

PERENCANAAN PENGELOLAAN SUKU CADANG PADA POMPA PRODUK MENGGUNAKAN *RELIABILITY CENTERED SPARES* PADA TERMINAL BBM PT. XYZ

Ega, Zhafran

Jurusan Teknik Industri Universitas Telkom Bandung
Jl. Telekomunikasi No.1, Bandung 40257
E-mail: zhafega@gmail.com

Alhilman, Judi

Jurusan Teknik Industri Universitas Telkom Bandung
Jl. Telekomunikasi No.1, Bandung 40257
E-mail: alhilman@telkomuniversity.ac.id

Atmaji, Fransiskus Tatas Dwi

Jurusan Teknik Industri Universitas Telkom Bandung
Jl. Telekomunikasi No.1, Bandung 40257
E-mail: franstatas@telkomuniversity.ac.id

ABSTRAK

Perbaikan mesin selalu menghambat laju produksi karena mesin tidak dapat digunakan saat komponen mesin sedang dalam masa perawatan. Seringkali komponen mesin tersebut tidak dapat melanjutkan fungsinya kembali. Penggantian komponen menjadi satu-satunya solusi yang mengakibatkan mesin mengalami waktu henti yang berbanding lurus dengan waktu tunggu kedatangan komponen pengganti. Suku cadang komponen diperlukan untuk menghilangkan waktu tunggu tersebut sehingga produksi dapat langsung dilanjutkan. *Reliability centered spares* digunakan untuk menghitung jumlah suku cadang yang harus disediakan dalam jangka waktu tertentu. Metode ini dihitung berdasarkan data kerusakan historis suatu komponen yang kemudian dikoversikan menjadi mean time to repair dan mean time between failure masing-masing komponen. Metode *poisson process* digunakan untuk menghitung hasil akhir dari persediaan suku cadang untuk waktu tertentu

Kata Kunci: Suku Cadang; Reliability Centered Spares; Mesin Pompa; Risk Matrix; Poisson Process..

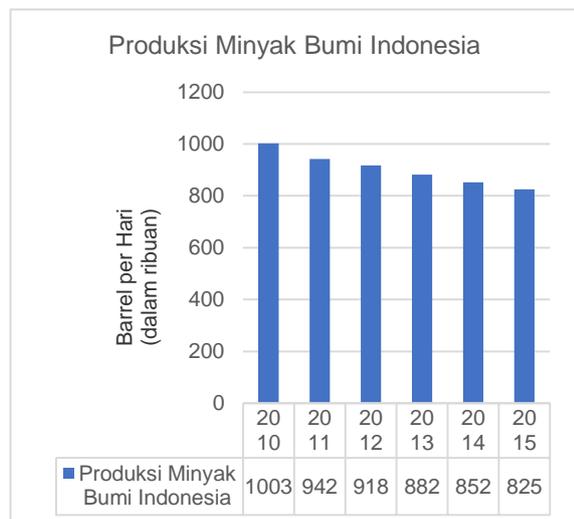
1. PENDAHULUAN

Sektor minyak dan gas Indonesia secara rutin berkontribusi signifikan untuk perekonomian Indonesia melalui pendapatan ekspor dunia dan cadangan devisa negara dengan kontribusinya untuk APBN mencapai 13% dari pendapatan domestik. Menurut informasi dari Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral (ESDM), cadangan minyak mentah terbukti yang ada saat ini akan bertahan untuk sekitar 23 tahun.

Produksi minyak bumi Indonesia selalu mengalami penurunan dari tahun 2010 sampai dengan 2015 yang hanya dapat menghasilkan 825.000 barel per hari berdasarkan Gambar 1. Hal ini dikarenakan oleh beberapa hal yang salah satunya adalah pengolahan minyak bumi oleh perusahaan asing.

PT. XYZ merupakan badan usaha milik negara yang bertugas mengelola penambangan minyak dan gas bumi di Indonesia. PT XYZ terbagi menjadi dua sektor, yaitu hulu dan hilir. Sektor hulu meliputi eksplorasi dan produksi minyak, gas, dan panas bumi.

Kegiatan usaha hilir meliputi pengolahan, pemasaran & niaga dan perkapalan serta distribusi produk hilir baik didalam maupun keluar negeri yang berasal dari kilang PT. XYZ maupun impor yang didukung oleh sarana transportasi darat dan laut.



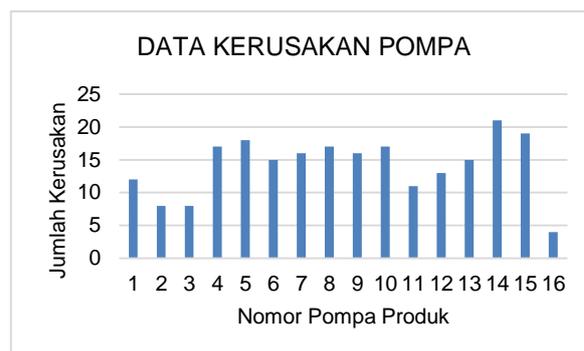
Gambar 1. Produksi BBM di Indonesia (BP, 2016)

Terminal Bahan Bakar Minyak Bandung Group adalah bagian dari PT XYZ Marketing Operation Region III yang merupakan sektor hilir dan pemasaran dari PT. XYZ (Persero). Kegiatan di Terminal BBM Bandung Group adalah menerima, menimbun, dan menyalurkan bahan bakar minyak di daerah DKI Jakarta, Jawa Barat, dan Banten.

Terdapat dua lokasi Terminal BBM Bandung Group, yaitu di Ujung Berung dan Padalarang. TBBM yang berada di Ujung Berung merupakan TBBM yang sudah memasuki generasi 3 dan

pengelolaan bahan bakar minyaknya pun sudah menggunakan otomasi sedangkan yang terdapat di Padalarang masih menggunakan mesin secara manual oleh para operator sehingga banyak mengalami kerusakan mesin dan membutuhkan maintenance management.

Mesin pompa produk digunakan pada proses penyaluran BBM yang akan mendorong BBM dari tangki menuju meter arus yang selanjutnya akan diteruskan untuk mengisi truk tangki BBM. Terdapat 16 buah pompa yang memiliki jenis BBM yang berbeda-beda.



Gambar 2. Data kerusakan pompa

Gambar 2 menunjukkan data kerusakan Pompa Produk yang didapat dari *logbook* perawatan mesin dari tahun 2009-2017.

Dalam melakukan kegiatan perawatan, ada kemungkinan terdapat komponen yang bila terjadi kegagalan atau kerusakan tidak dapat diperbaiki, tetapi harus diganti (*replace*). Oleh karena itu, suku cadang (*spare part*) komponen diperlukan, sehingga komponen tersebut dapat diganti tanpa melakukan pengadaan komponen dan sistem dapat terus beroperasi.

Reliability centered spares (RCS) adalah salah satu metode analisis pengelolaan suku cadang dengan mempertimbangkan beberapa aspek seperti kebutuhan pemeliharaan apa yang dibutuhkan oleh mesin dan akibat yang terjadi jika suku cadang tidak tersedia. Metode ini memungkinkan kegiatan perawatan tanpa harus menunggu pengadaan komponen yang diganti.

Semakin lama digunakan, alat akan mengalami penuaan dan peningkatan tingkat bahaya akan terjadi (Alhilman, Saedudin, Atmaji, & Suryabrata, 2015).

Oleh karena itu, diperlukan pengelolaan suku cadang yang tepat agar dapat melakukan kegiatan perawatan mesin dengan waktu proses optimal.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Studi Literatur

Reliability centered spares adalah metode untuk menghitung persediaan suku cadang selama periode tertentu. Komponen kritis merupakan komponen yang jika mengalami kegagalan dapat menimbulkan kerugian yang tinggi bagi perusahaan

Untuk menghitung persediaan suku cadang pada jurnal ini menggunakan metode dan analisa sebagai berikut : *Risk Matrix*, *Mean Time Between Failure* (MTBF), *Mean Time To Repair* (MTTR), dan *Reliability Centered Spares* dengan menggunakan *Poisson Process*.

| | | | | | |
|----------------|----|-----|----|----|----|
| Almost Certain | TA | TNA | NA | NA | NA |
|----------------|----|-----|----|----|----|

Tabel 2 merupakan hasil akhir dari matriks risiko dengan tingkat risiko tercantum didalamnya.

2.1.1 Matriks Risiko

Matriks Risiko adalah mekanisme untuk mengklasifikasikan risiko proses yang biasanya diidentifikasi melalui satu atau lebih tinjauan (Markowski & Mannan, 2008).

Ada dua cara untuk mengevaluasi matriks, konsekuensi (*severity*) dan kemungkinan (*likelihood*) (Ristić, 2013).

Untuk membangun matriks risiko, langkah-langkah berikut perlu dilakukan:

1. Pengkategorian dan penskalaan tingkat keparahan konsekuensi dan frekuensi peristiwa,
2. Pemberian skala indeks risiko output,
3. Pengkategorian risiko,
4. Membangun matriks risiko

Tabel 1. Kategori matriks risiko

| Variabel | Kategori |
|----------------------|----------------------------|
| <i>Likelihood</i> | <i>Rare</i> |
| | <i>Unlikely</i> |
| | <i>Possible</i> |
| | <i>Likely</i> |
| | <i>Almost Certain</i> |
| <i>Severity</i> | <i>Insignificant</i> |
| | <i>Minor</i> |
| | <i>Moderate</i> |
| | <i>Major</i> |
| | <i>Catastrophic</i> |
| <i>Risk Category</i> | A : Dapat diterima |
| | TA : Dapat ditoleransi |
| | TNA : Tidak dapat diterima |
| | NA : Segera diperbaiki |

Tabel 2. Matriks risiko

| <i>Likelihood</i> | <i>Severity</i> | | | | |
|-------------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-------------------|
| | <i>Insign.</i> | <i>Minor</i> | <i>Moderate</i> | <i>Major</i> | <i>Catastrho.</i> |
| <i>Rare</i> | A | A | TA | TNA | TNA |
| <i>Unlikely</i> | A | A | TA | TNA | NA |
| <i>Possible</i> | A | TA | TNA | NA | NA |
| <i>Likely</i> | TA | TA | TNA | NA | NA |

2.1.2 Mean Time Between Failure (MTBF)

Laju kerusakan suatu komponen/sistem tidak berkaitan dengan umur pakai dan karakteristik lain dalam sejarah pemakaiannya, maka distribusi statistik yang digunakan adalah distribusi Eksponensial (laju kerusakannya bersifat konstan) yang dinyatakan dengan parameter λ sedangkan jika laju kerusakannya tergantung pada umur pakainya maka distribusi statistik yang digunakan adalah distribusi Normal dan Weibull (Ebeling, 1997).

MTBF digunakan sebagai atribut atau ukuran keandalan perangkat keras dan perangkat lunak, dan juga sebagai informasi penting dalam logistik untuk perencanaan suku cadang untuk barang yang dapat diperbaiki, atau perencanaan penggantian atau barang yang tidak dapat diperbaiki (Krasich, 2009).

a. Distribusi Normal

$$MTBF = \mu \tag{1}$$

b. Distribusi Eksponensial

$$MTBF = \int R(t) dt = \frac{1}{\lambda} = \mu \tag{2}$$

c. Distribusi Weibull

$$MTBF = \eta \cdot \Gamma(1 + \frac{1}{\beta}) \tag{3}$$

2.1.3 Mean Time To Repair (MTTR)

Mean Time To Repair (MTTR) merupakan waktu rata rata perbaikan. Dalam menghitung MTTR perlu diperhatikan distribusi datanya.

Nilai kemampuan pemeliharaan utama adalah waktu rata-rata untuk memperbaiki (MTTR) dan batas waktu perbaikan maksimum (Sharma & Kumar, 2008)

a. Distribusi Normal

$$MTTR = \mu \tag{4}$$

b. Distribusi Eksponensial

$$MTTR = \frac{1}{\lambda} \tag{5}$$

c. Distribusi Weibull

$$MTTR = \theta \cdot \Gamma(1 + \frac{1}{\beta}) \tag{6}$$

Nilai $\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})$ didapat dari tabel fungsi gamma.

2.1.4 Poisson Process

Permintaan untuk suku cadang yang meliputi penggantian atau kegagalan komponen yang terjadi sebagai akibat dari tindakan pemeliharaan adalah kejadian yang digambarkan sebagai pendistribusian *poisson* yang terjadi berdasarkan peristiwa yang

terjadi dalam interval waktu tertentu (Fukuda, 2008)

Faktor yang digunakan pada teknik ini adalah :

1. Keandalan komponen kritis (dinyatakan sebagai waktu rata-rata antar kegagalan komponen (**MTBF**)).
2. Jumlah item yang dipasang per mesin, **A**.
3. Probabilitas suku cadang tersedia di gudang saat dibutuhkan ($90\% \leq P \leq 95\%$). Disebut juga sebagai tingkat kepercayaan.
4. Jumlah mesin yang diteliti **N**.
5. Periode waktu operasional (waktu **T** dalam bulan).
6. Penggunaan mesin rata-rata per bulan, **M**.

Komponen kritis dibagi dua, untuk penerapan metode ini, dapat diperbaiki dan tidak dapat diperbaiki. Untuk suku cadang yang dapat diperbaiki, persediaan suku cadang dihitung untuk mengimbangi barang yang sedang menjalani proses perbaikan.

7. Untuk komponen yang dapat diperbaiki, periode rata-rata yang diperlukan untuk memperbaiki (Diindikasikan sebagai waktu antara perbaikan RT) dianggap bukan waktu dukungan T dari poin 5 di atas.
8. Untuk *scrap* pada komponen yang dapat diperbaiki dinyatakan sebagai nilai sisa (misalnya $R \cong 0,02$ atau 2%).

Distribusi ini cukup sering digunakan dalam penentuan kuantitas suku cadang sebagai teknik peramalan dengan menggunakan analisis reliabilitas yang memiliki perbedaan perhitungan sesuai dengan klasifikasi komponen.

1. Komponen Non - Repairable

Menurut Fukuda (2008), pada perhitungan jumlah kebutuhan komponen suku cadang *non-repairable*, jumlah kegagalan yang terjadi sama dengan jumlah kebutuhan suku cadangnya. Jumlah kebutuhan komponen suku cadang merupakan nilai minimum dari (n) dengan perhitungan sebagai berikut

$$\lambda t = \frac{1}{MTBF} t = \frac{A \cdot N \cdot M \cdot T}{MTBF} \tag{7}$$

$$P \leq \sum_{x=0}^n \frac{(\lambda t)^x e^{-\lambda t}}{x!} \tag{8}$$

2. Komponen Non-Repairable:

Dalam keadaan sebenarnya, komponen yang rusak dapat dikembalikan ke keadaan operasionalnya dengan cara diperbaiki. Ketika sebuah komponen gagal berfungsi, komponen tersebut dipindahkan ke fasilitas perbaikan untuk menjalani perbaikan, dan suku cadang, jika tersedia, menggantikan segera (Kim, Shin, & Yu, 1996).

Menurut Fukuda (2008), pada komponen *repairable*, tingkat persediaan suku cadang yang ada yaitu untuk mengimbangi komponen *repairable* selama proses perbaikan berlangsung, yang dapat dilihat pada rumus berikut ini.

$$\lambda t = \frac{1}{MTBF} t = \frac{A \cdot N \cdot M \cdot RT}{MTBF} \tag{9}$$

Saat melakukan rekondisi mesin dan melibatkan penggantian komponen maka perlu untuk mengadakan komponen suku cadang, sehingga perhitungannya adalah:

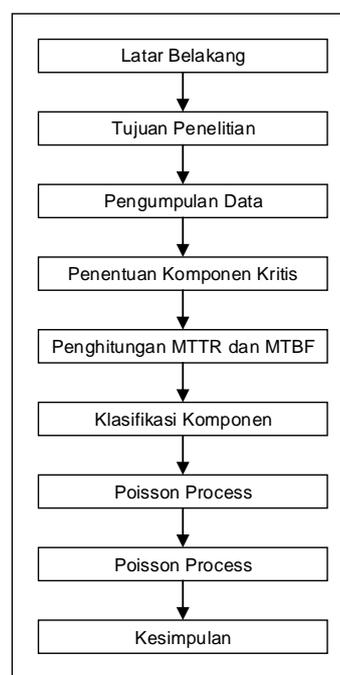
$$P \leq \sum_{x=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^x e^{-\lambda t}}{x!} \tag{10}$$

Komponen *repairable* dapat dihitung dengan mempertimbangkan *scrap rate* karena komponen yang diperbaiki tidak selalu dapat diperbaiki sehingga dibutuhkan penggantian komponen.

Faktor biaya menjadi pertimbangan yang harus diperhatikan ketika biaya perbaikan lebih besar daripada biaya penggantian komponen. Kebutuhan komponen pun meningkat dan probabilitasnya dapat dihitung menggunakan laju kerusakan kombinasi dari komponen *non-repairable* dan *repairable*.

2.2 Sistematika Penyelesaian Masalah

Ditunjukkan oleh Gambar 3 merupakan sistematika penelitian untuk menentukan kebutuhan suku cadang selama satu tahun ke depan.



Gambar 3. Metodologi penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Komponen Kritis

Pemeriksaan yang digunakan pada matriks risiko berdasarkan seberapa besar dampak yang ditimbulkan terhadap keamanan, lingkungan, produktivitas, dan operasional jika komponen mengalami kerusakan serta seberapa sering komponen mengalami kerusakan.

Tabel 3. Komponen kritis

| Likelihood | Severity | | | | |
|----------------|----------|----------------------------------|--------------------|-------|------------|
| | Insign. | Minor | Moderate | Major | Catastrho. |
| Rare | | | | | |
| Unlikely | | Panel | Impeller | | |
| Possible | | Strainer, Bearing, Flexible, PSV | | | |
| Likely | | | Motor, Mech. Seal | | |
| Almost Certain | | | Valve, Cross Joint | | |

Tabel 3 menunjukkan tingkat risiko setiap komponen pada pompa produk. Komponen kritis berada pada warna jingga dan merah yaitu *motor*, *mechanical seal*, *valve*, dan *cross joint*.

3.2 Perhitungan MTTR

Penghitungan *mean time to repair* berbeda

3.4 Poisson Process

Komponen kritis dibagi menjadi dua klasifikasi yaitu komponen *repairable* dan komponen *non-repairable* berdasarkan kemampuan *repairability* komponen seperti ditunjukkan pada Tabel 6.

Berikut merupakan perhitungan jumlah suku cadang komponen kritis menggunakan *poisson process* untuk satu tahun ke depan berdasarkan klasifikasi komponen.

1. Komponen Repairable

a. Motor

$$\lambda 1t = R \cdot \frac{A \cdot N \cdot M \cdot T}{MTBF} = 0.1 \cdot \frac{1 \cdot 1 \cdot 390 \cdot 12}{2559.82} = 0.182825355$$

$$\lambda 2t = \frac{A \cdot N \cdot M \cdot RT}{MTBF} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 390 \cdot 1.7939}{2559.82} = 0.273306837$$

Tabel 7. Perhitungan suku cadang motor

berdasarkan distribusi waktu perbaikan komponen kritis. Distribusi *time to repair* didapat menggunakan nilai Anderson-Darling setiap komponen kritis sehingga MTTR komponen kritis dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. MTTR komponen kritis

| Komponen | Distribusi | MTTR |
|-----------------|------------|--------|
| Motor | Weibull | 1.794 |
| Mechanical Seal | Ekspensial | 11.250 |
| Valve | Ekspensial | 5.773 |
| Cross Joint | Weibull | 3.589 |

3.3 Perhitungan MTBF

Penghitungan *mean time between failure* berbeda berdasarkan distribusi waktu perbaikan komponen kritis. Distribusi *time between failure* didapat menggunakan nilai Anderson-Darling setiap komponen kritis sehingga MTBF komponen kritis dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. MTBF komponen kritis

| Komponen | Distribusi | MTBF |
|-----------------|------------|---------|
| Motor | Normal | 2559.82 |
| Mechanical Seal | Ekspensial | 4086.53 |
| Valve | Weibull | 2788.60 |
| Cross Joint | Weibull | 2734.39 |

Tabel 6. Klasifikasi komponen kritis

| No. | Komponen Kritis | Klasifikasi |
|-----|-----------------|----------------|
| 1 | Motor | Repairable |
| 2 | Mechanical Seal | Non-repairable |
| 3 | Valve | Non-repairable |
| 4 | Cross Joint | Non-repairable |

| N | n-1 | λt^x | $\exp(-\lambda t)$ | fact(n) | P | $\sum P$ | % |
|---|-----|---------------|--------------------|---------|-------|----------|-------|
| 1 | 0 | 1.000 | 0.6337 | 1 | 0.634 | 0.634 | 63.4% |
| 2 | 1 | 0.456 | 0.6337 | 1 | 0.289 | 0.923 | 92.3% |
| 3 | 2 | 0.208 | 0.6337 | 2 | 0.066 | 0.989 | 98.9% |
| 4 | 3 | 0.095 | 0.6337 | 6 | 0.010 | 0.999 | 99.9% |

2. Komponen Non-repairable

a. Mechanical Seal

$$\lambda t = \frac{A \cdot N \cdot M \cdot T}{MTBF} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 390 \cdot 12}{4086.53} = 1.145$$

Tabel 8. Perhitungan suku cadang *mechanical seal*

| n | λt^x | $\exp(-\lambda t)$ | fact(n) | P | $\sum P$ | % |
|---|---------------|--------------------|---------|-------|----------|-------|
| 0 | 1.000 | 0.3182 | 1 | 0.318 | 0.318 | 31.8% |
| 1 | 1.145 | 0.3182 | 1 | 0.364 | 0.683 | 68.3% |
| 2 | 1.312 | 0.3182 | 2 | 0.209 | 0.891 | 89.1% |
| 3 | 1.502 | 0.3182 | 6 | 0.080 | 0.971 | 97.1% |
| 4 | 1.720 | 0.3182 | 24 | 0.023 | 0.994 | 99.4% |

b. Valve

$$\lambda t = \frac{A \cdot N \cdot M \cdot T}{MTBF} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 390 \cdot 12}{2788.598} = 1.678$$

Tabel 9. Perhitungan suku cadang *valve*

| N | λt^x | $\exp(-\lambda t)$ | fact(n) | P | $\sum P$ | % |
|---|---------------|--------------------|---------|-------|----------|-------|
| 0 | 1.000 | 0.1867 | 1 | 0.187 | 0.187 | 18.7% |
| 1 | 1.678 | 0.1867 | 1 | 0.313 | 0.500 | 50.0% |

4. KESIMPULAN

Suku cadang sangat umum di banyak industri dan meramalkan kebutuhan inventaris suku cadang merupakan masalah operasional yang penting (Boylan & Syntetos, 2010). Dengan menggunakan *Poisson process*, dapat diketahui jumlah suku cadang untuk setiap komponen kritis untuk satu tahun ke depan. Berdasarkan perhitungan pada Tabel 7, 8, 9, 10, komponen *reparable* motor harus disediakan sebanyak 3 unit dan untuk komponen *non-repairable* seperti *mechanical seal*, *valve*, serta *cross joint* harus disediakan sebanyak 3, 4, 4 unit berturut-turut selama satu tahun ke depan dengan tingkat keyakinan sebesar 95%. Upaya ini dilakukan untuk mencegah *stock out* komponen serta dapat menurunkan nilai *down time* mesin.

5. DAFTAR PUSTAKA

Alhilman, J., Saedudin, R. R., Atmaji, F. T. D., & Suryabrata, A. G. (2015). LCC application for estimating total maintenance crew and optimal age of BTS component. *2015 3rd International Conference on Information and Communication Technology, ICoICT 2015*, 4(2), 543–547. <https://doi.org/10.1109/ICoICT.2015.7231483>

Boylan, J. E., & Syntetos, A. A. (2010). Spare parts management: A review of forecasting research and extensions. *IMA Journal of Management Mathematics*, 21(3), 227–237. <https://doi.org/10.1093/imaman/dpp016>

BP. (2016). *Statistical Review of World Energy*. BP

| | | | | | | |
|---|-------|--------|----|-------|-------|-------|
| 2 | 2.817 | 0.1867 | 2 | 0.263 | 0.763 | 76.3% |
| 3 | 4.727 | 0.1867 | 6 | 0.147 | 0.910 | 91.0% |
| 4 | 7.933 | 0.1867 | 24 | 0.062 | 0.972 | 97.2% |

c. Cross Joint

$$\lambda t = \frac{A \cdot N \cdot M \cdot T}{MTBF} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 390 \cdot 12}{2734.394} = 1.712$$

Tabel 10. Perhitungan suku cadang *cross joint*

| N | λt^x | $\exp(-\lambda t)$ | fact(n) | P | $\sum P$ | % |
|---|---------------|--------------------|---------|-------|----------|-------|
| 0 | 1.000 | 0.1806 | 1 | 0.181 | 0.181 | 18.1% |
| 1 | 1.712 | 0.1806 | 1 | 0.309 | 0.490 | 49.0% |
| 2 | 2.929 | 0.1806 | 2 | 0.265 | 0.754 | 75.4% |
| 3 | 5.014 | 0.1806 | 6 | 0.151 | 0.905 | 90.5% |
| 4 | 8.581 | 0.1806 | 24 | 0.065 | 0.970 | 97.0% |
| 5 | 14.687 | 0.1806 | 120 | 0.022 | 0.992 | 99.2% |

Statistical Review of World Energy, (June), 1–48.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.172>

Ebeling, C. (1997). *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. McGraw Hill.

Fukuda, J. (2008). Spare Parts Stock Level Calculation, 1–8.

Kim, J. S., Shin, K. C., & Yu, H. K. (1996). Optimal algorithm to determine the spare inventory level for a repairable-item inventory system. *Computers and Operations Research*, 23(3), 289–297. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(95\)00014-3](https://doi.org/10.1016/0305-0548(95)00014-3)

Krasich, M. (2009). How to estimate and use MTTF/MTBF would the real MTBF please stand up? *Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 353–359. <https://doi.org/10.1109/RAMS.2009.4914702>

Markowski, A. S., & Mannan, M. S. (2008). Fuzzy risk matrix. *Journal of Hazardous Materials*, 159(1), 152–157. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.055>

Ristić, D. (2013). a Tool for Risk Assessment. *Safety Engineering Journal*, 3(3), 121–127. <https://doi.org/10.7562/SE2013.3.03.03>

Sharma, R. K., & Kumar, S. (2008). Performance modeling in critical engineering systems using RAM analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 93(6), 913–919. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.03.039>