

PENERAPAN INTEGRASI *PREFERENCE SELECTION INDEX* DENGAN *FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS* PADA EVALUASI PRIORITAS POTENSI RESIKO KERUSAKAN POMPA SENTRIFUGAL

Savior Pongai, Agung Sutrisno, Irvan R. Rondonuwu
Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi Manado

ABSTRAK

Mesin produksi merupakan salah satu faktor produksi yang memiliki peran penting sehingga perawatan mesin sangat penting untuk dikaji. Terkait dengan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menentukan prioritas resiko kerusakan mesin pada pompa sentrifugal. Dalam pengkajiannya penelitian ini menggunakan integrasi antara metode *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA) dengan metode *Preference Selection Index* (PSI).

Dari hasil penerapan integrasi metode *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA) dengan metode *Preference Selection Index* (PSI) pada evaluasi prioritas potensi resiko kerusakan pompa sentrifugal menunjukkan 6 jenis kerusakan yang umum terjadi pada kedua pompa yang ada yaitu *rewinding* elektro motor hangus, *casing bearing* aus, *shaft* pompa aus, *impeller* korosi, *bearing* aus, *housing shaft* aus. Kemudian untuk hasil perankingan prioritas resiko kerusakan pompa sentrifugal pertama jatuh pada korosi pada *impeller* yang merupakan jenis kerusakan dengan prioritas tertinggi dengan skor preferensi 0,86. Dan untuk pompa sentrifugal kedua jenis kerusakan dengan skor preferensi tertinggi adalah *rewinding* elektro motor hangus akibat *overheat* dengan skor preferensi 0,74. Kemudian untuk usulan perawatan pada umumnya dilakukan pengecekan, penanganan, dan pergantian komponen berkala.

Kata kunci: Metode *Preference Selection Index* (PSI), Metode *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA), pompa sentrifugal.

ABSTRACT

Production machinery is one of the production factors that has an important role so that machine maintenance is very important to be studied. Related to this, this study aims to determine the priority of engine damage risk in centrifugal pumps. In its study, this study uses an integration between the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) method with the Preference Selection Index (PSI) method.

From the results of the application of the integration of the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) method with the Preference Selection Index (PSI) method in the priority evaluation of the potential risk of damage to centrifugal pumps shows 6 types of damage that commonly occur in the two pumps, namely scorched electro motor rewinding, worn bearing casing, worn pump shaft, corrosion impeller, worn bearings, worn shaft housing. Then for the priority ranking results, the risk of damage to the first centrifugal pump falls on corrosion on the impeller which is the highest priority type of damage with a preference score of 0.86. And for centrifugal pumps, the two types of damage with the highest preference score are scorched motor eletro rewinding due to overheating with a preference score of 0.74 Then for treatment proposals for handling activities, periodic checks, periodic handling, and periodic changes are generally carried out,

Keywords: *Preference Selection Index (PSI) method, Failure Modes and Effects Analysis (FMEA), centrifugal pump*

I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam lingkup industri peningkatan efektifitas dan efisiensi perusahaan diharapkan dapat mencapai sasaran dengan memanfaatkan faktor-faktor produksi diantaranya ada *man*, *material*, *money*, dan *machines*. Kebutuhan produktivitas yang tinggi mendesak mesin untuk melakukan produksi terus-menerus. Namun kegagalan, kelusuhan, kerusakan, *low performance* dapat dialami mesin, sehingga pada situasi inilah pemeliharaan atau *maintenance* menjadi faktor penting pada mesin-mesin produksi. Suatu mesin

produksi merupakan representasi suatu sistem yang beroperasi di dalamnya terdapat komponen-komponen yang memiliki fungsi masing-masing. Dengan adanya fungsi-fungsi yang berbeda membuat masing-masing komponen memiliki level potensi kerusakan yang berbeda. Sehingga level prioritas penanganan kerusakan masing-masing komponen juga berbeda. Dalam lingkup teknik pemeliharaan, prioritas penentuan pemeliharaan mesin, upaya untuk menentukan prioritas resiko akibat kerusakan mesin menjadi penting untuk dikaji (Sutrisno, 2022). Untuk menentukan prioritas resiko akibat kerusakan mesin metode *Failure Modes and Effect Analysis* (FMEA)

merupakan salah satu metode yang digunakan. Konsep FMEA mengevaluasi kemungkinan terjadinya sebuah kegagalan dari sebuah sistem, dsain, proses atau servis untuk dibuat langkah penanganannya (Andiyanto, 2017).

Dari beberapa kajian tentang penentuan prioritas resiko kerusakan mesin berbagai metode diintegrasikan dengan metode FMEA seperti AHP (*Anlythic Hierarchy Process*), ANP (*Analythic Network Process*), dan *Proximity Value Index*. Berbagai metode diatas adalah metode yang memecahkan masalah MCDM atau *Multi Criteria Decision Making* karena dari FMEA sendiri yang bersifat multi-kriteria. Oleh karena itu penelitian ini ingin mengeksplorasi penggunaan metode PSI untuk menentukan prioritas potensi resiko dengan metode perhitungan yang lebih sederhana dan efisien dengan penentuan bobot kriteria berbeda-beda berdasar pada masalah yang akan dipecahkan.

Metode PSI adalah salah satu metode dalam pengambilan keputusan yang bersifat multi-kriteria. Sehingga dalam penerapan metode PSI salah satu langkah yang penting adalah ketika menentukan masalah maka ditentukan kriteria-kriteria yang mempengaruhi pengambilan keputusan. Keuntungan menggunakan metode PSI karena metode PSI sangat sederhana dan lebih efisien dalam hal kalkulasinya sehingga metode PSI dapat membantu pengambilan keputusan membuat keputusan secara lebih cepat. Terkait dengan keuntungan yang dimiliki oleh metode PSI tersebut peneliti tertarik untuk menggunakan metode PSI prospektif sebagai metode alternatif untuk mengukur dampak resiko kerusakan pompa di instalasi PDAM Minahasa.

II LANDASAN TEORI

2.1 Metode FMEA

Metode FMEA merupakan suatu metode yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi penyebab dan dampak dari setiap kemungkinan mode kegagalan potensial pada komponen peralatan dengan menjelaskan secara detail dan sistematis tingkat level kegagalan, sehingga dapat dilakukan pencegahan/perbaikan dengan tepat (Puspitasari, 2017; Smith, 2001). Dalam kegiatan *maintenance* FMEA diterapkan untuk menentukan tingkat resiko dari setiap kegagalan. Tingkat resiko dari setiap kegagalan dijabarkan dalam bentuk RPN atau *Risk Priority Number* (Situngkir, 2019). Pada FMEA RPN diidentifikasi dengan beberapa faktor yaitu tingkat kejadian (*occurrence*), tingkat keparahan (*severity*), dan tingkat deteksi (*detection*).

Untuk menentukan prioritas potensi resiko kerusakan pompa sentrifugal, metode FMEA menggunakan persamaan RPN atau *Risk Priority Number* (RPN) yang menyatakan tingkat kekritisan

akibat kerusakan suku cadang, Rumus RPN adalah sebagai berikut:

$$RPN= S \times O \times D \dots \dots \dots (2.1)$$

Adapun notasi S,O dan D dijelaskan sebagai berikut:

S = *Severity* (tingkat keparahan)

O = *Occurrence* (tingkat kejadian)

D = *Detection* (Deteksi).

2.2 Metode Preference Selection Index

Metode *Preference Selection Index* merupakan salah satu metode pengambilan keputusan yang sederhana dalam penyelesaian kasus terutama pengambilan keputusan yang mengandung pertimbangan multi-kriteria. Menurut Mesran dkk (2018) metode PSI dikembangkan oleh Maniya dan Bhatt tahun 2010 untuk memecahkan multi-kriteria pengambilan keputusan (MCDM). Dibandingkan dengan pendekatan MCDM lainnya, metode PSI lebih mudah dipahami karena melibatkan lebih sedikit perhitungan numerik. Oleh karena itu metode PSI dapat dianggap sebagai metode baru untuk menyelesaikan keputusan membuat masalah (Attri, 2015). Karena bersifat sederhana dan praktis metode PSI sering digunakan dalam keputusan berbagai bidang. Tahapan prosedur PSI yaitu sebagai berikut (Mesran, 2018):

1. Tentukan masalah
Tentukan tujuan dan mengidentifikasi atribut dan alternatif yang terkait masalah pengambilan keputusan
2. Merumuskan matriks keputusan
Langkah ini melibatkan konstruksi matriks berdasarkan semua informasi yang tersedia yang menggambarkan atribut masalah. Maka matriks keputusan sebagai matriks N . M, dapat direpresentasikan sebagai berikut:

$$X = [X_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

3. Normalisasi matriks keputusan Jika atribut adalah tipe menguntungkan, maka nilai yang lebih besar diinginkan, yang dapat dinormalisasi sebagai :

$$N_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max x_j} \dots \dots \dots (2.2)$$

Jika atributnya adalah tipe yang tidak menguntungkan, maka nilai yang lebih kecil adalah yang diinginkan, yang dapat dinormalisasi sebagai:

$$N_{ij} = \frac{\min x_j}{x_{ij}} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana X_{ij} adalah ukuran atribut ($i = 1, 2, \dots, N$ dan $j = 1, 2, \dots, M$).

4. Menentukan nilai mean dari matriks yang dinormalkan dalam hubungannya dengan

masing-masing kriteria menggunakan persamaan berikut:

$$N = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{ij} \dots \dots \dots (2.4)$$

5. Menentukan nilai variasi preferensi
$$\phi_j = \sum_{i=1}^n (N_{ij} - N)^2 \dots \dots \dots (2.5)$$

6. Menentukan deviasi preferensi
$$\Omega = 1 - \phi_j \dots \dots \dots (2.6)$$

7. Menentukan kriteria bobot
$$W_j = \frac{\Omega_j}{\sum_{j=1}^m \Omega_j} \dots \dots \dots (2.7)$$

8. Menghitung PSI
$$\theta_i = \sum_{j=1}^m N_{ij} \times W_j \dots \dots \dots (2.8)$$

2.3 Mekanisme Kerja Pompa Sentrifugal

Mekanisme pompa sentrifugal diawali dengan adanya daya putar dari penggerak diberikan pada poros pompa untuk memutar impeller, yang kemudian akan menghisap fluida lalu memutarannya. Akibat dari putaran fluida cair yang cepat maka akan menghasilkan gaya sentrifugal yang besar sehingga cairan akan terlempar dan mengalami kenaikan kecepatan. Setelah meninggalkan impeller, fluida akan mengalir dan ditampung pada saluran berbentuk spiral (volute) kemudian sebagian kecepatan aliran dirubah menjadi tekanan keluaran (discharge pressure). Jadi di dalam impeller, fluida mengalami kenaikan energi kinetik. Pada pompa sentrifugal terdapat komponen-komponen yang bekerja yang memiliki fungsi dan kerja masing-masing. Berikut merupakan bagian-bagian utama pompa sentrifugal.

1. Impeller

Impeller berfungsi untuk mengubah energi mekanis dari pompa menjadi energi kecepatan pada cairan yang dipompa secara kontinu, sehingga cairan pada sisi hisap secara terus menerus akan masuk mengisi kekosongan akibat perpindahan dari cairan yang masuk sebelumnya.

2. Rumah Pompa

Rumah pompa merupakan bagian paling luar dari pompa yang berfungsi sebagai pelindung elemen yang berputar, tempat kedudukan *difusser*, *suction nozzle* dan *discharge nozzle* serta memberikan arah aliran dari *impeller* dan mengubah energi kecepatan menjadi energi tekan.

3. Shaft

Shaft berfungsi untuk meneruskan momen puntir dari penggerak (motor) selama beroperasi ke *impeller*. Shaft juga berfungsi sebagai tempat kedudukan *impeller* dan bagian – bagian lain yang berputar.

4. Shaft Sleeve

Shaft sleeve berbentuk silinder berlubang yang berfungsi untuk melindungi shaft utama dari erosi, korosi, dan aus

5. Bearing

Bearing atau bantalan berfungsi untuk menumpu dan menahan beban dari poros agar dapat berputar, baik berupa beban radial maupun beban aksial. Bearing juga memungkinkan poros untuk dapat berputar dengan lancar dan tetap pada tempatnya, sehingga kerugian gesek juga akan kecil.

6. Drive side

Drive side atau motor penggerak berfungsi sebagai sumber penggerak pada poros pompa yang nantinya akan memutar *impeller*. Drive side terdiri dari tiga komponen penting yaitu *frame*, *stator*, dan *rotor*.

III .METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Lokasi untuk penelitian ini dilakukan di salah satu perusahaan BUMD (yang terletak di Minahasa yaitu PDAM Minahasa yang bergerak dalam bidang pendistribusian air bersih tepatnya di Kembuan, Kecamatan Tondano Utara, Kabupaten Minahasa, Sulawesi Utara. Dimana pengambilan data akan dilakukan di instalasi Uluna unit Tondano Barat yang di dalamnya terdapat mesin produksi berupa pompa sentrifugal yang akan menjadi objek penelitian dalam penelitian ini. Penelitian akan dilakukan dimulai dari bulan Februari 2023 hingga bulan Mei 2023.

3.2 Cara Pengambilan Data

Pengumpulan data dilakukan untuk memperoleh informasi yang dibutuhkan dalam rangka mencapai tujuan penelitian. Data yang dikumpulkan oleh sampel yang telah ditentukan sebelumnya. Sampel tersebut terdiri atas sekumpulan unit analisis sebagai sasaran penelitian. Pengumpulan data dalam penelitian ini yang berbentuk kuantitatif dilakukan dengan cara observasi, wawancara, studi pustaka, dan dokumentasi

- Metode Observasi

Pada penelitian ini dilakukan pengamatan langsung bersama kepala unit di PDAM Minahasa Instalasi Uluna untuk mengamati pompa sebagai objek pada penelitian ini.

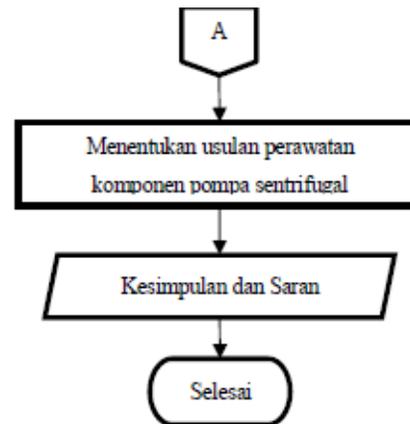
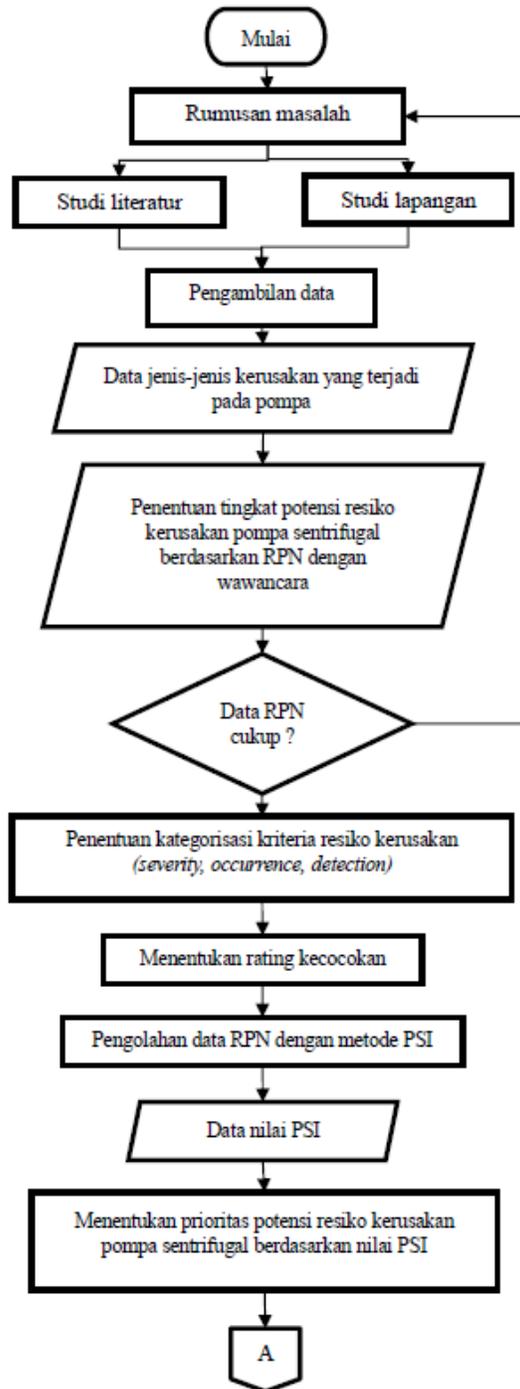
- Metode Wawancara

Wawancara langsung dilakukan terhadap operator serta karyawan yang berhubungan langsung dengan objek penelitian pada hal ini kepala bagian perawatan PDAM Minahasa dan juga kepala unit instalasi Uluna yang menangani langsung pompa sentrifugal sebagai objek penelitian ini. Wawancara dilakukan dengan tanya jawab secara langsung maupun tidak langsung atau panggilan suara.

- Metode Dokumentasi

Pada metode pengumpulan data ini dengan teknik pengumpulan dengan memanfaatkan data-data yang ada dari pihak perusahaan sebagai contoh data perawatan pada PDAM Minahasa.

3.3 Diagram Alir Penelitian

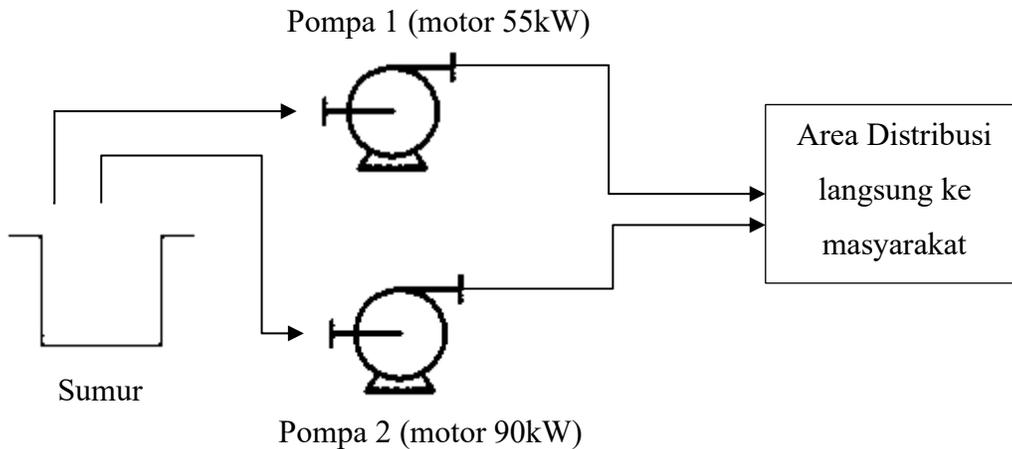


IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Mekanisme Proses Pompa Sentrifugal di PDAM Minahasa

Pada sub bab ini berisi tentang mekanisme pompa sentrifugal pada proses distribusi air di PDAM Minahasa Instalasi Uluna. Dimana terdapat dua pompa yang digunakan untuk pendistribusian air dari instalasi Uluna untuk pompa pertama adalah pompa sentrifugal berjenis *multi-stage pump* dengan daya motor 55 kW

kemudian yang kedua adalah pompa sentrifugal berjenis *split case pump* dengan daya motor 90 kW. Masing-masing pompa memiliki target distribusi yang pada umumnya sama menyesuaikan dengan kebutuhan di lapangan. Dimana untuk area distribusinya mencakup pusat kota Tondano dan Tondano bagian selatan dimana untuk pergantian area distribusi memanfaatkan katup buka tutup untuk menjangkau kedua area distribusi tersebut.



Gambar 4. 1 Mekanisme Proses Distribusi Air Bersih di PDAM Minahasa dengan Pompa Sentrifugal

Jadi kedua pompa dijalankan bersama untuk menyesuaikan pada area distribusi yang ada. Dibawah ini merupakan proses mekanisme pendistribusian air di Instalasi Uluna. Jadi pada gambar diatas jelas bahwa walaupun kedua pompa bekerja masing-masing namun target distribusinya sama sehingga untuk waktu operasi sama. Dengan catatan pompa 1 dan 2 memiliki pompa cadangan yang beroperasi ketika pompa 1 atau 2 akan di matikan karena perawatan atau

hal lainnya hal ini agar proses produksi tidak berhenti ketika salah satu mengalami *shutdown*.

4.1 Hasil Penelitian

4.1.1 Jenis-jenis Resiko Kerusakan yang Terjadi pada Pompa Sentrifugal di PDAM Minahasa Instalasi Uluna

Tabel 4. 1 Jenis-jenis Mode Kegagalan pada Pompa Sentrifugal di PDAM Minahasa Instalasi Uluna

No.	Komponen	Fungsi	Modus Kerusakan
1.	Motor	Sumber penggerak pompa	Kumparan/rewinding stator hangus
2.	Bearing	Menahan beban poros	Casing bearing aus
3.	Shaft	Meneruskan momen puntir dari motor penggerak	Shaft aus
4.	Impeller	Menghisap dan mendorong air dari sumber	Impeller korosi
5.	Bearing	Menahan beban poros	Bearing aus
6.	Shaft Sleeve	Melindungi shaft utama dari korosi, erosi, dan aus	Shaft Sleeve aus

Dari hasil observasi dan wawancara pada tabel 4.1 diatas ditemukan 6 jenis kerusakan yang umum terjadi pada 2 jenis pompa sentrifugal di PDAM Minahasa Instalasi Uluna.

4.1.2 Menentukan Tingkat Potensi Resiko Kerusakan Pompa Sentrifugal di PDAM Minahasa Instalasi Uluna

Tingkat potensi resiko kerusakan pompa sentrifugal PDAM Minahasa Instalasi Uluna ditentukan berdasarkan 3 kriteria pada FMEA (*Failure*

Modes and Effect Analysis) yaitu; (1) *Severity* atau tingkat keparahan akibat suatu resiko kerusakan, (2) *Occurrence* atau tingkat kejadian suatu resiko kerusakan, dan (3) *Detection* atau tingkat kesulitan mendeteksi suatu resiko kerusakan. Jenis – jenis resiko kerusakan yang telah diidentifikasi yang umum terjadi pada pompa sentrifugal di PDAM Minahasa Instalasi Uluna terdiri dari 6 komponen. Tabel dibawah menunjukkan skor-skor setiap kriteria RPN pada setiap jenis kegagalan komponen pada kedua pompa yang ada.

Tabel 4. 2 Tabel Penerapan FMEA Berdasar pada Modus Kegagalan pada Pompa Sentrifugal di PDAM Minahasa Instalasi Uluna

No	Failure Modes	Failure Effect	Kriteria Penentuan Resiko Kerusakan						RPN	
			Severity		Occurrence		Detection			
			P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
1.	Rewinding elektro motor hangus akibat overheating	Pompa berhenti total	7	7	1	1	3	3	21	21
2.	Casing bearing aus	Menghasilkan getaran berlebihan	4	5	3	3	7	7	84	105
3.	Shaft pompa aus	Menghasilkan getaran berlebihan	6	5	2	2	7	5	84	50
4.	Impeller korosi	Penurunan kapasitas air	3	2	1	2	5	5	15	20
5.	Bearing aus akibat kurang pelumasan	overheat	4	3	8	8	3	3	96	72
6.	Housing shaft aus	Menurunkan kapasitas air	4	3	5	4	3	3	60	36

P1 : Pompa 1 P2 : Pompa 2

Pada setiap kriteria penentuan resiko kerusakan digunakan skor dengan *range* 1-10 hal ini sesuai dengan sistem penilaian pada metode FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*). Dengan adanya nilai kuantitas diatas maka akan memudahkan dalam penerapan metode PSI (*Preference Selection Index*) hal ini lah yang akan menjadi proses integrasi dimana skor diatas yang diperoleh dari hasil penerapan metode FMEA akan diintegrasikan dengan metode PSI untuk penentuan prioritas potensi kerusakan pada pompa sentrifugal. Pada tabel diatas dapat diidentifikasi bahwa setiap jenis kerusakan memiliki skor yang berbeda di setiap kriteria. Yang pertama ada kriteria penilaian dari tingkat keparahan atau *severity* dimana semakin tinggi skor maka semakin parah akibat yang ditimbulkan. Pada kriteria selanjutnya yaitu *occurrence* atau tingkat kejadian resiko kerusakan yang berarti semakin tinggi skor maka semakin sering

terjadi suatu kegagalan. Kemudian pada kriteria *detection* atau tingkat deteksi resiko kerusakan yang berarti semakin tinggi tingkat deteksi maka semakin sulit untuk mendeteksi suatu jenis kegagalan tersebut

4.1.3 Menentukan Kategorisasi Kriteria Resiko Kerusakan Pompa Sentrifugal

Kemudian dari hasil pengumpulan data RPN diatas akan ditentukan kategori kriteria resiko kerusakan. Pada tahap ini akan ditentukan mana kriteria yang bersifat *benefit* dan mana kriteria yang bersifat *cost*. Definisi kriteria bersifat *benefit* adalah jenis kriteria yang mana nilai atau skor semakin tinggi atau semakin besar maka akan semakin menguntungkan. Kemudian untuk kriteria bersifat *cost* artinya semakin tinggi atau semakin besar nilai skor nya akan makin merugikan.

Tabel 4. 3 Kategorisasi Kriteria Mode Kegagalan

No.	Kriteria Mode Kegagalan	Kategori Kriteria		Keterangan
		<i>Benefit</i>	<i>Cost</i>	
1.	Tingkat Keparahan (<i>Severity</i>)		<input type="checkbox"/>	Semakin besar skor tingkat keparahan jenis kerusakan pompa maka akan semakin besar dampak yang dihasilkan sehingga dapat merugikan PDAM Minahasa.
2.	Tingkat Kejadian (<i>Occurrence</i>)		<input type="checkbox"/>	Semakin besar skor skala frekuensi kejadian maka semakin sering terjadi jenis kerusakan sehingga akan semakin merugikan karena memakan biaya dan waktu bagi pihak PDAM Minahasa.
3.	Tingkat Deteksi (<i>Detection</i>)		<input type="checkbox"/>	Semakin besar skor mampu deteksi kejadian jenis kerusakan pompa semakin tidak terdeteksi, sehingga dapat merugikan pihak PDAM Minahasa, namun sebaliknya semakin kecil skor berarti pihak perawatan dapat mendeteksi jenis kerusakan pompa sentrifugal.

4.1.4 Menentukan Rating Kecocokan

Dalam menentukan prioritas kerusakan pompa sentrifugal dengan metode *Preference Selection Index*

(PSI) tahap awal adalah menentukan rating kecocokan pada jenis kerusakan pompa sentrifugal dengan kriteria nya. Dibawah ini adalah hasil pemetaan rating kecocokan pompa 1 dan 2 dari data olahan:

Tabel 4. 4 Penentuan Rating Kecocokan

No	Failure Modes	Jenis Kerusakan pada Pompa Sentrifugal	Kriteria prioritas Jenis Kerusakan Pompa Sentrifugal					
			Severity		Occurrence		Detection	
			P1	P2	P1	P2	P1	P2
1	FM1	Rewinding elektro motor hangus akibat <i>overheat</i>	7	7	1	1	3	3
2	FM2	Casing bearing aus	4	5	3	3	7	7
3	FM3	Shaft pompa aus	6	5	2	2	7	5
4	FM4	Impeller korosi	3	2	1	2	5	5
5	FM5	Bearing aus akibat kurang pelumasan	4	3	8	8	3	3
6	FM6	Housing shaft aus	4	3	5	4	3	3

P1 : Pompa 1 P2 : Pompa 2

4.1.5 Merumuskan Matriks Keputusan

Tahap selanjutnya adalah merumuskan matriks keputusan dari data jenis kerusakan pompa sentrifugal di PDAM Minahasa Instalasi Uluna dengan skor kriteria nya. Hasil perumusan matriks X_{ij} yang berdasarkan rating kecocokannya telah disusun pada matriks X_{ij1} untuk pompa 1 dan X_{ij2} untuk pompa 2 dibawah ini;

$$X_{ij1} = \begin{pmatrix} 7 & 1 & 3 \\ 4 & 3 & 7 \\ 6 & 2 & 7 \\ 3 & 1 & 5 \\ 4 & 8 & 3 \\ 4 & 5 & 3 \end{pmatrix}$$

$$X_{ij2} = \begin{pmatrix} 7 & 1 & 3 \\ 5 & 3 & 7 \\ 5 & 2 & 5 \\ 2 & 2 & 5 \\ 3 & 8 & 3 \\ 3 & 2 & 3 \end{pmatrix}$$

Matriks keputusan diatas di ambil dari data rating kecocokan pada table diatas dan telah diurutkan

berdasarkan *failure modes* yang ada dimana FM1 atau alternatif pertama dilampirkan pada baris pertama dan seterusnya hingga baris terakhir menunjukkan *failure modes* terakhir atau FM6. Dan untuk jenis kriteria dilampirkan sebagai kolom dimana pada kolom pertama merupakan skor *severity*, untuk kolom kedua menjabarkan *occurrence*, dan kolom yang terakhir merupakan skor *detection*.

4.1.6 Menentukan Normalisasi Matriks Keputusan

Untuk menormalisasikan matriks keputusan dari jenis kerusakan prioritas pompa sentrifugal dapat digunakan persamaan (2.3). Hasil perhitungan normalisasi matriks N_{ij1} dan N_{ij2} adalah sebagai berikut:

$$N_{ij1} = \begin{pmatrix} 0,42 & 1,00 & 1,00 \\ 0,75 & 0,33 & 0,42 \\ 0,50 & 0,50 & 0,42 \\ 1,00 & 1,00 & 0,60 \\ 0,75 & 0,12 & 1,00 \\ 0,75 & 0,20 & 1,00 \end{pmatrix}$$

$$N_{ij}2 = \begin{pmatrix} 0,28 & 1,00 & 1,00 \\ 0,40 & 0,33 & 0,42 \\ 0,40 & 0,50 & 0,60 \\ 1,00 & 0,50 & 0,60 \\ 0,66 & 0,12 & 1,00 \\ 0,66 & 0,25 & 1,00 \end{pmatrix}$$

Matriks diatas merupakan hasil normalisasi matriks keputusan dengan rumus. Secara sederhana rumus yang digunakan merupakan hasil dari pembagian skor terendah pada kolom dengan skor pada matriks.

4.1.7 Menentukan Nilai Mean dari Matriks Keputusan Hasil Normalisasi

Perhitungan nilai mean dari matriks hasil normalisasi matriks keputusan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \sum_1^6 N_{16}1 &= R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14} + R_{15} + R_{16} \\ &= 0,42 + 0,75 + 0,50 + 1,00 \\ &\quad + 0,75 + 0,75 = 4,17 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_1^6 N_{26}1 &= R_{21} + R_{22} + R_{23} + R_{24} + R_{25} + R_{26} \\ &= 1,00 + 0,33 + 0,50 + 1,00 \\ &\quad + 0,12 + 0,20 = 3,15 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_1^6 N_{36}1 &= R_{31} + R_{32} + R_{33} + R_{34} + R_{35} + R_{36} \\ &= 1,00 + 0,42 + 0,42 + 0,60 \\ &\quad + 1,00 + 1,00 = 4,45 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_1^6 N_{16}2 &= R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14} + R_{15} + R_{16} \\ &= 0,28 + 0,40 + 0,40 + 1,00 \\ &\quad + 0,66 + 0,66 = 3,41 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_1^6 N_{26}2 &= R_{21} + R_{22} + R_{23} + R_{24} + R_{25} + R_{26} \\ &= 1,00 + 0,33 + 0,50 + 0,50 \\ &\quad + 0,12 + 0,25 = 2,70 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_1^6 N_{36} &= R_{31} + R_{32} + R_{33} + R_{34} + R_{35} + R_{36} \\ &= 1,00 + 0,42 + 0,60 + 0,60 \\ &\quad + 1,00 + 1,00 = 4,62 \end{aligned}$$

Hasil diatas adalah hasil atau jumlah dari masing-masing kolom kemudian akan digunakan rumus (2.4) $N = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{ij}$. Hasil dari perhitungan adalah sebagai berikut;

$$\begin{aligned} N1 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{ij}1 = \frac{1}{6} [4,17 \ 3,15 \ 4,45] \\ &= [0,69 \ 0,52 \ 0,74] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{ij}2 = \frac{1}{6} [3,41 \ 2,70 \ 4,62] \\ &= [0,56 \ 0,45 \ 0,77] \end{aligned}$$

4.1.8 Menghitung Nilai Variasi Preferensi

Menghitung nilai variasi akan menggunakan persamaan (2.5) Hasil dari perhitungan nilai variasi preferensi dilampirkan pada matriks ϕ_j dibawah ini;

$$\phi_j1 = (N_{ij}1 - N1)^2 = \begin{pmatrix} 0,0717 & 0,2243 & 0,0661 \\ 0,0028 & 0,0372 & 0,0987 \\ 0,0385 & 0,0006 & 0,0987 \\ 0,0921 & 0,2243 & 0,0204 \\ 0,0028 & 0,1611 & 0,0661 \\ 0,0028 & 0,1065 & 0,0661 \end{pmatrix}$$

$$\phi_j2 = (N_{ij}2 - N2)^2 = \begin{pmatrix} 0,0807 & 0,3010 & 0,0522 \\ 0,0288 & 0,0139 & 0,1176 \\ 0,0288 & 0,0024 & 0,0295 \\ 0,1850 & 0,0024 & 0,0294 \\ 0,0094 & 0,1065 & 0,0522 \\ 0,0094 & 0,0406 & 0,0522 \end{pmatrix}$$

Hasil dari nilai variasi preferensi diatas merupakan hasil perhitungan persamaan (2.5). Sederhananya untuk baris pertama kolom pertama akan dikurangi dengan nilai mean kolom kedua yang ada pada tahap sebelumnya kemudian akan di kuadrat kan mendapatkan hasil diatas.

Setelah tahap itu kemudian akan menjumlahkan nilai hasil kuadrat diatas untuk mendapatkan nilai variasi preferensi ketiga kolom sebagai berikut;

$$\phi_j1 = 0,2110 \ 0,7542 \ 0,4163$$

$$\phi_j2 = 0,3422 \ 0,4667 \ 0,3331$$

4.1.9 Menentukan Penyimpangan Nilai Preferensi

Menentukan penyimpangan nilai preferensi dengan menggunakan persamaan (2.6). Hasil dari nilai preferensi menghasilkan matriks Ω_j adalah sebagai berikut;

$$\Omega_j1 = 1 - \phi_j1$$

$$\Omega_j1 = [0,7889 \ 0,2457 \ 0,5839]$$

$$\Omega_j2 = 1 - \phi_j2$$

$$\Omega_j2 = [0,6578 \ 0,5333 \ 0,6669]$$

Langkah selanjutnya adalah menghitung nilai keseluruhan matriks Ω_j adalah sebagai berikut:

$$\sum \Omega_j1 = 1,6183 \quad \sum \Omega_j2 = 1,8580$$

4.1.10 Menentukan Kriteria Bobot

Tahap selanjutnya adalah menentukan kriteria bobot dengan menggunakan persamaan (2.7) yaitu dengan membagikan penyimpangan nilai preferensi masing-masing kolom dengan jumlah penyimpangan preferensi setiap kolom yang didefinisikan sebagai kriteria sehingga akan didapatkan hasil yang berupa bobot masing-masing kriteria. Hasil dari penentuan kriteria bobot dilampirkan pada table berikut:

Tabel 4. 5 Penentuan Kriteria Bobot

	Kriteria bobot					
	Severity		Occurrence		Detection	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2
Bobot	0,4874	0,3540	0,1518	0,2870	0,3606	0,3589

P1= Pompa 1 P2=Pompa 2

4.1.11 Menghitung Preference Selection Index (PSI)

Untuk tahapan terakhirnya adalah menentukan nilai *preference selection index* untuk menentukan keputusan. Untuk perhitungan digunakan persamaan (2.8) untuk mendapatkan nilai preferensi tertinggi atau terbesar. Hasil dari perhitungan adalah sebagai berikut;

$$\theta_i = \sum_{j=1}^m N_{ij} \times W_j$$

$$N_{ij}1 \times W_{j1} = \begin{pmatrix} 0,2090 & 0,1519 & 0,3607 \\ 0,3660 & 0,0506 & 0,1546 \\ 0,2440 & 0,0759 & 0,1546 \\ 0,4870 & 0,1519 & 0,2164 \\ 0,3660 & 0,0190 & 0,3607 \\ 0,3660 & 0,0304 & 0,3607 \end{pmatrix}$$

$$\theta_{i1} = \begin{pmatrix} 0,7214 \\ 0,5707 \\ 0,4742 \\ 0,8557 \\ 0,7452 \\ 0,7566 \end{pmatrix}$$

$$N_{ij}2 \times W_{j2} = \begin{pmatrix} 0,1012 & 0,2870 & 0,3590 \\ 0,1416 & 0,0957 & 0,1539 \\ 0,1416 & 0,1435 & 0,2154 \\ 0,3540 & 0,1435 & 0,7129 \\ 0,2360 & 0,0359 & 0,6309 \\ 0,2360 & 0,0718 & 0,6667 \end{pmatrix}$$

$$\theta_{i2} = \begin{pmatrix} 0,7471 \\ 0,3911 \\ 0,5005 \\ 0,7129 \\ 0,6309 \\ 0,6667 \end{pmatrix}$$

Hasil perhitungan pada matriks diatas yang pertama adalah perkalian matriks N_{ij} dan W_j kemudian untuk matriks θ_{i1} dan θ_{i2} adalah hasil dari penjumlahan setiap baris sehingga menghasilkan matriks diatas. Sebagai contoh pada matriks N_{ij} dan W_j baris pertama dikalikan akan menghasilkan 0,7214 yang adalah nilai preferensi dari

Failure Modes 1 dan seterusnya akan dilanjutkan dalam pembahasan.

4.2 Pembahasan

4.2.1 Penentuan Rangking Prioritas Resiko Kerusakan Pompa Sentrifugal di PDAM Minahasa Instalasi Uluna Berdasarkan Nilai Preference Selection Index (PSI).

Pada bagian ini akan dibahas prioritas resiko kerusakan mesin yang akan diurutkan menurut nilai PSI hasil olahan data dari RPN menuju ke PSI. Hasil akhir pada matriks θ_i berupa jumlah seluruh nilai kriteria dari *Failure Modes* yang ada seperti pada tabel berikut:

Tabel 4. 6 Tabel Skor Preferensi Mode Kegagalan

Failure Modes	Skor Preferensi	
	Pompa 1	Pompa 2
FM1	0,7214	0,7471
FM2	0,5707	0,3911
FM3	0,4742	0,5005
FM4	0,8557	0,7129
FM5	0,7452	0,6309
FM6	0,7566	0,6667

Pada tabel 4.6 diatas adalah hasil dari skor preferensi pada setiap *failure modes* dengan skor yang berbeda-beda. Hasil diatas diurutkan sesuai urutan jenis kegagalan atau *failure modes* mulai FM1 hingga FM6 pada masing-masing pompa. Salah satu diambil FM3 dengan skor 0,4742 untuk pompa 1 dan skor 0,5005 untuk pompa 2. Dapat disimpulkan bahwa kedua jenis pompa memiliki nilai yang berbeda-beda pada jenis kerusakan yang sama sehingga dari data ini maka kemungkinan prioritas penanganannya akan berbeda dari kedua jenis kerusakan ini.

Pada tahap langkah selanjutnya untuk menentukan prioritas potensi resiko kerusakan pompa sentrifugal di PDAM Minahasa Instalasi Uluna digunakan hasil matriks PSI yang akan diurutkan menurut skor preferensi tertinggi hingga terendah dimana semakin tinggi skor preferensi jenis kerusakan tersebut maka semakin menjadi prioritas dalam hal penanganan perawatan. Hasil perankingan ada pada tabel sebagai berikut:

Tabel 4. 7 Rangking Mode Kegagalan Berdasarkan Keputusan *Preference Selection Index* (PSI) (Pompa 1)

Kode	Jenis Kerusakan	Skor Preferensi	Prioritas Penanganan
FM4	<i>Impeller</i> korosi	0,8557	1

FM6	<i>Housing shaft</i> aus	0,7566	2
FM5	<i>Bearing</i> aus akibat kurang pelumasan	0,7452	3
FM1	<i>Rewinding</i> elektro motor hangus akibat <i>overheat</i>	0,7214	4
FM2	<i>Casing bearing</i> aus	0,5707	5
FM3	<i>Shaft</i> pompa aus	0,4742	6

Tabel 4. 8 *Rangking Mode Kegagalan Berdasarkan Keputusan Preference Selection Index (PSI) (Pompa 2)*

Kode	Jenis Kerusakan	Skor Preferensi	Prioritas Penanganan
FM1	<i>Rewinding</i> elektro motor hangus akibat <i>overheat</i>	0,7471	1
FM4	<i>Impeller</i> korosi	0,7129	2
FM6	<i>Housing shaft</i> aus	0,6667	3
FM5	<i>Bearing</i> aus akibat kurang pelumasan	0,6309	4
FM3	<i>Shaft</i> pompa aus	0,5005	5
FM2	<i>Casing bearing</i> aus	0,3911	6

Dari hasil perangkingan resiko kerusakan pompa sentrifugal diatas ditemukan prioritas penanganan dengan mengaplikasikan metode *preference selection index* (PSI). Dapat dilihat dari nilai PSI yang tertinggi adalah FM3 atau jenis kegagalan ketiga yaitu *impeller* korosi untuk pompa 1 sehingga menjadi prioritas penanganan pertama pada

pompa 1. Sedangkan untuk nilai PSI terendah pada pompa 1 adalah jenis kegagalan keempat atau FM4 yaitu *shaft* pompa aus dan mendapat prioritas penanganan terakhir. Kemudian untuk pompa 2 dengan skor preferensi tertinggi ada pada FM1 yaitu *rewinding* elektro motor hangus akibat *overheat* sehingga untuk prioritas penanganan pada pompa 2

adalah FM1. Selanjutnya untuk jenis kerusakan dengan skor preferensi terendah adalah FM2 yaitu *casing bearing* aus sehingga menjadi prioritas penanganan ke-6.

Kemudian dari hasil penentuan prioritas resiko kerusakan pada kedua pompa sentrifugal akan dibandingkan hasil prioritas resiko kerusakan dari metode FMEA dan hasil integrasi FMEA dan PSI.

Tabel 4. 9 Perbandingan prioritas resiko antara hasil metode FMEA dengan hasil integrasi metode FMEA & PSI (Pompa 1)

Modus Kerusakan (kode)	Metode FMEA		Integrasi FMEA & PSI	
	Risk Priority Number (RPN)	Prioritas Resiko	Skor <i>Preference Selection Index</i> (PSI)	Prioritas Resiko
<i>Rewinding</i> elektro motor hangus akibat <i>overheat</i> (FM1)	21	5	0,7214	4
<i>Casing bearing</i> aus (FM2)	84	2	0,5708	5
<i>Shaft</i> pompa aus (FM3)	84	2	0,4742	6
<i>Impeller</i> korosi (FM4)	15	6	0,8557	1
<i>Bearing</i> aus akibat kurang pelumasan (FM5)	96	1	0,7452	3
<i>Housing shaft</i> aus (FM6)	60	4	0,7566	2

Tabel 4. 10 Perbandingan prioritas resiko antara hasil metode FMEA dengan hasil integrasi metode FMEA & PSI (Pompa 2)

Modus Kerusakan (kode)	Metode FMEA		Integrasi FMEA & PSI	
	Risk Priority Number (RPN)	Prioritas Resiko	Skor <i>Preference Selection Index</i> (PSI)	Prioritas Resiko
<i>Rewinding</i> elektro motor hangus akibat <i>overheat</i> (FM1)	21	5	0,7471	1

<i>Casing bearing aus (FM2)</i>	105	1	0,3911	6
<i>Shaft pompa aus (FM3)</i>	60	3	0,5005	5
<i>Impeller korosi (FM4)</i>	20	6	0,7129	2
<i>Bearing aus akibat kurang pelumasan (FM5)</i>	96	2	0,6309	4
<i>Housing shaft aus (FM6)</i>	36	4	0,6667	3

Dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan yang cukup kontras antara hasil dari metode FMEA klasik dengan integrasi metode FMEA dan PSI hal ini disebabkan karena adanya proses perhitungan pada bobot kriteria yang pada FMEA semua kriteria memiliki bobot yang sama sehingga tidak memengaruhi nilai RPN namun ketika diintegrasikan dengan PSI maka terdapat perhitungan bobot kriteria sehingga hal ini menyebabkan masing-masing kriteria memiliki bobot yang berbeda yang akan memengaruhi secara langsung nilai RPN menjadi nilai PSI untuk hasil perbandingan prioritas potensi resiko kerusakan pada pompa sentrifugal.

4.2.2 Usulan Perawatan Komponen Pompa Sentrifugal di PDAM Minahasa Instalasi Uluna Berdasarkan Hasil Rangkings Prioritas

Setelah ditentukan rangking prioritas untuk resiko kerusakan pada pompa sentrifugal di PDAM Minahasa Instalasi Uluna dengan data hasil olahan dengan metode *Preference Selection Index* (PSI) maka langkah selanjutnya adalah mengusulkan kegiatan perawatan dan penanganan kerusakan agar kerugian waktu dan biaya akibat perbaikan dapat diminimalisir. Berikut adalah usulan perawatan pompa sentrifugal di perusahaan PDAM Minahasa Instalasi Uluna:

Tabel 4. 11 Usulan Perawatan Pompa Sentrifugal di PDAM Minahasa Instalasi Uluna

No	Jenis Kegagalan	Kondisi <i>existing</i>	Usulan Perawatan
1.	<i>Impeller korosi</i>	Dilakukan penampalan lewat las	Dilakukan pemeriksaan komponen secara berkala karena bersifat tersembunyi untuk ditentukan jenis kerusakannya.
2.	<i>Housing shaft aus</i>	<i>on condition task /</i> menyesuaikan dengan kondisi	Dilakukan pemeriksaan secara berkala untuk mencegah sebelum memperparah menjadi kerusakan yang besar dan melakukan pergantian komponen
3.	<i>Bearing aus akibat kurang pelumasan</i>	Penambahan fat lubrickan <i>on condition</i> atau sesuai kondisi	Meningkatkan sistem lubrikasi dan melakukan pergantian komponen sesuai SOP 8000 jam

4.	<i>Rewinding</i> elektro motor hangus akibat <i>overheat</i>	Pemeriksaan tidak terjadwal	Pemeriksaan terjadwal
5.	<i>Casing bearing</i> aus	Tindakan perawatan <i>breakdown maintenance</i>	Dilakukan pemeriksaan secara berkala untuk mencegah sebelum memperparah <i>casing bearing</i> aus (detail pemeriksaan)
6.	<i>Shaft</i> pompa aus	Tindakan perawatan <i>breakdown maintenance</i>	Dilakukan pergantian secara berkala dengan identifikasi umur komponen

Pada tabel 4.8 diatas dilampirkan mengenai perbandingan kondisi *existing* dengan usulan perawatan yang seharusnya diterapkan. Contohnya pada kasus jenis kegagalan *housing shaft* aus dimana kondisi *existing* di PDAM Minahasa kegiatan penanganan untuk jenis kegagalan ini hanya sebatas menyesuaikan dengan kondisi atau *on condition task* hal ini berdasarkan hasil wawancara dengan seksi perawatan dalam sesi wawancara dijelaskan bahwa pemeriksaan atau pengecekan kondisi *housing shaft* telah mengalami aus atau tidak hanya menyempatkan saat dilakukan inspeksi keseluruhan pada pompa tidak secara khusus melakukan pemeriksaan berkala pada *housing shaft*. Sehingga untuk usulan perawatan yang dikaji dari sumber-sumber yang ada hal yang perlu dilakukan untuk mencegah *housing shaft* aus adalah dengan melakukan pemeriksaan terjadwal atau berkala secara khusus untuk *housing shaft* agar supaya selain dapat mencegah terjadinya keausan juga dapat mencegah memperparah akibat yang dapat ditimbulkan dari jenis kegagalan ini. Begitu juga dengan jenis kegagalan lainnya ada kondisi *existing* juga usulan perawatan yang mungkin diterapkan.

V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai evaluasi prioritas potensi resiko kerusakan pompa sentrifugal di PDAM Minahasa Instalasi Uluna sebagai objek penelitian, maka peneliti dapat menarik kesimpulan sebagai berikut:

- Mengacu pada penerapan metode PSI pada pompa 1 komponen yang memiliki dampak kerusakan kritis adalah *impeller* dengan skor preferensi 0,86 dan pada pompa 2 komponen yang memiliki dampak kerusakan kritis

adalah *rewinding* elektro motor dengan skor 0,74.

- Berdasarkan hasil penelitian ini usulan perawatan masing-masing komponen dari pompa sentrifugal memiliki usulan perawatan umumnya sama untuk kedua pompa. Dan untuk secara keseluruhan untuk usulan perawatan di PDAM Minahasa dilakukan pengecekan berkala, penanganan berkala, dan pergantian berkala singkatnya dilakukan kegiatan pemeliharaan secara aktif.

5.2 Saran

Dari hasil penelitian ini peneliti ingin memberikan saran yaitu:

1. Untuk penelitian selanjutnya yang akan melakukan penelitian serupa di PDAM Minahasa disarankan untuk melakukan penelitian pada instalasi-instalasi lain di PDAM Minahasa.
2. Untuk peneliti lainnya, peneliti menyarankan untuk melakukan penelitian menggunakan integrasi metode-metode FMEA dengan metode pengambilan keputusan multi kriteria lainnya.
3. Untuk penggunaan metode FMEA pada penelitian selanjutnya di sarankan untuk diterapkan pada pendekatan untuk penentuan jenis perawatan yang harus diterapkan berdasarkan nilai RPN.
4. Untuk perusahaan PDAM Minahasa, diberikan usulan berupa usulan perawatan. Selain itu, usulan untuk pihak perusahaan agar menerapkan kegiatan perawatan *proactive task* atau jenis kegiatan perawatan yang mana mencegah sebelum terjadinya suatu kerusakan agar dapat meningkatkan produktivitas yang efektif dan efisien.

5. Kemudian untuk pengembangan dari penelitian ini maka dapat dilakukan penelitian lanjutan dengan data-data empiris untuk membuktikan jika penerapan integrasi PSI dan FMEA menghasilkan ranking prioritas resiko kerusakan yang lebih baik daripada penentuan ranking prioritas potensi resiko dengan FMEA klasik.

DAFTAR PUSTAKA

- Andiyanto, S., Sutrisno, A., & Punuhsingon, C. C. (2017). Penerapan metode FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) untuk kuantifikasi dan pencegahan resiko akibat terjadinya lean waste. *Jurnal Poros Teknik Mesin Unsrat*, 6(1).
- Attri, R., & Grover, S. (2015). Application of preference selection index method for decision making over the design stage of production system life cycle. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 27(2), 207-216.
- Mesran, M., Huda, N., Hutagalung, S. N., Khasanah, K., & Iskandar, A. (2018). Sistem Pendukung Keputusan Pemilihan Supervisor Terbaik Pada Bagian Perencanaan PT. PLN (Persero) Area Medan Menerapkan Preference Selection Index. *KOMIK (Konferensi Nasional Teknologi Informasi dan Komputer)*, 2(1).
- Puspitasari, N. B., & Martanto, A. (2014). Penggunaan FMEA dalam mengidentifikasi resiko kegagalan proses produksi sarung ATM (Alat Tenun Mesin)(studi kasus PT. Asaputex Jaya Tegal). *J@ Ti Undip: Jurnal Teknik Industri*, 9(2), 93-98.
- Situngkir, D. I. (2019). Pengaplikasian FMEA untuk mendukung pemilihan strategi pemeliharaan pada paper machine. *FLYWHEEL: Jurnal Teknik Mesin Untirta*, 1(1), 39-43.
- Smith, D. J. (2021). *Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers*. Butterworth-Heinemann.
- Sutrisno, A. (2022). Evaluasi Prioritas Resiko Kerusakan Mesin Menggunakan Integrasi Metode *Proximity Value Index* Dan FMEA. *Jurnal Tekno Mesin*, 8(2), 19-23.