

ANALISIS KEANDALAN PADA KOMPONEN VALVE DENGAN MENGGUNAKAN METODE RISK BASED INSPECTION (RBI) DAN PERHITUNGAN MEAN TIME TO FAILURE (MTTF) DI PERUSAHAAN PENYEDIAAN AIR MINUM (SPAM)

*Bagus Yogo Saputro¹, Gunawan Dwi Haryadi², Yusuf Umardani²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: bagusyogo71@gmail.com

Abstrak

Air merupakan salah satu sumber utama kehidupan manusia yang kebutuhannya akan semakin meningkat dari waktu ke waktu. Pemenuhan kebutuhan air dapat dilakukan dengan sistem perpipaan atau non perpipaan. Proses perpipaan membutuhkan sistem waterflow yang berpengaruh pada mesin pompa ketika saluran air tersumbat oleh partikel ataupun karena sungainya mengering pihak instansi dapat mengetahui kekurangan dari debit air yang dihasilkan, sehingga dapat mematikan pompa dikarenakan aliran pipa tidak berjalan dengan baik. Pada sistem perpipaan yang baik terdapat beberapa bagian yang berperan penting untuk menjaga aliran air dalam keadaan yang normal, yaitu peran dari valve. Kerusakan pada valve tersebut dapat mempengaruhi dari segi kualitas produksi pada sistem perpipaan yang ada pada perusahaan air minum terkait. Dalam menghadapi permasalahan tersebut maka diperlukan nya sebuah sistem perawatan atau maintenance yang baik dan terjadwal. Agar sistem lebih terjadwal maka perlu diketahui reliability dari masing-masing komponen kritis pada valve yang digunakan. Reliability didapatkan dengan menggunakan metode risk based inspection dan perhitungan dari nilai mean time to failure untuk menentukan penyebab kerusakan pada komponen kritis. Hasil yang diperoleh pada analisis tersebut adalah tujuh komponen kritis dari beberapa jenis valve yang digunakan yang memiliki nilai MTTF yaitu Disc – Check Valve adalah 7.199,42 jam; Handwheel – Check Valve adalah 3.599,71 jam; Disc – Gate Valve adalah 2.159,82 jam; Handwheel – Gate Valve adalah 4.319,65 jam; Stem – Butterfly Valve adalah 2.880,18 jam; Disc – Butterfly Valve adalah 5.760,36 jam; Handwheel – Butterfly Valve adalah 2.880,18 jam. Dari nilai tersebut dibuatlah jadwal perbaikan pada setiap komponen kritis pada valve.

Kata kunci: keandalan; mttf; perawatan; rbi; valve

Abstract

Water is one of the main sources of human life whose need will increase from time to time. Meeting water needs can be done with a piped or non-piped system. The piping process requires a waterflow system which affects the pump engine when the water channel is blocked by particles or because the river dries up. The agency can find out the shortage of the water flow produced, so it can turn off the pump because the pipe flow is not running well. In a good piping system, there are several parts that play an important role in maintaining water flow in normal conditions, namely the role of valves. Damage to the valve can affect the production quality of the existing piping system at the drinking water company concerned. In dealing with these problems, a good and scheduled maintenance or maintenance system is needed. So that the system is more scheduled, it is necessary to know the reliability of each critical component of the valve used. Reliability is obtained by using the risk based inspection method and calculating the mean time to failure value to determine the cause of damage to critical components. The results obtained from this analysis are seven critical components from several types of valves used which have MTTF values, namely Disc – Check Valve is 7,199.42 hours; Handwheel – Check Valve is 3,599.71 hours; Disc – Gate Valve is 2,159.82 hours; Handwheel – Gate Valve is 4,319.65 hours; Stem – Butterfly Valve is 2,880.18 hours; Disc – Butterfly Valve is 5,760.36 hours; Handwheel – Butterfly Valve is 2,880.18 hours. From these values, a repair schedule for each critical component of the valve is created.

Keywords: maintenance; mttf; reliability; rbi; valve

1. Pendahuluan

Air adalah sumber daya alam yang mutlak diperlukan bagi makhluk hidup, kehidupan manusia, dan dalam sistem tata lingkungan air adalah unsur utama. Kebutuhan manusia akan air semakin meningkat dari waktu ke waktu, bukan saja karena meningkatnya jumlah manusia yang memerlukan air tersebut melainkan juga karena meningkatnya intensitas dari ragam dan kebutuhan akan air. Manusia dan seluruh makhluk hidup butuh air [1].

Pengolahan air yang berasal dari jaringan transmisi atau distribusi diperlukan pemeliharaan untuk menjaga kualitas dari air. Dalam kehidupan sehari-hari air merupakan salah satu komponen yang paling dekat dengan manusia yang menjadi kebutuhan dasar bagi kualitas dan keberlanjutan kehidupan manusia, oleh karena hal tersebut air harus tersedia dalam kualitas dan kuantitas yang memadai. Pemenuhan kebutuhan air dapat dilakukan dengan sistem perpipaan maupun sistem non-perpipaan tergantung dari sarana dan prasarana di wilayah tersebut. Sistem perpipaan dikelola oleh Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) dan sistem nonperpipaan dikelola oleh masyarakat baik secara individu maupun secara kelompok [2].

Peran PDAM sebagai penyedia air bersih yang berada pada Masyarakat menjadi peran yang tidak tergantikan, seperti PT. Nindya Tirta Unggu (NTU) yang berada di kabupaten Cilacap. PT. Nindya Tirta Unggul (NTU) merupakan sebuah tempat pengolahan air dari saat air masih baku, hingga siap di konsumsi oleh konsumen atau Masyarakat sekitar. Bahan baku air yang digunakan diambil dari aliran Sungai Serayu yang terdapat di depan bangunan PT. Nindya Tirta Unggul [3]. Pengambilan bahan baku dari aliran Sungai menggunakan mesin pompa untuk disedot dan diteruskan ke tempat penampungan yang telah disediakan untuk nantinya memasuki beberapa tahapan pengolahan sampai air siap digunakan atau dikonsumsi oleh konsumen.

Pasang surut air sungai tidak dapat diprediksi, terlebih lagi ketika ada beberapa partikel yang menyebabkan tersumbatnya aliran pipa bahan baku. Kasus ini dapat menyebabkan terhambatnya proses produksi. Oleh karena itu diperlukan adanya sebuah alat yang dapat memantau besar debit aliran air / Water Flow yang berhasil dialirkan oleh pompa di hulu sungai. Kegunaan sistem Water Flow juga berpengaruh pada mesin pompa ketika saluran air tersumbat oleh partikel ataupun karena sungainya mengering pihak instansi dapat mengetahui kekurangan dari debit air yang dihasilkan, sehingga dapat mematikan pompa dikarenakan aliran pipa tidak berjalan dengan baik. Pipa yang tidak berjalan dengan baik dapat membuat kerusakan pompa air pada bahan baku. Tidak berjalan dengan baiknya pipa juga dapat merusak seal, atau juga dapat menyebabkan kebakaran oleh pompa [4].

Penelitian kali ini bertujuan untuk mengkaji keandalan pada valve yang digunakan di PT. Nindya Tirta Unggul, Bagian peralatan yang penting didalam jalur perpipaan PT. Nindya Tirta Unggul adalah valve pipe, kerusakan yang tinggi pada jalur pipa tersebut disebabkan oleh bocornya komponen valve sehingga operasi dan distribusi menjadi terhambat. Oleh karena itu pihak distributor harus dapat mempertahankan kehandalan peralatan komponen valve pipe dan melakukan analisa sistem konfigurasi semua jalur perpipaan (pipeline).

2. Bahan dan Metode Penelitian

2.1 Pengumpulan Data

Objek pada penelitian ini yaitu komponen *Gate Valve*, *Check Valve*, dan *Buttefly valve* yang berperan vital dalam kelancaran proses perpipaan di PT. Nindya Tirta Unggul, Kab. Cilacap, Jawa Tengah. *Valve* tersebut merupakan unit yang memiliki peranan besar yaitu untuk bisa menutup atau membuka aliran, mengontrol laju aliran, mengalihkan aliran, mencegah aliran balik, mengontrol tekanan, atau mengurangi tekanan aliran air yang mengalir di Sungai Serayu Kab. Cilacap, jika unit ini mengalami *breakdown* maka akan sangat mengganggu proses permesinan dan sangat merugikan perusahaan. Gambar tiga jenis *valve* dapat dilihat pada gambar sebagai berikut:



Gambar 1. Valve di NTU

Pengumpulan data dilakukan dengan cara pengumpulan data primer dan pengumpulan data sekunder. Pengumpulan data primer dilakukan dengan cara melakukan observasi atau pengujian langsung sedangkan pengumpulan data sekunder adalah data yang tidak langsung diamati oleh peneliti misalnya merupakan data yang diperoleh dari dokumen perusahaan, hasil penelitian yang sudah lalu dan data lainnya.

2. 2 Penentuan *Weighting Factor* Kriteria Komponen Kritis Penentuan *Grade* Komponen Terhadap Kriteria Kritis

Penentuan komponen kritis dilakukan dengan menggunakan metode *critical analysis*. *Critical analysis* merupakan sebuah metode yang digunakan untuk dapat mengetahui nilai kekritisan dari suatu komponen sehingga hasil penilaiannya dapat dijadikan *input* dalam perawatan mesin. Langkah penentuan komponen kritis diawali dengan menentukan terlebih dahulu kriteria-kriteria dalam standar penilaian komponen kritis. Terdapat empat kriteria dalam metode *critical analysis* dan setiap kriteria tersebut kemudian diberikan *weighting factor* (faktor bobot) dengan nilai yang berbeda sesuai dengan prioritas dari setiap kriteria terhadap kekritisan komponen. Berikut ini merupakan nilai pembobotan setiap kriteria: [5]

1. Frekuensi Kerusakan (Bobot 4)
2. Dampak kerusakan dari Komponen (Bobot 3)
3. Tingkat Kesulitan Proses Pembongkaran dan Pemasangan Komponen (Bobot 2)
4. Harga dari Komponen (Bobot 1)

Grade komponen berbeda dengan pembobotan pada masing-masing kriteria kritis sebuah komponen. Kategori tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Standar Penilaian Komponen Kritis

NO	Kriteria Penilaian	Rating Scale				
		1	2	3	4	5
1.	Frekuensi Kerusakan (Bobot 4)	Frekuensi kerusakan 1 kali	Frekuensi kerusakan 2 kali	Frekuensi kerusakan 3 kali	Frekuensi kerusakan 4 kali	Frekuensi kerusakan ≥ 5 kali
2.	Dampak (Bobot 3)	Produksi masih bisa beroperasi tidak ada kerusakan lebih	Produksi masih bisa beroperasi, dan tidak ada kerusakan lebih	Produksi masih dapat berjalan, akan tetapi ada perambatan kerusakan	Produksi masih dapat berjalan, akan tetapi ada perambatan kerusakan	Produksi tidak bisa beroperasi
3.	Proses <i>Repair</i> (Bobot 2)	Proses <i>Repair</i> ≤ 24 jam	Proses <i>repair</i> 1 hari	Proses <i>repair</i> 2-3 hari	Proses <i>repair</i> 5 hari	Proses <i>repair</i> ≥ 5 hari
4.	Harga (Bobot 1)	≤ 100 USD	100-150 USD	150-200 USD	200-250 USD	≥ 250 USD

2. 3 Penentuan *Risk Based Inspection* pada Kerusakan Komponen Kritis

Setelah mengetahui dan menganalisa kerusakan-kerusakan apa saja yang ada pada beberapa jenis *valve* yang digunakan maka didapatkan komponen kritis. Setelah mendapatkan beberapa komponen kritis, digunakanlah tabel *risk based inspection* untuk mengetahui factor-faktor apa saja yang mengakibatkan terjadinya kerusakan pada komponen-komponen tersebut.

2. 4 Pembuatan *Preventive Maintenance* pada *valve*

Pembuatan *Preventive Maintenance* dapat dilakukan berdasarkan rencana dan jadwal yang spesifik untuk mempertahankan agar alat-alat/mesin-mesin tetap pada kondisi siap kerja melalui proses *checking* dan *reconditioning* [6]. Tindakan-tindakan ini merupakan langkah *preventive* untuk menunda dan menurunkan probabilitas kegagalan mesin-mesin tersebut. *Preventive maintenance* dilakukan untuk mencegah alat yang rusak secara prematur dan *downtime* yang tidak dijadwalkan. Tipe *maintenance* ini menggunakan jadwal dan tugas-tugas yang sering diulang [7].

2. 5 Penentuan MTTF Komponen Kritis

Mean Time To Failure (MTTF) merupakan nilai rata-rata kerusakan atau nilai yang diekspektasi dari suatu distribusi kerusakan pada suatu komponen atau sistem [8]. Secara umum, persamaan MTTF adalah sebagai berikut:

$$MTTF = E(T) = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$

Kemudian untuk masing-masing distribusi kerusakan, MTTF dapat diungkapkan dengan persamaan berikut:

1. Distribusi *Weibull*

$$MTTF = \theta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

Keterangan:

θ = *scale parameter* (parameter skala) yang mempengaruhi nilai tengah dari pola data.

β = *shape parameter* (parameter bentuk) yang mempengaruhi laju kerusakan.

Nilai $\Gamma(1+1/\beta)$ didapatkan dari tabel fungsi gamma.

2. Distribusi *Exponential*

$$MTTF = \frac{1}{\lambda}$$

Keterangan:

λ = rata-rata kedatangan kerusakan yang terjadi

3. Distribusi Normal

$$MTTF = \mu$$

Keterangan:

μ = nilai tengah

4. Distribusi Lognormal

$$MTTF = e^{\mu + \frac{1}{2}(\sigma)^2}$$

Keterangan:

μ = parameter lokasi (*location parameter*)

σ = parameter skala (*scale parameter*)

2. 6 Pembuatan Diagram *Fishbone*

Diagram *fishbone* atau diagram sebab-akibat dibuat untuk mengidentifikasi penyebab yang timbul dari efek spesifik dan kemudian memisahkan akar penyebabnya. Setiap penyebab yang ditemukan akan diselidiki agar diketahui penyebab dari kerusakannya. Faktor-faktor yang akan dibahas oleh penulis terbagi menjadi empat, yaitu mesin (*machine*), manusia (*man power*), metode (*method*), dan material. Langkah-langkah pembuatan diagram *fishbone* adalah sebagai berikut: [9]

1. Membuat pernyataan permasalahan yang diinterpretasikan sebagai akibat pada bagian kepala ikan
2. Membuat garis horizontal dan pernyataan masalah ke kanan
3. Mengklasifikasikan dan mengidentifikasi penyebab permasalahan sesuai dengan faktor-faktor yang akan dibahas yaitu *machine*, *man power*, *method*, dan material
4. Membuat panah berbentuk seperti tulang ikan untuk masing-masing kategori permasalahan secara lebih mendetail
5. Mengkaji penyebab permasalahan yang paling mungkin mengakibatkan pernyataan masalah

2. 7 Penyusunan Waktu Perbaikan

Pada tahapan ini ialah menentukan tindakan perawatan. Tindakan yang dilakukan dengan cara perbaikan dan pergantian komponen. Tahap ini dilakukan dengan melibatkan nilai MTTF dari masing masing komponen yang di bagi dengan 24 jam. Penentuan perawatan tertera pada persamaan berikut: [10]

$$\text{Jadwal Perawatan} = \frac{MTTF}{24 \text{ JAM}}$$

3. Hasil dan Pembahasan

3. 1 Data kerusakan valve

Pengumpulan data dilakukan dengan cara melakukan observasi dan wawancara langsung oleh pembimbing dilapangan. Data yang diperoleh penulis berupa data kerusakan komponen *valve* dari cacatan waktu pemakaian setiap komponen *valve*. Adapun data kerusakan komponen *valve* dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Kerusakan Komponen *Valve*

No	Nama Komponen	Frekuensi Kerusakan
<i>Check Valve</i>		
1.	<i>Body & Cover</i>	0
2.	<i>Disc</i>	1

3.	Seat Ring	0
4.	Bonnet/Cover Gaske	0
5.	Stud Bolt	0
6.	Stud Bolt Nuts	0
7.	Handwheel	1
Gate Valve		
1.	Body & Cover	0
2.	Disc	2
3.	Seat Ring	0
4.	Bonnet/Cover Gaske	0
5.	Stud Bolt	0
6.	Stud Bolt Nuts	0
7.	Handwheel	1
Butterfly Valve		
1.	Body	0
2.	Bonnet/Cover Gaske	0
3.	Stem	2
4.	Disc	1
5.	Seat Ring	0
6.	Yoke/Gland Flange	0
7.	Gland Bushing/Sleeve	0
8.	Gland Packing	0
9.	Backseat	0
10.	Gasket	0
11.	Handwheel	2
12.	Stud Bolts	0
13.	Stud Bolts Nuts	0

3. 2 Penentuan komponen kritis menggunakan metode *critical analysis*

Komponen kritis pada *check valve*, *gate valve*, dan *butterfly valve* dilakukan dengan menggunakan metode *critical analysis* untuk mengetahui nilai kekritisan dari komponen-komponen yang mengalami kerusakan sesuai dengan standar penilaian komponen kritis yang terdapat pada Tabel 3 dibawah ini.

Tabel 3. Matriks Pembobotan Komponen Kritis

No	Jenis Valve	Part	Kriteria 1 (Bobot 4)		Kriteria 2 (Bobot 3)		Kriteria 3 (Bobot 2)		Kriteria 4 (Bobot 1)		Nilai Total (Grade x Bobot)
			Grade	Grade x Bobot	Grade	Grade x Bobot	Grade	Grade x Bobot	Grade	Grade x Bobot	
1	Check Valve	Body/Cover	0	0	3	9	4	8	5	5	22
2	Check Valve	Disc	1	4	3	9	4	8	4	4	25
3	Check Valve	Seat Ring	0	0	3	9	4	8	2	2	19
4	Check Valve	Bonnet	0	0	3	9	4	8	1	1	18
5	Check Valve	Stud Bolt	0	0	2	6	3	6	1	1	13
6	Check Valve	Stud Bolt Nuts	0	0	2	6	3	6	1	1	13
7	Check Valve	Handwheel	2	8	3	9	4	8	3	3	28
8	Gate Valve	Body/Cover	0	0	3	9	4	8	5	5	22
9	Gate Valve	Disc	2	8	3	9	4	8	4	4	29
10	Gate Valve	Seat Ring	0	0	3	9	4	8	2	2	19
11	Gate Valve	Bonnet	0	0	3	9	4	8	1	1	18
12	Gate Valve	Stud Bolt	0	0	2	6	3	6	1	1	13
13	Gate Valve	Stud Bolt Nuts	0	0	2	6	3	6	1	1	13
14	Gate Valve	Handwheel	1	4	3	9	4	8	3	3	24
15	Butterfly Valve	Body	0	0	3	9	4	8	5	5	22
16	Butterfly Valve	Bonnet	0	0	3	9	4	8	1	1	18
17	Butterfly Valve	Stem	2	8	3	9	4	8	3	3	28
18	Butterfly Valve	Disc	1	4	3	9	4	8	4	4	25
19	Butterfly Valve	Seat Ring	0	0	3	9	4	8	2	2	19
20	Butterfly Valve	Yoke	0	0	3	9	4	8	1	1	18
21	Butterfly Valve	Gland Bushing	0	0	3	9	4	8	1	1	18
22	Butterfly Valve	Gland Packing	0	0	3	9	4	8	1	1	18
23	Butterfly Valve	Backseat	0	0	3	9	4	8	1	1	18
24	Butterfly Valve	Gasket	0	0	3	9	4	8	1	1	18
25	Butterfly Valve	Handwheel	2	8	3	9	4	8	3	3	28
26	Butterfly Valve	Stud Bolts	0	0	2	6	3	6	1	1	13
27	Butterfly Valve	Stud Bolts Nuts	0	0	2	6	3	6	1	1	13

3.3 Risk Based Inspection Kerusakan Komponen Kritis

Setelah mengetahui dan menganalisa kerusakan-kerusakan apa saja yang ada pada beberapa jenis *valve* yang digunakan maka didapatkan komponen kritis. Setelah mendapatkan beberapa komponen kritis, digunakanlah tabel *risk based inspection* untuk mengetahui factor-faktor apa saja yang mengakibatkan terjadinya kerusakan pada komponen-komponen tersebut.

Tabel 4. *Risk Based Inspection* Komponen Kritis

No	Nama Komponen	Jenis Kerusakan	Dampak
1	<i>Disc</i>	Keretakan	Kebocoran
		Korosi	
		Penyumbatan	Mengganggu aliran fluida
		Overpressure	Kerusakan Lingkungan dan Operator
2	<i>Seal ring</i>	Robekan	Kebocoran
		Aus	
		Perubahan Dimensi	
3	<i>Handwheel</i>	Keretakan	Kebocoran
		Penuaan	
4	<i>Stem</i>	Keretakan	Gangguan kontak listrik
		Aus	Penurunan kinerja pompa
5	<i>Studbolt</i>	Korosi	Kerusakan Struktural
		Aus	Penurunan kinerja pompa
		Retakan	Kebocoran
6	<i>Gasket</i>	Aus	Penurunan kinerja pompa
		Getaran	
		Overheat	
7	<i>Bonnet</i>	Tekanan berlebih	Kebocoran
		Aus	
		Deformasi	Penurunan kinerja pompa

3.4 Perbaikan yang bisa dilakukan pada *Valve*

Dalam suatu perbaikan *valve*, terdapat beberapa langkah-langkah yang dapat dilakukan. Salah satu diantaranya yang paling general dan mudah dilakukan adalah mengidentifikasi *valve* tersebut. Setiap akan memulai melakukan perbaikan/perkerjaan, kita perlu mengidentifikasi untuk mengetahui indikasi/permasalahan yang ada pada *valve* serta, untuk menentukan langkah perbaikan apa yang harus dilakukan/dikerjakan.

Tabel 5. Identifikasi Kerusakan dan Penyelesaiannya.

NO	Kerusakan	Analisis	Perbaikan
1.	<i>Leak</i> pada <i>stem</i> dan baut <i>packing</i>	1. Baut kendur akibat getaran yang terjadi pada saat proses pengoprasian.	Mengencangkan Baut <i>Packing</i> .
		2. Terjadi keretakan pada baut akibat terjadinya korosi.	Mengganti dengan baut <i>packing</i> yang baru.
2.	<i>Valve</i> tidak menutup dengan benar	Terjadinya goresan pada disc akibat gesekan ketika <i>valve</i> akan dibuka atau ditutup dan adanya tekanan pada fluida	<i>Lapping disc</i> dengan campuran minyak dan <i>lapping compounds</i> .
3.	<i>Seats</i>	Aliran yang berada pada <i>valve</i> ketika ditutup masih terdapat kebocoran fluida.	Mengganti <i>part seats</i> yang lama/rusak dengan <i>part seats</i> yang baru.
4.	Ada kerusakan yang tidak diketahui penyebabnya.	<i>Valve</i> dalam kondisi yang baik, akan tetapi dalam proses pengoprasiaannya selalu menghasilkan hasil yang kurang maksimal.	Membongkar <i>valve</i> dan mengganti pada bagian <i>valve</i> yang mengalami kerusakan.

Sebuah *valve* dapat mengalami kerusakan yang disebabkan oleh beberapa faktor yaitu:

1. Tekanan yang berlebih, hal ini dapat menyebabkan deformasi pada *body valve*, *disc*, atau *seats*, yang pada akhirnya dapat mengakibatkan kebocoran dan kerusakan permanen.
2. Suhu dari air itu sendiri yang melewati *valve* juga dapat menjadi salah satu faktor penyebab kebocoran jika material yang digunakan pada *disc* tidak sesuai dengan spesifikasi material. Maka *valve* dapat mengalami degradasi dan menjadi rapuh, sehingga rentan terhadap kerusakan.
3. Gaya gesek yang terjadi antara *disc* dan *seats* ketika hendak membuka dan menutup *valve*, juga dapat menyebabkan kebocoran aliran fluida pada *valve* tersebut.

3.5 Preventive Maintenance pada Komponen Valve

Ada beberapa prosedur untuk melakukan *preventive maintenance*. Prosedur ini berlaku untuk seluruh kegiatan *maintenance* bagi semua peralatan utama beserta komponen-komponen yang mendukung pada *valve*, meliputi:

3.5.1 Prosedur Pemeliharaan Korektif

Pemeliharaan korektif adalah pelaksanaan pemeliharaan karena rusak, gangguan, atau insiden. Berikut adalah urutan dari prosedur pemeliharaan korektif:

- a. Bagian operasional membuat *work order fault* agar mempermudah karyawan mendata kerusakan pada *valve*.
- b. Bagian *maintenance* yang ada menganalisis *work order fault* yang sudah dibuat oleh bagian operasional dan menunjuk beberapa supervisor terkait untuk memeriksa kondisi yang ada dilapangan apakah sudah sesuai atau belum.
- c. Bagian pemeliharaan membahas *work order fault* yang sudah dibuat dalam sebuah rapat/*meeting* dan memastikan ketersediaan dari masing-masing *job plan*.
- d. Apabila belum terdapat *job plan* maka, dari pihak kepala bagian akan Menyusun *job plan* mengenai tenaga, material, alat kerja, APD, waktu yang diperlukan.
- e. Bagian pemeliharaan melakukan *review job plan* dengan keputusan tindakan, diantaranya adalah *Approve* yang dapat langsung dilaksanakan, *Waiting For Material* yaitu barang/jasa belum tersedia, dan *Waiting For Plant Condition* yang perlu dilakukan pada keadaan tertentu.
- f. Bagian pemeliharaan bertanggung jawab atas pekerjaan *maintenance* dilapangan.
- g. Dalam pelaksanaannya mengacu pada *job plan* dan harus berkoordinasi dengan supervisor terkait atau operator yang ada dilapangan untuk memasang *tagging*, melakukan penguncian, serta rambu pengaman lainnya.
- h. Bagian pemeliharaan dan bagian operasi melakukan uji coba individual dengan cara mengisi formulir pemeliharaan tahunan.
- i. Setelah hasil uji coba dinyatakan baik, bagian pemeliharaan melepaskan *tagging* dan pekerjaan dapat dinyatakan selesai.
- j. Bagian pemeliharaan bertanggung jawab membuat laporan pelaksanaan pekerjaan dan disampaikan kepada manager operasi dan pemeliharaan.

3.5.2 Prosedur Pemeliharaan Preventive

Pemeliharaan *preventive* disini sendiri dapat diartikan sebagai sebuah pemeliharaan peralatan yang sudah direncanakan secara rutin. Adapun urutan dari prosedur pemeliharaan *preventive* itu sendiri yaitu:

- a. Manajer *maintenance* membuat rencana pemeliharaan peralatan dengan mendata dan memasukkan kedalam inventaris peralatan apa saja yang akan di *maintenance* menggunakan formulir pemeliharaan tahunan yang ada dan sudah dibuat.
- b. Manajer *maintenance* kemudian membuat jadwal pelaksanaan, lingkup pekerjaan, tenaga kerja, material/part, tool kits, perlengkapan K3, dan mengidentifikasi sumber bahaya dampak dari kerusakan yang terjadi.
- c. Bagian *maintenance* bertanggung jawab atas pelaksanaan kegiatan *maintenance* yang ada dilapangan.
- d. Pelaksanaan *maintenance* mengacu pada *job plan* yang sudah dirancang serta dibuat oleh bagian dari *maintenance* dan untuk pelaksanaannya tetap harus berkoordinir dengan bagian dari operasi teknis dan operator lapangan.
- e. Untuk *maintenance* periodik, terdapat langkah-langkah yaitu:
 - Bagian *maintenance* melakukan pemasangan tanda-tanda terhadap parts yang akan dipelihara, dan lainnya. Setelah melakukan *maintenance*, tim *quality control* yang terdiri bagian operasional dan bagian *maintenance* melakukan uji coba hasil dari *maintenance* yang sudah dilakukan secara individual sesuai dengan instruksi/arahan kerja pengoperasian dengan mengisi formulir yang ada.
 - Setelah hasil uji coba dinyatakan baik oleh tim *quality control*, bagian *maintenance* melakukan pelepasan tanda dan pekerjaan dinyatakan selesai.
- f. Bagian pemeliharaan memiliki tanggung jawab untuk membuat laporan pelaksanaan pekerjaan dan menyampaikannya kepada manajer operasional dan *maintenance*.

3.6 Analisa Nilai MTTF (*Mean Time To Failure*) Setiap Komponen Kritis

Setelah mendapatkan apa saja komponen kritis yang ada pada *valve*, langkah selanjutnya adalah menghitung MTTF dari setiap komponen kritis yang mengalami kerusakan untuk mengetahui nilai rata-rata waktu kerusakan dari distribusi

kerusakannya. Perhitungan MTTF untuk data komponen kritis menggunakan distribusi *exponential*. Karena data yang didapatkan oleh peneliti cukup terbatas, maka dari itu peneliti menggunakan distribusi *exponential* yang dirasa sangat relevan dengan data yang ada. Data perhitungan distribusi *exponential* pada komponen kritis *valve* dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Perhitungan MTTF pada Komponen Kritis

No	Jenis Valve	Part	Frekuensi kerusakan/3 tahun	Total waktu Oprasional (Jam)	λ (Jumlah kerusakan/total waktu operasional)	MTTF ($1/\lambda$) Jam
1.	Check Valve	Disc	1	7.200	$1,389 \times 10^{-4}$	7.199
2.	Check Valve	Handwheel	2	7.200	$2,778 \times 10^{-4}$	3.599
3.	Gate Valve	Disc	2	4.320	$4,630 \times 10^{-4}$	2.159
4.	Gate Valve	Handwheel	1	4.320	$2,315 \times 10^{-4}$	4.319
5.	Butterfly Valve	Stem	2	5.760	$3,472 \times 10^{-4}$	2.880
6.	Butterfly Valve	Disc	1	5.760	$1,736 \times 10^{-4}$	5.760
7.	Butterfly Valve	Handwheel	2	5.760	$3,472 \times 10^{-4}$	2.880

Data jumlah kegagalan ini dan total waktu operasional yang dipakai pada *valve* adalah jumlah data selama 3 tahun, dimulai dari awal perusahaan ini dibentuk dan data-data tersebut dikumpulkan melalui pengamatan lapangan dan hasil dari wawancara oleh manajer *maintenance* yang ada di perusahaan tersebut.

3.7 Perhitungan Manual Nilai MTTF Pada Setiap Komponen Valve

Analisa perhitungan waktu rata-rata kerusakan dari suatu distribusi dilakukan terhadap komponen-komponen *valve* yang mengalami kerusakan dengan tujuan agar dapat menjadi acuan perbaikan dan dapat menganalisa komponen sebelum mengalami kerusakan. Berikut merupakan perhitungan manual dari nilai *Mean Time To Failure* (MTTF) setiap komponen *valve* yang mengalami kerusakan.

3.7.1 Perhitungan MTTF pada Disc – Check Valve

Pada pembahasan sebelumnya telah didapatkan distribusi yang sesuai untuk komponen *disc* pada *check valve* adalah distribusi *exponential* dengan parameter (λ) jumlah kerusakan dibagi total waktu operasional maka perhitungan nilai MTTF pada komponen tersebut adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 (\lambda) &= 0,0001389 \\
 &= 1,389 \times 10^{-4} \\
 \text{MTTF} &= \frac{1}{\lambda} \\
 &= \frac{1}{1,389 \times 10^{-4}} \\
 &= 7.199,42 \text{ Jam}
 \end{aligned}$$

Maka Nilai MTTF dari komponen *disc* pada *check valve* adalah 7.199,42 jam.

3.7.2 Perhitungan MTTF pada Handwheel – Check Valve

Pada pembahasan sebelumnya telah didapatkan distribusi yang sesuai untuk komponen *handwheel* pada *check valve* adalah distribusi *exponential* dengan parameter (λ) jumlah kerusakan dibagi total waktu operasional maka perhitungan nilai MTTF pada komponen tersebut adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 (\lambda) &= 0,0002778 \\
 &= 2,778 \times 10^{-4} \\
 \text{MTTF} &= \frac{1}{\lambda} \\
 &= \frac{1}{2,778 \times 10^{-4}} \\
 &= 3.599,71 \text{ Jam}
 \end{aligned}$$

Maka Nilai MTTF dari komponen *Handwheel* pada *check valve* adalah 3.599,71 jam.

3.7.3 Perhitungan MTTF pada Disc – Gate Valve

Pada pembahasan sebelumnya telah didapatkan distribusi yang sesuai untuk komponen *disc* pada *gate valve* adalah distribusi *exponential* dengan parameter (λ) jumlah kerusakan dibagi total waktu operasional maka perhitungan nilai MTTF pada komponen tersebut adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 (\lambda) &= 0,0004630 \\
 &= 4,630 \times 10^{-4} \\
 \text{MTTF} &= \frac{1}{\lambda}
 \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{4,630 \times 10^{-4}}$$

$$= 2.159,82 \text{ Jam}$$

Maka Nilai MTTF dari komponen *disc* pada *gate valve* adalah 2.159,82 jam.

3.7.4 Perhitungan MTTF pada *Handwheel – Gate Valve*

Pada pembahasan sebelumnya telah didapatkan distribusi yang sesuai untuk komponen *handwheel* pada *gate valve* adalah distribusi *exponential* dengan parameter (λ) jumlah kerusakan dibagi total waktu operasional maka perhitungan nilai MTTF pada komponen tersebut adalah sebagai berikut:

$$(\lambda) = 0,0002315$$

$$= 2,315 \times 10^{-4}$$

$$\text{MTTF} = \frac{1}{\lambda}$$

$$= \frac{1}{2,315 \times 10^{-4}}$$

$$= 4.319,65 \text{ Jam}$$

Maka Nilai MTTF dari komponen *handwheel* pada *gate valve* adalah 4.319,65 jam.

3.7.5 Perhitungan MTTF pada *Stem – Butterfly Valve*

Pada pembahasan sebelumnya telah didapatkan distribusi yang sesuai untuk komponen *stem* pada *butterfly valve* adalah distribusi *exponential* dengan parameter (λ) jumlah kerusakan dibagi total waktu operasional maka perhitungan nilai MTTF pada komponen tersebut adalah sebagai berikut:

$$(\lambda) = 0,0003472$$

$$= 3,472 \times 10^{-4}$$

$$\text{MTTF} = \frac{1}{\lambda}$$

$$= \frac{1}{3,472 \times 10^{-4}}$$

$$= 2.880,18 \text{ Jam}$$

Maka Nilai MTTF dari komponen *stem* pada *butterfly valve* adalah 2.880,18 jam.

3.7.6 Perhitungan MTTF pada *Disc – Butterfly Valve*

Pada pembahasan sebelumnya telah didapatkan distribusi yang sesuai untuk komponen *disc* pada *butterfly valve* adalah distribusi *exponential* dengan parameter (λ) jumlah kerusakan dibagi total waktu operasional maka perhitungan nilai MTTF pada komponen tersebut adalah sebagai berikut:

$$(\lambda) = 0,0001736$$

$$= 1,736 \times 10^{-4}$$

$$\text{MTTF} = \frac{1}{\lambda}$$

$$= \frac{1}{1,736 \times 10^{-4}}$$

$$= 5.760,36 \text{ Jam}$$

Maka Nilai MTTF dari komponen *disc* pada *butterfly valve* adalah 5.760,36 jam.

3.7.7 Perhitungan MTTF pada *Handwheel – Butterfly Valve*

Pada pembahasan sebelumnya telah didapatkan distribusi yang sesuai untuk komponen *handwheel* pada *butterfly valve* adalah distribusi *exponential* dengan parameter (λ) jumlah kerusakan dibagi total waktu operasional maka perhitungan nilai MTTF pada komponen tersebut adalah sebagai berikut:

$$(\lambda) = 0,0003472$$

$$= 3,472 \times 10^{-4}$$

$$\text{MTTF} = \frac{1}{\lambda}$$

$$= \frac{1}{3,472 \times 10^{-4}}$$

$$= 2.880,18 \text{ Jam}$$

Maka Nilai MTTF dari komponen *handwheel* pada *butterfly valve* adalah 2.880,18 jam.

3.8 Penyebab Kerusakan Komponen Kritis pada *Valve* dengan Menggunakan Diagram *Fishbone*

Dalam melakukan identifikasi penyebab masalah dilakukan dengan cara melihat bagaimana komponen *valve* bekerja secara normal dan tidak normal. Identifikasi juga dilakukan pada beberapa dokumen yang dipakai pihak teknisi

dilapangan dalam melakukan *maintenance*. Identifikasi juga dilakukan dengan melakukan wawancara terhadap beberapa pihak yang memiliki kapasitas dibidang keteknikan, dari identifikasi yang dilakukan didapat kan hasil:

3.8.1 Mesin

Pada sistem perpipaan terdapat sistem permesinan dimana aliran fluida yang dialirkan menggunakan mesin pompa dengan kapasitas tertentu yang sudah ditetapkan pada setiap perusahaan, adakalanya setiap pompa mengalami kerusakan atau kendala yang disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya yaitu panas yang berlebih yang disebabkan oleh suhu mesin dan faktor paparan sinar matahari yang berlebih dan selain pengaruh dari suhu kendala dapat disebabkan oleh guncangan yang terjadi pada proses produksi. Frekuensi kerusakan pada pompa juga mempengaruhi dampak kerusakan pada *valve*. Ada nya faktor ini akan membuat terhentinya proses produksi dan membuat kondisi zat-zat yang terkandung dalam fluida yang ada pada pipa menjadi mengerak pada komponen-komponen yang ada di *valve*.

3.8.2 Material

Penyebab kerusakan pada *valve* bisa dari faktor material, dimana pemilihan material dari jenis komponen yang ada pada *valve* mengalami kesalahan/kurang tepat. Mulai dari pembelian komponen yang tidak original, spesifikasi yang kurang tepat, dan tidak sesuai dengan material yang direkomendasikan. Dengan adanya faktor tersebut dapat menyebabkan kerusakan/kendala pada *valve*. *Leak*/kebocoran pada *valve* menjadi problem yang sangat penting pada sistem perpipaan. Apabila terjadi sebuah kebocoran maka secara pasti proses produksi akan berhenti sementara sampai proses *maintenance* pada komponen material yang mengalami kerusakan selesai diperbaiki. Kebocoran ini terjadi akibat ada nya tingkat porosivitas dan kerusakan pada komponen kritis yang ada pada *valve*.

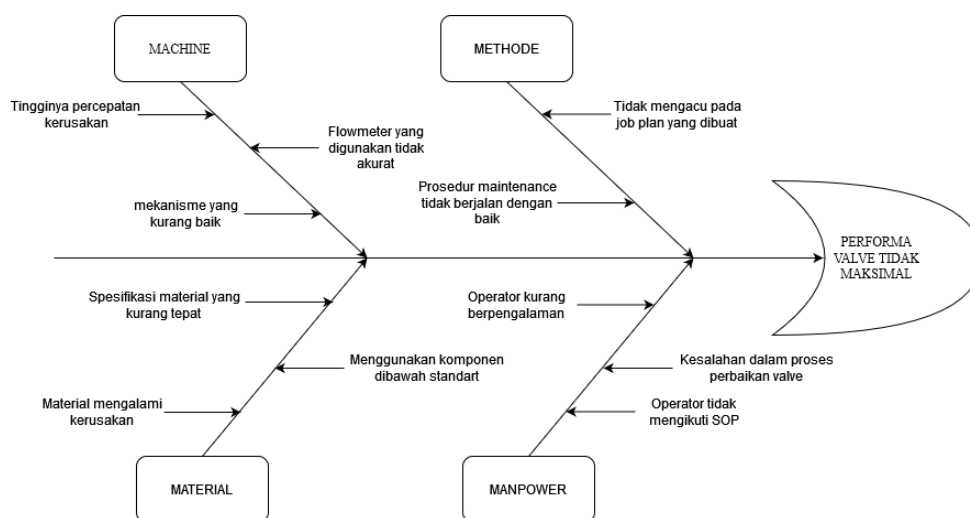
3.8.3 Metode

Untuk mencegah terjadi nya kerusakan/kendala pada *valve* maka diperlukan pemeriksaan lebih kepada setiap komponen kritis. Dengan dibuatnya *work order fault* yang mengacu pada *job plan* yang ada dapat membantu mempermudah menganalisa dan mengatasi kendala yang terjadi pada setiap komponen kritis pada *valve*. Prosedur *maintenance* yang tidak terjadwal dengan baik, maka dari itu perlu dibuatnya prosedur *maintenance* agar setiap adanya perbaikan. Ada nya prosedur *maintenance* yang sesuai dengan SOP yang ada dapat meningkatkan performa dari proses produksi itu sendiri dan juga membantu pada pekerja dalam menganalisa tingkat kerusakan pada *valve* yang ada pada jalur perpipaan tersebut.

3.8.4 Manpower

Hasil dari wawancara kepada setiap karyawan juga menentukan tingkat ketelitian setiap karywan, akan menjadi dampak buruk terhadap hasil yang dikerjakan oleh setiap karyawan jika kurang nya ketelitian ketika proses *maintenance* suatu *valve*. Penerapan kepekaan dan kehati-hatian dalam membaca setiap langkah-langkah serta catatan dalam dokumen perlu dilakukan dengan secara urut dan penuh dengan perhatian, agar kesalahan dalam menginput data kerusakan dapat diminimalisir. Selain itu, hasil wawancara dengan pihak teknisi yang melakukan *maintenance* tidak dapat mengatur waktu dengan baik, karena itu akan berdampak pada kinerja yang dilakukan seperti diantaranya kurang teliti, terlalu terburu-buru, dan tidak adanya pemeriksaan ulang terhadap pekerjaan yang sudah dilakukan.

Dari point-point di atas dirangkum dalam sebuah metode diagram *fishbone* terlihat pada Gambar 2 dalam merumuskan akibat kerusakan pada *valve*. Penyebab-penyebab yang mungkin terjadi pada kerusakan *valve* dikelompokkan dalam kategori 4M yaitu *Machines*, *Materials*, *Method*, dan yang terakhir yaitu *Manpower*.



Gambar 2. Diagram Fishbone Penyebab Kerusakan Komponen Kritis

3.9 Tindakan Korektif yang Dapat dilakukan untuk Mencegah Terjadinya Kerusakan pada Valve

Melihat pada perhitungan dan analisa yang ada yang hasilnya menunjukkan ketidakandalan komponen serta hasil dari *Root Cause Analysis* (RCA) yang memperlihatkan perlunya tindakan korektif pada kategori *Machine, Material, Method, dan Manpower*, maka ada beberapa tindakan korektif yang dapat dilakukan yaitu:

1. Merekomendasikan perusahaan untuk menambah kegiatan operasional *maintenance check*, sebelum memulai kegiatan produksi setiap harinya. Kegiatan ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap komponen *valve* berfungsi sebagai mestinya kerja dari *valve* itu sendiri dan mencegah terjadinya kegagalan dalam proses produksi akibat kerusakan pada salah satu komponen *valve*. Kegiatan ini dapat ditambahkan kedalam list *job plan* yang sudah dibuat.
2. Merekomendasikan kepada perusahaan untuk menambahkan catatan pada dokumen *work order fault* tentang perlunya perhatian yang lebih pada komponen-komponen kritis pada *valve*.
3. Merekomendasikan terhadap operator yang ada dilapangan agar tetap mengikuti langkah-langkah yang tertera pada SOP yang sudah dibuat dan tetap tenang (tidak terburu-buru) dalam melakukan perbaikan agar tidak terjadi kesalahan dalam segala tindakan.
4. Merekomendasikan perlunya perhatian terhadap tingkat kelelahan setiap engineer oleh pihak perusahaan, jika engineer terlalu letih/lelah dalam bekerja maka meningkatkan resiko kesalahan dalam bekerja.

3.10 Menentukan Jadwal Perawatan pada Setiap Komponen Kritis

Pada tahapan ini ialah menentukan tindakan perawatan. Tindakan yang dilakukan dengan cara perbaikan dan penggantian komponen. Tahap ini dapat dilakukan dengan melibatkannya hasil dari nilai MTTF masing-masing komponen yang dibagi dengan 24 jam. Untuk menentukan jadwal perawatan pada komponen kritis dapat mengacu pada persamaan yang ada di bawah ini. Penentuan perawatan tertera pada Tabel 4.7.

$$\text{Jadwal Perawatan} = \frac{\text{MTTF}}{24 \text{ JAM}}$$

Tabel 7. Jadwal Perwatan Komponen Kritis pada Valve

NO	Jenis Valve	Komponen	MTTF (Jam)	Jadwal Perawatan
1.	Check Valve	Disc	7.199,42	300 hari
2.	Check Valve	Handwheel	3.599,71	150 hari
3.	Gate Valve	Disc	2.159,82	90 hari
4.	Gate Valve	Handwheel	4.319,65	180 hari
5.	Butterfly Valve	Stem	2.880,18	120 hari
6.	Butterfly Valve	Disc	5.760,36	240 hari
7.	Butterfly Valve	Handwheel	2.880,18	120 hari

Tahapan ini dilakukan dengan melibatkan nilai MTTF dari masing-masing komponen yang dibagi dengan 24 jam sehingga didapatkan jadwal perawatan pada setiap komponen *valve*.

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian ini dapat diketahui bahwa:

- a. Pemilihan komponen kritis dengan menggunakan metode *critical analysis* yang dilakukan melalui pembobotan (*Weighting Factor*) menghasilkan 7 komponen kritis dari total 27 komponen yang terdapat pada *valve*. Adapun 7 komponen kritis tersebut yaitu *Disc – check valve* dengan nilai 25, *Handwheel – check valve* dengan nilai 28, *Disc – gate valve* dengan nilai 29, *Handwheel – gate valve* dengan nilai 24, *Stem – butterfly valve* dengan nilai 28, *Disc – butterfly valve* dengan nilai 25, *Handwheel – butterfly valve* dengan nilai 28.
- b. Berdasarkan *Risk Based Inspection* (RBI) terdapat faktor penyebab komponen kritis yaitu berdasarkan faktor mesin, material, metode, dan manusia.
- c. Distribusi yang digunakan oleh penulis pada penelitian kali ini adalah distribusi *exponential*, karena keterbatasan data yang diperoleh oleh penulis maka dari itu sesuai data yang ada distribusi tersebut dapat digunakan untuk penelitian kali ini. Dengan menggunakan distribusi *exponential* dapat didapatkan *lifetime production* pada setiap komponen kritis dengan menghitung nilai dari *Mean Time To Failure* (MTTF). Berikut merupakan nilai MTTF masing-masing komponen kritis pada valve yaitu *Disc – Check Valve* adalah 7.199,42; *Handwheel – Check Valve* adalah 3.599,71; *Disc – Gate Valve* adalah 2.159,82; *Handwheel – Gate Valve* adalah 4.319,65; *Stem – Butterfly Valve* adalah 2.880,18; *Disc – Butterfly Valve* adalah 5.760,36; *Handwheel – Butterfly Valve* adalah 2.880,18.
- d. *Preventive maintenance* pada valve sangat lah berguna untuk jangka panjang, karena banyak sekali faktor yang dapat merusak beberapa komponen lain selain dari komponen kritis yang ada pada valve. *Maintenance* pada valve dilakukan untuk menjaga efisiensi dari fungsi valve tersebut agar bekerja secara maksimal, dan juga jika massa dari pemakaian valve tersebut sudah habis maka perlu dilakukannya pemeliharaan lebih lanjut agar tetepa efisien.

- e. Mengacu pada Analisa yang dilakukan menggunakan diagram *fishbone* memberikan peran penting dalam menganalisis permasalahan yang terjadi pada *valve* tersebut, diantaranya adalah:
 - 1) Mesin, memperhatikan suhu pada mesin pompa yang digunakan agar aliran dari fluida yang bergerak dapat stabil dan mengurangi faktor-faktor yang dapat menyebabkan rusaknya suatu *valve*. Selain itu juga dapat melakukan pengecekan rutin terhadap mesin pompa yang digunakan agar dapat memaksimalkan efisiensi kinerja dari *valve* itu sendiri
 - 2) Material, memilih material pada komponen *valve* sesuai dengan standart yang ada agar tidak terjadi kerusakan pada *valve* serta membeli material yang original guna menjaga efisiensi dari kinerja *valve* yang digunakan.
 - 3) Metode, membuat metode seperti *job plan* agar meminimalisir kerusakan pada komponen-komponen *valve* dan adanya prosedur *maintenance* yang kurang baik, maka dari itu perlu ada nya SOP yang mengatur tentang *maintenance* pada *valve* tersebut.
 - 4) Manusia, menerapkan kepekaan dan kehati-hatian dalam mengambil setiap langkah-langkah *maintenance* dan diperlukan peran adil dari pihak atasan juga berpengaruh dalam meningkatkan ketelitian pekerja agar tidak terjadi kelalaian pada saat bekerja.
- f. Berdasarkan nilai MTTF (*Mean Time To Failure*) setiap komponen maka didapatkan perawatan untuk setiap komponen kritis pada *valve* yaitu *Disc – Check Valve* adalah 300 hari, *Handwheel – Check Valve* adalah 150 hari, *Disc – Gate Valve* adalah 90 hari, *Handwheel – Gate Valve* adalah 180 hari, *Stem – Butterfly Valve* adalah 120 hari, *Disc – Butterfly Valve* adalah 240 hari, dan *Handwheel – Butterfly Valve* adalah 120 hari.

5. Daftar Pustaka

- [1] Kodoatie, R.J, d Sjarief, R., 2017, “Pengelolaan sumber daya air terpadu” Yogyakarta.
- [2] Tambunan, R.A., 2013, “Peran Pdam Dalam Pengelolaan Bahan Air Baku Air Minum Sebagai Perlindungan Kualitas Air Minum di Kota Yogyakarta”. UAJY.
- [3] Nindya Karya, “PT Nindya Tirta Unggul Gelar Groundbreaking Pembangunan Instalasi Pengolahan Air (IPA) di Kecamatan Kesugihan”. <https://www.nindyakarya.co.id/news/pt-nindya-tirta-unggul-gelar-groundbreaking-pembangunan-instalasi-pengolahan-air-ipa-di-kecamatan-kesugihan>, diakses 15 Maret 2024
- [4] Nurdin, Y., Gaol, B.B.L. and Muchamad, M.K., 2022, “Kajian Perbandingan Desain Sensor Pengukur Water Flow Di WTP PDAM Tirta Daroy Lambaro”, Jurnal Komputer, Informasi Teknologi, dan Elektro, 7(3).
- [5] Adigama, A. S., et. al. (2019). “Reliability Analysis and Critical Part Lifetime Prediction of Heavy Duty Articulated Dump Truck on Coal Mining Industry”. AIP Conference Proceedings, Vol. 2097, No. 1, pp. 030088
- [6] Dhillon, B.S. (2002) *Engineering maintenance: a modern approach*. cRc press.
- [7] Mobley, R.K. (2011) *Maintenance fundamentals*. Elsevier.
- [8] Ebeling, C.E. (1997) ‘Intro to Reliability & Maintainability Engineering. pdf (p. 486).
- [9] Mobley, R.K. (1999) *Root cause failure analysis*. Butterworth-Heinemann.
- [10] R. M. Simanungkalit, S. Suliawati, and T. Hernawati, “Analisis Penerapan Sistem Perawatan dengan Menggunakan Metode Reliability Centered Maintenance (RCM) pada Cement Mill Type Tube Mill di PT Cemindo Gemilang Medan,” Blend Sains J. Tek., vol. 2, no. 1, pp. 72–83, 2023, doi: 10.56211/blendsains.v2i1.199.