

DURASI PERAWATAN OPTIMUM UNTUK FASILITAS PRODUKSI MINYAK DAN GAS DI KILANG TUBAN EAST JAVA

Indra Nur Yahya ¹⁾ ✉, Dian Mahatwan ¹⁾, Ari Setiawan ²⁾, Djarot B. Darmadi ³⁾

¹⁾Fungsi Production & Project

Pertamina Hulu Energi
PHE Tower – TB Simatupang, Kav. 99
Kebagusan, Pasar Minggu
Jakarta Selatan, INDONESIA
Indra.Yahya@pertamina.com
dian.mahatwan@pertamina.com

²⁾Production & Maintenance Functions

PHE Tuban East Java
Jl. Lingkar Pertamina, Desa Rahayu,
Kecamatan Soko, Tuban
East Java, INDONESIA
arisetiawan@pertamina.com

³⁾Mechanical Engineering Department

Brawijaya University
MT. Haryono, 167, Malang,
East Java, INDONESIA
b_darmadi_djarot@ub.ac.id

Abstract

Electric Submersible Pump (ESP) is one of the most critical oil & gas equipment in Tuban East Java (TEJ) field. This research applies Reliability Centered Maintenance (RCM) to oil & gas to optimize maintenance methods for ESP at the TEJ field. The RCM was applied based on the historical failure events at equipment which caused Loss Production Opportunity (LPO). Start with Pareto chart, the RCM followed by Failure Modes and Effect Analysis (FMEA) that produced the Risk Priority Number (RPN) for the 80% problems. The last step provided the optimum maintenance periods using Weibull's statistic. The result shows that flat cable in ESP has the highest RPN. Flat cable requires an optimum maintenance period of 519 days and a total cost of US\$59,342. The total cost consists of Periodic Maintenance (PM) and Risk costs.

Keywords: ESP, FMEA, RCM, PM Cost, Risk Cost.

1. PENDAHULUAN

Kegiatan perawatan berbasis kehandalan (*Reliability Centered Maintenance – RCM*) merupakan strategi perawatan yang banyak digunakan dalam beberapa dekade terakhir ini. Dunia industri modern yang kompleks banyak yang mengadopsi RCM untuk optimasi kegiatan perawatan. Selain mempertahankan fungsinya yang merupakan prinsip dari kegiatan perawatan, dengan RCM dapat diperoleh kegiatan perawatan yang optimum dan biaya yang hemat ^[1]. RCM merupakan strategi perawatan yang menggunakan pendekatan yang sistematis untuk mengidentifikasi dan mencegah kegagalan dari aset-aset kritis. Dengan melakukan RCM pada *crane*, dapat mengurangi resiko kegagalan, memperbaiki faktor keamanan dan menghemat biaya perawatan ^[2]. Jiang *et al.* mengaplikasikan RCM pada sistem pembangkit listrik dengan penyimpan energi pompa, yakni pompa digunakan untuk menaikkan air ke bendungan saat energi listrik yang dihasilkan melebihi beban listrik yang harus dipikul. Terbukti RCM memberikan kontribusi positif yang signifikan dalam mengoptimalkan strategi perawatan, mengurangi beban kerja perawatan dan mengurangi waktu *overhaul* ^[3].

Langkah-langkah dalam melakukan RCM biasanya dimulai dengan memilih peralatan (*equipment*) yang akan dilakukan dievaluasi strategi perawatannya menggunakan RCM, kemudian dilakukan analisa mode kegagalan dan akibatnya (*Failure Mode and Effects Analysis – FMEA*), menentukan frekwensi kegiatan perawatan, evaluasi hasil dari aplikasi

Corresponding Author:

✉ Indra Nur Yahya
Indra.Yahya@pertamina.com
Received on: 2024-04-27
Revised on: 2024-05-05
Accepted on: 2024-05-09

RCM serta proses monitoring. FMEA, yang merupakan bagian penting dari RCM adalah metode untuk mendesain dan membuat prioritas dari aktivitas perawatan pencegahan (*Preventive Maintenance*). Perlu digaris bawahi FMEA harusnya bukan merupakan hal yang statis dan memungkinkan evaluasi serta perbaikan terus menerus ^[4]. Salah *et al.* [5] mengaplikasikan FMEA pada komponen mesin pengisi yogurt. Komponen ketergantungan (*dependency – D2*) ditambahkan pada komponen tradisional FMEA (*Severity, Occurance, Detection – SOD*). Dalam analisa FMEA problem umum seperti ketidakpastian dan subyektivitas perlu dihindari, oleh karenanya skoring untuk tiap elemen dilakukan oleh tim expert terdiri atas operator, engineers, desainer system, pengguna system dan supervisor lab. Pareto chart dalam artian sumbu-y adalah nilai dari skoring FMEA digunakan untuk memilih equipment dan diterapkan kaidah 80/20 dari Pareto yakni 80% problem disebabkan oleh 20% sebab. Nilai RPN, yaitu merupakan perkalian $S \times O \times D \times D2$ teratas berturut-turut adalah: *proximity sensor, solenoid valves, color contrast sensors, conveyor system, WAGO PFC Configuration* yang didominasi oleh komponen-komponen yaitu *proximity sensor, color contrast sensors dan WAGO PFC configuration*. Berbeda dengan Salah *et al.* [5], Abedin [6] menggunakan *Pareto chart* berdasar banyaknya kejadian kerusakan. Pemilihan komponen yang akan dianalisa berdasarkan nilai efektifitas menyeluruh dari peralatan (*Overall Equipment Effectiveness – OEE*), yakni perkalian dari nilai *Availability x Performance Rate x Quality Rate*. Untuk mencari penyebab nilai OEE yang rendah dilakukan prosedur analisa akar masalah (*Root Cause Analysis – RCA*) menggunakan metode *Fishbone*.

Statistik *Weibull* diaplikasikan untuk analisa kehandalan dari suatu peralatan. Distribusi *Weibull* diketahui sebagai salah satu model statistik yang bisa menggambarkan umur dari suatu mesin/peralatan. Model *Weibull* telah terbukti dapat memprediksi berbagai kegagalan dari berbagai jenis komponen dan berbagai fenomena ^[7]. Talkit *et al.* mengaplikasikan statistik *Weibull* pada sistem mesin produksi dari pabrik olahan susu ^[8]. Dimulai dari evaluasi diagram alir garis produksi olahan susu yakni bubuk susu dan *yoghurt*. Pareto chart dibuat berdasar data riwayat kerusakan mesin untuk mengevaluasi mesin-mesin yang paling rentan dalam garis produksi olahan susu, dan analisa *reliability* dari mesin-mesin produksi bubuk susu dan *yoghurt*. Dong *et al.* mengaplikasikan model *Weibull 2* parameter pada distribusi data kerusakan dari sepeda motor ^[9]. Evaluasi kecocokan model (*goodness of fit*) dilakukan menggunakan metode *Kolmogorov-Smirnov* yang membuktikan bahwa model *Weibull 2* parameter bisa digunakan untuk mewakili kehandalan dari sepeda motor.

Langkah kritis dari statistik *Weibull* adalah memprediksi fungsi distribusi kumulatif (*Comulative Distribution Function – CDF*). Ada tiga model CDF yang banyak dipakai yaitu model *Bernard*, model mengikuti *Montgomery* dan model mengikuti distribusi F. Contreras *et al.* memprediksi kegagalan fatik dari suatu poros menggunakan kegagalan fatik non-linear dan statistik *Weibull*. Fungsi CDF didekati dengan menggunakan model *Bernard* ^[10]. Model *Bernard* mengikuti persamaan sederhana $CDF = \frac{j-0,3}{N+0,4}$ dimana j adalah rangking jika data diurutkan dari nilai terkecil dan N adalah jumlah data. Carvalho *et al.* mengevaluasi umur fatik sambungan *stainless steel* dengan komposit serat karbon. Pengujian fatik dilakukan pada gaya geser yang bervariasi dan analisa dilakukan dengan distribusi *weibull 2* parameter dengan tingkat kehandalan yang berbeda. Kurva CDF diprediksi menggunakan model *Bernard* ^[11]. Ma *et al.* mengevaluasi komponen kritis dari roda-gigi *switch* bertegangan tinggi ^[12]. Berdasarkan evaluasi mode kegagalan dan analisa penyebabnya dipilih 3 komponen yang dianggap memegang peran yang paling tinggi dalam kegagalan yaitu: poros utama, palang pembuka (*Opening Latch*) dan palang penutup (*Closing Latch*). CDF didekati dengan menggunakan model *Bernard*. Berdasarkan data kegagalan untuk poros utama, palang pembuka dan palang penutup diperoleh secara berturut-turut fungsi bentuk (*Shape Function*) $\beta = 5.2687, 4.9427$ dan 5.6434 serta faktor skala (*Scale Factor*) $\eta = 34721.5386, 33241.7214$ dan 35867.4672 .

Dalam bukunya, Montgomery & Runger ^[13] menyatakan CDF dari model *Weibull* bisa didekati dengan persamaan $CDF = \frac{j-0,5}{N}$ dimana j adalah rangking jika data diurutkan dari nilai terkecil dan N adalah jumlah data. Ding *et al.* ^[14] mengevaluasi kekuatan tarik dari serat poliethylene dengan berat molekul tinggi. CDF menggambarkan kekuatan tarik serat dibawah $P(\sigma_i)$ yang mengikuti fungsi pendekatan seperti dalam bukunya Montgomery & Runger. Boikoa *et al.* mengevaluasi kekuatan tarik dari serat tunggal kekuatan tinggi terorientasi ultra dan *fiber polyfilament* yang terdiri atas beberapa ratus poliethylene dengan berat molekul ultra tinggi. Analisa dilakukan dengan menggunakan model *Gauss* dan *Weibull* ^[15]. Untuk model *Weibull*, CDF didekati dengan persamaan sama dengan yang disebutkan dalam bukunya Montgomery & Runger. Hasil evaluasi menunjukkan model *Weibull* bisa merepresentasikan kekuatan tarik fiber tunggal maupun *polyfilaments*, sedangkan model *Gauss* tidak bisa merepresentasikan kekuatan tarik fiber tunggal.

Analisa *variance* dilakukan dengan menggunakan F-test, dan hasil diskusi menunjukkan bahwa data *Weibull* dapat ditransformasikan menjadi data Normal dengan nilai *variance* yang tetap ^[16]. Black *et al.* melakukan evaluasi terhadap data umur produk dan sistem. Analisa varian dilakukan menggunakan uji F dengan level signifikan $\alpha = 5\%$. Hasil evaluasi menunjukkan faktor skala (η) tidak terlalu berpengaruh terhadap penyimpangan data sementara hasil kombinasi antara faktor skala dan fungsi bentuk (β) menyebabkan target level signifikan harus dinaikkan (misal $\alpha \geq 10\%$). Nymphas dan Teliat melakukan karakterisasi kecepatan angin di Nigeria menggunakan statistik Weibull ^[18]. Tiga metode kesesuaian distribusi yaitu *Chi Square* (Distribusi F) diaplikasikan bersama dengan Maksimum error dari *Kolmogorov-Smirnov* dan akar dari kwadrat *error* terhadap rata-rata (*Root Mean Square Error* – RMSE).

Pada penelitian ini diterapkan dengan perawatan RCM pada peralatan produksi minyak dan gas di kilang Tuban *East Java*. *Probability Density Function* (PDF) diprediksi menggunakan persamaan sederhana Montgomery & Runger, kemudian akan dikembangkan optimasi periode perawatan yaitu yang memerlukan biaya total paling minimum.

2. METODE DAN DATA LAPANGAN

2.1. Statistik Weibull

Menurut *Weibull* ^[19] umur dari suatu equipment atau komponen (*parts*) dapat diwakili dengan fungsi densitas kemungkinan PDF $= \frac{\beta t^{\beta-1}}{\eta^\beta} e^{-(t/\eta)^\beta}$. Fungsi ini merupakan fungsi dengan variabel bebas $t =$ umur dari *equipment* / komponen dengan karakteristik dari fungsi ditentukan oleh $\beta =$ fungsi bentuk dan $\eta =$ faktor skala. Fungsi distribusi kumulatif (*Cumulative Distribution Function* – CDF) bisa diperoleh dengan mengintegalkan PDF mulai $t = 0$ hingga $t = t$ sebagai berikut:

$$\begin{aligned} CDF &= \int_0^t \frac{\beta \tau^{\beta-1}}{\eta^\beta} e^{-(\tau/\eta)^\beta} d\tau = \frac{\beta}{\eta^\beta} \int_0^t \tau^{\beta-1} e^{-(\tau/\eta)^\beta} d\tau = \frac{\beta}{\beta \eta^\beta} \int_0^t e^{-(\tau/\eta)^\beta} d\tau^\beta \\ &= \frac{\eta^\beta}{\eta^\beta} \int_0^t e^{-(\tau/\eta)^\beta} d\frac{\tau^\beta}{\eta^\beta} = \left[-e^{-(\tau/\eta)^\beta} \right]_0^t = \left[e^{-(\tau/\eta)^\beta} \right]_t^0 = 1 - e^{-(t/\eta)^\beta} \end{aligned} \quad (1)$$

Terlihat CDF merupakan fungsi yang lebih sederhana dibanding fungsi asalnya yaitu PDF. Jika diplotkan dalam koordinat Cartesian dengan sumbu y CDF dan sumbu x variabel bebas t , maka akan diperoleh grafik mirip bentuk dan biasa disebut dengan kurva S atau kadang disebut juga dengan nama kurva naga (*S-curve*, *Dragon curve*). Oleh karenanya kurva CDF lebih mudah diprediksi dibanding dengan PDF. Pada penelitian ini digunakan

pendekatan menggunakan persamaan dalam buku Montgomery dan Runger [13]. Setelah diperoleh karakteristik dari kurva yaitu fungsi bentuk (β) dan faktor skala (η), maka bisa diperoleh prediksi fungsi distribusi kumulatif (CDF) dan fungsi densitas probabilitas (PDF).

2.2. Data Lapangan

Data umur *equipment* diperoleh dengan mengevaluasi riwayat kegiatan perbaikan (servis) yang menyebabkan sistem harus berhenti. Dalam istilah teknis perawatan, disebut dengan *unplanned shutdown* yang menyebabkan kerugian karena hilangnya kesempatan produksi (*Loss Production Opportunity* – LPO). Berdasarkan riwayat kegiatan perbaikan dapat diperoleh waktu aktif (*up time*) dan waktu berhenti (*down time*) dari *equipment*. Rentang waktu aktif merupakan data penting yang menjadi dasar menentukan nilai kehandalan (*Reliability*) dari *equipment* / komponen. Dengan mempertimbangkan resiko biaya jika terjadi *unplanned shutdown* dan biaya untuk melakukan perawatan rutin selanjutnya akan dioptimasi durasi optimum untuk perawatan dari mesin yang dipilih. Dengan asumsi untuk variabel subsurface sumur (*viscosity* fluida, H₂S dan karakteristik sumur) pada kondisi normal operasi.

2.3. Pemilihan Equipment

Mengingat jumlah *equipment* untuk fasilitas produksi di lapangan TEJ sangat banyak, maka *equipment* yang akan dievaluasi dan dilakukan optimasi harus dipilih dan diprioritaskan adalah peralatan yang kritical dan utama. Seperti telah didiskusikan sebelumnya, langkah pertama untuk memilih *equipment* adalah dengan memilih *equipment* yang mempengaruhi LPO saja. Pada lapangan TEJ, LPO banyak terjadi pada *equipment* utama *Electric Submersible Pump* (ESP) yang tersebar di sumur-sumur yang ada. Pada Gambar 1 ditunjukkan contoh kegagalan pada komponen ESP (*Pot Head*).



Gambar 1. Kerusakan Pot Head bocor pada sumur Mudi B#17

2.4. Metode Pareto Chart dan FMEA

Setelah melakukan pemilihan *equipment* utama pada lapangan TEJ, langkah berikutnya adalah dengan membuat Pareto chart, dan dipilih peralatan yang menyebabkan 80% *unplanned shutdown*. Langkah berikutnya adalah melakukan FMEA untuk menentukan *equipment* yang memiliki nilai RPN tertinggi yang menjadi prioritas untuk dilakukan optimasi kegiatan perawatannya. Kegiatan FMEA dilakukan mengikuti Tata Kerja Organisasi (TKO): Analisa Dampak & Mode Kegagalan FMEA. Secara ringkas proses FMEA ditunjukkan pada Tabel 2. Hasil akhir dari FMEA adalah nilai RPN seperti terlihat pada kolom terakhir (kolom 10). Nilai SOD mengikuti TKO seperti ditunjukkan pada Tabel 1 – 3.

Tabel 1. *Severity Ranking Criteria and Scale*

Skala keparahan (Severity ranking/scale)	Kriteria tingkat keparahan (Severity ranking criteria)	Dampak (Effect)
1	Ketidaknyamanan kecil atau masalah tampilan yang tidak berdampak pada kinerja atau keselamatan	Tidak ada (<i>none</i>)
2	Sistem dapat dioperasikan dengan gangguan minimal	Sangat Kecil (<i>very minor</i>)
3	Sistem dapat dioperasikan dengan beberapa penurunan kinerja	Kecil (<i>minor</i>)
4	Sistem dapat dioperasikan dengan penurunan kinerja yang signifikan	Sangat rendah (<i>very low</i>)
5	Sistem tidak dapat dioperasikan tanpa kerusakan.	Rendah (<i>low</i>)
6	Sistem tidak dapat dioperasikan dengan kerusakan ringan	Sedang (<i>moderate</i>)
7	Sistem tidak dapat dioperasikan karena kerusakan peralatan	Tinggi (<i>high</i>)
8	Sistem tidak dapat dioperasikan dengan kegagalan destruktif tanpa mengorbankan keselamatan.	Sangat tinggi (<i>very high</i>)
9	Mode kegagalan yang berpotensi mempengaruhi pengoperasian keamanan sistem dengan peringatan	Berbahaya dengan peringatan (<i>hazardous with warning</i>)
10	Mode kegagalan yang berpotensi mempengaruhi pengoperasian keamanan sistem tanpa peringatan	Berbahaya tanpa peringatan (<i>hazardous without warning</i>)

Tabel 2. *Occurrence Ranking Criteria and Scales*

Skala keparahan (Severity ranking/scale)	Kriteria tingkat keparahan (Severity ranking criteria)	Dampak (Effect)
1	Sangat tidak mungkin atau hampir tidak mungkin.	< 1 in 1.500.000
2		1 in 150.000
3	Tidak mungkin terjadi, Kegagalan sesekali dalam kondisi tertentu.	1 in 15.000
4		1 in 2.000
5	Kejadian sedang, Kegagalan kadang terjadi.	1 in 4.00
6		1 in 80
7	Sering terjadi, Sering terjadi kegagalan selama pengoperasian normal	1 in 20
8		1 in 8
9	Hampir pasti terjadi, kegagalan diperkirakan sering terjadi	1 in 4
10		1 in 2

Tabel 3. *Detection Ranking Criteria and Scales*

Skala deteksi (Detection scale)	Kriteria tingkat deteksi (Detection ranking criteria)	Deteksi (Detection)
1	Sistem deteksi akan mendeteksi potensi penyebab/mechanisme dan modus kegagalan selanjutnya	Hampir yakin/pasti (<i>almost certain</i>)
2	Sistem deteksi kemungkinan sangat besar akan mendeteksi potensi penyebab/mechanisme dan modus kegagalan berikutnya	Sangat tinggi (<i>very high</i>)
3	Kemungkinan besar sistem deteksi akan mendeteksi potensi penyebab/mechanisme dan mode kegagalan berikutnya	Tinggi (<i>high</i>)
4	Kemungkinan cukup tinggi bahwa sistem deteksi akan mendeteksi potensi penyebab/mechanisme dan modus kegagalan berikutnya	Cukup tinggi (<i>Moderately high</i>)
5	Kemungkinan sedang bahwa sistem deteksi akan mendeteksi potensi penyebab/mechanisme dan mode kegagalan selanjutnya	Sedang (<i>moderate</i>)
6	Kemungkinan kecil sistem deteksi akan mendeteksi potensi penyebab/mechanisme dan mode kegagalan selanjutnya	Rendah/kecil (<i>low</i>)
7	Sangat kecil kemungkinannya bahwa sistem deteksi akan mendeteksi potensi penyebab/mechanisme dan modus kegagalan berikutnya	Sangat rendah/kecil (<i>Very Low</i>)
8	Sistem deteksi hampir tidak akan mendeteksi potensi penyebab/mechanisme dan mode kegagalan berikutnya	<i>Remote</i>
9	Sistem deteksi sangat hampir tidak akan mendeteksi potensi penyebab/mechanisme dan mode kegagalan berikutnya	<i>Very Remote</i>
10	Tidak ada sistem deteksi atau sistem deteksi tidak dapat mendeteksi potensi penyebab/mechanisme dan modus kegagalan selanjutnya	Mutlak tidak pasti (<i>Absolute uncertainty</i>)

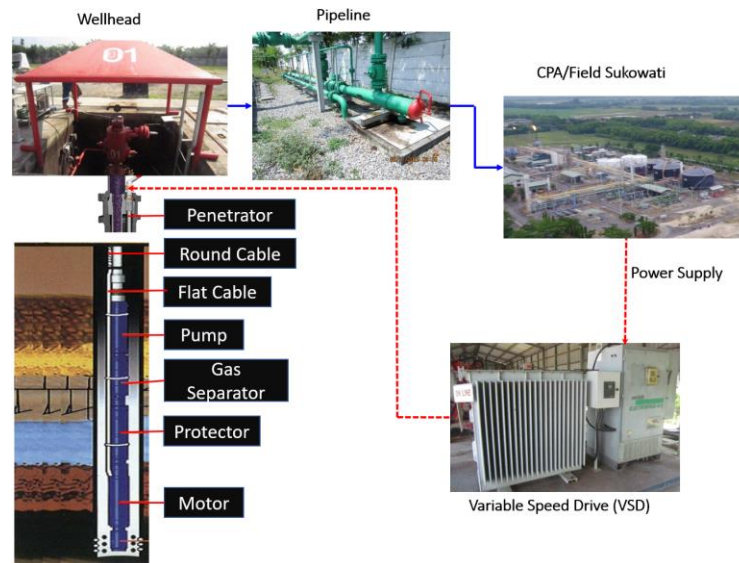
2.5. Data Kerusakan 2021 - 2022

Pada Tabel 4 disajikan data kerusakan yang menyebabkan *unplanned shutdown*. Secara umum penyebab *unplanned shutdown* pada *Electric Submersible Pump* (ESP) dapat dibagi atas fasilitas permukaan (*surface facilities* - SF) dan *non-surface facilities* (NSF) atau untuk

equipment/elemen yang menyebabkan *unplanned shutdown* dari NSF biasa juga disebut dengan *Off Down Hole* (ODH). Pada Gambar 2, ditunjukkan skema dari NSF yang terdiri atas 7 equipment utama ESP yaitu: *Penetrator*, *Round Cable*, *Flat Cable*, Pompa, *Gas Separator*, *Protector* dan Motor. Untuk fasilitas permukaan yang mengalami *unplanned shutdown* adalah sistem perpipaan (*piping*) dan katup (*valve*).

Tabel 4. Kerusakan ESP yang menyebabkan *unplanned shutdown*.

No.	Equipment	Kejadian	Presentasi Total
Off Down Hole (ODH)			
1	Flat Cable	16	44,44
2	Motor	9	69,44
3	Round Cable	3	77,78
4	Protector	2	83,33
5	Pump	2	88,89
6	Gas Separator	1	91,67
7	Penetrator	1	94,44
Surface Facilities			
8	Piping	1	97,22
9	Valve	1	100

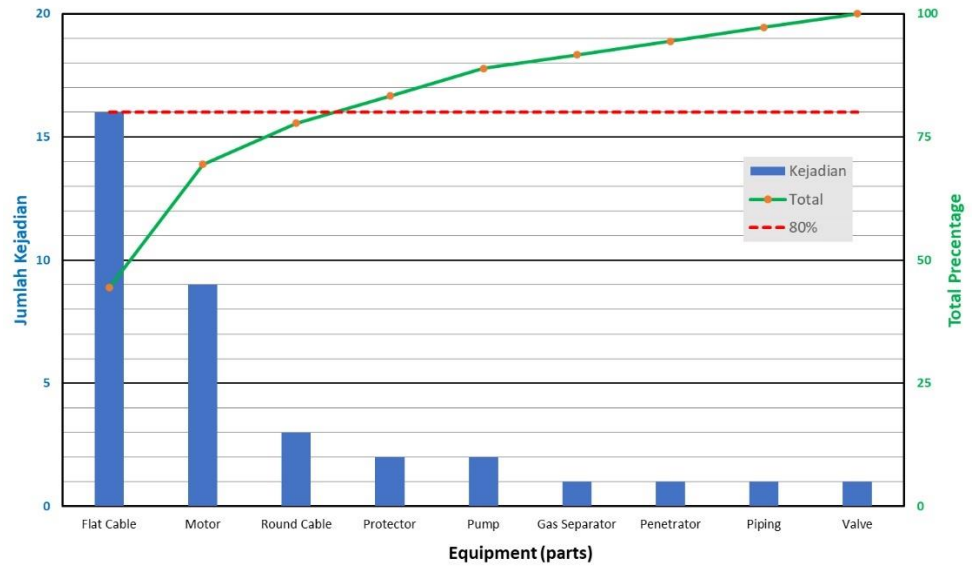


Gambar 2. Skema equipment ESP yang menyebabkan *unplanned shutdown*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Langkah pertama dalam optimasi durasi perawatan adalah memilih *equipment* menggunakan Pareto chart seperti terlihat pada Gambar 3. Dengan menggunakan data 80% kerusakan, maka paling tidak terdapat 4 *equipment* yang harus dioptimasi. Mengingat jumlah kerusakan dari protektor dan pompa selama periode 2021 – 2022 sama-sama berjumlah 2 kejadian, maka keduanya (protektor dan pompa) diikutkan dalam optimasi kegiatan perawatan.

Langkah berikutnya adalah melakukan Analisa mode kegagalan dan pengaruhnya (FMEA) dapat dilihat pada Tabel 5. Pada penelitian kali ini, optimasi frekwensi kegiatan dilakukan pada *equipment* yang memiliki nilai RPN tertinggi yakni *Flat Cable*. Berdasar data kegiatan perbaikan yang dilakukan, maka dibuat data *running days* (*up time*) yang akan menjadi dasar statistik *Weibull*.



Gambar 3. Pareto chart untuk komponen penyebab *unplanned shutdown*.

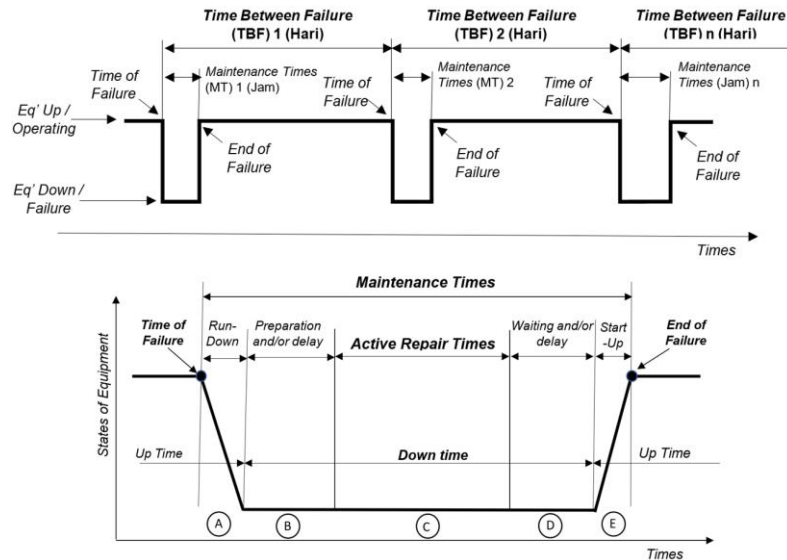
Tabel 5. FMEA equipment dengan kejadian total hingga 80%.

Item/ Function	Function Failure	Failure Mode	Potential Cause(s)/ Mechanism(s) of Failure	Potential Effect(s) of Failure		Severity Rank	Occurance Rank	Detection Rank	RPN
				Local	System				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Flat Cable / Kabel pipih penghantar listrik dari switchboard ke ESP	Short pada Flat Cable	Kebocoran pada pot head	Epoxy lining bocor sehingga terjadi short pada flat cable	Motor mati / tidak berfungsi	- ESP mati / tidak berfungsi. - Pengaruh thd proses selanjutnya	7	7	8	392
		Defect pada product round cable	6			2	7	84	
		Flat cable robek	5			2	6	60	
Motor / Penggerak utama sistem ESP	Short pada motor	Kebocoran pada Pot Head	Kebocoran pada Pot Head sehingga fluida masuk dalam koneksi motor yang menyebabkan short	Motor mati / tidak berfungsi	- ESP mati / tidak berfungsi. - Pengaruh thd proses selanjutnya	7	6	8	336
		Kerusakan mekanis motor	Flip patah pada shaft motor			5	2	6	60
			Proses rewinding motor yang kurang bagus			5	2	6	60
			Motor terbakar, sehingga braker terbakar			5	2	6	60
Round Cable/ Kabel bulat penghantar listrik dari switchboard ke ESP	Short pada Electric Round Cable	Kebocoran pada Pot Head	Isolasi antara pot head dan round cable bocor	Motor mati / tidak berfungsi	- ESP mati / tidak berfungsi.	7	5	8	280
			Defect pada product round cable			6	2	7	84

		Round Cable robek	Round cable robek/rusak pada proses pull out		- Pengaruh thd proses selanjutnya	5	2	6	60
Protektor / Penyekat/ pelindung (seal protector) antara fluida sumur dengan electric oil pada motor Penghubung rumah pompa dengan motor Penyeimbang tekanan dalam pompa terhadap tekanan lubang bor	Short pada motor	Kebocoran pada protector	Proteksi terhadap liquid bocor, Fluida masuk ke dalam komponen motor Bubble di celah electric oil motor	Motor mati / tidak berfungsi	- ESP mati / tidak berfungsi. - Pengaruh thd proses selanjutnya	5	4	8	160
		Elastomer Seal Protector robek	Seal protector robek / rusak pada proses pull out			5	5	7	175
						5	2	7	70
Pompa / Bagian yg terletak di atas intake gas separator ESP, yg berfungsi memindahkan fluida minyak mentah ke permukaan	Fluida tidak terangkat ke permukaan	Kerusakan pada mechanical pompa	Blade pompa bagian rotator bermasalah	Pompa mati / tidak berfungsi	- ESP mati / tidak berfungsi. - Pengaruh thd proses selanjutnya	7	4	8	224
		Kerusakan pada motor	Flip patah pada shaft motor			6	2	6	72
			Motor terbakar, sehingga braker terbakar			5	2	6	60

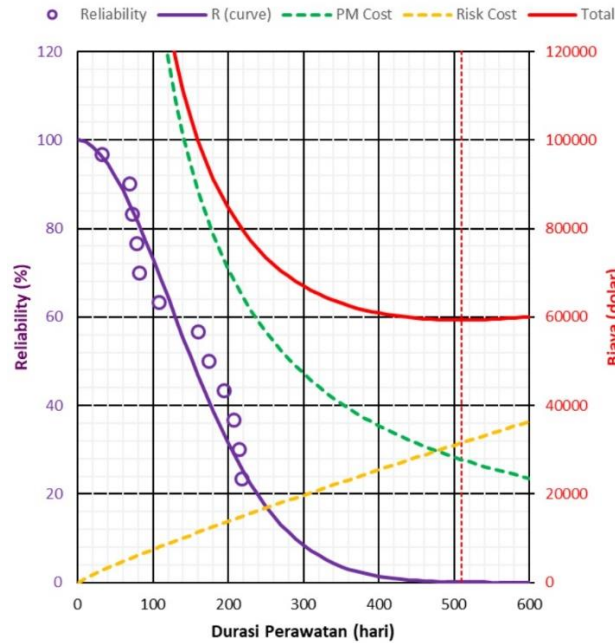
Pada Gambar 4. ditunjukkan bagaimana menghitung *Times Between Failure* (TBF) dari *flat cable*, yakni secara prinsip dengan menghitung *up time* yaitu waktu antara kerusakan satu dengan kerusakan lainnya. Berdasar 16 kejadian *unplanned shutdown*, maka didapat 15 *running days* (TBF) dari *flat cable* dari berbagai sumur di kilang Sukowati adalah: 33, 265, 215, 218, 261, 194, 160, 208, 174, 290, 78, 73, 82, 69, 108. Berdasar data TBF tersebut dengan menggunakan pendekatan CDF menggunakan persamaan *Montgomery & Runger*, bisa diprediksi fungsi bentuk $\beta = 1,8825$ dan faktor skala $\eta = 185,283$. Sekali nilai fungsi bentuk dan faktor skala diketahui, bisa dibentuk kurva PDF dan CDF. Kehandalan (*reliability*) dari *flat cable* bisa diperoleh dengan persamaan $R = 1 - CDF$.

Biaya *maintenance* bisa dihitung berdasar pengeluaran perawatan selama setahun untuk satu sumur yaitu untuk *preventive maintenance* – PM sebesar US\$ 87.331 sedangkan biaya perbaikan jika terjadi *unplanned shutdown* dan mempertimbangkan LPO dalam setahun adalah US\$ 2860328 (*risk cost*). Besarnya biaya perawatan untuk *flat cable* bisa diperoleh dengan mempertimbangkan Pareto Chart, yakni *flat cable* menempati porsi 44,444% kejadian kerusakan sehingga secara sederhana bisa diperoleh untuk *flat cable* biaya untuk PM dan *risk cost* secara berturut-turut adalah US\$ 38813 dan US\$ 1271244. PM *cost* dalam setahun bisa diperoleh dengan pendekatan $PM\ Cost = Annual\ PM \times \frac{TBF}{365}$. Sedangkan biaya resiko ketika terjadi *unplanned shutdown* bisa didekati dengan $Risk\ Cost = Annual\ Risk\ Cost \times Failure\ Rate$. Sedangkan *Failure Rate* (λ) bisa dihitung berdasar persamaan $\lambda = \frac{PDF}{Reliability}$. Berdasar asumsi awal, bahwa TBF yang terjadi mengikuti distribusi *Weibull*, maka $Reliability = e^{-(t/\eta)^\beta}$ dan $\lambda = \frac{\beta t^{\beta-1}}{\eta^\beta}$. Berdasarkan persamaan-persamaan ini maka bisa dibuat grafik seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Menghitung TBF berdasar data *historical failure event*.

Pada Gambar 5 juga ditunjukkan *Reliability* yaitu data riil berupa marker berbentuk lingkaran berwarna ungu dan data prediksi menggunakan *Weibull 2* parameter yang berupa garis penuh berwarna ungu. Garis putus-putus berwarna hijau adalah biaya yang diperlukan untuk perawatan periodik (*PM Cost*) dan garis putus-putus berwarna kuning adalah *risk cost* dan garis penuh berwarna merah adalah total biaya yang merupakan jumlah *PM Cost* + *risk cost*. Periode perawatan optimum, yaitu yang memiliki biaya total paling rendah diperoleh pada komponen *flat cable* per sumur jika perawatan dilaksanakan dalam periode 509 hari dengan total cost US\$ 59.397.



Gambar 5. Optimasi periode perawatan untuk *flat cable*.

4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah didemonstrasikan kegiatan RCM untuk peralatan ESP pada sumuran TEJ yang berpotensi menyebabkan LPO. Periode perawatan optimum untuk *flat cable* disarankan pada 509 hari yang dengan perawatan dengan rentang periode tersebut diperoleh total cost sebesar US\$ 59.397. Dan dengan rekomendasi penggantian pada komponen *flat cable* ESP dengan spesifikasi material dan *type* yang sesuai dengan kondisi sumur di lapangan TEJ.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mengchu Song, Xinxin Zhang, Morten Lind, “Automatic identification of maintenance significant items in reliability centered maintenance analysis by using functional modeling and reasoning”, *Computer & Industrial Engineering*, vol. 182, 109409, 19 halaman, 2023.
- [2] Imran Hazim Ismail, Mustapha Kamil Omran, Mohd Noor Fathullah Mohd Noordin, Muhammad Zulhilmy Yaman, “Reliability-Centered Maintenance (RCM) Application for 15-Ton Overhead Traveling Crane in Kuala Lumpur Additional Vehicle 27 (KLAV27) Project Facility at Hartasuma Sdn. Bhd. (HSB)”, *Progress in Engineering Application and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 1098-1110, 2023.
- [3] Qiu Jiang, Xiaoliang Li, Lifei Yang, Yijin Ma and Huanhuan Li, “Innovation and Application of Reliability-Centered Maintenance Technology for Pumped Storage Power Plant”, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2694, 012014, 8 halaman, 2024.
- [4] FMEA as part of the RCM Process. Jan Braaksma, W. Klingenberg & Jasper Veldman, “Failure mode and effect analysis in asset maintenance: A multiple case study in the process industry”, *Int. J. of Production research*, vol. 51, no. 4, pp. 1055 – 1071, 2013.
- [5] Bashir Salah, Mohammed Alnahhal, Mujahid Ali, “Risk prioritization using a modified FMEA analysis in industry 4.0”, *Journal of Engineering Research*, vol. 11, pp. 460 – 468, 2023.
- [6] Ahsanul Abedin, “Improvement of Overall Equipment Efficiency with Root Cause Analysis and TPM Strategy: a Case Study”, *International Journal of Research in Industrial Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 205-220, 2023.
- [7] Chin-Die Lai & M Xie, “Weibull distribution and their applications.” In *Springer Handbook of Engineering Statistics*, pp. 63 – 78, Springer, New York, 2006.
- [8] Vaishali Govindrao Talkit, Pratiksha Hanrao, Shivani Bhosale, Anand Bewoor, Rajkuma Bhimgonda Patil, “Application of the reliability analysis for modification in maintenance scheduling”, *Materials Today: Proceeding*, vol. 77, pp. 579 – 585, 2023.
- [9] Wentao Dong, Xiaowei Zhang, Yucai Dong, Yuanyuan Lin, “Equipment reliability assessment based on a twoparameter Weibull distribution”, *Proceedings of the 3rd International Conference on Management Science and Software Engineering (ICMSSE 2023)* pp. 537 - 545, Qing Dao, China, 21-23 July 2024.
- [10] Jesús M. Barraza-Contreras, Manuel R. Piña-Monarez and Roberto C. Torres-Villaseñor, “Reliability by Using Weibull Distribution Based on Vibration Fatigue Damage”, *Applied Sciences*, vol. 13, 10291, 13 halaman, 2023.
- [11] Willian S. de Carvalho, Jonathan Draper, Talina Terrazas-Monje, Athanasios Toumpis, Alexander Galloway, Sergio T. Amancio-Filho, “Fatigue life assessment and fracture mechanisms of additively manufactured metal-fiber reinforced

- thermoplastic hybrid structures produced via ultrasonic joining*”, *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 26, pp. 5716 – 5730, 2023.
- [12] Hongming Ma, Guochao Qian, Jie Zhang, Jiali Chen, Fusheng Zhou, Pengfeng Qiu, Aohua Zhang, Ting Wang, Xiaofei Yao and Zhiyuan Liu, “*Fatigue Life Estimation of Critical Components in a Motor-Energized Spring Operating Mechanism Based on Theory of Reliability*”, *Energies*, vol 17, 1623, 16 halaman, 2024.
- [13] Douglas C. Montgomery, George C. Runger, “*Applied Statistic and Probability for Engineers*”, John Wiley & Sons, Inc. Chapter 6: Descriptive Statistic, 2024.
- [14] Jinyou Ding, Gonglin Chen, Wei Huang, Jinlong Cheng, Ting Li, Chunzu Cheng, and Jigang Xu, “*Tensile Strength Statistics and Fracture Mechanism of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Fibers: On the Weibull Distribution*”, *ACS Omega*, vol. 9, pp. 12984 – 12991, 2024.
- [15] Yu. M. Boikoa, V. A. Marikhina, O. A. Moskalyukb, and L. P. Myasnikova, “*Features of Statistical Strength Distributions in Mono- and Polyfilament Ultraoriented High-Strength Fibers of Ultrahigh-Molecular-Weight Polyethylene*”, *Physics of the Solid State*, vol. 62, no.4, pp. 676-681, 2020.
- [16] Lakhana Watthanacheewakul, “*Analysis of Variance with Weibull Data*”, *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientist*, vol III, Hongkong, March 17-19, 2010.
- [17] Gray Black, Derek Ard, James Smith and Tim Schibik, “*The impact of the Weibull distribution on the performance of the single-factor ANOVA model*”, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 1, pp. 185 – 198, 2010.
- [18] E.F. Nymphas, R.O. Teliat, “*Evaluation of the performance of five distribution functions for estimating Weibull parameters for wind energy potential in Nigeria*”, *Scientific African*, vol. 23, e02037, 20 halaman, 2024.
- [19] Waloddi Weibull, “*A statistical distribution function of wide applicability*”, *ASME Journal of Applied Mechanics*, vol. 18, pp. 293 – 297, 1951.