-down* yang berarti, kuantifikasi dimulai dari *child* teratas (pelumasan buruk) hingga *child* terendah (*high blow-by pressure*). Adapun nilai probabilitas pada setiap skenario kegagalan ditunjukkan pada Tabel 8 dengan contoh perhitungan sebagai berikut:

Kebocoran Sistem Pendingin (KP)

Kebocoran Bahan Bakar (KB)

Pelumasan Buruk (PB)

$$P(\text{PB=benar}) = \sum P(\text{PB=benar}|\text{KP, KB}) P(\text{KP}) P(\text{KB})$$

$$P(\text{PB=benar}) = P(\text{PB=benar}|\text{KP=benar, KB=benar}) P(\text{KP=benar}) P(\text{KB=benar}) + \\ P(\text{PB=benar}|\text{KP=benar, KB=salah}) P(\text{KP=benar}) P(\text{KB=salah}) + \\ P(\text{PB=benar}|\text{KP=salah, KB=benar}) P(\text{KP=salah}) P(\text{KB=benar}) + \\ P(\text{PB=benar}|\text{KP=salah, KB=salah}) P(\text{KP=salah}) P(\text{KB=salah})$$

$$P(\text{PB=benar}) = (1 \times 0,008 \times 0,0008) + (0,8 \times 0,008 \times (1-0,0008)) + (0,3 \times (1-0,008) \times$$

$$\begin{aligned}
 & 0,0008) + (0 \times (1-0,008) \times (1-0,0008)) \\
 P(\text{PB=benar}) &= 0,0066 \\
 P(\text{PB=salah}) &= 1 - P(\text{PB=benar}) \\
 P(\text{PB=salah}) &= 1 - 0,0066 = 0,9933
 \end{aligned}$$

Tabel 8. Probabilitas Pada Setiap Skenario Kegagalan

<i>State</i>	Pelumasan Buruk	Komponen Korosi	<i>Cylinder Liner Rusak</i>	Kegagalan Mengompresi Udara	<i>High Blow-By Pressure</i>
Benar	0,0066	0,0072	0,0072	0,0046	0,0049
Salah	0,9933	0,9927	0,9927	0,9953	0,9950

Hasil yang didapatkan pada **Tabel 8** menunjukkan bahwa kemungkinan untuk terjadinya *high blow-by pressure* adalah jarang terjadi. Hal tersebut dikarenakan terdapat beberapa parameter yang harus dipenuhi untuk terjadinya *high blow-by pressure*, diantaranya *countable* parameter seperti *mean effective pressure*, kecepatan *engine*, dan beban *engine*, juga *uncountable* parameter seperti keausan komponen [34]. Maka dari itu, untuk mengetahui langkah perawatan seperti apa yang paling efektif untuk dilakukan guna mencegah atau meminimalisir kegagalan serupa, perlu adanya proses lanjutan berupa analisis sensitivitas.

Analisis sensitivitas merupakan proses perhitungan kestabilan hasil untuk dapat mengambil suatu keputusan [35]. Proses ini dilakukan menggunakan Persamaan (2) dengan cara mengasumsikan suatu peristiwa memiliki probabilitas pasti terjadi atau bernilai 1, sehingga akan terlihat probabilitas baru pada *top event*. Berikut adalah contoh perhitungan pada analisis sensitivitas yang kemudian hasil keseluruhan pada analisis sensitivitas ditampilkan pada **Gambar 4**.

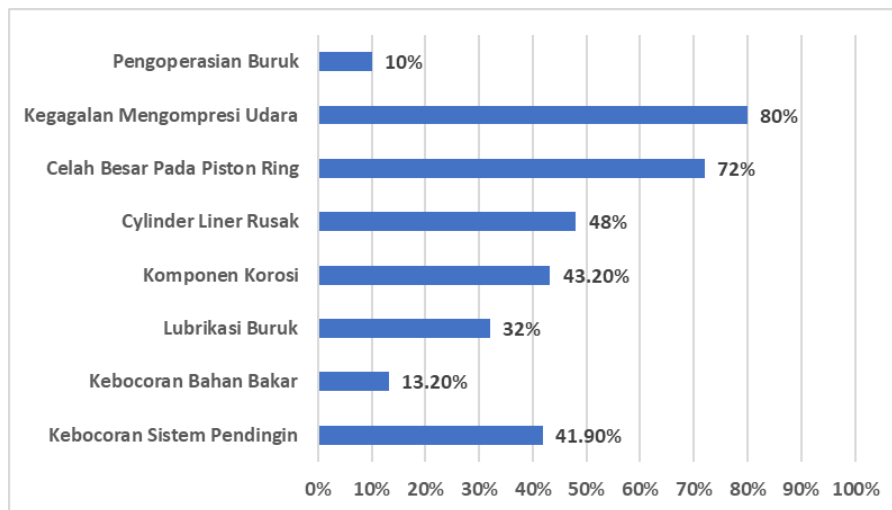
High Blow-by Pressure (HP)

Pengoperasian Buruk (PB)

$$\begin{aligned}
 P(\text{HP=benar}) &= \sum P(\text{HP=benar}|\text{PB}) P(\text{PB}) \\
 P(\text{HP=benar}) &= P(\text{HP=benar}|\text{PB=benar}) P(\text{PB=benar}) + P(\text{HP=benar}|\text{PB=salah}) P(\text{PB=salah}) \\
 P(\text{HP=benar}) &= (0,1 \times 1) + (0 \times 0) \\
 P(\text{HP=benar}) &= 0,1 \approx 10\%
 \end{aligned}$$

Analisis sensitivitas ini menunjukkan seberapa penting penanan dari setiap variabel terhadap terjadinya kegagalan *high blow-by pressure*. Sebab, proses ini menganalisis perubahan probabilitas *high blow-by pressure* apabila salah satu atau lebih variabel di bawahnya diasumsikan benar-benar terjadi. Skenario yang telah dibangun pada CPT merupakan hal vital dari analisis sensitivitas. Sebab, semakin besar nilai probabilitas pada CPT, maka akan semakin besar pula pengaruhnya terhadap terjadinya *top event* (*high blow-by pressure*).

Pada **Gambar 4** ditunjukkan bahwa penyebab paling besar terhadap terjadinya *high blow-by pressure* adalah kegagalan dalam mengompresi udara dengan nilai sensitivitas sebesar 80%. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan proses pembakaran pada mesin membutuhkan kandungan udara [36]. Sedangkan, faktor celah besar pada *piston ring* memiliki nilai sensitivitas terbesar kedua terhadap terjadinya *high blow-by pressure*, yakni sebesar 72%. Penyebabnya dikarenakan ring piston merupakan komponen kunci pada mesin, sebab ring piston memiliki peran untuk mencegah udara tembus melalui celah antara piston dengan *cylinder liner* [27].



Gambar 4. Analisis Sensitivitas

Berdasarkan hasil kuantifikasi kegagalan ini, didapatkan nilai probabilitas dari terjadinya *high blow-by pressure* pada Doosan excavator DX300LCA sebesar 0,0049 dengan penyebab utamanya ialah terjadinya kegagalan dalam mengompresi udara. Berdasarkan hasil tersebut, sangat penting bagi perusahaan untuk melakukan pembaharuan pada kegiatan perawatan dan perbaikan mesin untuk mencegah terjadinya kegagalan mengompresi udara, seperti memfokuskan kegiatan *preventive maintenance* pada pengecekan kualitas oli, pelumasan pada *universal joints*, pengecekan *valve lash*, dan lain sebagainya [23]. Mengingat, alat berat memiliki beban pekerjaan yang berat, sehingga perlu merancang kegiatan perawatan yang lebih akurat pada setiap *cluster* kegagalan agar terhindar dari kegagalan sebelum dilakukan perbaikan.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Berdasarkan hasil kuantifikasi kegagalan *high blow-by pressure* pada Doosan excavator DX300LCA ini, dapat diambil kesimpulan bahwa terjadinya kegagalan ini diawali dengan terjadinya proses pengompresian udara yang buruk/gagal diiringi dengan pengoperasian unit yang buruk. Pengompresian udara yang buruk ini dapat terjadi karena adanya celah yang terlalu besar pada piston ring atau terjadi kerusakan pada *cylinder liner*. Kerusakan pada *cylinder liner* tersebut terjadi karena sistem lubrikasi yang berjalan buruk atau terjadinya korosi pada komponen mesin. Di mana, korosi ini dapat terjadi karena jalur pendinginan yang bocor atau proses lubrikasi yang berjalan buruk. Adapun buruknya proses lubrikasi ini disebabkan oleh kebocoran pada jalur bahan bakar atau kebocoran pada sistem pendingin.

Dengan menggunakan metode *Bayesian Network*, didapatkan probabilitas terjadinya *high blow-by pressure* adalah sebesar 0,0049. Adapun, penyebab paling besar terhadap terjadinya *high blow-by* ini disebabkan oleh kegagalan dalam mengompresi udara dengan nilai sensitivitas sebesar 80%. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan proses pembakaran pada mesin membutuhkan kandungan udara. Sehingga hal tersebut merupakan hal yang sangat krusial untuk dilakukan perawatan.

Saran

Berdasarkan proses serta hasil yang didapatkan pada penelitian ini, Penulis menyarankan kepada perusahaan untuk melakukan pembaharuan pada kegiatan perawatan dan perbaikan mesin untuk mencegah terjadinya kegagalan serupa, dengan cara memfokuskan kegiatan *preventive maintenance* pada ruang bakar mesin.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] Darongke, B., "Penegakan Hukum Terhadap Pertambangan Tanpa Izin Menurut Undang-Undang Nomor 4 Tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara," *Lex Soc.*, vol. 5, no. 10, 2017.
- [2] Herman, O. K. Haris, S. Hidayat, Handrawan, Heryanti, and M. F. Masulili, "Penegakan Hukum Terhadap Tindak Pidana Penambangan Mineral di Kawasan Hutan Tanpa Izin," vol. 4, no. 2, pp. 261–275, 2022.
- [3] Hartana, "IMPLIKASI EKSPANSI PERUSAHAAN GROUP PADA SEKTOR PERTAMBANGAN BATUBARA DI INDONESIA," *J. Pendidik. Kewarganegaraan Undiksha*, vol. 10, no. 1, pp. 251–260, 2022.
- [4] Application Engineer Departement PT. United Tractors Tbk, "Manajemen Alat-Alat Berat," *PT. United Tractors Tbk*, p. 1, 2020.
- [5] Mishimoto, "Blow-by 101: What is Blow-by and How to Keep it from Ruining Your Engine," *Mishimoto*, 2016.
- [6] Basic Mechanic Course, "Pengertian Blow-by Pressure Engine," 2022.
- [7] D. J. Sribantolo and B. Suharnadi, "Analisis Kerusakan Engine High Blow-By Pressure Pada Mesin SA6D125E-2 UNIT bulldozer D85ESS-2A," *J. Mater. Teknol. Proses War. Kemajuan Bid. Mater. Tek. Teknol. Proses*, vol. 2, no. 2, p. 17, 2021, doi: 10.22146/jmtp.69458.
- [8] K. Chen, H. W. Chen, A. Bisantz, S. Shen, and E. Sahin, "Where Failures May Occur in Automated Driving : A Fault Tree Analysis Approach," *J. Cogn. Eng. Decis. Mak.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–19, 2022, doi: 10.1177/15553434221116254.
- [9] Z. R. Nurfatha and D. Herwanto, "Analisis Pengendalian Kualitas Pada Unit SV-521 DI PT. XYZ Menggunakan Metode Fault Tree Analysis," *J-ENSISTEC (Journal Eng. Sustain. Technol.*, vol. 09, no. 02, pp. 766–773, 2023.
- [10] A. Nuryono, H. Kurnia, E. B. Tambunan, and T. N. Wiyatno, "Analisis Kinerja Keselamatan Dan Kesehatan Kerja (K3) Pada Proses Produksi Saus Dengan Metode Fault Tree Analysis," *J. Ilm. Tek. Ind.*, vol. 11, no. 2, pp. 141–154, 2023.
- [11] S. Xu, E. Kim, S. Haugen, and M. Zhang, "A Bayesian network risk model for predicting ship besetting in ice during convoy operations along the Northern Sea Route," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 223, no. November 2021, p. 108475, 2022, doi: 10.1016/j.ress.2022.108475.
- [12] R. Zhou, W. Fang, and J. Wu, "A risk assessment model of a sewer pipeline in an underground utility tunnel based on a Bayesian network," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 103, no. April, p. 103473, 2020, doi: 10.1016/j.tust.2020.103473.
- [13] Y. T. Li, X. N. He, and J. Shuai, "Risk analysis and maintenance decision making of natural gas pipelines with external corrosion based on Bayesian network," *Pet. Sci.*, vol. 19, no. 3, pp. 1250–1261, 2022, doi: 10.1016/j.petsci.2021.09.016.
- [14] S. Kabir, M. Taleb-Berrouane, and Y. Papadopoulos, "Dynamic Reliability Assessment of Flare Systems by Combining Fault Tree Analysis and Bayesian Networks," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, pp. 1–19, 2019.
- [15] OREDA, *Offshore Reliability Data Handbook 4th Edition (Combustion Engines-Diesel Engine)*. 2002.
- [16] M. Hasbi, R. Mujiastuti, D. M. Sarip, M. Hasbi, and M. Syarip, "Penerapan Metode Bayesian Network Dalam Aplikasi E-Learning Berbasis Web," *JUST IT J. Sist. Informasi, Teknol. Inf. Dan Komput.*, vol. 7, no. 2, pp. 36–44, 2017.
- [17] O. Arslan, Y. Zorba, and J. Svetak, "Fault Tree Analysis of Tanker Accidents during Loading and Unloading Operations at the Tanker Terminals," *J. ETA Marit. Sci.*, vol. 6, no. 1, pp. 3–16, 2018, doi: 10.5505/jems.2018.29981.

-
- [18] Y. Ahn, Y. Yu, and J. Kim, "Accident Cause Factor of Fires and Explosions in Tankers Using Fault Tree Analysis," *Mar. Sci. Eng.*, pp. 1–12, 2021.
- [19] A. Alijoyo, B. Wijaya, and I. J. Jacob, *Analisis Pohon Kesalahan (Fault Tree Analysis)*. 2021.
- [20] E. Nugraha *et al.*, "Analisis Defect dengan Metode Fault Tree Analysis dan Failure Mode Effect Analysis," vol. 02, no. 02, pp. 62–72, 2019.
- [21] A. Lestari and N. A. Mahbubah, "Analisis Defect Proses Produksi Songkok Berbasis Metode FMEA dan FTA di Home - Industri Songkok GSA Lamongan," *Serambi Eng.*, vol. VI, no. 3, 2021.
- [22] Y. Wang, H. Yang, X. Yuan, and Y. Cao, "An improved Bayesian network method for fault diagnosis," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 21, pp. 341–346, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.09.443.
- [23] Mekanik Hydro, "SOP Maintenance Alat Berat Untuk Unit Tambang & Konstruksi," *Hydropower*, 2022.
- [24] J. S. Evans, "Where Does All That Metal Come From?," 2010.
- [25] A. Shringi, M. Arashpour, E. M. Golafshani, and A. Rajabifard, "Efficiency of VR-Based Safety Training for Construction Equipment : Hazard Recognition in Heavy Machinery Operations," *Buildings*, pp. 1–23, 2022.
- [26] N. Gu, "Examination of the effect of combustion chamber geometry and mixing ratio on engine performance and emissions in a hydrogen-diesel dual-fuel ScienceDirect Examination of the effect of combustion chamber geometry and mixing ratio on engine performance and," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 7, pp. 2801–2820, 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.155.
- [27] W. Hu, "A visual inspection system for detecting end gap and light leakage of the piston ring," vol. 10, no. 3, pp. 3–6, 2023.
- [28] H. Purwono and Rasma, "Analisis Terjadinya Panas Berlebihan pada Mesin Dump Truck HD785-7," *Semin. Nas. Sains dan Teknol. 2019*, pp. 1–10, 2019.
- [29] A. Maleque, S. Y. Cetin, M. Hassan, M. H. Sulaiman, and A. H. Rosli, "A systematic review on corrosive-wear of automotive components materials," vol. 35, no. January, pp. 33–49, 2022.
- [30] M. S. Pulatovich, K. Turgunbay, and R. M. Iskandarovich, "Car Engine Lubrication System Maintenance And Repair," vol. 1, no. 2, pp. 250–260, 2023.
- [31] Q. Masodiqov, "Modern Trends In Improving The Fuel Supply System," vol. 03, no. 06, pp. 294–301, 2023.
- [32] S. Qin, C. Xie, S. Li, Q. Yang, J. Chen, and K. Sun, "CFD Analysis and Optimization of a Diesel Engine Cooling Water Jacket," 2022, doi: 10.32604/fdmp.2022.017519.
- [33] P. Vadapali, "Bayesian Network Example [With Graphical Representation]," *upgrad*, 2021.
- [34] S. Gargate, R. Aher, R. Jacob, and S. Dambhare, "Estimation of Blow-by in Diesel Engine : Case Study of a Heavy Duty Diesel Engine," *Int. J. Emerg. Eng. Res. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 165–170, 2014.
- [35] I. A. G. Wiguna, K. N. Semadi, I. G. I. Sudipa, and I. K. J. Septiawan, "Analisis Sensitivitas Prioritas Kriteria Pada Metode Analytical Hierarchy Process (Kasus Penentuan Pemberian Kredit)," *J. Sains Komput. Inform.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–11, 2022.
- [36] S. Ramadhani, "ANALISA PERHITUNGAN PEMBAKARAN PADA MOTOR DIESEL EMPAT LANGKAH," *J. Laminar*, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, 2019.