

ANALISIS KEGAGALAN POMPA ANGGUK DI HEAVY OIL OPERATING UNIT PT. CVX DENGAN METODE FAULT TREE ANALYSIS

Nama mahasiswa : Joko Laksono
NRP : 9111.202.713
Pembimbing : Tri Joko Wahyu Adi ST. MT. PhD

ABSTRAK

Pompa angguk adalah alat utama yang digunakan untuk mengangkat minyak jenis *Heavy Oil* dari dalam bumi oleh PT. CVX di Indonesia. Jumlah produksi sangat tergantung dari tingkat ketersediaan dan keandalan pompa angguk tersebut. Berdasarkan data tahun 2011 – 2012 ditemukan 3805 kasus kegagalan dari 5405 populasi yang menyebabkan pompa angguk tidak beroperasi. Biaya yang dikeluarkan sekitar USD 1,4 juta untuk *unplanned shutdown*, USD 7,8 juta untuk *planned shutdown* dan USD 2,4 juta untuk perawatan rutin.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan, menganalisa probabilitas kegagalan, mengidentifikasi sumber yang paling mempengaruhi kegagalan dan menentukan pencegahan untuk mengurangi kegagalan pompa angguk dengan menggunakan metode *fault tree analysis*. Metode penyusunan pohon kegagalan atau *logic tree* menggunakan *Focus Group Discussion* (FGD) dan penentuan nilai probabilitas penyebab kegagalan atau *basic event* dilakukan menggunakan data sekunder dan observasi lapangan.

Hasil dari penelitian ini mendapatkan 32 penyebab kegagalan. Probabilitas penyebab kejadian puncak (*top event*) pada pohon kegagalan sebesar 0,6342. Sumber penyebab kegagalan yang tinggi adalah pada roda gigi atau *gearbox*, bantalan struktur dan panel kontrol. Pencegahan yang diperlukan untuk mengurangi terjadinya kegagalan pompa angguk adalah dengan memperbaiki kualitas dari ketiga komponen tersebut yaitu roda gigi, bantalan struktur dan panel kontrol. Uji perbaikan dilakukan pada tiga komponen tersebut. Dari hasil uji perbaikan selama 5 bulan didapatkan penurunan nilai probabilitas kejadian puncak menjadi 0,5141.

PUMPING UNIT FAILURE ANALYSIS IN HEAVY OIL OPERATING UNIT PT. CVX USING FAULT TREE ANALYSIS

By : Joko Laksono
Student Identity Number : 9111202713
Advisor : Tri Joko Wahyu Adi ST. MT. PhD

ABSTRACT

Pumping unit is the primary lifting equipment used to pump out heavy oil from underground reservoir by PT. CVX in Indonesia. Production rate depends on the level of availability and reliability of the pumping unit. Based on data from 2011-2012, it has been found 3805 failure cases of 5405 populations brought in nonoperation of the pumping unit. Costs incurred for those matters were approximately \$ 1.4 million for unplanned shutdown, USD 7.8 million for planned shutdown and USD 2.4 million for routine maintenance.

This research has objectives to identify failure root causes, analyze failure probabilities, identify the most influencing failure and determine preventive action to reduce pumping unit failure using Fault Tree Analysis method. The Fault Tree Analysis method or logic tree uses Focus Group Discussion (FGD) and determination of basic event probability value is conducted using secondary data and field observations.

This research results in 32 basic event failures. Top event probability of logic tree is 0.6342. The main causes of failure occurred on the gearbox, bearing structure and control panel. Preventive action that required to reduce pumping unit failure is by improving the quality of the all three components: gearbox, bearing structure and control panel. Repairs test was carried out on those three components. The repairs test result for 5 months shows decrease value of top event probability is 0.5141.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Proses Perolehan Minyak Bumi

Hawkins & Singhal (2004) menjelaskan secara umum perolehan minyak bumi dapat dikategorikan menjadi tiga metode:

1. *Primary Recovery*

Proses perolehan minyak dengan cara aliran alamiah (*flowing*). Misalnya: tekanan air yang menuju sumur (*well*), aliran gas menuju ke permukaan sumur dan ekspansi gas yang terlarut dalam minyak bumi yang menyebabkan minyak terdorong ke arah sumur.

2. *Secondary Recovery*

Perolehan minyak dengan cara memberikan tambahan energi dari luar untuk mendorong minyak ke arah reservoir. Energi tambahan tersebut bisa berupa air yang disuntikkan ke dalam bumi (*water injection*) atau gas alam yang disuntikkan ke bumi (*natural gas injection*).

3. *Tertiary Recovery*

Perolehan minyak dengan cara mengubah karakteristik fluida dan batuan reservoir. Metode ini dibagi menjadi empat kategori, yaitu:

- a. Injeksi dengan Kimia (*Chemical: surfactant, polymer dan caustic*).
- b. Injeksi dengan panas (*Thermal: steam simulation, steam or hot water*).
- c. Injeksi dengan pelarut (*Miscible: CO₂, miscible solvent, inner gas*).
- d. Injeksi dengan bentuk lainnya (*Microbial, electrical, chemical leaching, mechanical seperti vibrasi dan horizontal drilling*).

Pada perkembangan metode *tertiary recovery* yang populer dilaksanakan di seluruh dunia dinamakan dengan *Enhance Oil Recovery* (EOR) yang akan dibahas di sub bab berikut ini.

2.2 Perolehan Minyak dengan *Enhance Oil Recovery*

Lake (1992) menjelaskan tujuan dari proses *Enhanced Oil Recovery (EOR)* adalah untuk memobilisasi minyak yang tersisa setelah *primary recovery*. EOR adalah suatu metode dimana materi pendorong disuntikkan ke dalam reservoir minyak dari sumur injeksi. Materi pendorong ini dapat berupa:

- Air (*Water flooding*).
- Materi panas (*Thermal methods*).
- Metode Kimia (*Chemical methods*).
- Bahan pelarut (*Miscible methods*).

2.2.1 *Enhance Oil Recovery* Menggunakan Metode *Water Flooding*

Perolehan minyak metode *Water Flooding* adalah menambahkan tekanan reservoir dengan menginjeksikan air untuk mendorong minyak ke permukaan. Air diinjeksikan pada sumur injeksi dengan pola tertentu, untuk mengoptimalkan mekanisme pendorongan menuju sumur produksi.

Ketika fase awal *Water Flood*, produksi minyak akan meningkat karena dorongan tambahan dari injeksi air. Dan setelah beberapa lama:

- a) *Oil water contact* akan bergeser dan *water cut* sumur mulai meningkat.
- b) Akhirnya air injeksi akan mencapai sumur produksi dan hanya air yang akan dihasilkan.

Ilustrasi EOR menggunakan *water flooding* bisa dilihat pada Gambar 2. 1

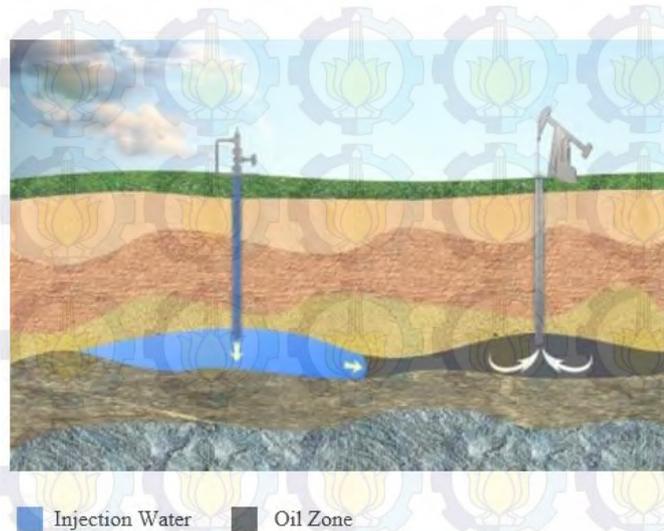
2.2.2 *Enhance Oil Recovery* Menggunakan *Steam Flooding*

Metode ini dipergunakan pada lapangan minyak dengan jenis minyak berat (*heavy oil*) dengan cara menginjeksi uap yang memiliki kualitas mendekati 80% kedalam formasi yang berada di bawah permukaan tanah (*Reservoir*).

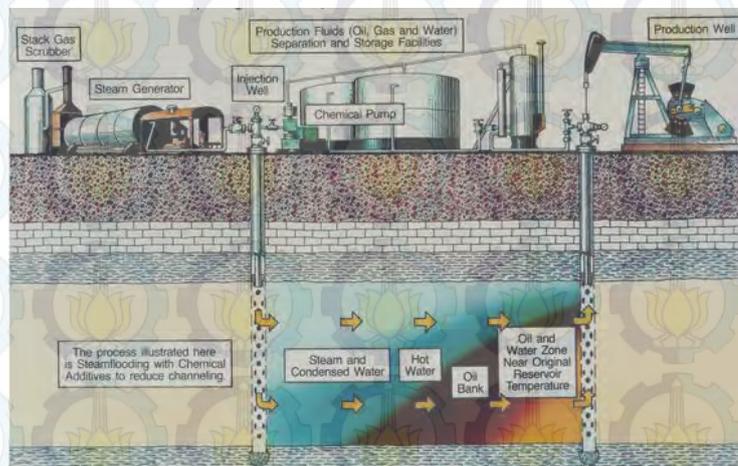
Mekanisme ini dapat meningkatkan perolehan minyak dengan cara:

- a. Memanaskan minyak sehingga minyak menjadi cair dan juga menurunkan viskositasnya.
- b. Merubah karakteristik fluida dan batuan *reservoir*.
- c. Tekanan yang tinggi mendorong minyak ke sumur produksi.

Gambar 2. 2 adalah ilustrasi EOR menggunakan *steam flooding (thermal method)*.



Gambar 2. 1 Ilustrasi *Enhance Oil Recovery* Menggunakan *Water Flooding* (Amerexco, 2011)



Gambar 2. 2 Ilustrasi EOR Menggunakan *Steam Flooding* (Pet-Oil , 2012)

2.3 Pemilihan *Artificial Lift*

Fatahi dkk. (2012) menjelaskan peralatan buatan dalam proses pengangkatan minyak bertujuan untuk meningkatkan jumlah aliran minyak mentah atau air dari sumur produksi. Hal ini umumnya dicapai dengan menggunakan alat mekanis di dalam sumur (dikenal sebagai pompa atau *velocity string*) atau dengan menurunkan berat hidrostatik dengan menyuntikkan gas pada jarak tertentu dari sumur produksi. *Artificial lift* dibutuhkan ketika tekanan yang kurang memadai di

dalam reservoir untuk mengangkat cairan yang diproduksi ke permukaan.

Pemilihan *artificial lift* bisa dilihat pada Tabel 2. 1.

Tabel 2. 1 Pemilihan *Artificial Lift*

<i>Operating Parameters</i>	<i>Positive displacement pumps</i>			<i>Dynamic displacement pumps</i>		<i>Gas lift</i>	<i>Plunger lift</i>
	<i>Rod pump</i>	<i>PCP</i>	<i>Hydraulic Piston</i>	<i>ESP</i>	<i>Hydraulic Jet</i>		
<i>Typical Operating Depth (TVD)</i>	100 to 11000 ft	2000 to 4500 ft	7500 to 10000 ft		5000 to 10000 ft	5000 to 10000 ft	To 8000 ft
<i>Maximum Operating Depth (TVD)</i>	16000 ft	6000 ft	17000 ft	15000 ft	15000 ft	15000 ft	20000 ft
<i>Typical Operating</i>	5 - 1500	5 - 2200	5 - 500	100 - 30000	300 - 4000	100 - 10000	1 - 5 BFPD
<i>Volume</i>	BFPD	BFPD	BFPD	BFPD	BFPD	BFPD	
<i>Maximum Operating Volume</i>	6000 BFPD	4500 BFPD	4000 BFPD	40000 BFPD	>15000 BFPD	30000 BFPD	200 BFPD
<i>Typical Operating Temperature</i>	100 - 300 °F	75 - 150 °F	100 - 250 °F		100 - 250 °F	100 - 250 °F	120 °F
<i>Maximum Operating temperature</i>	550 °F	250 °F	500 °F	400 °F	500 °F	400 °F	500 °F
<i>Typical Wellbore Deviation</i>	0 - 20 deg landed pump	N/A	0 - 20 deg landed pump		0 - 20 deg hole angle	0 - 50 deg	N/A
<i>Maximum Wellbore Deviation</i>	0 - 90 deg landed pump	0 - 90 deg < 15 deg/100 ft	0 - 90 deg < 15 deg/100 ft	0 - 90 deg	0 - 90 deg < 24 deg/100 ft	70 deg, short to medium radius	80 deg
<i>Corrosion handling</i>	Good to excellent	Fair	Good	Good	Excellent	Good to excellent	Excellent

<i>Operating Parameters</i>	<i>Positive displacement pumps</i>			<i>Dynamic displacement pumps</i>		<i>Gas lift</i>	<i>Plunger lift</i>
	<i>Rod pump</i>	<i>PCP</i>	<i>Hydraulic Piston</i>	<i>ESP</i>	<i>Hydraulic Jet</i>		
<i>Gas handling</i>	<i>Fair to good</i>	<i>Good</i>	<i>Fair</i>	<i>Fair</i>	<i>Good</i>	<i>Excellent</i>	<i>Excellent</i>
<i>Solids handling</i>	<i>Fair to good</i>	<i>Excellent</i>	<i>Poor</i>	<i>Fair</i>	<i>Good</i>	<i>Good</i>	<i>Poor to Fair</i>
<i>Fluid gravity</i>	<i>>8^o API</i>	<i><35^o API</i>	<i>>8^o API</i>	<i>>10^o API</i>	<i>>8^o API</i>	<i>>15^o API</i>	<i>GLR = 300 SCF/Bbl per 1000 ft of depth</i>
<i>Servicing</i>	<i>Workover or pulling rig</i>	<i>Workover or pulling rig</i>	<i>Hydraulic or wireline</i>	<i>Workover or pulling rig</i>	<i>Hydraulic or wireline</i>	<i>Wireline or workover rig</i>	<i>Wellhead catcher or wireline</i>
<i>Prime mover</i>	<i>Gas or electric</i>	<i>Gas or electric</i>	<i>Multicylinder or electric</i>	<i>Electric motor</i>	<i>Multicylinder or electric</i>	<i>Compressor</i>	<i>Well's natural energy</i>
<i>Offshore applications</i>	<i>Limited</i>	<i>Good</i>	<i>Good</i>	<i>Excellent</i>	<i>Excellent</i>	<i>Excellent</i>	<i>N/A</i>
<i>System efficiency</i>	<i>45 – 60 %</i>	<i>40 – 70 %</i>	<i>45 – 55 %</i>	<i>35 – 60 %</i>	<i>10 – 30 %</i>	<i>10 – 30 %</i>	<i>N/A</i>

ESP: *Electric Submersible Pump System*

PCP: *Progressive Cavity Pump*

Sumber : Brown (1977)

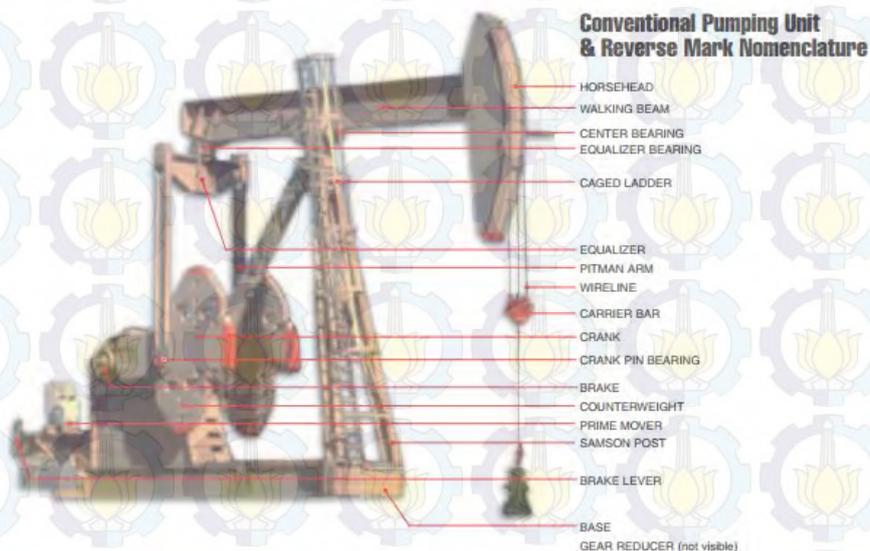
2.4 Definisi Pompa Angguk (*Pumping Unit*)

Langston (2003) menjelaskan bahwa *Pumping unit* atau *Sucker rod pump* yang di Indonesia dikenal dengan nama pompa angguk adalah jenis pompa mekanik yang banyak digunakan di industri perminyakan di dunia. *Pumping unit* mengubah gerak berputar (*rotation*) dari motor listrik menjadi gerak naik-turun atau *translation* yang akan digunakan untuk mengangkat minyak dari dalam perut bumi.

Aplikasi sistem pompa angguk yang digunakan untuk industri perminyakan adalah menggunakan rekomendasi API (*American Petroleum Institute*) 11 E untuk perhitungan kekuatan *design* (rancang bangun).

Untuk merubah gerak rotasi menjadi gerak translasi, pompa angguk menggunakan lengan yang dihubungkan dengan *gearbox* yang kedua ujungnya dipasang bantalan (*bearing*). Ada beberapa komponen utama yang harus diperhitungkan baik dari sisi disain maupun dari sisi perawatan. Komponen utama pompa angguk adalah sebagai berikut : *Horse head*, *walking beam*, *center bearing*, *equalizer*, *equalizer bearing*, *pitman arm*, *carrier bar*, *crank*, *crank pin/wrist pin bearing*, *brake* (rem), *counter weight*, *Samson post*, *gear reducer* (*gearbox*), *base*, *prime mover* (motor listrik), dan sistem elektrik / instrumentasi.

Gambar 2. 3 berikut adalah posisi komponen-komponen utama pada pompa angguk.



Gambar 2. 3 Komponen Pompa Angguk (Lufkin, 2009)

2.5 Kegagalan dan Laju Kegagalan

Menurut Priyanta (2000) kegagalan dapat didefinisikan sebagai terhentinya kemampuan sesuatu yang dapat berupa komponen maupun berupa satu sistem yang kompleks. Kegagalan pada komponen dapat dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu:

1. Kegagalan primer (*primary failure*).

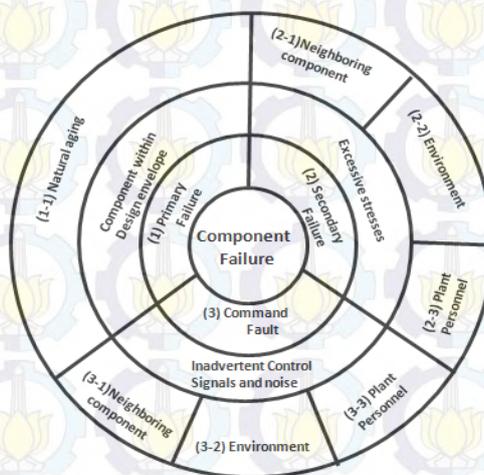
2. Kegagalan sekunder (*secondary failure*).
3. Kesalahan perintah (*command faults*).

Kegagalan primer adalah kegagalan dari sebuah komponen dimana komponen tersebut memang diperhitungkan mengalami kerusakan, sehingga diperlukan perbaikan agar komponen tersebut bisa digunakan.

Kegagalan sekunder adalah kegagalan dari sebuah komponen di luar dari yang diperhitungkan. Dengan kata lain kegagalan sekunder adalah kegagalan yang diakibatkan oleh kondisi yang melebihi dari yang direncanakan.

Kesalahan perintah adalah kegagalan sebuah komponen akibat dari kesalahan sistem kontrol atau kontrol daya. Contoh dari kesalahan perintah adalah *control valve* yang menutup terlalu cepat akibat kesalahan signal yang diterima. Padahal dalam kondisi tersebut *control valve* tidak boleh tertutup.

Gambar 2. 4 menunjukkan karakteristik kegagalan dari sebuah komponen. Lingkaran pertama yang mengelilingi lingkaran yang bertuliskan *component failure* menunjukkan bahwa kegagalan komponen disebabkan oleh (1) *primary failure*, (2) *secondary failure* atau (3) *command faults*. *Primary failure* disebabkan oleh *component within design envelope*, *secondary failure* disebabkan oleh *excessive stresses*, dan *command fault* disebabkan oleh *inadvertent control signals and noise*. Berbagai penyebab yang mungkin dari ketiga kategori kegagalan ini ditunjukkan oleh lingkaran terluar.



Gambar 2. 4 Karakteristik Kegagalan Komponen (Priyanta, 2000)

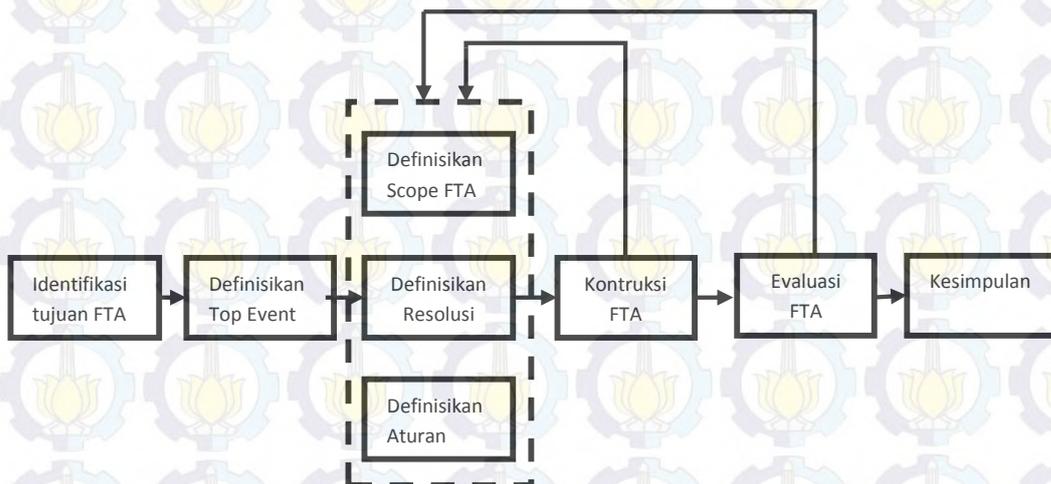
2.6 Fault Tree Analysis

2.6.1 Definisi Fault Tree Analysis

Fault Tree Analysis (FTA) adalah deduktif, metode *top-down* yang menganalisis sistem disain dan kinerja yang mencakup penetapan *top event* untuk dianalisa (contohnya kebakaran). Diikuti dengan mengidentifikasi semua elemen terkait dalam sistem yang dapat menyebabkan *top event* terjadi. *Fault tree* memberikan representasi simbolis dari Kombinasi peristiwa yang mengakibatkan terjadinya *top event* (Hoyland & Rausand, 1994).

Fault Tree Analysis (FTA) berorientasi pada fungsi (*function-oriented*) atau yang lebih dikenal dengan “*top down*” *approach* karena analisa ini berawal dari *system level* (*top*) dan meneruskannya ke bawah. Titik awal dari analisa ini adalah mengidentifikasikan mode kegagalan fungsional pada *top level* dari suatu sistem atau *sub system* (Priyanta, 2000).

Ada 8 tahapan umum yang dilakukan dalam sebuah *Fault Tree Analysis* dan hubungan tiap-tiap tahapan bias dilihat pada Gambar 2.5 berikut:



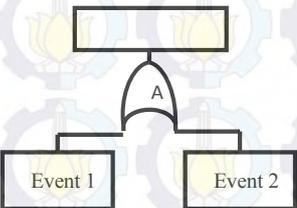
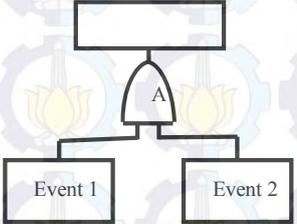
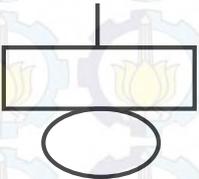
Gambar 2.5 Hubungan Tahapan Dalam Melakukan *Fault Tree Analysis*
(Stamatelatos & Vesely, 2002)

2.6.2 Konstruksi *Fault Tree Analysis*

Menurut Priyanta (2000) konstruksi *fault tree* selalu diawali dengan *top event*. Untuk itu semua permasalahan yang dianggap penting yang akan dianalisa

penyebabnya harus diidentifikasi dengan teliti dan ditempatkan pada posisi *top event*. Kemudian dari *top event* ini akan dikembangkan untuk dicari penyebabnya. Penyebab-penyebab langsung yang menjadi akibat terjadinya *top event* akan dihubungkan oleh gerbang logika. Gerbang logika berupa simbol yang memiliki makna sesuai dengan sumber penyebab terjadinya permasalahan. Tabel 2. 2 adalah simbol dan arti pada *fault tree*.

Tabel 2. 2 Simbol dan Arti pada *Fault Tree*

NAMA	SIMBOL	DESKRIPSI
<i>Logic Gate</i>	<p style="text-align: center;">OR – Gate</p>  <p style="text-align: center;">AND – Gate</p> 	<p>OR-Gate menunjukkan output dari kejadian A terjadi jika salah satu <i>Event 1</i> atau <i>Event 2</i> (<i>Event</i> ke <i>i</i>) terjadi.</p> <p>AND – Gate menunjukkan output dari kejadian A yang terjadi jika semua <i>input event</i> E1 dan <i>event</i> E2 (<i>Event</i> ke <i>i</i>) terjadi bersama.</p>
<i>Input Event</i>	<p style="text-align: center;">Basic Event</p> 	<p><i>Basic event</i> menyatakan kegagalan sebuah peralatan yang tidak memerlukan penelitian lebih lanjut dari penyebab kegagalan. Pada kondisi ini sering disebut sebagai <i>root cause</i> atau akar permasalahan.</p>

NAMA	SIMBOL	DESKRIPSI
	<p>Undevelop Event</p> 	<p><i>Undeveloped event</i> menyatakan sebuah <i>event</i> yang tidak diteliti lebih lanjut karena tidak cukup informasi atau karena konsekuensi dari <i>event</i> ini tidak terlalu penting.</p>
Description of State	<p>Comment rectangle</p> 	<p><i>Comment rectangle</i> dimanfaatkan untuk informasi tambahan</p>
Transfer symbol	<p>Transfer- Out</p>  <p>Transfer - In</p> 	<p>Simbol <i>transfer-out</i> menunjukkan bahwa <i>fault tree</i> dikembangkan lebih jauh dan berkaitan dengan simbol <i>transfer-in</i></p>

Sumber : Priyanta, (2000)

2.6.3 Top Event

Top event pada *fault tree* adalah suatu masalah yang akan dianalisa dan dicari penyebabnya. Jika identifikasi *top event* ini tidak teliti maka hasil dari FTA akan mengalami kesalahan dan akan mengakibatkan kesalahan dalam hal pengambilan keputusan langkah untuk mengatasi masalah yang sebenarnya. Dalam mendefinisikan *top event* sangat penting kiranya untuk menetapkan pada masalah dan kejadian yang spesifik (Priyanta, 2000).

2.6.4 Minimum Cut Set

Sebuah *fault tree* memberikan informasi yang berharga tentang berbagai kombinasi yang mengarah pada kegagalan kritis sistem. Kombinasi dari berbagai *fault event* disebut dengan *cut set*. Pada terminologi *fault tree*, sebuah *cut set* didefinisikan sebagai *basic event* yang bila terjadi (secara simultan) akan

mengakibatkan terjadinya *top event*. Sebuah *cut set* dikatakan sebagai *minimal cut set* jika *cut set* tersebut tidak dapat dikurangi tanpa menghilangkan statusnya sebagai *cut set* (Priyanta, 2000).

2.6.5 Teori Probabilitas

2.6.5.1 Percobaan Secara Acak dan Hasil Percobaan Secara Acak

Menurut Vesely et al (1981) percobaan secara acak didefinisikan sebagai sebuah pengamatan atau serangkaian pengamatan di mana kemungkinan hasil atau hasil yang didapatkan adalah *non-deterministic*. Sebuah hasil yang *deterministic* adalah jika semua hasil yang didapatkan sebagai hasil dari sebuah pengamatan. Sedangkan hasil yang *non-deterministic* adalah jika hanya satu nilai dari probabilitasnya terjadi.

Percobaan *random* dapat ditandai dengan memberikan item-item pada semua hasil. Hal ini bisa terjadi jika jumlah hasilnya tidak banyak. Notasi E1, E2, E3..., En akan digunakan untuk menunjukkan semua hasil dari kemungkinan kejadian atau *event*.

2.6.5.2 Frekuensi Relatif pada Probabilitas

Menurut Vesely dkk (1981) mempertimbangkan percobaan secara acak dengan hasil E1, E2, E3, ..., En dengan mengulang kejadian sebanyak N kali, dan melihat keserangan pada spesifik kejadian (katakanlah E1), setelah N kali pengulangan maka aktual perhitungan kejadian adalah E1 sebanyak N1 kali. Sehingga akan didapatkan perbandingan N1/N. Jika kejadian sebanyak N sangat besar maka nilai probabilitas pada *event* E bisa dirumuskan sebagai berikut:

$$P(E1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{N1}{N} \right) \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

$$0 < P(E1) < 1$$

Jika $P(E1) = 1$, adalah kejadian khusus atau tertentu

Jika $P(E1) = 0$, maka E1 adalah tidak mungkin.

2.7 Penelitian Terdahulu

Febriani (2008) telah melakukan penelitian dengan judul “Penentuan *reliability* pada Pumping Unit dengan menggunakan Metode *Failure Mode and Effect Analysis* di PT. Chevron Pacific Indonesia” dengan hasil penelitian tersebut merekomendasikan penentuan jadwal pelaksanaan *maintenance pumping unit* berdasarkan *time base maintenance*. Dari penelitian tersebut juga menyebutkan bahwa komponen *pumping unit* yang mendapatkan nilai RPN (*Risk Priority Number*) tertinggi adalah *sucker rod*, dan dua buah komponen lain yang memiliki interval waktu *maintenance* tertinggi adalah *horse head* dan *stuffing box*.

Ghareeb, Ponteggia, Nagea (1993) melakukan penelitian *failure analysis* pada *pumping unit* bersama perusahaan *manufacturer pumping unit* LUFKIN bekerjasama dengan perusahaan minyak AGIBA *Petroleum Company* mendapatkan empat katagori kegagalan pada pompa angguk yaitu: kegagalan pada *sucker rod* dan *polished rod*, kegagalan pada *down hole pump*, kegagalan pada tubing karena aus, dan kegagalan *surface pump*.

Xu et al (2012) menerangkan tiga jenis metode di dalam penilaian risiko: evaluasi kualitatif, evaluasi setengah kuantitatif dan evaluasi kuantitatif. *Safety Check List, Preliminary Hazard Analysis, Accident Tree Analysis, Event Tree Analysis, Fire & Explosion Index Method, Operating condition analysis method, Risk matrix analysis method* dan seterusnya sering digunakan untuk menilai risiko pada *well*. FTA adalah metode yang intuitif, jelas dan memiliki logika yang kuat, dll. Metode ini dapat menghasilkan analisa kualitatif dan kuantitatif. Oleh karena itu, FTA adalah metode yang cocok untuk menganalisa akar penyebab *blow out* yang diluar kendali pada proses operasi pengeboran. Dengan menentukan kunci utama untuk memonitor keselamatan pada proses *well control*.

Menurut Junwei & Yuesheng (2011) sebagai peralatan penting untuk mencapai produksi yang berkelanjutan dan memiliki resiko meledak, pompa ulir merupakan salah satu peralatan yang menjadi sumber kegagalan. *Fault Tree Analysis* (FTA) diperlukan untuk mendiagnosa keselamatan operasi pompa ulir (*screw pump*). Dengan menggunakan FTA sumber masalah bisa diketahui. Secara praktis menunjukkan bahwa metode ini memiliki kemampuan yang lebih baik untuk

mendiagnosa kesalahan, metode FTA menawarkan pengukuran kesalahan dan memiliki efek positif untuk mencegah kecelakaan pada proses produksi.

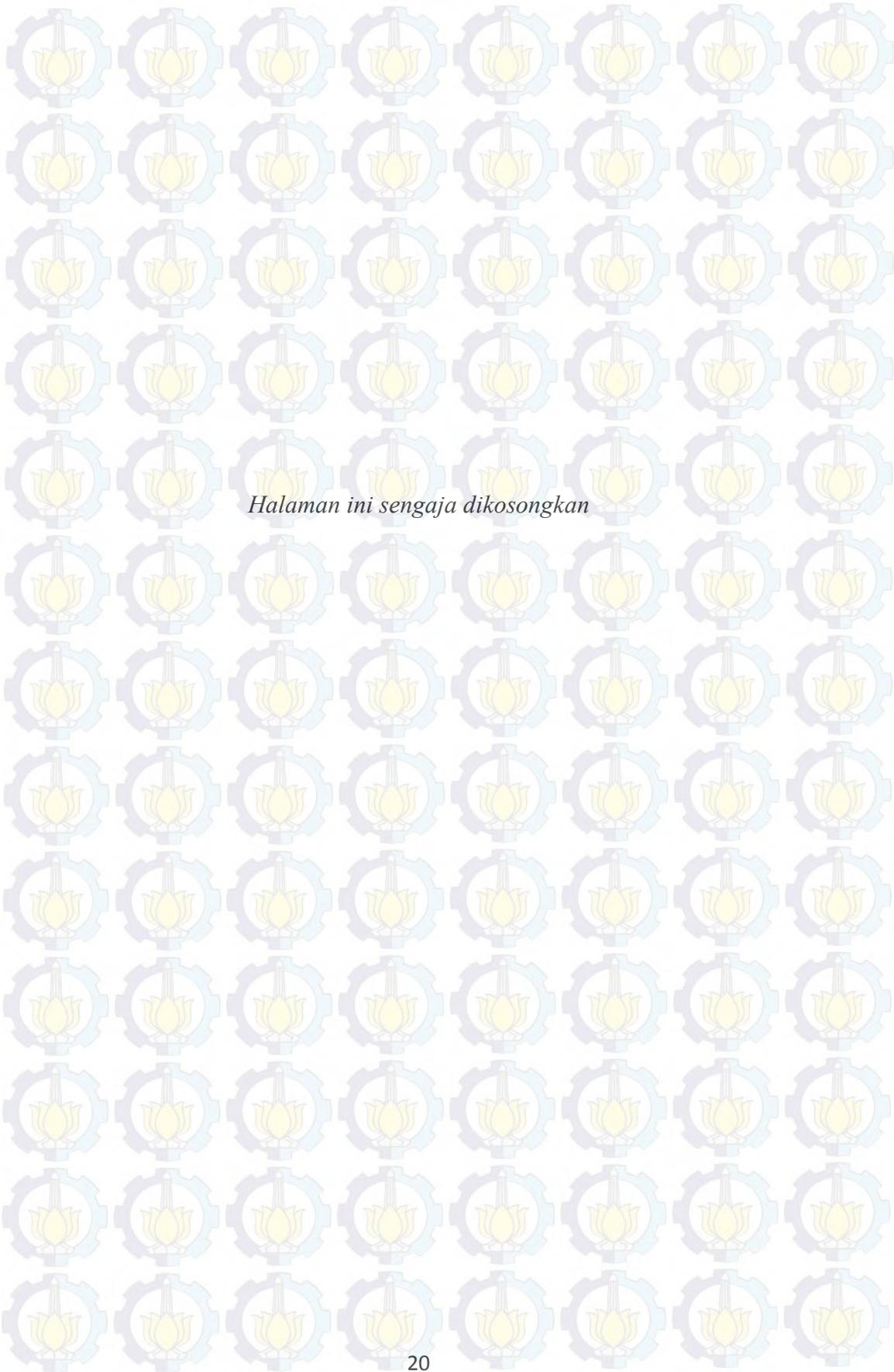
Menurut Liu (1990) ada dua dasar keandalan pada disain FTA yaitu komponen seri dan parallel. Sebuah sistem yang terpasang seri akan mengalami kegagalan ketika salah satu unit dari sistem tersebut mengalami kegagalan. Namun jika sistem disusun secara parallel akan mengalami kegagalan jika semua unit dalam sistem tersebut mengalami kegagalan. Secara matematika probabilitas keandalan dihitung berdasarkan gerbang logika yang dipergunakan pada FTA. Gerbang yang digunakan adalah gerbang OR untuk sistem seri dan gerbang AND untuk sistem parallel. Jika ada sistem dengan tiga komponen yang disusun secara seri menggunakan gerbang **OR** yang memiliki probabilitas keandalan masing-masing R1, R2 dan R3. Maka persamaan untuk menghitung probabilitas keandalan Rs, adalah

$$R_s = 1 - [(1-R_1) \times (1-R_2) \times (1-R_3)] \dots\dots\dots(2.2)$$

Jika ada tiga komponen yang disusun secara parallel menggunakan gerbang **AND** maka persamaan keandalannya adalah:

$$R_s = R_1 \times R_2 \times R_3 \dots\dots\dots(2.3)$$

Berdasarkan penelitian tersebut diatas, bisa disimpulkan bahwa penyebab kegagalan pompa angguk bervariasi mengingat kondisi jenis minyak yang diangkat, lokasi dan suhu lingkungan yang berbeda.



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Disain Penelitian

Penelitian ini adalah merupakan penelitian studi kasus kegagalan pompa angguk dengan pendekatan kuantitatif. Analisa ini dilakukan untuk mengetahui sebab-sebab terjadinya kegagalan pada pompa angguk yang beroperasi di PT. CVX. Pemilihan metode ini berdasarkan atas pertimbangan bahwa metode ini sangat cocok karena fenomena yang terjadi berangkat dari data yang sudah ada. Disain ini juga cocok untuk menggali informasi dan data yang menjadi penyebab sebuah kegagalan pada pompa angguk.

3.2 Proses Penelitian

Dalam melakukan penelitian dan pengolahan data terhadap permasalahan yang diangkat maka dilakukan langkah-langkah seperti terlihat pada Gambar 3. 1.

3.2.1 Latar Belakang Masalah

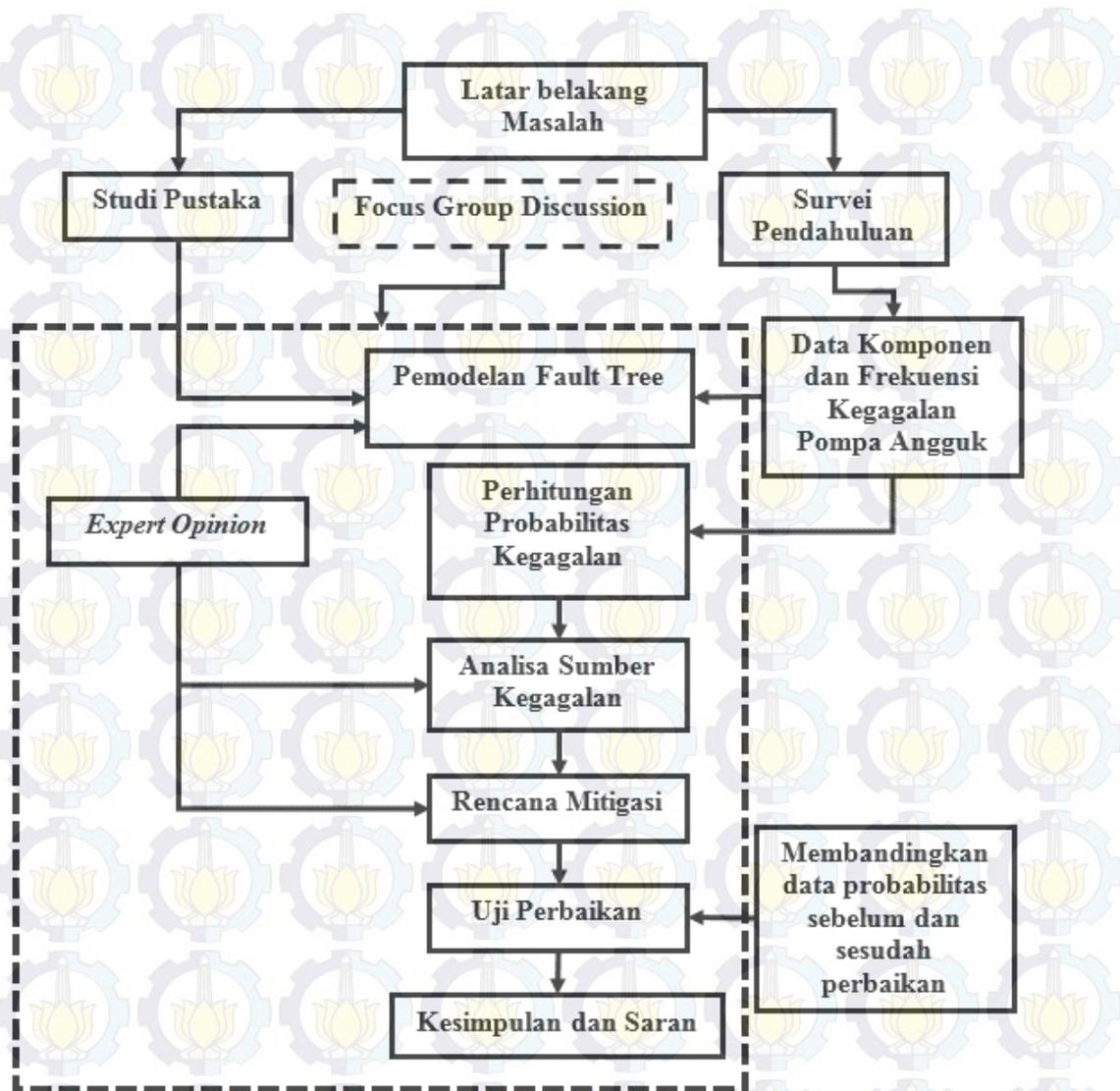
Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah bagaimana kegagalan pompa angguk di *Heavy Oil Operating Unit* PT. CVX bisa dikurangi atau diminimalisasi.

3.2.2 Studi Pustaka

Tahapan ini melakukan pengkajian jurnal, buku dan penelitian terdahulu yang terkait dengan teori dan konsep penelitian yang terkait dengan kegagalan dan probabilitas. Teori yang dipelajari adalah aplikasi dan proses kontruksi *Fault Tree Analysis*.

3.2.3 Survei Pendahuluan

Tahapan ini bertujuan untuk mendapatkan gambaran yang lengkap tentang posisi pompa angguk di *Heavy Oil Operating Unit*. Survei ini juga mendapatkan data-data yang terkait dengan proses operasi dimana fungsi pompa angguk sangat dominan terhadap hasil pengangkatan minyak dari dalam bumi.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Metodologi Penelitian

3.2.4 Pemodelan *Fault Tree*

Pada tahap ini dilakukan pengkontruksian *Fault Tree* berdasarkan referensi dari Bello (2006), Priyanta (2000), Sondalini, Vesely et al (1981), Liu (1990) dan Vatn, (2001). Pemodelan *Fault Tree* ini juga disesuaikan dengan komponen pompa angguk.

3.2.5 *Expert Opinion*

Pada bagian ini melibatkan *Subject Expert Matter* (SME) yang ada di PT. CVX untuk memberikan masukan-masukan yang terkait dengan kegagalan pompa

angguk, analisa sumber penyebab kegagalan dan mitigasi yang diperlukan untuk mengurangi resiko kegagalan pompa angguk. SME yang terlibat adalah *Electrical Engineer, Mechanical Engineer, Maintenance Engineer* dan *Instrument Engineer*.

3.2.6 Data Komponen dan Frekuensi Kegagalan Pompa Angguk

Tahapan ini dilakukan untuk mendapatkan data komponen pompa angguk dan data kegagalan pompa angguk. Data didapatkan dari *Computerize Maintenance Management System* yang masih berupa data mentah yang akan diolah untuk mendapatkan data kegagalan sampai pada level komponen pompa angguk.

3.2.7 Perhitungan Probabilitas Kegagalan

Tahapan ini melakukan perhitungan nilai masing-masing probabilitas kejadian kegagalan, kombinasi probabilitas kejadian dan *probabilitas Top Event* dari *Logic Tree* yang dibangun menggunakan metode yang dipelajari dari Liu (1990).

3.2.8 Analisa Sumber Masalah

Tahapan ini melakukan analisa terkait dengan hasil perhitungan probabilitas yang telah dilakukan pada tahap sebelumnya. Dari analisa ini didapatkan faktor-faktor yang paling mempengaruhi yang menyebabkan kegagalan pompa angguk.

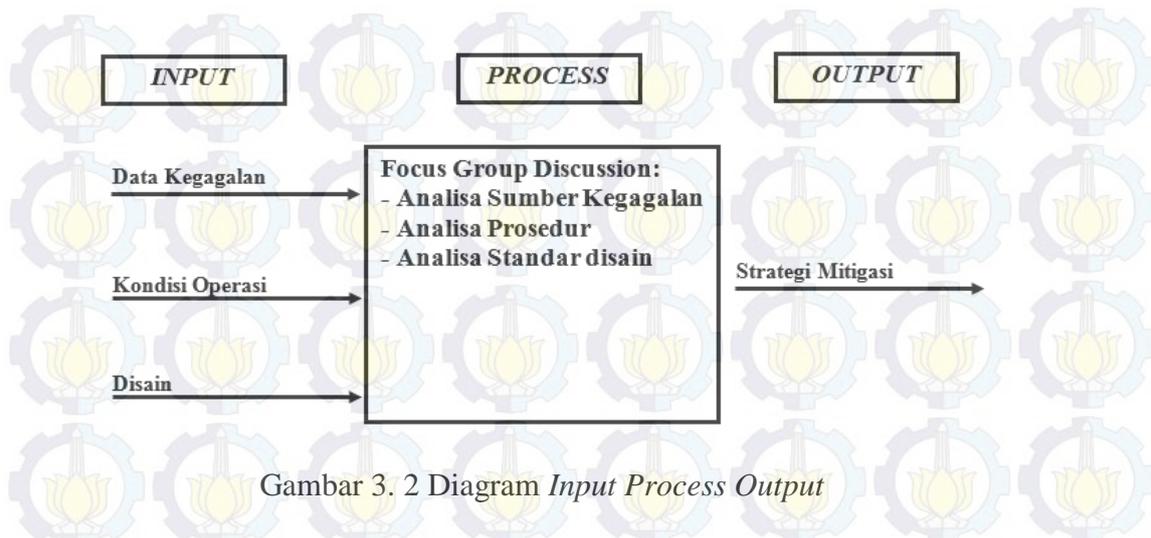
Analisa ini melibatkan SME pompa angguk di PT. CVX.

3.2.9 Rencana Mitigasi

Pada tahapan ini menetapkan langkah yang diperlukan guna mencegah dan meminimalisasi kegagalan pompa angguk berdasarkan hasil analisa. Hasil dari tahapan ini adalah menentukan strategi perbaikan yang akan diaplikasikan agar kegagalan pompa bisa dikurangi. Proses mitigasi yang dilakukan mengacu pada diagram Input Process Output (IPO) yang bisa dilihat pada Gambar 3. 2.

3.2.10 Uji Perbaikan

Tahapan ini melakukan uji perbaikan dari hasil keputusan yang telah disepakati oleh tim FGD dan uji perbaikan disetujui untuk dilakukan di *Heavy Oil Operating Unit*.



Gambar 3. 2 Diagram *Input Process Output*

3.2.11 Membandingkan Nilai Probabilitas Kegagalan Sebelum dan Sesudah Perbaikan

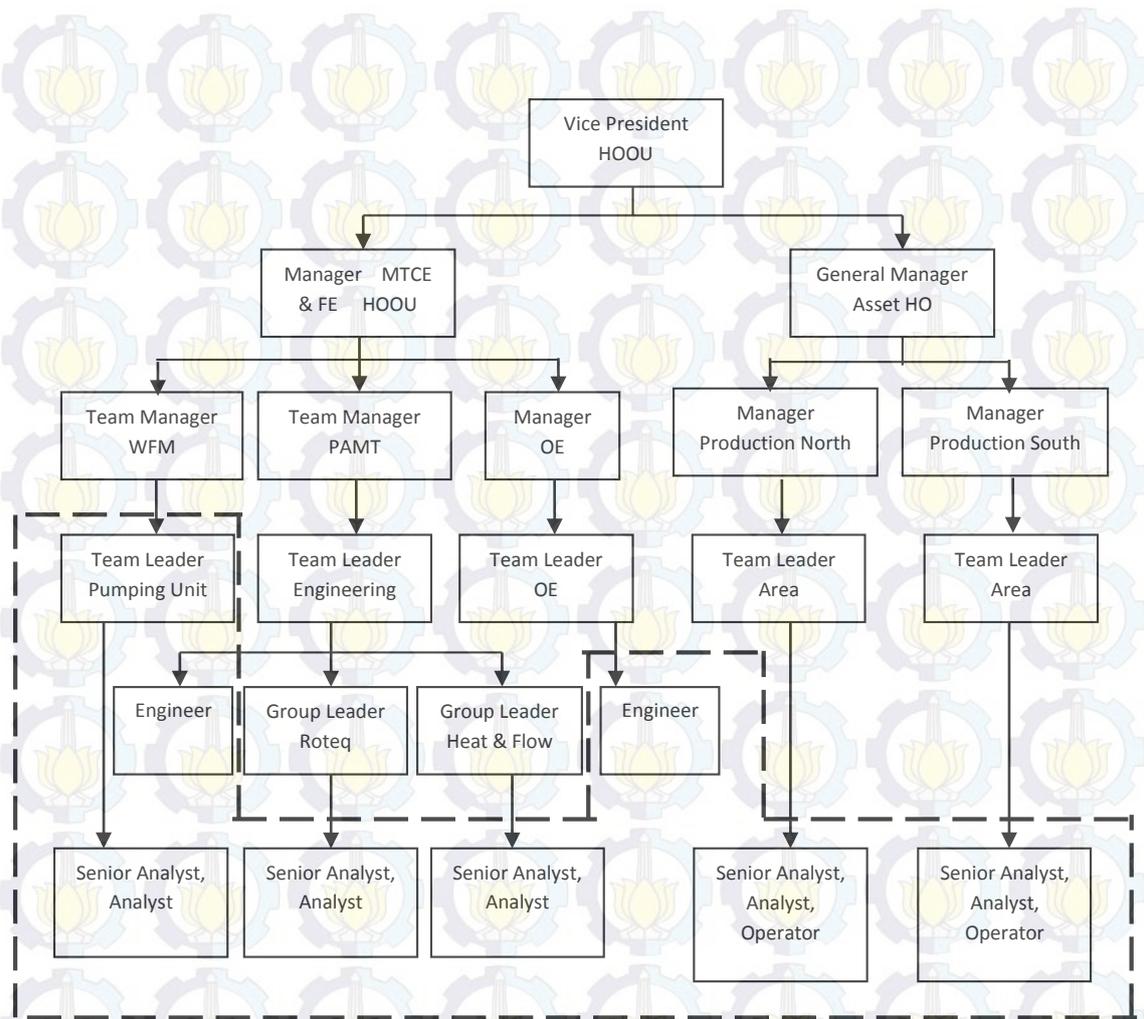
Tahapan ini melakukan pengambilan ulang data setelah dilakukan uji perbaikan pada komponen-komponen yang dipilih oleh tim FGD. Data tersebut kemudian dihitung ulang nilai probabilitasnya sesuai dengan posisinya di dalam pohon kegagalan (*logic tree*). Kemudian hasil perhitungan probabilitas pada tahap ini dibandingkan dengan nilai probabilitas yang telah dihitung pada tahap sebelumnya. Hasil dari perbandingan nilai probabilitas yang didapat merupakan dasar kesimpulan dari penelitian ini.

3.2.12 *Focus Group Discussion*

Sebelum menentukan anggota di dalam *Focus Group Discussion* (FGD), peneliti terlebih dahulu mempelajari struktur organisasi yang terlibat di dalam perawatan pompa anguk. Secara garis besar, organisasi yang terlibat di dalam penggunaan dan perawatan pompa anguk seperti pada Gambar 3.3.

Dari struktur organisasi tersebut, yang terlibat secara langsung terhadap pompa anguk adalah:

1. Pihak *Production: Team Leader area*, Senior Analis, Analis dan Operator.
2. Pihak WFM (*Well Facility Engineering*)/Perawatan: *Team Leader* pompa anguk, Analis senior dan Analis.
3. Pihak PAMT (*Proactive Maintenance*): *Maintenance Engineer*.
4. Pihak OE (*Operation Engineering*): *Engineer*.



Gambar 3. 3 Struktur Organisasi yang Terlibat Dalam Perawatan Pompa Angguk (Organisasi PT. CVX, 2012)

Peran masing-masing pihak yang terlibat langsung pada pompa angguk adalah sebagai berikut:

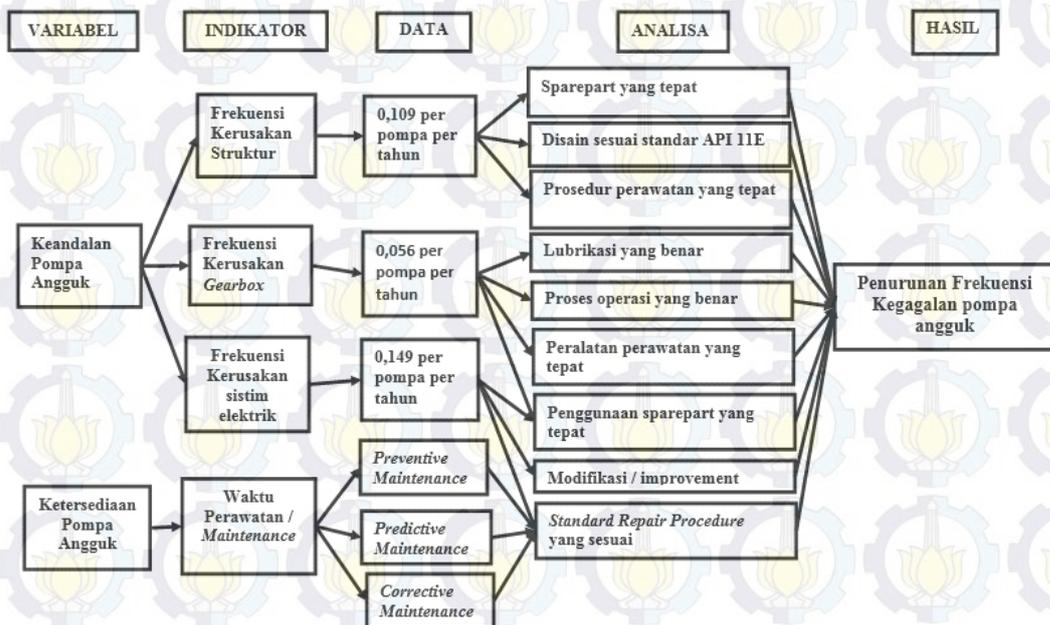
1. Pihak *Operation*: sebagai pemilik fasilitas, yang mengoperasikan pompa angguk dan bertanggung jawab terhadap operasi dan mengontrol kondisi pompa angguk agar tetap bisa bekerja dengan baik dan selamat.
2. Pihak WFM: sebagai tim yang bertugas merawat dan memastikan kondisi perlengkapan pompa angguk dalam keadaan yang layak untuk beroperasi.
3. Pihak PAMT: bertugas memonitor kondisi pompa angguk menggunakan peralatan *condition monitoring*.
4. Pihak OE: bertugas sebagai proses *engineering*.

Dengan mempertimbangkan struktur organisasi tersebut, maka anggota FGD dipilih dari masing-masing tim sesuai dengan fungsi dan tugas masing-masing terhadap pompa angguk. Tim yang dipilih seperti yang terlihat di dalam

Gambar 3. 3 di dalam kotak garis putus-putus adalah *Engineer* PAMT, *Engineer* OE, Senior Analis/Analis group Roteq (*rotating equipment*) dan *Heat & Flow*, Senior Analis/Analis WFM, dan Analis Senior /Analis/Operator dari pihak *production* adalah bagian yang terlibat di dalam FGD.

3.3 Diagram Sistematis Penelitian

Diagram hubungan sistematis yang menunjukkan hubungan variabel, indikator, data dan analisa pada penelitian ini dijelaskan pada Gambar 3. 4.



Gambar 3. 4 Hubungan Sistematis Penelitian

3.4 Sumber Data, Metode Pengambilan Sampel dan Obyek Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder yang diambil dari data CMMS (*Computerized Maintenance Management System*) dan data pengukuran beban pompa angguk di *Heavy Oil Operating Unit* perusahaan PT.

CVX. Metode yang dipergunakan untuk pengumpulan data menggunakan teknik *Purposive Sampling*. Proses pengambilan data dimulai dari pengambilan seluruh data *Work Order (WO)* yang tersimpan di CMMS yang terkait dengan aktifitas pompa angguk diseluruh *Heavy Oil Operating Unit*. Data yang diambil dari CMMS adalah data perawatan pompa angguk dimulai 1 Januari 2011 – 31 Oktober 2012 dengan jumlah populasi pompa angguk yang diambil datanya adalah sebanyak 5405 unit. Kemudian data WO dipisahkan sesuai dengan jenis pekerjaan dan sesuai dengan kode kejadian pekerjaan. Saat pemisahan WO ini melibatkan Analisis dari tim perawatan pompa angguk. Setelah didapatkan data kejadian kegagalan dari hasil pemisahan, kemudian kebenaran data tersebut divalidasi lagi oleh *maintenance engineer* (ahli dibidang perawatan). Validasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa antara kode kejadian kegagalan benar sesuai dengan material yang di ambil di gudang. Setelah validasi selesai, maka data yang diambil adalah data yang sudah sesuai dengan kejadian yang sebenarnya pada pompa angguk.

Adapun dari data tersebut, komponen yang diperhitungkan adalah:

1. Jumlah populasi pompa angguk.
2. Jumlah kerusakan pompa angguk.
3. Data beban yang diterima pompa angguk.
4. Komponen yang menyebabkan kegagalan pompa angguk.

Dalam penelitian ini, obyek yang diteliti adalah:

1. Pompa angguk jenis konvensional.
2. Pompa angguk yang sudah didaftarkan pada CMMS.
3. Pompa angguk dengan perlakuan perawatan yang sama.
4. Pompa angguk yang rutin dilakukan pengecekan bebannya.

Penelitian ini juga melibatkan orang-orang yang berhubungan langsung dengan operasional dan perawatan pompa angguk. Orang-orang yang dimaksud adalah:

1. Analisis dan operator pompa angguk.
2. Analisis dan Teknisi tim perawat pompa angguk.
3. Team Leader pompa angguk.
4. *Engineer* mekanik dan elektrik pompa angguk.

5. Analisis tim *condition monitoring* pompa angguk.

3.5 Survei dan Observasi

Survei dilakukan dengan mewawancarai beberapa karyawan yang terlibat langsung dengan perawatan pompa angguk diantaranya: analis, *Team Leader* dan *Maintenance Engineer* pompa angguk. Pada bagian operasi, survei dilakukan pada Operator dan analis bagian operasi pompa angguk. Wawancara yang dilakukan untuk mendapatkan informasi tentang proses perawatan dan proses operasi pompa angguk lengkap dengan Standar operasi yang diberlakukan di PT. CVX. Hasil wawancara bisa dilihat pada Lampiran 8.

Observasi dilakukan dengan cara melihat langsung kondisi pompa angguk pada saat beroperasi, melihat pompa angguk pada saat dilakukan perawatan dan perbaikan, melihat kondisi kerusakan yang terjadi baik dari sisi mekanik maupun dari sisi kontrolnya.

Dengan survei dan observasi tersebut maka penulis akan mendapatkan gambaran yang jelas tentang permasalahan yang dihadapi dan tujuan atau katagori sukses yang dimaksudkan oleh perusahaan PT. CVX.

3.6 Pengolahan dan Analisa Data

Identifikasi masalah pada penelitian ini didapatkan dari:

1. Observasi di lapangan, dengan bertemu tim *maintenance* didapatkan pernyataan bahwa biaya *maintenance pumping unit* dan jumlah kejadian kegagalan *pumping unit* sangat tinggi. Observasi juga dilakukan dengan melihat data pada CMMS yang terkait dengan aktifitas *maintenance* pompa angguk.
2. Studi literatur, peneliti mendapatkan literature dari *pumping unit manufacturer* yang menyebutkan komponen yang sering mengalami kerusakan dan hal yang sering menyebabkan kerusakan.

Proses pembuatan *logic tree* dilakukan dengan *Focus Group Discussion* (FGD). Peserta FGD terdiri dari orang-orang yang terlibat di dalam perawatan

pompa angguk dan *Subject Master Expert* dibidang pompa angguk di perusahaan PT. CVX.

Pengolahan data dilakukan dengan teknis pengolahan kuantitatif, dengan mentranskrip data mentah yang didapat dari *Computerized Maintenance Management System*. Data mentah yang diambil masih sangat kompleks karena semua aktifitas *maintenance* tersimpan dalam bentuk *work order*. Data diolah secara sistematis berdasarkan variabel yang diteliti.

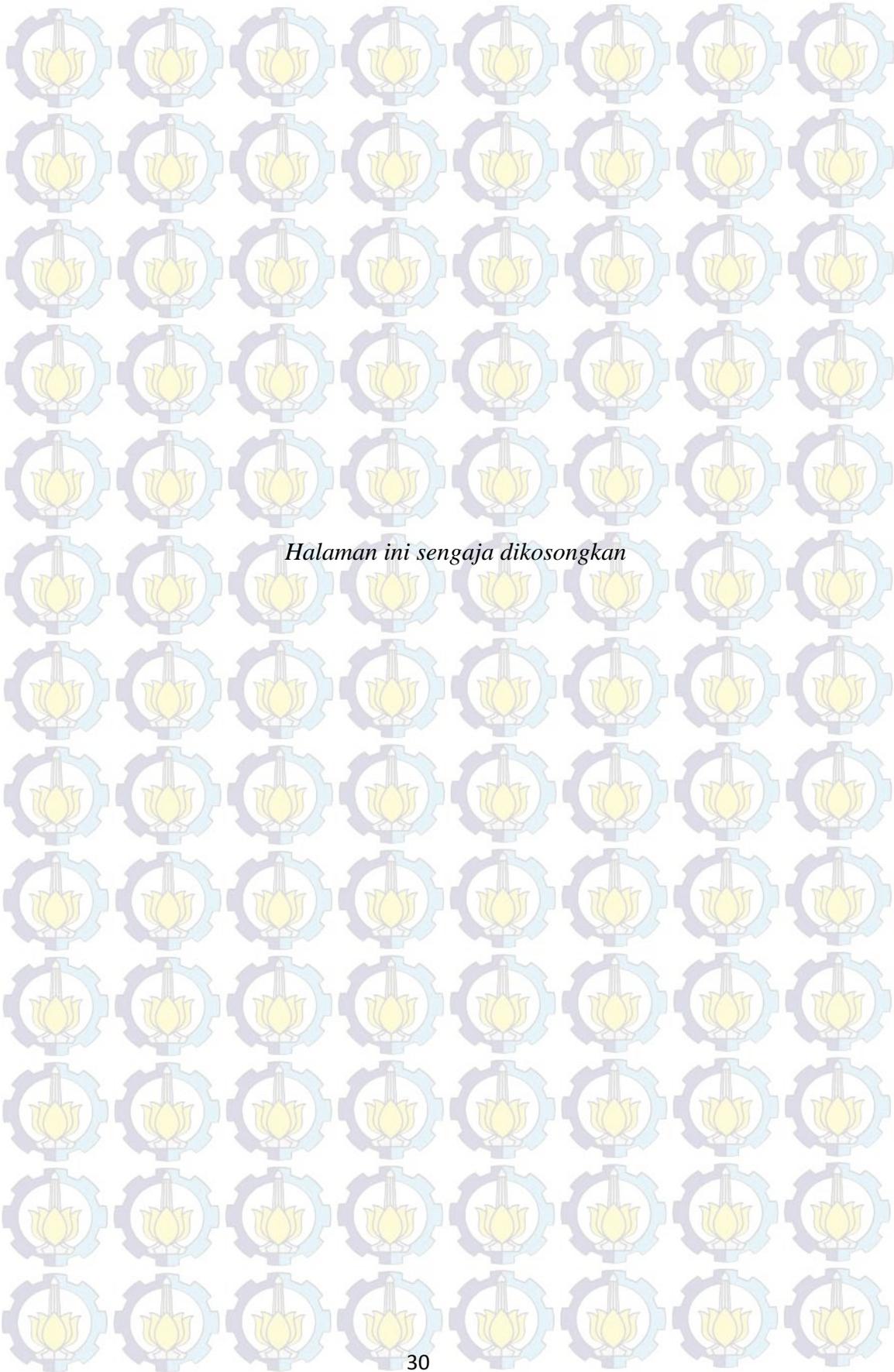
Langkah-langkah proses pembuatan *Fault Tree Analysis* dari penelitian ini adalah:

1. Mengidentifikasi tujuan menggunakan *Fault Tree Analysis*.
2. Menentukan *top event*.
3. Menentukan cakupan FTA, resolusi dan aturan dasar FTA.
4. Mengkonstruksi FTA atau *logic tree*.
5. Mengevaluasi *logic tree*. Dasar perhitungan yang digunakan untuk menghitung nilai probabilitas gerbang logika sesuai dengan persamaan 2.2 dan 2.3 yang telah disebutkan di sub bab 2.7 pada Bab 2.
6. Menetapkan Kesimpulan.

Setelah dievaluasi dan divalidasi oleh ahli yang ada diperusahaan PT. CVX, maka dari *logic tree* tersebut bisa ditarik kesimpulan komponen atau *sub system* mana saja yang memiliki kombinasi probabilitas paling tinggi sehingga merupakan peluang untuk dilakukan perbaikan (*improvement*). Jika komponen yang memiliki nilai probabilitas kegagalan paling tinggi sudah teridentifikasi, maka akan diupayakan metode perbaikan (*improvement*) berdasarkan kondisi dan temuan permasalahan yang ada pada masing-masing komponen tersebut.

3.7 Kesimpulan dan Saran

Dari hasil analisa berdasarkan sub bab 3.6, selanjutnya akan dicari dan dianalisa masing-masing penyebab kegagalan dan permasalahan yang ada dan akan dikembangkan dalam bentuk saran kepada perusahaan PT. CVX.



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4 ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Survei Pendahuluan di *Heavy Oil Operating Unit* PT. CVX.

Pada survei pendahuluan di *Heavy Oil Operating Unit* memperoleh gambaran singkat mengenai posisi divisi *Heavy Oil Operating Unit* pada PT. CVX. *Heavy Oil Operating Unit* adalah salah satu divisi operasi di PT. CVX yang mengelola pengambilan minyak bumi yang masuk dalam katagori minyak berat. Minyak yang dimaksud memiliki *oil gravity* sebesar 21 API grade dengan viskositas pada 100 derajat Fahrenheit sebesar 330 CP (CentiPoise). Sedangkan kedalaman sumur (*well*) untuk daerah ini berkisar 600 – 700 feet. *Heavy oil* PT. CVX memiliki kapasitas produksi sekitar 160.000 BOPD (*Barrels Oil Per Day*) dengan jumlah sekitar 5405 pompa angguk aktif dengan masing-masing memiliki kapasitas produksi yang berbeda yang tergantung dari area dan kedalaman pada masing-masing sumur.

4.1.1 Populasi Pompa Angguk

Heavy Oil Operating Unit PT. CVX menggunakan beberapa ukuran pompa angguk jenis konvensional. Tabel 4. 1 menunjukkan jumlah populasi pompa angguk yang digunakan di *heavy oil*, dengan jumlah total pompa angguk adalah 5405 unit.

Tabel 4. 1 Populasi Pompa Angguk di *Heavy Oil Operating Unit*

No	Tipe pompa Angguk	Populasi	No	Tipe pompa Angguk	Populasi
1	C114-119-100	2922	8	C160-185-144	89
2	C114-119-86	93	9	C228-173-100	11
3	C114-125-100	1251	10	C228-173-144	7
4	C160-109-120	5	11	C228-185-100	3
5	C160-119-100	3	12	C228-185-144	984
6	C160-169-64	3	13	C228-200-74	9
7	C160-173-100	13	14	C912-305-240	12
				Total	5405

Sumber: Data PT. CVX, (2013)

4.1.2 Perawatan Pompa Angguk

Untuk menjaga agar pompa angguk memiliki kehandalan yang tinggi, PT. CVX menerapkan metode perawatan *time base maintenance* dimana perawatan dilakukan berdasarkan waktu operasi. Disamping dilakukan perawatan rutin, pada pompa angguk juga dilakukan pengambilan data kondisi dan pengecekan menggunakan metode *predictive maintenance*. Berikut ini adalah jadwal perawatan dan aktifitas yang dilakukan pada pompa angguk untuk memastikan pompa angguk beroperasi dengan handal, yaitu:

1. ORDC (*Operator Routine Duty Check*).
2. Memonitor kondisi oli pelumas.
3. Memonitor kondisi pompa angguk menggunakan *Ultrasound* dan *Thermal camera*.
4. *Preventive Maintenance*.
5. Perbaikan (*Corrective maintenance*) pompa angguk.

Dari aktifitas perawatan dan pengecekan pompa angguk diatas, jika ditemukan sesuatu yang diperlukan untuk dilakukan perbaikan maka tim yang menemukan tersebut akan membuat perintah kerja (*work order*) kepada tim perbaikan (*corrective*) untuk melaksanakan perbaikan sesuai dengan yang direkomendasikan.

4.1.3 ORDC (*Operator Routine Duty Check*).

ORDC adalah sebuah aktifitas pengecekan peralatan operasi secara *visual* yang dilakukan oleh operator. ORDC dilaksanakan setiap 14 hari sekali. Secara bergiliran operator akan melakukan inspeksi *visual* menggunakan *check list* yang telah dibuat sebagai petunjuk dan standar pengecekan. *Check list* tersebut dibuat sesederhana mungkin tetapi dapat mewakili keinginan manajemen perusahaan untuk menangkap hal-hal yang tidak normal terhadap operasi pompa angguk. Dari ORDC akan diketahui sejak dini ketidaknormalan operasi pompa angguk. Berikut ini adalah komponen utama pompa angguk yang dicek pada saat ORDC:

- 1) Kepala Kuda atau *horse head*.

- 2) *Saddle bearing*.
- 3) *Tail bearing*.
- 4) *Wrist pin bearing*.
- 5) *Gearbox* dan kelengkapannya.
- 6) Baut-baut struktur.
- 7) Tekanan pipa.
- 8) Kondisi struktur dan kedudukan pompa angguk (*base pumping unit*).
- 9) Suara yang tidak normal pada saat operasi.

4.1.4 Memonitor Kondisi Oli Pelumas

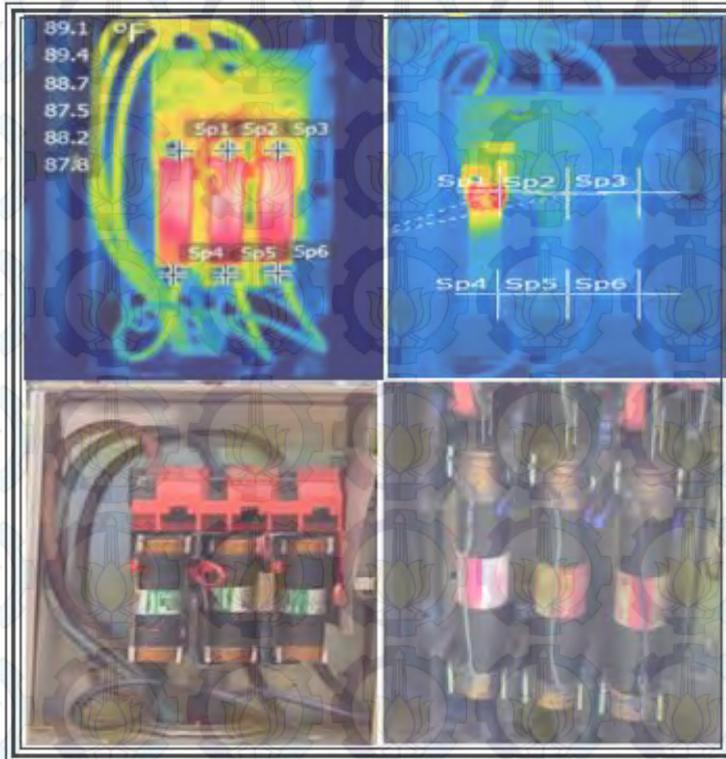
Oli pelumas perlu dimonitor untuk memastikan kondisinya di *gearbox*. Tim yang bertugas menganalisa kondisi oli adalah dari tim *predictive maintenance rotating equipment*. Periode pengambilan minyak *gearbox* dilakukan setiap tiga bulan sekali. Tujuan dari *oil analysis* ini adalah mengetahui apakah kondisi minyak pelumas *gearbox* masih layak untuk terus digunakan atau sudah harus diganti. Metode penggantian minyak pelumas *gearbox* berdasarkan pada *condition based*, dimana minyak pelumas akan diganti jika memang kondisinya sudah tidak layak untuk digunakan.

4.1.5 Memonitor Kondisi Pompa Angguk dengan *Ultrasound* dan *Thermal Camera*

Disamping menggunakan laboratorium untuk menganalisa oli pelumas, ada tim khusus yang bertugas untuk mengambil dan menganalisa operasi pompa angguk menggunakan *ultrasound* meter dan *thermal camera*. Periode pengambilan data dilakukan setiap 90 hari sekali. *Thermal camera* berfungsi menangkap obyek yang di *scan* berdasarkan temperatur permukaannya.

Penggunaan *Ultrasound* dan *thermal camera* menggunakan standar yang telah ditetapkan oleh perusahaan PT. CVX. Komponen pompa angguk yang di cek menggunakan *thermal camera* adalah kontrol panel, motor listrik, *gearbox* dan struktur *bearing* (*saddle*, *tail* dan *crank pin bearing*). Gambar 4. 1 adalah contoh hasil *scan* yang dilakukan menggunakan *thermal camera* pada kontrol panel pompa angguk. Dari Gambar 4. 1 bisa dilihat bahwa ditemukan adanya titik distribusi

panas yang tidak merata sehingga bisa dikategorikan sebagai kondisi yang tidak normal yang harus dilakukan perbaikan.



Gambar 4. 1 Contoh *Scan Thermal Camera* pada Panel Kontrol (PT. CVX, 2012)

Tabel berikut ini menunjukkan standar parameter perbedaan temperatur yang digunakan.

Tabel 4. 2 Parameter Perbedaan Panas pada Kondisi Tidak Normal

Temperatur yang diukur	Katagori
1 ^o – 10 ^o C O/A 1 ^o – 3 ^o C O/S	Perlu dimonitor lebih lanjut
11 ^o – 20 ^o C O/A 4 ^o – 15 ^o C O/S	Diperlukan perbaikan pada saat pompa mati diwaktu terdekat.
21 ^o – 40 ^o C O/A >15 ^o C O/S	Perbaikan diperlukan jika memungkinkan

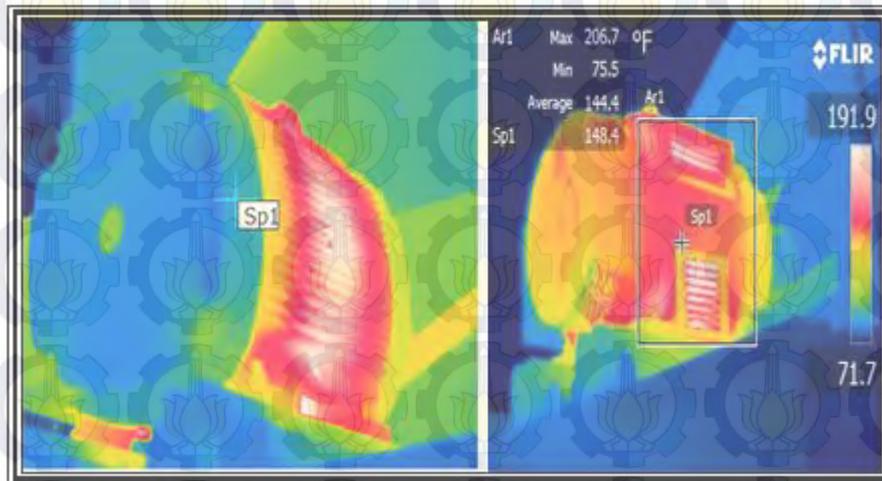
Temperatur yang diukur	Katagori
>40 ^o C O/A	Segera diperbaiki
>15 ^o C O/S	

O/A: *Over Ambient*

O/S: *Over Similar*

Sumber: Standar NETA (*interNational Electrical Testing Association*), (2012)

Untuk motor listrik, referensi temperatur permukaan yang diijinkan berdasarkan standar NEMA (*National Electrical Manufacturer Association*) adalah maksimal 198 derajat *Fahrenheit*. Contoh pengambilan data *thermal camera* pada motor listrik bisa dilihat pada Gambar 4. 2 berikut ini:



Gambar 4. 2. Hasil *Thermal Camera* pada Motor Listrik (Data PT. CVX, 2012)

Rienstra (2005) menjelaskan tentang *Ultrasound meter* adalah sebuah alat *condition monitoring* yang bertujuan untuk mendapatkan gambaran ketidaknormalan operasi berdasarkan suara yang ditimbulkan. Peralatan mekanik yang beroperasi akan menghasilkan suara, suara normal adalah suara dimana peralatan beroperasi pada batas disain yang diharapkan. Sedangkan peralatan dinilai mulai gagal adalah ketika menimbulkan perubahan suara yang tidak semestinya. Perubahan ini dapat dicatat sebagai pergeseran perubahan kualitatif yang dapat direkam oleh alat *ultrasound meter*. Secara umum *Ultrasound meter* dapat digunakan untuk mengukur: kavitasi pada pompa, kebocoran katup pada

kompresor, kerusakan gear, gesekan yang berlebihan dan *loss connection* pada peralatan listrik.

Pada pompa angguk *Ultrasound meter* digunakan untuk mengecek kondisi tidak normal pada motor listrik, *v-belt* penghubung antara motor listrik dan *gearbox*, dan *gearbox*. Parameter yang digunakan untuk menentukan kondisi yang tidak normal menggunakan aturan pada Tabel 4. 3.

Tabel 4. 3 Parameter yang Digunakan pada *Ultrasound Meter*

No	Komponen	Batasan
1	Motor Listrik	Intensitas suara pada 30 KHz 0 – 25 dB kondisi optimum 25 – 40 dB kondisi normal 40 – 50 dB Perlu ditambah pelumas (<i>regreasing</i>) >50 dB kondisi pengawasan dan penggantian <i>bearing</i>
2	Belt/ sabuk penghubung	Intensitas suara pada 40 KHz 0 – 20 dB kondisi optimum 20 – 25 dB kondisi normal >25 dB kondisi <i>belt</i> tidak normal/tidak lurus
3	<i>Relay</i> (pada panel kontrol)	< 12 dB
4	<i>Gearbox</i>	Maksimal 85 dB

Sumber: PT. CVX, (2013)

4.1.6 Preventive Maintenance

Pekerjaan disini adalah melakukan perawatan rutin dengan pengecekan secara menyeluruh pada komponen-komponen pompa angguk dengan melibatkan disiplin ilmu mekanik serta elektrik & Instrumentasi. Periode pelaksanaan *Preventive Maintenance* (PM) ini dilaksanakan berdasarkan periode waktu 270 hari

kalender. Jadi pada siklus 270 hari sekali tim perawatan akan datang dan melakukan perawatan menyeluruh terhadap pompa angguk.

Berikut ini adalah jenis pekerjaan yang dilakukan pada periode PM 270 hari:

- a) Melakukan pengecekan dan pengencangan semua baut-baut struktur.
- b) Melakukan pelumasan ulang (*regreasing*) pada semua bantalan (*bearing*) dan motor listrik.
- c) Pengecekan komponen listrik di dalam kontrol panel.
- d) Pengecekan semua kelengkapan komponen pompa angguk.
- e) Pengukuran keseimbangan beban pompa pada saat *down stroke* dan *up stroke*.

Pelaksanaan *Preventive Maintenance* ini dilakukan oleh kontraktor dibawah pengawasan karyawan PT. CVX. Untuk menghindari perselisihan dan penyimpangan antara kontraktor dan PT. CVX, kedua perusahaan ini menggunakan perjanjian yang dituangkan dalam bentuk kontrak kerjasama dalam jangka waktu tertentu. Kontrak kerja sama ini meliputi semua jenis aktivitas perawatan dan penyediaan pompa angguk baru lengkap dengan harganya. Sedangkan di dalam proses pengerjaan perawatan, digunakan *check list* yang telah disepakati diantara kedua belah pihak. Gambar 4. 3 menunjukkan aktifitas tim perawatan yang melakukan *Preventive Maintenance* sesuai dengan jadwal perawatan.



Gambar 4. 3 Aktifitas Perawatan (*Preventive Maintenance*) Pompa Angguk (photo PT. CVX 2013)

4.2 Data Kerusakan Pompa Angguk

Data di dalam *Computerized Maintenance Management System (CMMS)* yang diaplikasikan oleh PT. CVX, semua kegiatan yang berhubungan dengan perawatan pompa angguk didokumentasikan dalam CMMS yang dinamakan JDE E1. Di dalam JDE E1 inilah juga disimpan semua data kegagalan komponen masing-masing peralatan yang bisa di ekspor ke bentuk *excel* pada *Microsoft office*.

Secara umum semua komponen ada datanya di dalam JDE E1, tetapi tidak semua komponen pompa angguk bisa ditemukan dalam sistem JDE E1. Untuk mengatasi masalah tersebut ada tempat dimana pembuat *Work Order (WO)* akan menyisipkan beberapa jenis pekerjaan yang tidak ditemukan dalam pilihan. Jenis slot disini adalah tulisan bebas sehingga pembuat WO akan menulis sesuai dengan kebutuhannya. Kelemahan dari kondisi ini adalah menyebabkan perbedaan istilah dan maksud dari masing-masing pembuat WO.

Dari periode 1 Januari 2011 – 31 Oktober 2012 didapatkan data bahwa jumlah total pompa angguk yang aktif 5405 unit, dengan jumlah total perintah kerja yang terbagi dalam tiga katagori seperti terlihat pada Tabel 4. 4.

Tabel 4. 4 Jumlah Perintah Kerja pada Periode 1 Januari 2011 – 31 Oktober 2012

Nomer	JENIS PERINTAH KERJA (WO)	JUMLAH (WO)
1	Perbaikan dan pengecekan direncanakan berdasarkan waktu operasi (<i>Preventive Maintenance</i>)	32324
2	Pengecekan berdasarkan kondisi (<i>condition monitoring</i>)	17142
3	Perbaikan (<i>corrective maintenance</i>)	30454
	Jumlah Total	79920

Sumber: Data PT. CVX, (2013)

Perlu diketahui, bahwa semua pekerjaan yang berhubungan dengan pompa angguk diwujudkan dalam bentuk perintah kerja (*Work Order*) yang tersimpan di dalam CMMS.

Dari Tabel 4. 4 tersebut di atas, menunjukkan bahwa jumlah perintah kerja selama hampir dua tahun untuk katagori pekerjaan perbaikan (*corrective maintenance*) sebanyak 30454 *work order*. Dari pekerjaan tersebut dibagi lagi menjadi kelompok yang lebih detail yang terlihat seperti Tabel 4. 5 berikut:

Tabel 4. 5 Pembagian Perintah Kerja Berdasarkan Pekerjaan Perbaikan (*corrective maintenance*)

Nomer	JENIS PERINTAH KERJA	JUMLAH KEJADIAN
1	Unit mati tidak direncanakan (<i>unplanned shutdown</i>)	3805
2	Unit diperbaiki dengan direncanakan (<i>planned shutdown</i>)	8763
3	Unit diperbaiki dari hasil analisa kondisi (<i>condition monitoring</i>)	17871
	Total	30454

Sumber: Data PT. CVX, (2013)

Setelah didapatkan data pekerjaan perbaikan, data tersebut masih akan digali lebih dalam untuk mendapatkan komponen apa yang paling sering mengalami kerusakan. Dari hasil wawancara diperoleh kesimpulan bahwa kondisi yang paling merugikan adalah jika pompa angguk mati dalam kondisi yang tidak direncanakan. Kerugian yang didapat disebabkan oleh beberapa hal, diantaranya:

1. Perlunya perencanaan dan penetapan jadwal perbaikan yang mana akan membuat lebih lamanya pompa angguk harus mati. Di PT. CVX, untuk perencanaan dan penetapan jadwal menggunakan istilah *planning and scheduling* yang akan dilakukan setiap 7 hari sekali.
2. Kehilangan kesempatan produksi (*Loss Production Opportunity*) akibat waktu yang terbuang untuk menunggu perbaikan.
3. Matinya pompa angguk kadang tidak diketahui dengan cepat oleh operator.

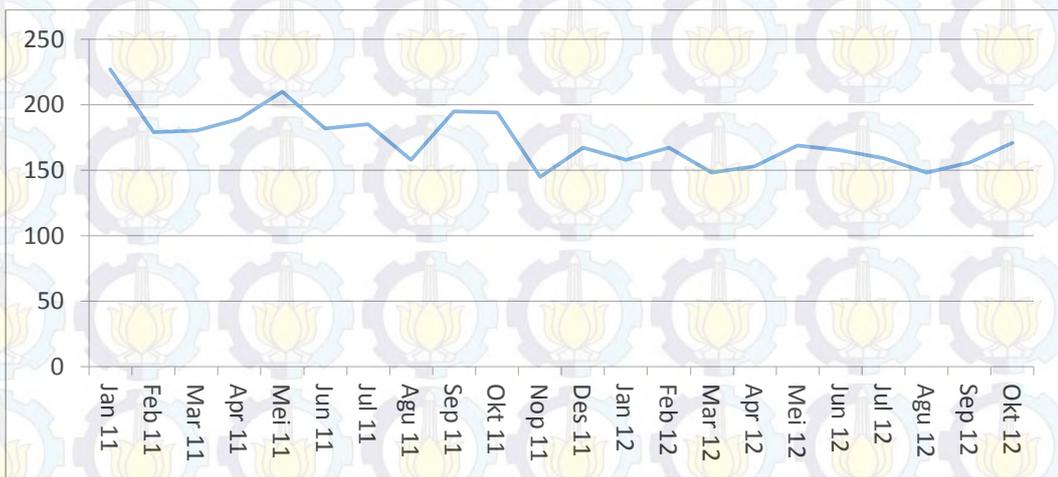
Dari jumlah kejadian yang tidak direncanakan pada Tabel 4. 5, didapatkan data komponen masing-masing kerusakan yang di PT. CVX dikenal dengan istilah *bad actor*. Data *bad actor* bisa dilihat pada Tabel 4. 6

Tabel 4. 6 Data Bad Actor 1 Januari 2011 – 31 Oktober 2012

NOMER	KOMPONEN	JUMLAH
1	<i>Wiring/Cable failure</i>	435
2	<i>Gearbox bearing failure</i>	336
3	<i>Saddle Bearing failure</i>	310
4	<i>Wristpin bearing failure</i>	303
5	<i>Tail Bearing failure</i>	301
6	<i>Switch failure (panel)</i>	245
7	<i>Relay failure</i>	199
8	<i>Belt cut off</i>	198
9	<i>Level switch active</i>	173
10	<i>Horse-Head failure</i>	172
11	<i>Termination failure</i>	153
12	<i>Breaker/Circuit failure</i>	148
13	<i>Fuse failure</i>	147
14	<i>No Code</i>	100
15	<i>Contactora failure (motor)</i>	93
16	<i>Burn out/ Winding failure (motor)</i>	78
17	<i>Bridle failure</i>	73
18	<i>Gearbox gear failure</i>	60
19	<i>Panel failure</i>	47
20	<i>Counter-Weight failure</i>	42
21	<i>Bolt/Fastener failure (structure)</i>	39
22	<i>Transformer failure</i>	32
23	<i>Motor bearing failure</i>	23
24	<i>Brake failure</i>	17
25	<i>No supply from PGT (Power Generator)</i>	16
26	<i>Pitman Arm failure</i>	12
27	<i>Pulley failure</i>	11
28	<i>gearbox shaft failure</i>	10
29	<i>Timer failure</i>	9
30	<i>Disconnect switch failure</i>	8
31	<i>Heater failure (motor)</i>	6
32	<i>Base failure</i>	5
33	<i>Oil/Lubricant low level</i>	4
	Total	3805

Sumber: Data PT. CVX, (2013)

Distribusi waktu kejadian *bad actor* dari Tabel 4. 6 bisa dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4. 4 Distribusi Kejadian *Bad Actor* Periode Januari 2011 - Oktober 2012 (data PT. CVX, 2013)

4.3 Analisa Data

4.3.1 Pembentukan *Fault Tree Analysis*

4.3.1.1 Menentukan Tujuan Penggunaan FTA

Dari hasil diskusi tim FGD, ditetapkan tujuan penggunaan FTA adalah untuk mendapatkan sumber permasalahan pompa angguk di level komponen dengan merujuk kepada data permasalahan yang ada pada data CMMS yang kemudian akan dihitung nilai kombinasi probabilitasnya. Setelah didapatkan nilai kombinasi probabilitasnya diharapkan akan dapat menentukan pada bagian atau komponen atau *sub system* yang bisa dilakukan *improvement* untuk meminimalisasi kerusakan yang sama.

4.3.1.2 Menentukan *Top Event*

Dalam menentukan *top event*, anggota FGD terlebih dahulu melakukan *brain storming* dengan melihat secara keseluruhan proses pengangkatan minyak dari dalam perut bumi. *Brain storming* tersebut menghasilkan kesepakatan bahwa *top event* yang dipilih adalah *Pumping Unit Failure* (Kegagalan pompa angguk). Proses *brain storming* bisa dilihat pada lampiran 1.

4.3.1.3 Membuat Cakupan dan Batasan FTA

Setelah mendapatkan *top event* yang akan diteliti lebih lanjut, kemudian ditetapkan cakupan dan batasan yang akan dikerjakan, yaitu:

- a. Hanya menganalisa kerusakan pompa angguk tipe konvensional yang sudah didaftarkan di CMMS sehingga semua aktifitas *maintenance* bisa diketahui.
- b. Data mentah yang diambil dari CMMS diolah dan dikelompokkan sesuai dengan komponen yang sama yang mengalami kegagalan.
- c. Kelompok komponen yang mengalami kegagalan tersebut dijadikan *basic event*.
- d. *Pumping unit* ditetapkan sebagai satu sistem. Sehingga yang menjadi sebab terjadinya kegagalan pompa angguk bisa dikategorikan *sub system* atau *intermediate event* atau *basic event*.
- e. Aturan Dasar Pembuatan FT Didapat Dari Literatur *Fault Tree Analysis*, diantaranya: tidak boleh gerbang logika bertemu dengan gerbang logika; teknik penghitungan kombinasi probabilitas kegagalan disesuaikan menurut aturan yang ada (OR dan AND).

4.3.1.4 Mengkontruksi FTA atau *Logic Tree*

Pada konstruksi *logic tree* tim FGD menetapkan data *bad actor* yang terjadi dari 1 Januari 2011 – 31 Oktober 2012 sebagai *basic event*. Di dalam tim FGD terdapat beberapa *engineer* yang sering melakukan *Root Cause Analysis* terhadap kegagalan pompa angguk dari berbagai disiplin ilmu, yaitu *Mechanical Engineer*, *Reliability Engineer* dan *Electric & Instrument Engineer*. Dari CMMS, data diolah untuk mendapatkan probabilitas masing-masing *bad actor* seperti pada Tabel 4. 7

Tabel 4. 7 Nilai Probabilitas Kegagalan Komponen

NO	KEGAGALAN KOMPONEN	JUMLAH KEJADIAN	PROBABILITAS
1	<i>Wiring/Cable failure</i>	435	0.1143
2	<i>Gearbox bearing failure</i>	336	0.0883
3	<i>Saddle Bearing failure</i>	310	0.0815
4	<i>Wristpin bearing failure</i>	303	0.0796
5	<i>Tail Bearing failure</i>	301	0.0791
6	<i>Switch failure (panel)</i>	245	0.0644

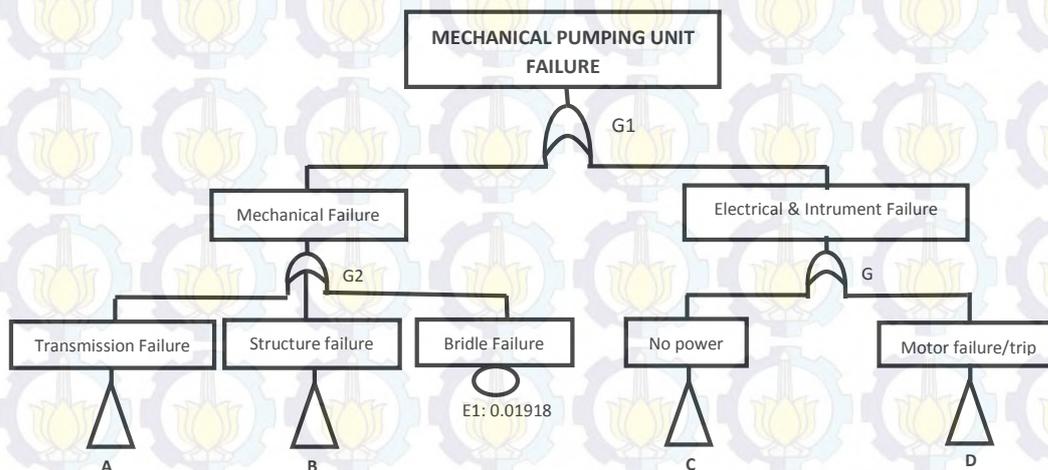
NO	KEGAGALAN KOMPONEN	JUMLAH KEJADIAN	PROBABILITAS
7	<i>Relay failure</i>	199	0.0523
8	<i>Belt cut off</i>	198	0.0520
9	<i>Level switch active</i>	173	0.0455
10	<i>Horse-Head failure</i>	172	0.0452
11	<i>Termination failure</i>	153	0.0402
12	<i>Breaker/Circuit failure</i>	148	0.0389
13	<i>Fuse failure</i>	147	0.0386
14	<i>No Code</i>	100	0.0263
15	<i>Contact failure (motor)</i>	93	0.0244
16	<i>Burn out/ Winding failure (motor)</i>	78	0.0205
17	<i>Bridle failure</i>	73	0.0192
18	<i>Gearbox gear failure</i>	60	0.0158
19	<i>Panel failure</i>	47	0.0124
20	<i>Counter-Weight failure</i>	42	0.0110
21	<i>Bolt/Fastener failure (structure)</i>	39	0.0103
22	<i>Transformer failure</i>	32	0.0084
23	<i>Motor bearing failure</i>	23	0.0060
24	<i>Brake failure</i>	17	0.0045
25	<i>no supply from PGT (Power Generator)</i>	16	0.0042
26	<i>Pitman Arm failure</i>	12	0.0032
27	<i>Pulley failure</i>	11	0.0029
28	<i>gearbox shaft failure</i>	10	0.0026
29	<i>Timer failure</i>	9	0.0024
30	<i>Disconnect switch failure</i>	8	0.0021
31	<i>Heater failure (motor)</i>	6	0.0016
32	<i>Base failure</i>	5	0.0013
33	<i>Oil/Lubricant low level</i>	4	0.0011
	Total	3805	1

Dari beberapa literatur, diantaranya adalah literatur yang dibuat oleh *manufacturer* pompa angguk, penelitian terdahulu tentang penggunaan FTA untuk pompa, beberapa literatur dari internal PT. CVX, dan dari pengalaman anggota tim FGD yang sudah sering melakukan RCA (*Root Cause Analysis*) dijadikan dasar dalam penyusunan *logic tree*. Dari 33 *bad actor*, ada satu komponen yang tidak bisa dimasukkan dalam *logic tree* sebagai *basic event* yaitu *no code* (nomer urut 14). *No code* adalah data *bad actor* yang tidak diketahui secara pasti sebab kerusakan

pompa angguk. *No code* bisa disebabkan oleh: orang yang membuat *work order* tidak tahu pasti bagian mana yang menyebabkan kerusakan dan tidak adanya pilihan kode kerusakan. Untuk itu tim FGD memutuskan bahwa *no code* tidak bisa dimasukkan sebagai *basic event* pada pompa angguk.

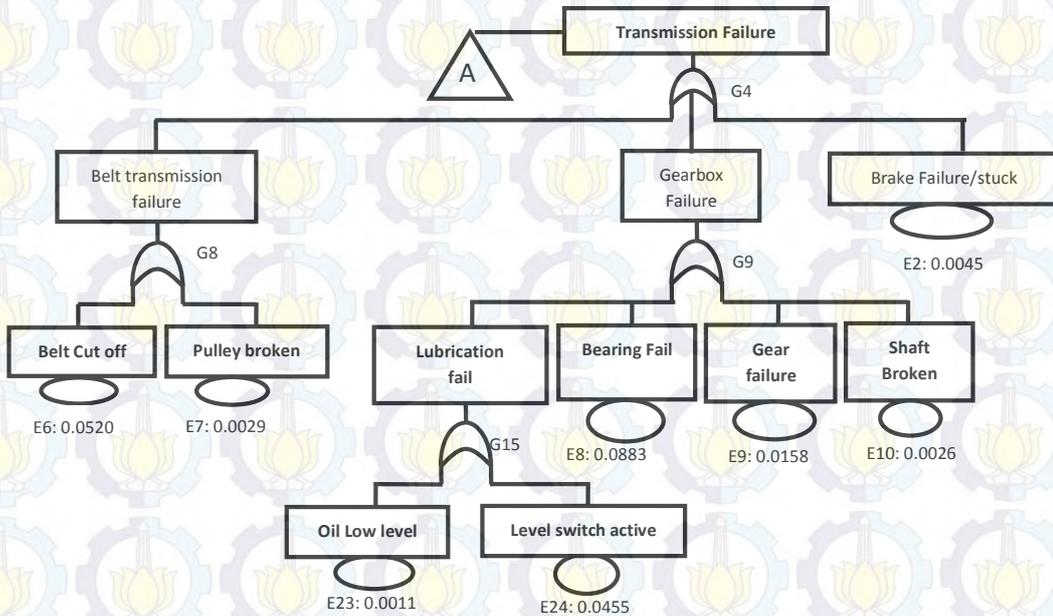
Pada sub bab 4.3.2.2 tim FGD sudah memutuskan *top event* yang akan dikembangkan penyebab kegagalannya adalah kegagalan pompa angguk (*pumping unit failure*). Dalam menyusun pohon kegagalan mulai dari *top event*, *intermediate event*, sampai ke *basic event* tim FGD menggunakan beberapa referensi literatur yang membahas khusus tentang Fault Tree Analysis. Literatur yang digunakan adalah Bello (2006), Sondalini, Liu (1990), Priyanta (2000) dan Stamatelatos & Vesely (2002).

Berdasarkan literatur tersebut disusunlah FTA seperti pada Gambar 4. 5, Gambar 4. 6, Gambar 4. 7, Gambar 4. 8 dan Gambar 4. 9. *Top event* pada Gambar 4. 5 didapatkan penyebab utama kegagalan pompa angguk adalah akibat dari kegagalan mekanik dan kegagalan elektrik/instrumentasi. Kemudian dilanjutkan dengan menetapkan penyebab kegagalan masing-masing kejadian kegagalan pada mekanik dan elektrik/instrumentasi.



Gambar 4. 5. FTA *Top Event Pumping Unit Failure*

Dari *Top Event* tersebut dilanjutkan pembuatan *logic tree* masing-masing penyebab kejadian kegagalan *top event*.



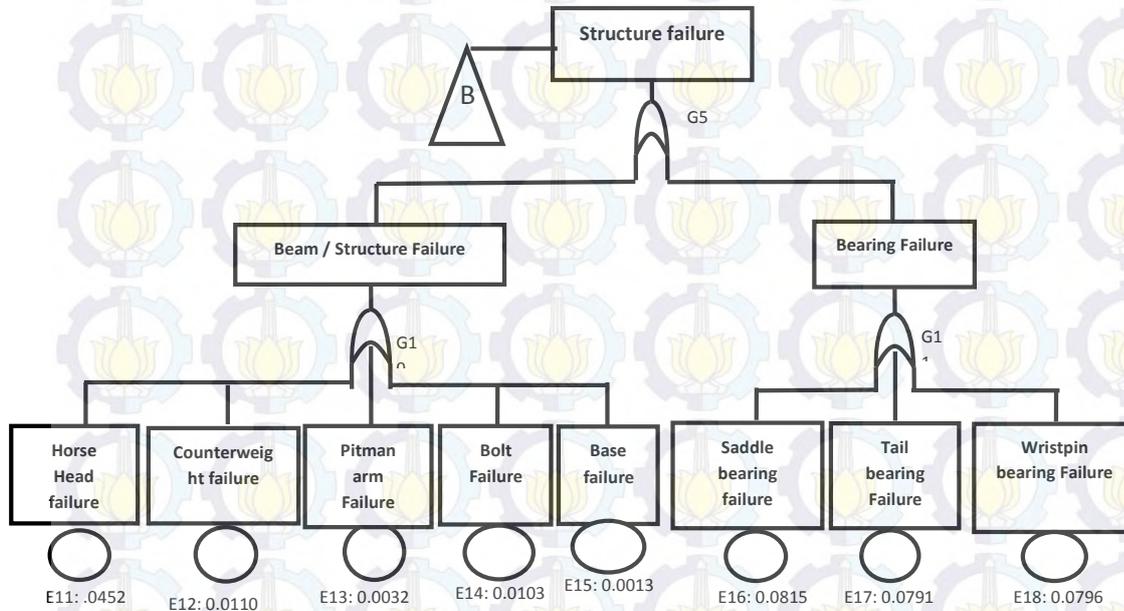
Gambar 4. 6. FTA *Intermediate Event Transmission Failure*

Data kegagalan pada transmisi (*transmission failure*) yang disebutkan pada Gambar 4. 6 adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 8 Komponen Gagal pada Transmisi

NOMER	KEJADIAN	KOMPONEN GAGAL	PROBABILITAS
1	E2	<i>Brake</i>	0,0045
2	E6	<i>Belt cut off</i>	0,0520
3	E7	<i>Pulley</i>	0,0029
4	E8	<i>Gearbox bearing</i>	0,0883
5	E9	<i>Gearbox gear</i>	0,0158
6	E10	<i>Gearbox shaft</i>	0,0026
7	E23	<i>Oil/Lubricant</i>	0,0011
8	E24	<i>Lubricator (level switch)</i>	0,0455

Kemudian dilanjutkan pembuatan *logic tree* dan analisa untuk kegagalan struktur.



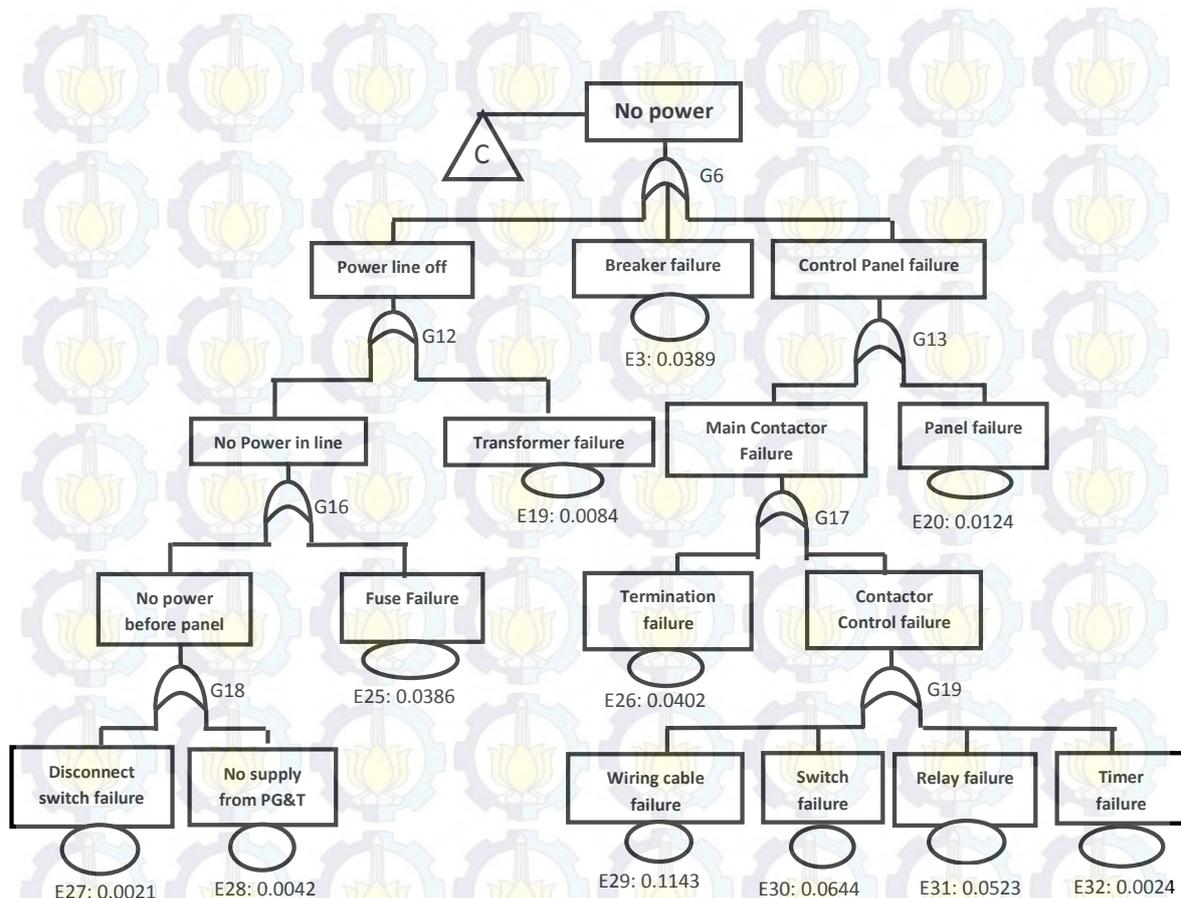
Gambar 4. 7. FTA *Intermediate Event Structure Failure*

Data kegagalan pada struktur (*structure failure*) yang disebutkan pada Gambar 4.7 adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 9 Komponen Gagal pada Struktur

NOMER	KEJADIAN	KOMPONEN GAGAL	PROBABILITAS
1	E11	<i>Horse Head failure</i>	0,0452
2	E12	<i>Counter-Weight failure</i>	0,0110
3	E13	<i>Pitman Arm failure</i>	0,0032
4	E14	<i>Bolt/Fastener failure</i>	0,0102
5	E15	<i>Base failure</i>	0,0013
6	E16	<i>Saddle Bearing failure</i>	0,0815
7	E17	<i>Tail Bearing failure</i>	0,0791
8	E18	<i>Wrist-Pin failure</i>	0,0796

Penyusunan *Logic tree* untuk *NO Power* bisa dilihat pada Gambar 4. 8.

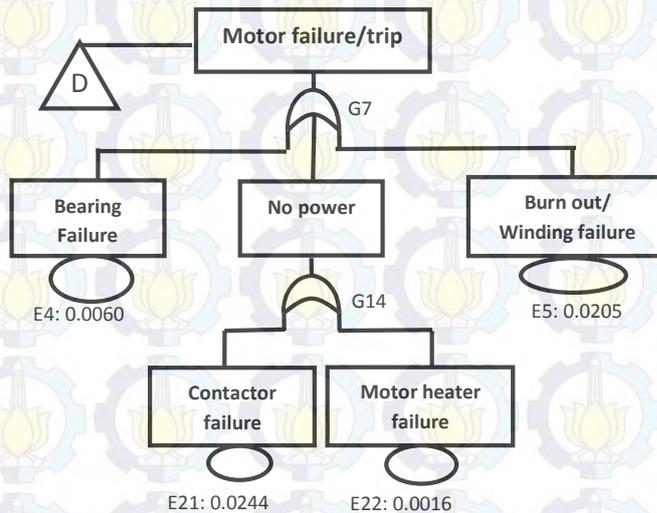


Gambar 4. 8. *Intermediate Event No Power*

Data kegagalan pada tidak ada power atau energi listrik (*no power*) yang disebutkan pada Gambar 4. 8 adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 10 *Komponen Gagal pada Kondisi No Power*

NOMER	KEJADIAN	KOMPONEN GAGAL	PROBABILITAS
1	E3	<i>Breaker, Circuit failure</i>	0,0389
2	E19	<i>Transformer failure</i>	0,0084
3	E20	<i>Panel failure</i>	0,0124
4	E25	<i>Fuse failure</i>	0,0386
5	E26	<i>Termination failure</i>	0,0402
6	E27	<i>Disconnect switch failure</i>	0,0021
7	E28	<i>no supply from PGT</i>	0,0042
8	E29	<i>Wiring/Cable failure</i>	0,1143
9	E30	<i>Switch failure</i>	0,0644
10	E31	<i>Relay failure</i>	0,0523
11	E32	<i>Timer failure</i>	0,0024



Gambar 4. 9. *Intermediate Event Motor Failure / trip*

Data kegagalan pada kegagalan motor listrik yang disebutkan pada Gambar 4. 9 adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 11 Komponen Gagal pada Motor Listrik

NOMER	KEJADIAN	KOMPONEN GAGAL	PROBABILITAS
1	E4	<i>Motor bearing</i>	0,0060
2	E5	<i>Winding, burn out</i>	0,0205
3	E21	<i>Contactor</i>	0,0244
4	E22	<i>Heater</i>	0,0016

4.3.1.5 Mengevaluasi FTA atau *Logic Tree*

Dari hasil *logic tree* yang telah disusun kemudian dianalisa dan dihitung kombinasi probabilitasnya. Dengan menggunakan persamaan 2.2 untuk gerbang logika OR dan persamaan 2.3 untuk gerbang logika AND, maka didapatkan nilai probabilitas masing-masing gerbang sebagai berikut:

Probabilitas untuk Gerbang 19 terjadi jika salah satu E29 or E30 or E31 or E31 terjadi, atau yang disebut dengan gerbang **OR**.

$$G19 = E29 \text{ OR } E30 \text{ OR } E31 \text{ OR } E32$$

$$P(G19) = 1 - \{[1 - P(E29)] \times [1 - P(E30)] \times [1 - P(E31)] \times [1 - P(E32)]\}$$

$$P(G19) = 1 - \{[1 - 0.1143] \times [1 - 0.0644] \times [1 - 0.0523] \times [1 - 0.0024]\}$$

$$P(G19) = 0.2165$$

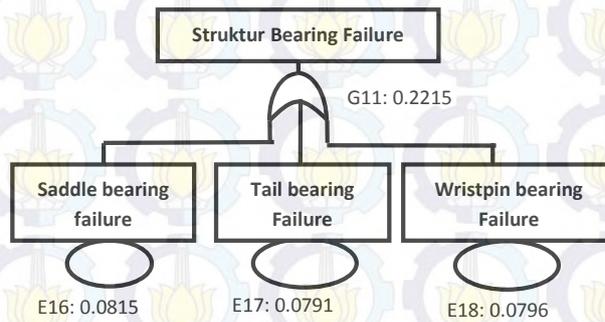
Dengan metode perhitungan yang sama pada gerbang 19 maka didapatkan nilai probabilitas masing-masing gerbang seperti terlihat pada Tabel 4. 12. Perhitungan lengkap probabilitas gerbang logika sebelum dilakukan perbaikan bisa dilihat pada Lampiran 2.

Tabel 4. 12 Probabilitas Gerbang Logika Sebelum Dilakukan Perbaikan

No	Gerbang	Probabilitas	No	Gerbang	Probabilitas
1	G1	0,6342	11	G11	0,2215
2	G2	0,4295	12	G12	0,0527
3	G3	0,3588	13	G13	0,2573
4	G4	0,1970	14	G14	0,0260
5	G5	0,2757	15	G15	0,0465
6	G6	0,3238	16	G16	0,0447
7	G7	0,0517	17	G17	0,2480
8	G8	0,0548	18	G18	0,0063
9	G9	0,1466	19	G19	0,2165
10	G10	0,0696			

Berdasarkan FTA dan nilai probabilitas yang terjadi, maka tim FGD menganalisa nilai yang tinggi pada masing-masing gerbang logika. Nilai yang tinggi tersebut kemudian analisa posisinya di dalam *logic tree*. Dari analisa tersebut didapatkan 3 gerbang logika yang di dalam *logic tree* merupakan *intermediate event* yang jika dilihat secara fungsi komponen adalah merupakan *sub system* dari pompa angguk. Pada komponen inilah tim FGD memutuskan untuk melakukan perbaikan atau *improvement*. Komponen tersebut terletak pada gerbang logika sebagai berikut:

1. Pada posisi G11 dimana *basic event* yang terjadi saling berhubungan dan memiliki fungsi komponen yang sama dan masing-masing *basic event* memiliki probabilitas yang cukup tinggi. Sehingga jika dilakukan satu jenis usaha perbaikan akan memberikan efek terhadap tiga *basic event* tersebut.



Gambar 4. 10. *Logic Tree* Gerbang Logika 11

Pada gerbang 11 tersebut terdapat tiga penyebab struktur *bearing* gagal yaitu kerusakan pada *Sadlle Bearing*, *Tail bearing* dan *Wristpin bearing*. Contoh kerusakan ketiga *basic event* tersebut bisa dilihat pada gambar berikut :



Gambar 4. 11. Contoh Kerusakan *Wristpin* dan *Saddle Bearing* (PT. CVX,2012)

Sedangkan contoh kerusakan *Tail bearing* bisa dilihat pada Gambar 4.12.

Berdasarkan analisa yang dilakukan oleh tim FGD, penyebab kegagalan bantalan struktur pada pompa angguk di PT. CVX ini adalah sebagai berikut:

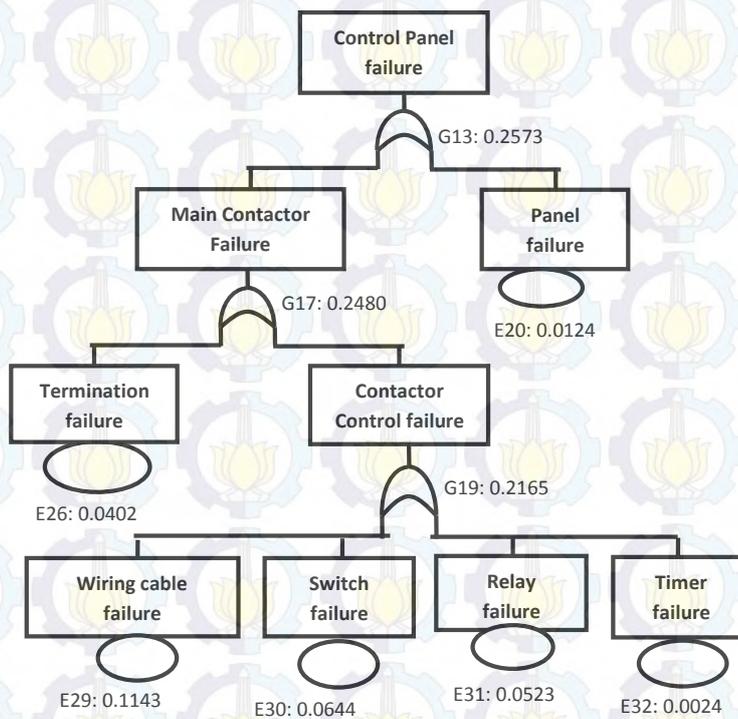
- 1) Kalkulasi disain Bearing tidak sesuai dengan standar API 11E.
- 2) Pada komponen strukur *bearing* yang diproduksi oleh *local company*, ditemukan bahwa yang dipasang tidak sesuai dengan disain awal yang telah disepakati di dalam kontrak perjanjian jual beli.

- 3) Ditemukan *bearing-bearing* yang tidak masuk dalam standar *bearing* yang telah ditentukan oleh *engineer* PT. CVX. *Bearing* yang disyaratkan adalah *bearing* yang masuk dalam *American Bearing Manufacturer Association* (ABMA).
- 4) Penggunaan pelumas (*grease*) yang tidak dikontrol. Banyak pelumas yang sudah rusak masih digunakan.



Gambar 4. 12 Contoh Kerusakan *Tail Bearing* (PT. CVX, 2012)

2. Posisi G13 dimana pada *intermediate event* tersebut memiliki nilai probabilitas yang paling tinggi dan memiliki enam *basic event* sebagai penyebab kegagalan. Pada panel kontrol ini merupakan *sub system* pada pompa angguk yang berfungsi mengatur semua kontrol elektrik yang terletak pada sebuah kotak panel.



Gambar 4. 13. *Logic tree* Gerbang Logika 13

Analisa MOCUS untuk gerbang 13 :

G13 OR gate
E20
G17

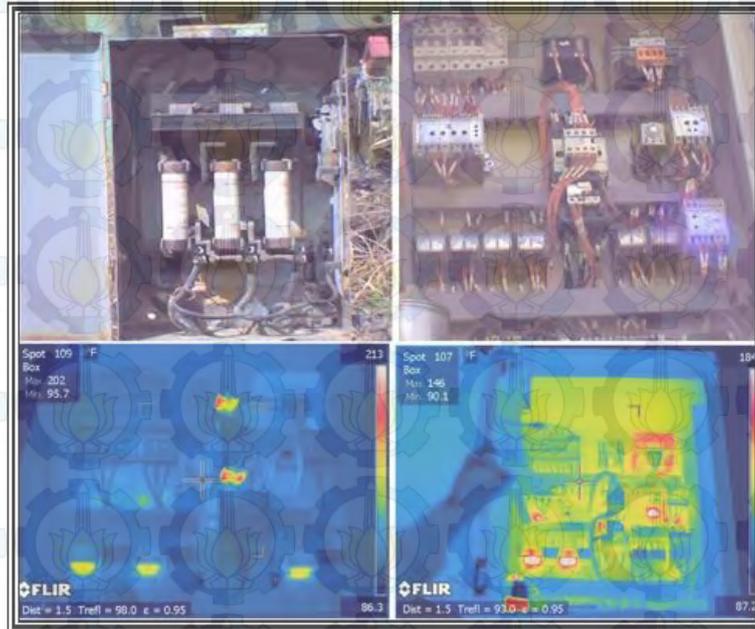
G17 OR gate
E20
E26
G19

G19 OR gate
E20
E26
E29
E30
E31
E32

<i>Minimal cut set</i>	
E20	<i>Panel failure</i> (kerusakan panel)
E26	<i>Termination failure</i>
E29	<i>Wiring cable failure</i>
E30	<i>Switch failure</i>
E31	<i>Relay failure</i>
E32	<i>Timer failure</i>

Hasil dari FTA penyebab kegagalan pada panel kontrol (*Control panel failure*) menghasilkan 6 *basic event*, sedangkan analisa MOCUS menghasilkan 3 *basic event* dengan 6 kegagalan.

Contoh-contoh kegagalan pada *sub system* ini bisa dilihat pada gambar berikut:

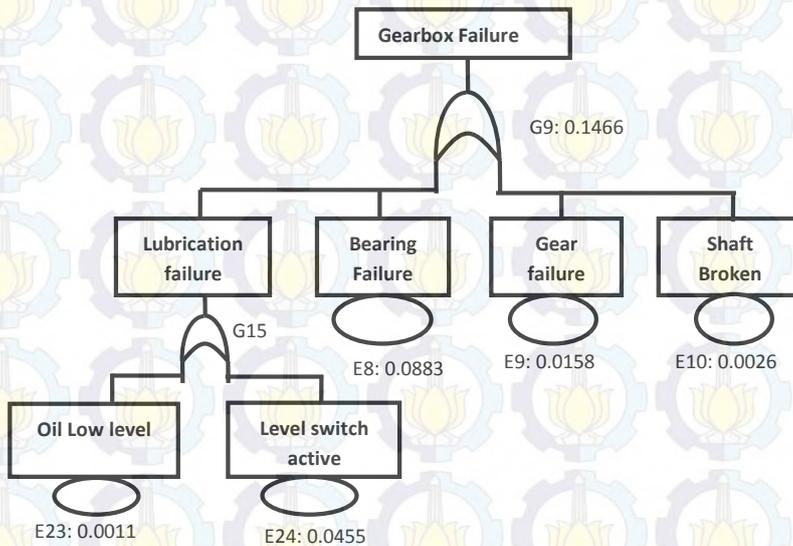


Gambar 4. 14 Contoh Kerusakan Panel Kontrol Pompa Angguk (PT. CVX, 2012)

Berdasarkan analisa yang dilakukan oleh tim FGD, penyebab kegagalan kontrol panel pada pompa angguk di PT. CVX ini adalah sebagai berikut:

- 1) Panel kontrol banyak yang rusak, berlubang, berkarat dan sering dijumpai panelnya terbuka pada saat beroperasi.
- 2) Banyak penggunaan *relay* yang dipasang (terdapat 12 *relay*) sedangkan dari fungsi *relay* tersebut tidak semuanya terhubung dan berfungsi sebagai proteksi. Sementara kegagalan *relay* banyak terjadi.
- 3) Pada kontrol panel ditemukan kabel-kabel yang sudah tua dan mulai rusak akibat usia pemakaian dan ditemukan kabel yang berantakan dan tidak tertata sehingga menyulitkan proses perawatan dan perbaikan.

3. Pada posisi G9 dimana komponen *basic event* yang terjadi adalah komponen tunggal yaitu *gearbox*, sehingga usaha yang diperlukan adalah mencari permasalahan sebab terjadinya kerusakan *gearbox*.



Gambar 4. 15. *Logic Tree* Gerbang Logika 9

Analisa MOCUS untuk kegagalan *gearbox* (gerbang 9) :

G9 OR gate
E8
E9
E10
G15

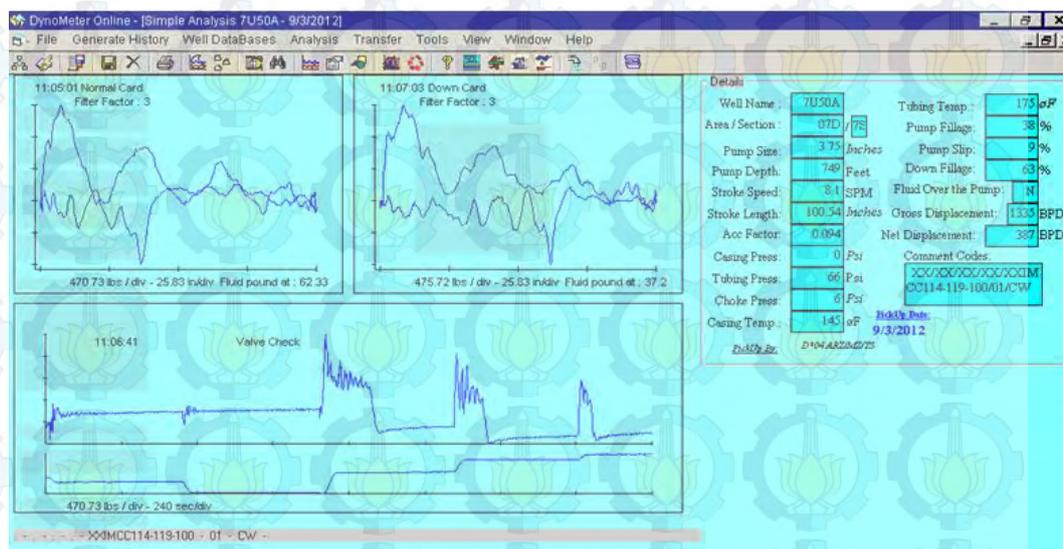
G15 OR gate
E8
E9
E10
E23
E24

<i>Minimal cut set</i>	
E8	<i>Bearing failure</i>
E9	<i>Gear failure</i>
E10	<i>Shaft broken</i>
E23	<i>Oil low level</i>
E24	<i>Level switch active</i>

Hasil dari FTA penyebab kegagalan pada *gearbox* menghasilkan 5 *basic event* sedangkan analisa MOCUS menghasilkan 2 *basic event* dengan 5 kegagalan.

Berdasarkan analisa yang dilakukan oleh tim FGD, penyebab kegagalan *gearbox* pada pompa angguk di PT. CVX ini adalah sebagai berikut:

- 1) *Bearing* rusak pada *gearbox* dalam kondisi kering tidak ada pelumasan meskipun oli pelumas masih ada di dalam *gearbox*.
- 2) Penggunaan oli pelumas *gearbox* yang tidak sesuai dengan rekomendasi manufaktur *gearbox*. Pelumasan yang direkomendasikan oleh *manufacturer* adalah menggunakan ISO VG 220 atau SAE 90. Sedangkan yang digunakan adalah menggunakan SEA 140.
- 3) Banyak sekali pompa angguk yang beroperasi dalam kondisi *fluid pound*, dimana efek dari *fluid pound* adalah menimbulkan getaran yang berlebihan pada pompa angguk. Contoh *fluid pound* bisa dilihat pada *dyno card* berikut ini :



Gambar 4. 16. Contoh Kartu *Dyno Fluid Pound* pada Pompa Angguk
(Data Dyno PT. CVX, 2012)

4.3.2 Usulan Perbaikan atau Solusi Terhadap Permasalahan.

Dari hasil analisa terhadap penyebab kegagalan pada tiga *sub system* (struktur *bearing*, *gearbox* dan panel kontrol) pompa angguk diatas maka tim FGD melibatkan para ahli (*Engineer*) di perusahaan PT. CVX untuk berdiskusi dan melakukan perbaikan terhadap tiga bagian kelompok komponen tersebut. Perbaikan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Struktur *bearing* :

- a) Menggunakan standar *bearing* yang diberlakukan oleh perusahaan PT. CVX.
- b) Mengembalikan kepada disain awal sesuai dengan perhitungan kontrak.

Karena disain awal ditemukan kalkulasi kekuatan komponen lebih kuat dan sesuai dengan yang disyaratkan oleh API 11E.

- c) Menggunakan alat yang tepat untuk pemasangan *bearing*.
- d) Lakukan pengencangan secara periodik pada *wristpin bearing*.

2. Gearbox :

- a) Mengembalikan penggunaan oli pelumas sesuai dengan yang direkomendasikan oleh *manufacturer* yaitu menggunakan ISO VG 220. Oli pelumas yang digunakan sebelumnya adalah dengan grade SAE 140 dimana oli tersebut memiliki viskositas kinematik yang lebih kental yaitu 412,32 Cst pada suhu 40⁰ C dibandingkan dengan viskositas kinematik oli ISO VG 220 sebesar 217,90 Cst. Menurut FAG (2002), dengan kekentalan yang dimiliki oleh oli SAE 140 menyebabkan oli pelumas tidak bisa mengalir sempurna menuju *bearing*. Perlu diketahui bahwa pelumasan bearing pada *gearbox* menggunakan sistem *splash* (percikan) dan aliran melalui jalur yang sempit menuju *bearing*. Data viskositas oli pelumas SAE 140 dan ISO VG 220 bisa dilihat pada Lampiran 6 dan Lampiran 7.
- b) Menggunakan *bearing* yang sesuai dengan standar yang ditentukan oleh perusahaan PT. CVX.
- c) Menggunakan alat yang tepat untuk pemasangan *bearing* pada *gearbox*.
- d) Perbaiki sumur-sumur yang mengalami *fluid pound*.

e) Mengatur dan menyesuaikan kecepatan pompa angguk atau *Speed Per Minutes* (SPM) dan panjang langkah pompa atau *Stroke Length* (SL). Hubungan antara SPM dan SL terhadap kerusakan pompa angguk adalah ketika timba pompa angguk tidak terisi dengan penuh akan mengakibatkan *fluid pound*. Timba tidak terisi dengan penuh diakibatkan oleh kecepatan aliran fluida di dalam formasi sumur tidak sebanding dengan kecepatan gerak dan panjang langkah dari pompa angguk. Dengan menyesuaikan antara SPM dan SL maka *fluid pound* akan bisa dihindari.

3. Panel kontrol.

- a) Mengatur ulang dan mengganti kabel-kabel yang sudah usang disesuaikan dengan P&ID (*Piping and Instrumentation Diagram*).
- b) Membuat modifikasi penggunaan *relay* yang tepat agar tidak terjadi banyak kerusakan pada *relay*.
- c) Menyesuaikan penggunaan kotak panel dan peralatan listrik yang sesuai dengan iklim dan kondisi lingkungan setempat. Karena kondisi lingkungan yang terkadang terpapar gas H₂S dan sifatnya *corrosive*, serta posisi kotak panel yang diluar ruangan (*outdoor*) maka kotak panel harus terbuat dari *stainless steel* dan dibuat *seal* yang bagus agar komponen kontrol panel tidak terpapar air dan panas matahari.
- d) Menggunakan *sparepart* yang bersertifikat.
- e) Membuat *Standard Repair Procedure* yang sesuai dan konsisten untuk dilaksanakan oleh pihak perawatan.

Kondisi sebelum perbaikan yang dimaksud adalah kondisi pompa angguk beroperasi dengan: menggunakan oli pelumas jenis SAE 140 pada gearbox, banyak mengalami fluid pounding, banyak panel yang terbuka, banyak relay yang terpasang, kabel yang sudah usang dan tidak beraturan, kualitas struktur bearing yang tidak terkontrol dan proses maintenance yang kurang mendapatkan perhatian dari tim maintenance.

Kondisi Setelah perbaikan adalah kondisi dimana pompa angguk sudah dilakukan treatment atau uji perbaikan sesuai dengan rekomendasi yang dibuat oleh tim FGD dari hasil analisa yang telah dilakukan.

Proses pengerjaan uji perbaikan dilakukan selama 2 bulan dengan cara paralel. Setiap pompa angguk yang dijadwalkan dilakukan pekerjaan perawatan rutin atau pompa angguk yang sedang *shutdown* atau mati karena kerusakan langsung dilakukan uji perbaikan sesuai dengan rekomendasi dari penelitian ini.

Setelah dilakukan uji perbaikan diharapkan terjadi penurunan probabilitas kegagalan dari jumlah total kejadian kegagalan rata-rata perbulan pada masing-masing komponen *basic event* di Gerbang 9, Gerbang 11 dan Gerbang 13. Untuk melihat apakah pengaruh dari perbaikan tersebut memberikan efek positif pada pompa angguk, kemudian diambil data kegagalan pompa angguk pada bulan januari – Mei 2013, dengan metode yang sama pada saat pengumpulan data pertama dan didapatkan data seperti terlihat pada tabel berikut :

Tabel 4. 13 Data Kegagalan Periode 5 Bulan Setelah Perbaikan

No	Kegagalan Komponen	Jumlah Kejadian
1	<i>Belt cut off</i>	45
2	<i>Wiring/Cable failure</i>	57
3	<i>Level switch active (oil)</i>	23
4	<i>Bearing Motor failure</i>	41
5	<i>Horse Head failure</i>	36
6	<i>Switch failure</i>	25
7	<i>Termination failure</i>	28
8	<i>Wristpin failure</i>	24
9	<i>Relay failure</i>	21
10	<i>Saddle Bearing failure</i>	16
11	<i>Gearbox gear failure</i>	18
12	<i>Tail Bearing failure</i>	23
13	<i>Panel failure</i>	10
14	<i>Gearbox shaft failure</i>	9
15	<i>Gearbox bearing failure</i>	25
16	<i>Fuse failure</i>	13
17	<i>Bridle failure</i>	9

No	Kegagalan Komponen	Jumlah Kejadian
18	<i>Oil low level</i>	25
19	<i>Breaker, Circuit failure</i>	15
20	<i>Contactora failure</i>	20
21	<i>Brake failure</i>	15
22	<i>No Code</i>	20
23	<i>Counter-Weight failure</i>	9
24	<i>burn out/winding failure</i>	10
25	<i>Bolt/fastener failure (structure)</i>	5
26	<i>Pitman Arm failure</i>	15
27	<i>Disconnect switch failure</i>	10
28	<i>No power from PG&T</i>	3
29	<i>Crank</i>	4
30	<i>Heater</i>	9
31	<i>Base</i>	5
	Total	588

Sumber : Data PT. CVX, (2013)

Perbandingan jumlah kegagalan antara sebelum dan setelah perbaikan yang terjadi dengan data 5 bulan setelah dilakukan perbaikan bisa dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4. 14 Perbandingan Kegagalan Periode 5 Bulan Setelah Perbaikan

Basic Event	Jumlah kejadian Sebelum perbaikan (rata-rata perbulan)	Jumlah kejadian setelah perbaikan (rata-rata perbulan)	Keterangan
E8	14	5	<i>Gearbox bearing failure</i>
E9	2,5	3,6	<i>Gearbox gear failure</i>
E10	0,42	1,8	<i>Gearbox shaft failure</i>
E16	12,92	3,2	<i>Saddle bearing failure</i>
E17	12,54	4,6	<i>Tail bearing failure</i>
E18	12,63	4,8	<i>Wristpin bearing failure</i>
E20	1,96	2	<i>Panel failure</i>
E23	0,17	5	<i>Oil low level</i>
E24	7,21	4,6	<i>Oil level switch active</i>
E26	6,38	5,6	<i>Termination failure</i>
E29	18,13	11,4	<i>Wiring cable failure</i>
E30	10,21	5	<i>Switch failure</i>
E31	8,29	4,2	<i>Relay failure</i>

Basic Event	Jumlah kejadian Sebelum perbaikan (rata-rata perbulan)	Jumlah kejadian setelah perbaikan (rata-rata perbulan)	Keterangan
E32	0,38	0	<i>Timer failure</i>
Total	107,71	60,8	

Dari Tabel 4. 14 diatas, didapatkan nilai probabilitas kejadian yang baru setelah dilakukan uji perbaikan adalah sebagai berikut :

$$\% \text{ Penurunan kejadian kegagalan} = \frac{107,71-60,8}{107,71} \times 100\% = 43,55 \%$$

Jika nilai penurunan kejadian kegagalan tersebut (43,55 %) dimasukkan dalam nilai probabilitas kejadian, maka akan didapatkan nilai probabilitas kejadian pada komponen yang dilakukan perbaikan sebagai berikut :

Tabel 4. 15 Probabilitas Komponen yang Diperbaiki Setelah Perbaikan

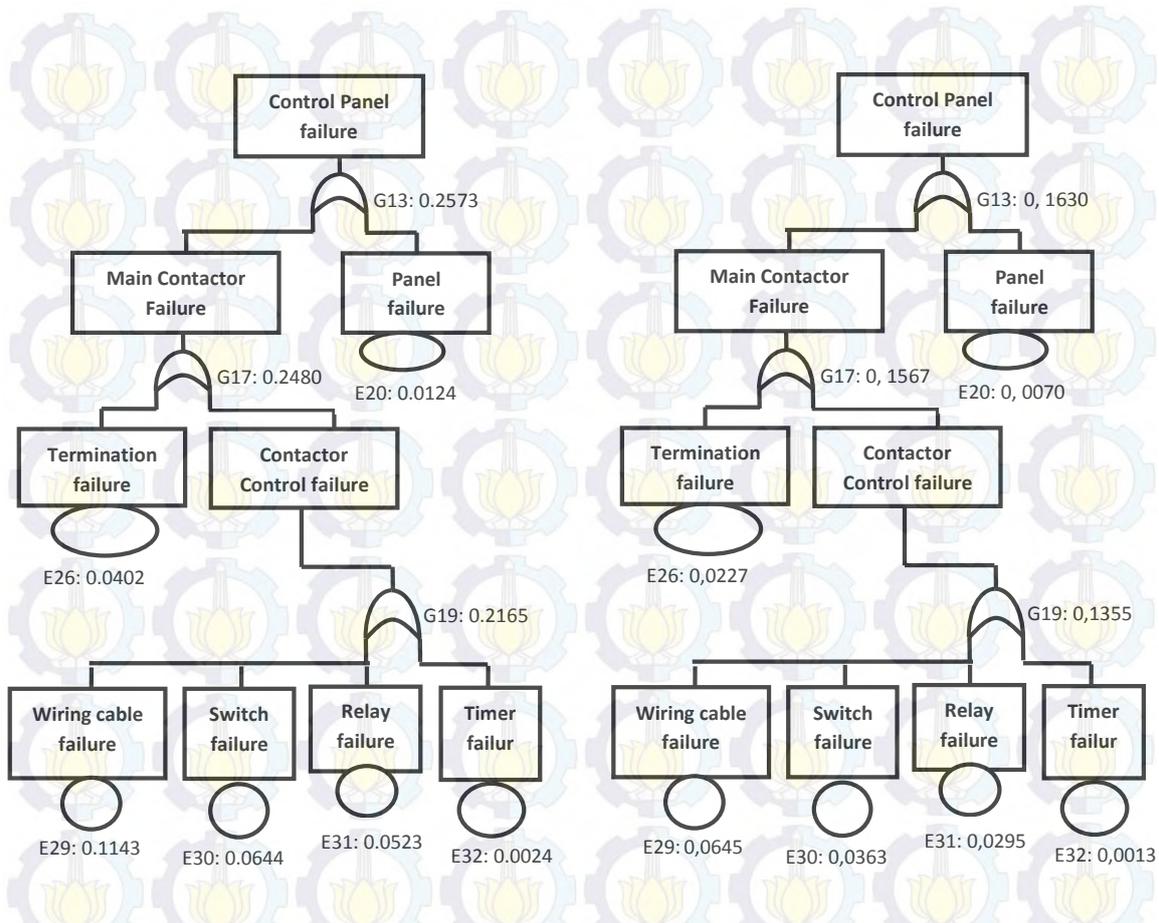
Basic Event	Probabilitas Sebelum perbaikan	Probabilitas Setelah perbaikan	Keterangan
E8	0,0883	0,0498	<i>Gearbox bearing failure</i>
E9	0,0158	0,0089	<i>Gearbox gear failure</i>
E10	0,0026	0,0015	<i>Gearbox shaft failure</i>
E16	0,0815	0,0460	<i>Saddle bearing failure</i>
E17	0,0791	0,0447	<i>Tail bearing failure</i>
E18	0,0796	0,0450	<i>Wristpin bearing failure</i>
E20	0,0124	0,0070	<i>Panel failure</i>
E23	0,0011	0,0006	<i>Oil low level</i>
E24	0,0455	0,0257	<i>Oil level switch active</i>
E26	0,0402	0,0227	<i>Termination failure</i>
E29	0,1143	0,0645	<i>Wiring cable failure</i>
E30	0,0644	0,0363	<i>Switch failure</i>
E31	0,0523	0,0295	<i>Relay failure</i>
E32	0,0024	0,0013	<i>Timer failure</i>

Dari nilai probabilitas pada *basic event* di Tabel 4. 15 maka didapatkan nilai kombinasi probabilitas pada masing-masing gerbang logika seperti yang disebutkan di Tabel 4. 16. Perhitungan secara lengkap nilai probabilitas setelah dilakukan perbaikan bisa dilihat pada Lampiran 3.

Tabel 4. 16 Perhitungan Nilai Probabilitas Setelah Dilakukan Perbaikan

Gerbang	Probabilitas sebelum perbaikan	Probabilitas sesudah perbaikan
G1	0,6342	0,5141
G2	0,4295	0,3277
G3	0,3588	0,2773
G4	0,1970	0,1443
G5	0,2757	0,1989
G6	0,3238	0,2379
G7	0,0517	0,0517
G8	0,0548	0,0548
G9	0,1466	0,0907
G10	0,0696	0,0696
G11	0,2215	0,1390
G12	0,0527	0,0527
G13	0,2573	0,1630
G14	0,0260	0,0260
G15	0,0465	0,0283
G16	0,0447	0,0447
G17	0,2480	0,1567
G18	0,0063	0,0063
G19	0,2165	0,1355

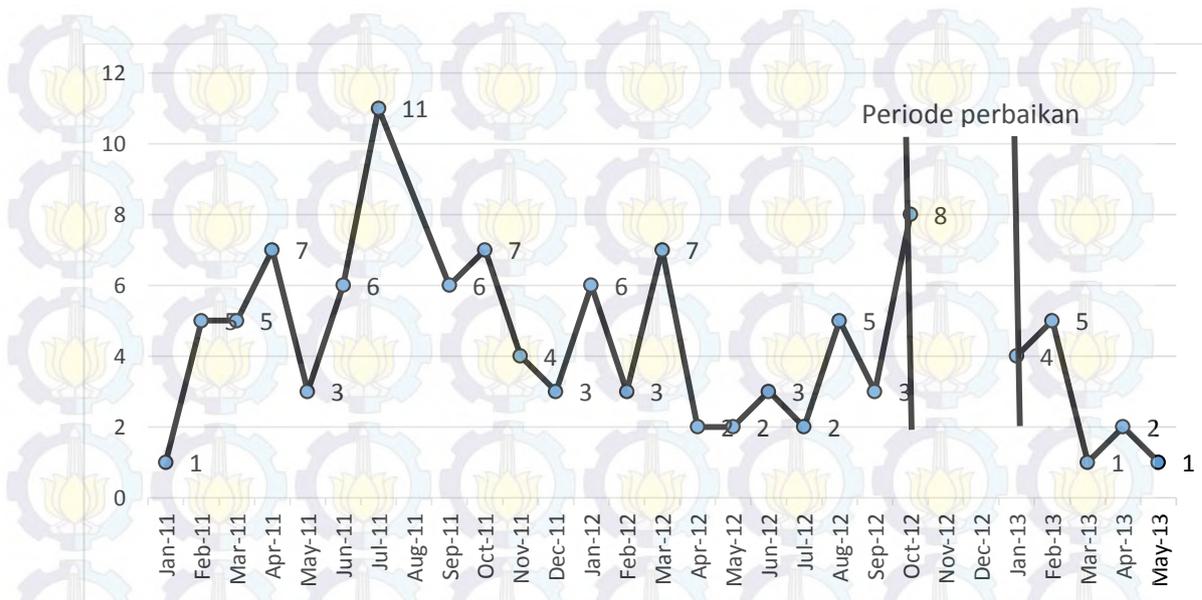
Dari Tabel 4. 16 diatas, terjadi perbedaan nilai probabilitas kejadian pada beberapa gerbang logika dimana perubahan tersebut akan mempengaruhi nilai probabilitas *top event*. Untuk lebih memperjelas perbedaan nilai probabilitas kejadian pada gerbang logika yang dimaksudkan, gambar di bawah adalah contoh salah satu perbedaan nilai probabilitas pada gerbang logika antara sebelum dan sesudah dilakukan uji perbaikan.



Gambar 4. 17 Perbandingan Nilai Probabilitas pada Pohon Kegagalan Sebelum dan Setelah Perbaikan pada Kontrol Panel

Dengan demikian setelah dilakukan perbaikan seperti di atas, maka didapatkan hasil penurunan nilai probabilitas pada Gerbang 1 dari 0.6342 menjadi 0.5141.

Perlu diketahui bahwa semua aktifitas perawatan pompa angguk di PT. CVX diserahkan pada kontraktor. Untuk melihat sejauh mana pengaruh uji perbaikan yang dilakukan bisa dilihat juga pada pekerjaan yang diulang (*rework*) akibat kerusakan yang masih dalam masa garansi, tren penurunan jumlah pekerjaan yang digaransi bisa dilihat pada gambar berikut :



Gambar 4. 18 Tren Jumlah Pekerjaan yang Diklaim Untuk Digaransi (Data PT. CVX, 2013)

Dari data pada Gambar 4. 18 diatas, kemudian dihitung nilai rata-rata kejadian klaim garansi yang dilakukan oleh PT. CVX kepada kontraktor. Dari perhitungan tersebut didapatkan hasil:

1. Jumlah rata-rata klaim garansi sebelum dilakukan perbaikan sebesar 4,7 kejadian per bulan untuk semua jenis aktifitas perbaikan pada 3 komponen yang diuji perbaikan.
2. Jumlah rata-rata klaim garansi setelah dilakukan perbaikan sebesar 2,6 kejadian per bulan untuk semua jenis aktifitas perbaikan pada 3 komponen yang diuji perbaikan.

4.4 Diskusi dan Pembahasan

Dari hasil *Fault Tree Analysis* atau *logic tree* didapatkan kondisi bahwa masing-masing *basic event* adalah komponen terkecil dari pompa angguk dimana jika komponen tersebut mengalami kegagalan, akan menyebabkan unit pompa angguk akan berhenti beroperasi. Beberapa *intermediate event* yang terbentuk merupakan *sub system* yang memiliki kesatuan fungsi pada pompa angguk, diantaranya adalah *gearbox*, motor listrik, struktur dan panel kontrol.

Sub system tersebut merupakan komponen yang memiliki peluang untuk dilakukan perbaikan. Untuk menentukan bagian komponen yang akan dipilih terlebih dahulu dilihat nilai probabilitas kejadiannya. Prioritas *improvement* akan dilakukan pada komponen yang memiliki probabilitas kejadian yang tinggi. Dari kelompok nilai probabilitas yang tinggi tersebut, maka dipilih 3 komponen untuk dilakukan *improvement* yaitu *bearing* struktur, *gearbox* dan panel kontrol karena ketiga komponen tersebut merupakan *sub system* yang berdiri sebagai komponen.

Uji perbaikan dilakukan sesuai rekomendasi atau usulan guna mengurangi resiko kegagalan. Perbaikan yang dimaksud adalah perbaikan kualitas baik dari kualitas komponen maupun kualitas pekerjaan pada tiga komponen yaitu *gearbox*, kontrol panel dan bearing struktur.

Gearbox adalah komponen pompa angguk yang membutuhkan perhatian lebih karena memiliki dimensi yang besar dan berat, untuk memperbaiki *gearbox* membutuhkan waktu perbaikan yang lebih lama dibandingkan untuk perbaikan komponen lain seperti panel dan *bearing* struktur. Proses perbaikan *gearbox* menurut aturan yang diberlakukan PT. CVX, tidak boleh dilakukan di tempat (lokasi) dan harus dilakukan di bengkel (*shop*). Sedangkan jarak dan peralatan yang digunakan untuk perbaikan tersebut juga spesial, seperti *Crane* dan *foco truck*. *Sparepart* yang digunakan dalam *gearbox* juga tergolong paling sulit dan mahal.

Panel kontrol pompa angguk merupakan peralatan yang cukup penting karena pada panel kontrol ini semua peralatan elektrik dan instrumen berada dan pompa angguk dikontrol oleh panel tersebut. Di dalam panel ini juga terdapat peralatan pengaman (proteksi) jika ada faktor-faktor yang membahayakan. Proteksi yang dimaksud adalah proteksi terhadap beban berlebih (*overload*) dan proteksi terhadap *gearbox* yang kekurangan oli pelumas.

Bearing struktur merupakan salah satu komponen *rotating equipment* yang berada di pompa angguk yang menerima beban yang cukup besar tergantung dari ukuran disain pompa angguknya. Kegagalan *bearing* struktur sangat dihindari karena *impact* yang cukup besar jika terjadi kegagalan pada struktur *bearing* bisa mengakibatkan pompa angguk tumbang. Contoh kegagalan pada bearing struktur yang mengakibatkan pompa angguk tumbang bisa dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.19 Pompa Angguk Tumbang Karena Kegagalan *Bearing* Struktur (1)



Gambar 4.20 Pompa Angguk Tumbang Karena Kegagalan *Bearing* Struktur (2)

Dari kondisi-kondisi yang disebutkan di atas, maka tim FGD memberikan saran ke perusahaan PT. CVX sebagai berikut:

1. Data-data yang ada dalam *work order* harus lebih lengkap dan spesifik, hal ini untuk menghindari tingkat kesalahan dalam menentukan *basic event*.
2. Adanya koreksi dari tim CMMS untuk bisa meminimalisasi jumlah *work order* pada komponen *No Code* dan *blank* sehingga bisa meningkatkan ketepatan pengisian penyebab kegagalan.

3. Pencegahan terjadinya kegagalan bisa dimulai dari awal pemasangan pompa anggur dengan meningkatkan ketrampilan tim yang terlibat dalam pemasangan dan penentuan standar material yang jelas yang harus diaplikasikan.
4. Dibentuknya tim khusus yang mengontrol kualitas material maupun pekerjaan oleh PT. CVX.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan pada pohon kegagalan (*logic tree*) pompa angguk di *Heavy Oil Operating Unit* PT. CVX. Dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan dari *Fault Tree Analysis* atau *logic tree* didapatkan tiga puluh dua *basic event* penyebab kegagalan yang menyebabkan pompa angguk tidak dapat beroperasi. Didapatkan nilai probabilitas kegagalan pompa angguk sebesar 0,6342 yang disebabkan kombinasi probabilitas kegagalan mekanik sebesar 0,4295 dan probabilitas kegagalan elektrik/instrumentasi sebesar 0,3588.
2. Pencegahan atau mitigasi dilakukan dengan perbaikan kualitas pekerjaan dan kualitas komponen pada tiga bagian pompa angguk. Ketiga komponen tersebut adalah *gearbox*, *bearing* struktur dan kontrol panel. *Gearbox* dengan perbaikan: menggunakan oli pelumas ISO VG 220, memakai *bearing* dan memasangnya dengan alat yang tepat, mengatur kecepatan dan langkah pompa angguk yang tepat dan memperbaiki sumur-sumur yang mengalami *fluid pounding*. *Bearing* struktur dengan perbaikan: mengganti *bearing* yang sesuai, menggunakan kalkulasi disain sesuai dengan standar API 11E, menggunakan alat yang tepat untuk memasang *bearing* dan melakukan pengencangan *wrist pin* secara periodik. Kontrol panel dengan perbaikan yang dilakukan: mengatur ulang dan mengganti kabel, memodifikasi penggunaan *relay*, kotak panel disesuaikan dengan kondisi operasi dan lingkungan, menggunakan *sparepart* yang bersertifikat dan membuat *Standard Repair Procedure* yang sesuai dan konsisten untuk dilaksanakan. Dari hasil perbaikan kualitas yang dilakukan pada tiga komponen tersebut, selama 5 bulan berhasil menurunkan nilai probabilitas kejadian kegagalan pompa angguk dari 0,6342 menjadi 0,5141 dengan nilai penurunan sebesar 18,9%.

5.2 Saran

Saran dalam analisis dan pencegahan kegagalan pompa angguk untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah untuk membandingkan hasil penelitian, sebaiknya dilakukan penelitian lanjutan dengan menggunakan metode yang berbeda seperti *Failure Mode Effects and Criticality Analysis* atau *Event Tree Analysis*.

LAMPIRAN

Lampiran 1. *Proses Brain Storming* Penentuan *Top Event*

Proses *brain Storming* pada saat penentuan *top event* oleh tim FGD dengan berdiskusi dan menjawab pertanyaan seberapa penting pompa angguk di dalam proses pengambilan atau eksplorasi minyak di PT. CVX. pertanyaan yang dimunculkan dan jawaban pada saat brain storming adalah sebagai berikut:

1. Menurut anda, fasilitas atau peralatan apa yang bisa mempengaruhi perolehan jumlah minyak yang dihasilkan oleh *heavy oil*?

Jawaban beberapa anggota FGD:

Senior analis perawatan pompa angguk: *“Sebetulnya yang paling berpengaruh adalah pumping unit. Selebihnya itu tergantung jenis minyak dan keperluan mau diapakan. itupun sebetulnya bukan pumping unit saja yang dipakai untuk mengangkat minyaknya. Bisa juga menggunakan ESP (Electric Submersible Pump). Itu karena tergantung formasi di dalam sumurnya. Yang jelas yang diawal adalah pumping unit selebihnya AWT (Automatic Well Test) dan CGS (Central Gathering Station) itu sebagai pendukung produksi.”*

Senior Engineer Reliability, *“Yang jelas pumping unit, kemudian CVC (Casing Vapour Collection) dan degassing, kemudian di CGS ada FWKO (Free Water Knock Out), kemudian di Shipping Facility.”*

Engineer Perawatan Instrumentasi, *“ya MPU (Mechanical Pumping Unit) ke Well Test, sampai ke CGS.”*

Team Leader Pumping Unit, *“semua kritisal, mulai dari pumping unit, AWT, CGS bahkan sampai ke shipping pump. Jadi semua akan mempengaruhi berapa jumlah minyak yang akan diangkat”*

Planning Engineer, *“Pompa angguk.”*

Mechanical Engineer, *“Kalau melihat dari keseluruhan proses di Heavy Oil, maka peranan pumping unit menjadi sangat penting dan menjadi tulang punggung perolehan minyak. Ini dibuktikan ketika produksi akan dinaikkan,*

yang pertama dilakukan adalah dengan menambah jumlah sumur produksi yang disitu terdapat pumping unit.”

2. Apakah *Pumping unit* merupakan penyumbang utama perolehan minyak?

Jawaban beberapa anggota FGD:

Senior analis perawatan pompa angguk, “*Tentu iya*”.

Senior Engineer Reliability, “*Ya*”.

Engineer Perawatan Instrumentasi, “*Iya*”

Team Leader Pumping Unit, “*Iya*”.

Team Leader Pumping Unit, “*Ya*”.

Planning Engineer, “*Iya*”.

Mechanical Engineer, “*Jelas ya*”.

Setelah menjawab pertanyaan tersebut, akhirnya tim FGD memutuskan bahwa *top event* yang dipilih adalah *pumping unit failure*.

Lampiran 2. Perhitungan Masing-masing Gerbang Logika Sebelum Perbaikan

$$G19 = E29 \text{ OR } E30 \text{ OR } E31 \text{ OR } E32$$

$$P(G19) = 1 - \{[1 - P(E29)][1 - P(E30)][1 - P(E31)][1 - P(E32)]\}$$

$$P(G19) = 1 - \{[1 - 0.11432][1 - 0.06439][1 - 0.05229][1 - 0.00236]\}$$

$$P(G19) = 0.2165$$

$$G18 = E27 \text{ OR } E28$$

$$P(G18) = 1 - \{[1 - P(E27)][1 - P(E28)]\}$$

$$P(G18) = 1 - \{[1 - 0.0021][1 - 0.0042]\}$$

$$P(G18) = 0,0063$$

$$G17 = E26 \text{ OR } G19$$

$$P(G17) = 1 - \{[1 - P(E26)][1 - P(G19)]\}$$

$$P(G17) = 1 - \{[1 - 0,0402][1 - 0,2165]\}$$

$$P(G17) = 0,2480$$

$$G16 = G18 \text{ OR } E25$$

$$P(G16) = 1 - \{[1 - P(G18)][1 - P(E25)]\}$$

$$P(G16) = 1 - \{[1 - 0,0063][1 - 0.03863]\}$$

$$P(G16) = 0,0447$$

$$G15 = E23 \text{ OR } E24$$

$$P(G15) = 1 - \{[1 - P(E23)][1 - P(E24)]\}$$

$$P(G15) = 1 - \{[1 - 0,0011][1 - 0,0455]\}$$

$$P(G15) = 0,0465$$

$$G14 = E21 \text{ OR } E22$$

$$P(G14) = 1 - \{[1 - P(E21)][1 - P(E22)]\}$$

$$P(G14) = 1 - \{[1 - 0,0244][1 - 0,0016]\}$$

$$P(G14) = 0,026$$

$$G13 = E20 \text{ OR } G17$$

$$P(G13) = 1 - \{[1 - P(E20)][1 - P(G17)]\}$$

$$P(G13) = 1 - \{[1 - 0,0124][1 - 0,2480]\}$$

$$P = 0,2573$$

$$G12 = G16 \text{ OR } E19$$

$$P(G12) = 1 - \{[1 - P(G16)][1 - P(E19)]\}$$

$$P(G12) = 1 - \{[1 - 0,0447][1 - 0,0084]\}$$

$$P(G12) = 0,0527$$

$$G11 = E16 \text{ OR } E17 \text{ OR } E18$$

$$P(G11) = 1 - \{[1 - P(E16)][1 - P(E17)][1 - P(E18)]\}$$

$$P(G11) = 1 - \{[1 - 0,0815][1 - 0,0791][1 - 0,0796]\}$$

$$P(G11) = 0,2215$$

$$G10 = E11 \text{ OR } E12 \text{ OR } E13 \text{ OR } E14 \text{ OR } E15$$

$$P(G10) = 1 - \{[1 - P(E11)][1 - P(E12)][1 - P(E13)][1 - P(E14)][1 - P(E15)]\}$$

$$P(G10) = 1 - \{[1 - 0,0452][1 - 0,011][1 - 0,0032][1 - 0,0103][1 - 0,0013]\}$$

$$P(G10) = 0,0696$$

$$G9 = G15 \text{ OR } E8 \text{ OR } E9 \text{ OR } E10$$

$$P(G9) = 1 - \{[P(G15)][P(E8)][P(E9)][P(E10)]\}$$

$$P(G9) = 1 - \{[1 - 0,0465][1 - 0,0883][1 - 0,0158][1 - 0,0026]\}$$

$$P(G9) = 0,1466$$

$$G8 = E6 \text{ OR } E7$$

$$P(G8) = 1 - \{[1 - P(E6)][1 - P(E7)]\}$$

$$P(G8) = 1 - \{[1 - 0,052][1 - 0,0029]\}$$

$$P(G8) = 0,0548$$

$$G7 = E4 \text{ OR } G14 \text{ OR } E5$$

$$P(G7) = 1 - \{[1 - P(E4)][1 - P(G14)][1 - P(E5)]\}$$

$$P(G7) = 1 - \{[1 - 0,006][1 - 0,026][1 - 0,0205]\}$$

$$P(G7) = 0,0517$$

$$G6 = G12 \text{ OR } E3 \text{ OR } G13$$

$$P(G6) = 1 - \{[1 - P(G12)][1 - P(E3)][1 - P(G13)]\}$$

$$P(G6) = 1 - \{[1 - 0,0527][1 - 0,0389][1 - 0,2573]\}$$

$$P(G6) = 0,3238$$

$$G5 = G10 \text{ OR } G11$$

$$P(G5) = 1 - \{[1 - P(G10)][1 - P(G11)]\}$$

$$P(G5) = 1 - \{[1 - 0,0696][1 - 0,2215]\}$$

$$P(G5) = 0,2757$$

$$G4 = G8 \text{ OR } G9 \text{ OR } E2$$

$$P(G4) = 1 - \{[1 - P(G8)][1 - P(G9)][1 - P(E2)]\}$$

$$P(G4) = 1 - \{[1 - 0,0548][1 - 0,1466][1 - 0,0045]\}$$

$$P(G4) = 0,197$$

$$G3 = G6 \text{ OR } G7$$

$$P(G3) = 1 - \{[1 - P(G6)][1 - P(G7)]\}$$

$$P(G3) = 1 - \{[1 - 0,3238][1 - 0,0517]\}$$

$$P(G3) = 0,3588$$

$$G2 = G4 \text{ OR } G5 \text{ OR } E1$$

$$P(G2) = 1 - \{[1 - P(G4)][1 - P(G5)][1 - P(E1)]\}$$

$$P(G2) = 1 - \{[1 - 0,197][1 - 0,2757][1 - 0,0192]\}$$

$$P(G2) = 0,4295$$

$$G1 = G2 \text{ OR } G3$$

$$P(G1) = 1 - \{[1 - P(G2)][1 - P(G3)]\}$$

$$P(G1) = 1 - \{[1 - 0,4295][1 - 0,3588]\}$$

$$P(G1) = 0,6342$$

Lampiran 3 Perhitungan Probabilitas Setelah Perbaikan

$$G19 = E29 \text{ OR } E30 \text{ OR } E31 \text{ OR } E32$$

$$P(G19) = 1 - \{[1 - P(E29)][1 - P(E30)][1 - P(E31)][1 - P(E32)]\}$$

$$P(G19) = 1 - \{[1 - 0,0695][1 - 0,0391][1 - 0,0318][1 - 0,0041]\}$$

$$P(G19) = 0,1355$$

$$G18 = E27 \text{ OR } E28$$

$$P(G18) = 1 - \{[1 - P(E27)][1 - P(E28)]\}$$

$$P(G18) = 1 - \{[1 - 0,0021][1 - 0,0042]\}$$

$$P(G18) = 0,0063$$

$$G17 = E26 \text{ OR } G19$$

$$P(G17) = 1 - \{[1 - P(E26)][1 - P(G19)]\}$$

$$P(G17) = 1 - \{[1 - 0,0244][1 - 0,1355]\}$$

$$P(G17) = 0,1567$$

$$G16 = G18 \text{ OR } E25$$

$$P(G16) = 1 - \{[1 - P(G18)][1 - P(E25)]\}$$

$$P(G16) = 1 - \{[1 - 0,0063][1 - 0,03863]\}$$

$$P(G16) = 0,0447$$

$$G15 = E23 \text{ OR } E24$$

$$G15 = 1 - \{[1 - P(E23)][1 - P(E24)]\}$$

$$G15 = 1 - \{[1 - 0,0006][1 - 0,0276]\}$$

$$G15 = 0,0283$$

$$G14 = E21 \text{ OR } E22$$

$$P(G14) = 1 - \{[1 - P(E21)][1 - P(E22)]\}$$

$$P(G14) = 1 - \{[1 - 0,0244][1 - 0,0016]\}$$

$$P(G14) = 0,026$$

$$G13 = E20 \text{ OR } G17$$

$$P(G13) = 1 - \{[1 - P(E20)][1 - P(G17)]\}$$

$$P(G13) = 1 - \{[1 - 0,0075][1 - 0,1567]\}$$

$$P(G13) = 0,163$$

$$G12 = G16 \text{ OR } E19$$

$$P(G12) = 1 - \{[1 - P(G16)][1 - P(E19)]\}$$

$$P(G12) = 1 - \{[1 - 0,0447][1 - 0,0084]\}$$

$$P(G12) = 0,0527$$

$$G11 = E16 \text{ OR } E17 \text{ OR } E18$$

$$P(G11) = 1 - \{[1 - P(E16)][1 - P(E17)][1 - P(E18)]\}$$

$$P(G11) = 1 - \{[1 - 0,0495][1 - 0,0481][1 - 0,0484]\}$$

$$P(G11) = 0,1390$$

$$G10 = E11 \text{ OR } E12 \text{ OR } E13 \text{ OR } E14 \text{ OR } E15$$

$$P(G10) = 1 - \{[1 - P(E11)][1 - P(E12)][1 - P(E13)][1 - P(E14)][1 - P(E15)]\}$$

$$P(G10) = 1 - \{[1 - 0,0452][1 - 0,011][1 - 0,0032][1 - 0,0103][1 - 0,0013]\}$$

$$P(G10) = 0,0696$$

$$G9 = G15 \text{ OR } E8 \text{ OR } E9 \text{ OR } E10$$

$$P(G9) = 1 - \{[P(G15)][P(E8)][P(E9)][P(E10)]\}$$

$$P(G9) = 1 - \{[1 - 0,0283][1 - 0,0537][1 - 0,0096][1 - 0,0016]\}$$

$$P(G9) = 0,0907$$

$$G8 = E6 \text{ OR } E7$$

$$P(G8) = 1 - \{[1 - P(E6)][1 - P(E7)]\}$$

$$P(G8) = 1 - \{[1 - 0,052][1 - 0,0029]\}$$

$$P(G8) = 0,0548$$

$$G7 = E4 \text{ OR } G14 \text{ OR } E5$$

$$P(G7) = 1 - \{[1 - P(E4)][1 - P(G14)][1 - P(E5)]\}$$

$$P(G7) = 1 - \{[1 - 0,006][1 - 0,026][1 - 0,0205]\}$$

$$P(G7) = 0,0517$$

$$G6 = G12 \text{ OR } E3 \text{ OR } G13$$

$$P(G6) = 1 - \{[1 - P(G12)][1 - P(E3)][1 - P(G13)]\}$$

$$P(G6) = 1 - \{[1 - 0,0527][1 - 0,0389][1 - 0,163]\}$$

$$P(G6) = 0,2379$$

$$G5 = G10 \text{ OR } G11$$

$$P(G5) = 1 - \{[1 - P(G10)][1 - P(G11)]\}$$

$$P(G5) = 1 - \{[1 - 0,0696][1 - 0,139]\}$$

$$P(G5) = 0,1989$$

$$G4 = G8 \text{ OR } G9 \text{ OR } E2$$

$$P(G4) = 1 - \{[1 - P(G8)][1 - P(G9)][1 - P(E2)]\}$$

$$P(G4) = 1 - \{[1 - 0,0548][1 - 0,0907][1 - 0,0045]\}$$

$$P(G4) = 0,1443$$

$$G3 = G6 \text{ OR } G7$$

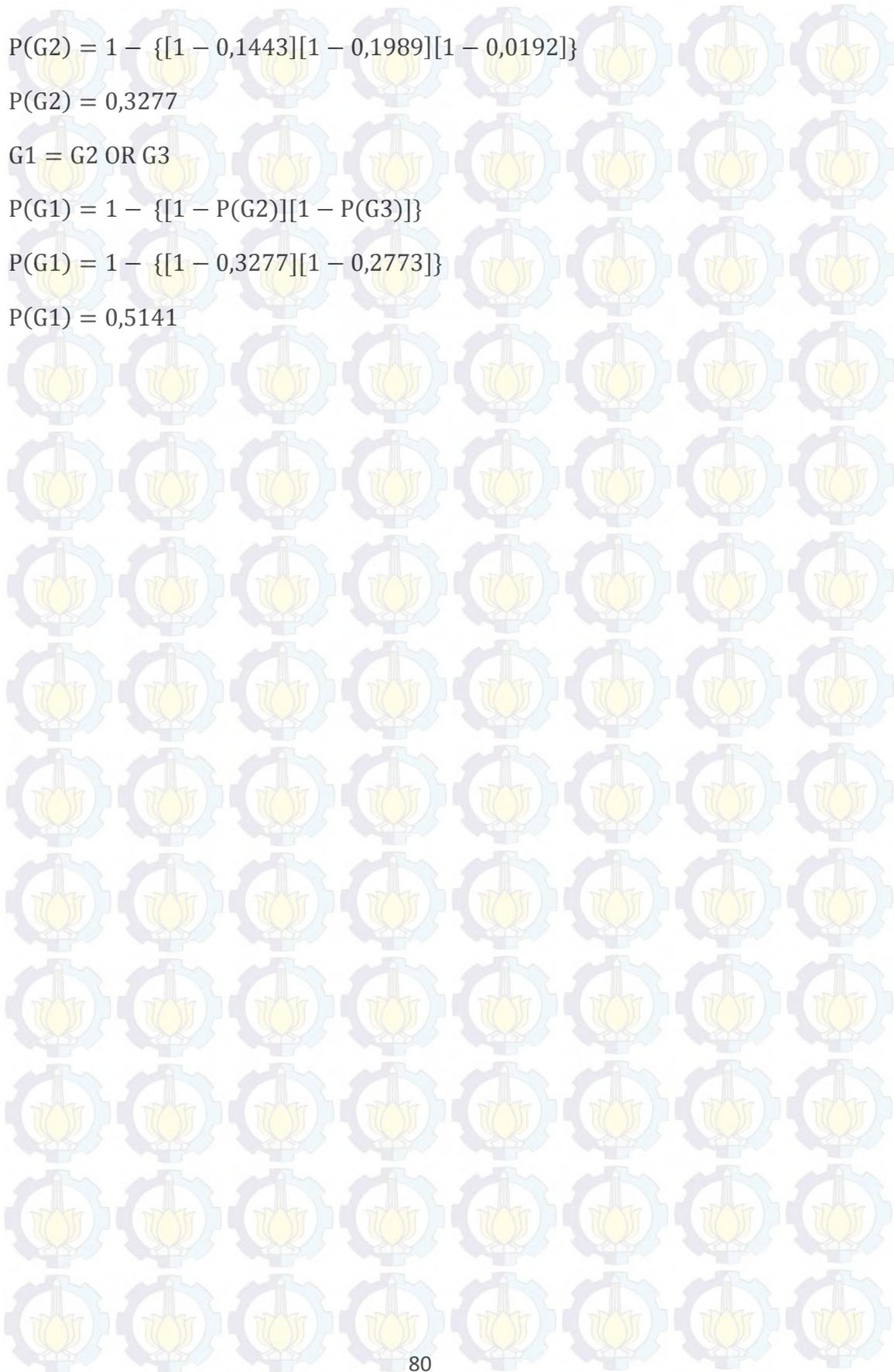
$$P(G3) = 1 - \{[1 - P(G6)][1 - P(G7)]\}$$

$$P(G3) = 1 - \{[1 - 0,2379][1 - 0,0517]\}$$

$$P(G3) = 0,2773$$

$$G2 = G4 \text{ OR } G5 \text{ OR } E1$$

$$P(G2) = 1 - \{[1 - P(G4)][1 - P(G5)][1 - P(E1)]\}$$



$$P(G2) = 1 - \{[1 - 0,1443][1 - 0,1989][1 - 0,0192]\}$$

$$P(G2) = 0,3277$$

$$G1 = G2 \text{ OR } G3$$

$$P(G1) = 1 - \{[1 - P(G2)][1 - P(G3)]\}$$

$$P(G1) = 1 - \{[1 - 0,3277][1 - 0,2773]\}$$

$$P(G1) = 0,5141$$

Lampiran 6 Data Oli pelumas RORED HDA SAE 140

9. PHYSICAL AND CHEMICAL DATA			
No. SAE	:	140	
Kinematic Viscosity at 40°C, cSt	:	425.5	(ASTM D-445)
100°C, cSt	:	28.85	(ASTM D-445)
Viscosity Index	:	95	(ASTM D-2270)
Specific Gravity, 15/4°C	:	0.9064	(ASTM D-4052)
Colour ASTM	:	Green	(ASTM D-1500)
Flash Point (COC), °C	:	238	(ASTM D-92)
Pour Point, °C	:	- 9	(ASTM D-97)
Total Base Number, mgKOH/g	:	-	(ASTM D-2896)

Lampiran 7 Data Oli Pelumas Masri RG ISO VG 220

9. PHYSICAL AND CHEMICAL DATA		
No. SAE	:	
Viscosity Kinematic at 40°C, cSt	:	217.90 (ASTM D-445)
100°C, cSt	:	18.70 (ASTM D-445)
Viscosity Index	:	96 (ASTM D-2270)
Specific Gravity at 15/4 °C	:	0.8928 (ASTM D-4052)
Colour ASTM	:	3.0 (ASTM D-1500)
Flash Point (COC), °C	:	252 (ASTM D-92)
TBN	:	- (ASTM D-974)
Pour Point, C	:	-12 (ASTM D-2896)

Lampiran 8 Wawancara yang dilakukan saat survei pendahuluan.

Pada saat survei pendahuluan, penulis melakukan wawancara dengan beberapa karyawan di Heavy Oil Operating Unit yang terlibat langsung dengan aktifitas pompa angguk. Pertanyaan yang penulis ajukan adalah sebagai berikut:

1. Seberapa penting pompa angguk di Heavy Oil Operating Unit?
2. Apa fokus yang anda lihat yang harus dilakukan terhadap pompa angguk?
3. Apakah Ada Maintenance terhadap pompa angguk?
4. Siapa yang melakukan perawatan pompa angguk?
5. Strategi apa yang diterapkan perusahaan terhadap kondisi operasi pompa angguk?

Hasil jawaban wawancara.

Maintenance Engineer,

1. Keberadaan pompa angguk di Heavy Oil sangat penting karena sebagai equipment awal yang bertugas mengangkat minyak.
2. Fokus yang harus dilakukan adalah dengan mengurangi downtime. Karena dari pengamatan kami, pompa angguk sering sekali mengalami kerusakan dan kadang ada bahaya yang harus diperhitungkan ketika pompa angguk rusak.
3. Ada. Dengan metode Preventive setiap 270 hari.
4. Kontraktor, tetapi ada petugas dari perusahaan yang mengawasinya.
5. Mengontrol data beban secara online terhadap sumur-sumur yang menghasilkan minyak diatas 50 BOPD.

Operator,

1. Sangat penting. Heavy Oil ini hidup karena adanya pompa angguk.
2. Menghadapi masalah yang timbul pada pompa angguk. Pompa angguk sering rusak.
3. Ada. Ada Preventive, Predictive Maintenance dan ada Pengontrolan rutin dari kami para operator.

4. Dilakukan oleh PT. A dan PT. B (sengaja disamarkan oleh penulis).
5. Ada beberapa. Diantaranya kami harus terus memantau kondisi operasi pompa angguk.

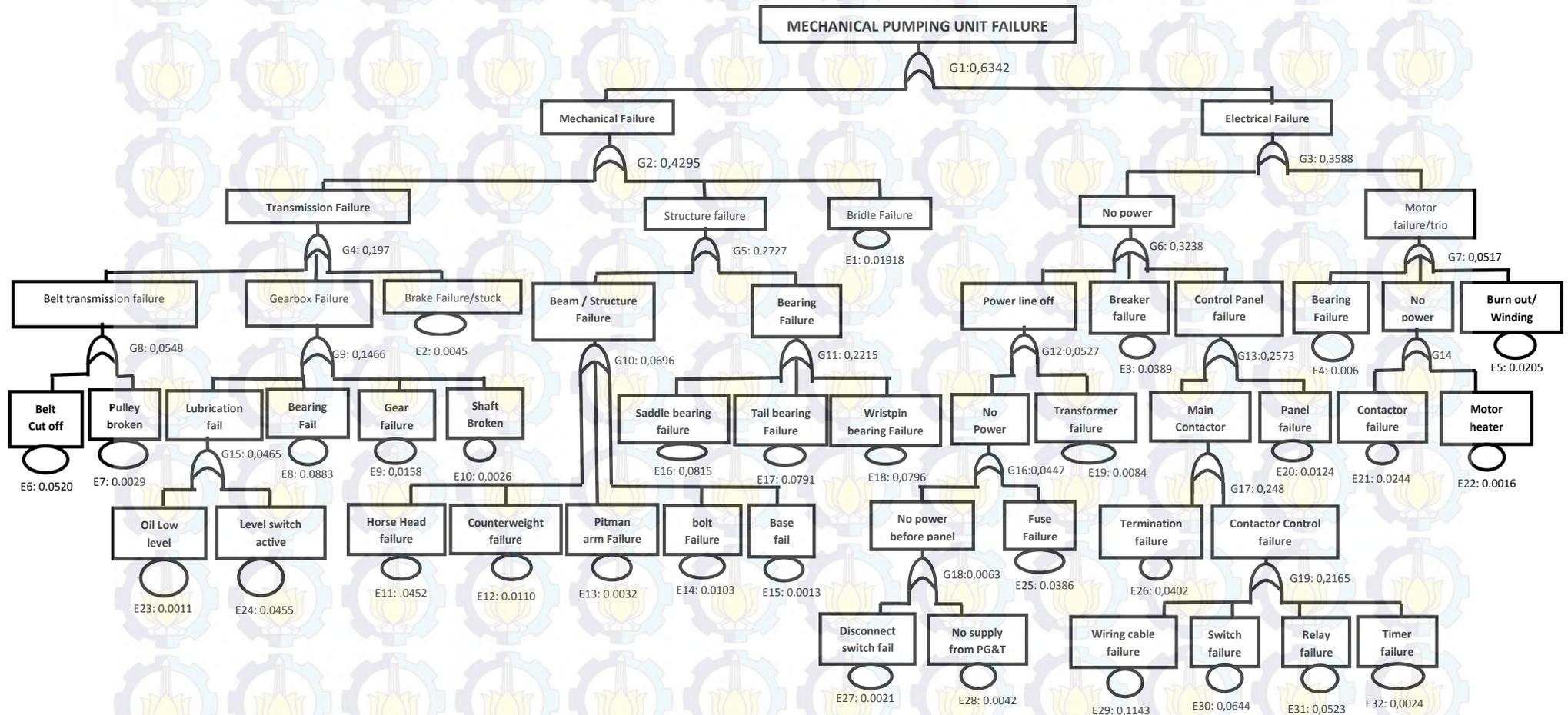
Team Leader Maintenance,

1. Penting sekali.
2. Menurunkan Failure. Pompa angguk sering mati karena kerusakan elektrik dan beberapa komponen mekanik.
3. Ada. Perusahaan menerapkan beberapa strategi maintenance.
4. Ada 2 kontraktor.
5. Strategi Maintenance dan strategi Operasi yang telah dibuat dalam bentuk SRP dan SOP.

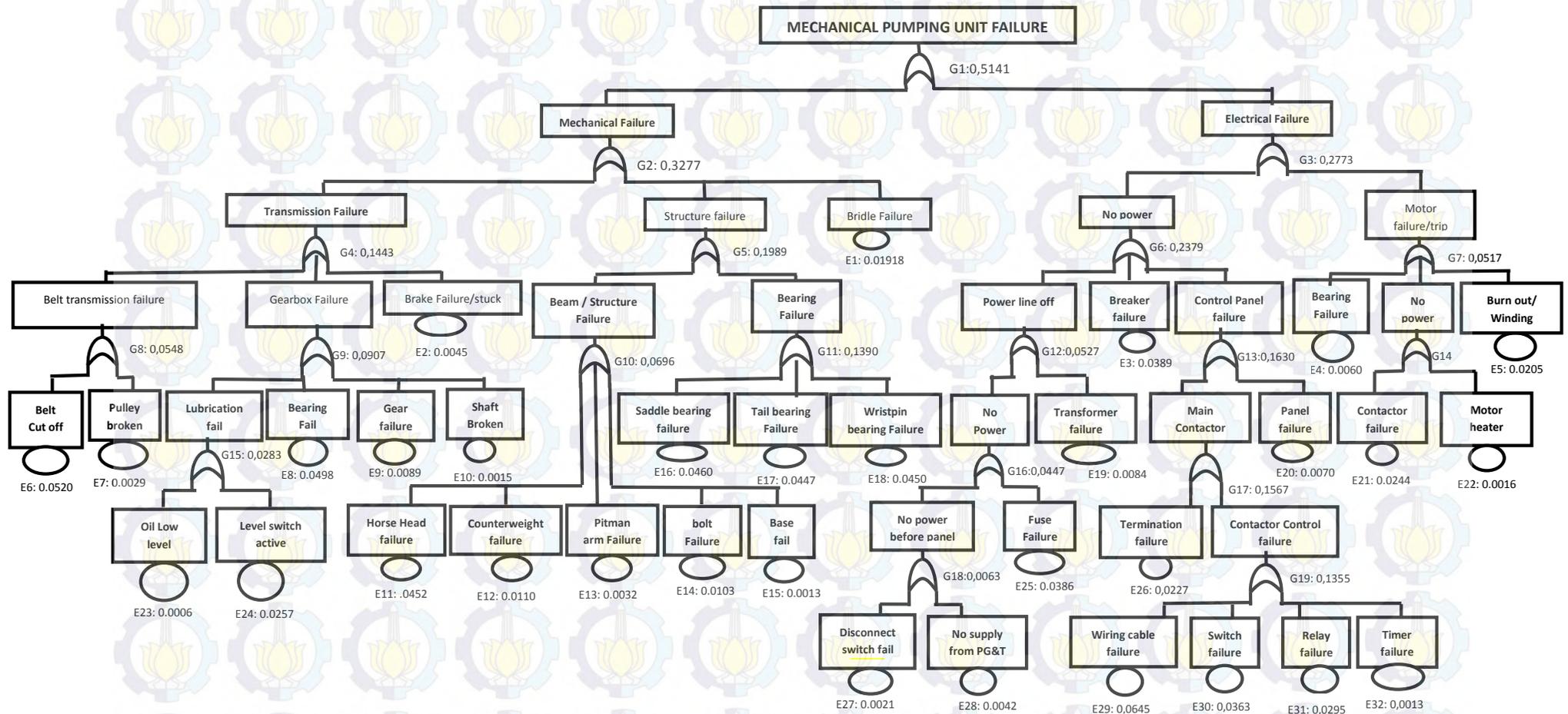
Teknisi Pompa Angguk,

1. Sangat penting. Karena dia sebagai ujung tombak produksi.
2. Mengurangi kerusakan dan menjaga kualitas maintenance.
3. Ada. Kami yang mengawasi pekerjaan perawatan.
4. Ada 2 kontraktor.
5. Pengawasan yang terus menerus terhadap maintenance dan operasi. Tapi mungkin perlu ada perbaikan strategi khusus karena masih banyak kerusakan yang terjadi.

Lampiran 4 *Fault Tree Analysis (logic tree)* Sebelum Perbaikan



Lampiran 5 *Fault Tree Analysis (logic tree)* Setelah Perbaikan



BIOGRAFI PENULIS



Penulis dilahirkan di Sragen, sebuah kota kabupaten di Jawa Tengah pada tahun 1973 sebagai anak nomer tiga dari lima bersaudara dari pasangan bapak Siman dan ibu Sukatmi. Penulis menyelesaikan DIII Jurusan Teknik Mesin di Akademi Teknologi Ronggolawe Cepu pada tahun 1994. Pada tahun 1998 penulis melanjutkan pendidikan ke program S1 Teknik Mesin di Universitas Diponegoro Semarang dan berhasil memperoleh gelar Sarjana pada tahun 2001. Pada tahun 2011 penulis menempuh program pendidikan pasca sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menempuh perkuliahan pasca sarjana, penulis berstatus

karyawan tetap pada perusahaan yang bergerak dalam bidang industri minyak dan gas bumi yaitu PT. Chevron Pacific Indonesia yang berlokasi di Duri – Riau. Penulis memiliki seorang istri bernama Kurnia Hasanah dan saat menulis biografi ini, penulis memiliki dua orang putri yang bernama Azka Burujan Kurnialaksono dan Chevieani Butsaina Kurnialaksono.

“Joko Laksono”