

Penerapan Metode *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)* pada Turbin Air Tipe *Cross Flow*

Kasda^{1, a*}, Rachman Setiawan^{2, b}

Fakultas Teknik Mesin dan Drigantara, Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesa No. 10 Bandung
Email: ^akasdakasdoels@gmail.com, ^brachmans@edc.ms.itb.ac.id

Abstrak

Turbin *cross flow* merupakan tipe turbin air yang banyak digunakan dalam Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH). karena dapat beroperasi pada beda ketinggian yang rendah (*low head*) dengan debit yang kecil, konstruksinya yang sederhana memungkinkan dapat dibuat oleh bengkel-bengkel yang memiliki peralatan standar dan mesin konvensional sederhana. Dalam PLTMH, keandalan sistem turbin air berperan penting dalam kelangsungan operasi. Berdasarkan hasil observasi, beberapa komponen turbin *cross flow* mengalami kegagalan komponen yang berulang-ulang maupun penurunan kualitas komponen yang menyebabkan penurunan performa PLTMH. Pada penelitian ini, metodologi *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)* diterapkan untuk menentukan modus kegagalan pada sistem turbin *cross flow* secara kualitatif dan kuantitatif, untuk kemudian dapat disusun rekomendasi perbaikan dalam rangka peningkatan keandalan turbin. Sebagai tahap awal, dalam makalah ini akan dilaporkan proses identifikasi modus kegagalan, efek beserta penyebabnya, hingga diperoleh angka prioritas resiko, atau yang disebut sebagai *Risk Priority Number (RPN)* dari setiap modus kegagalan komponen turbin. Dari analisis kualitatif dan kuantitatif, diperoleh hasil bahwa dari ke-28 modus kegagalan, modus kegagalan *bearing* macet dan poros *runner* patah memiliki harga RPN tertinggi, yang diakibatkan oleh ketidaksegarisan pada saat pemasangan poros turbin dengan poros puli transmisi ke generator. Berdasarkan hasil FMEA terhadap kondisi aktual turbin di atas, perbaikan dapat dilakukan terutama pada tahap instalasi turbin sehingga lebih memperhatikan kesegarisan antara poros turbin dan puli transmisi serta pemeliharaan rutin dengan melakukan pemeriksaan kondisi getaran turbin secara berkala menggunakan alat *vibration meter*, sehingga diharapkan keandalan PLTMH dapat meningkat.

Kata Kunci: PLTMH, Turbin *Cross Flow*, keandalan, FMEA

Pendahuluan

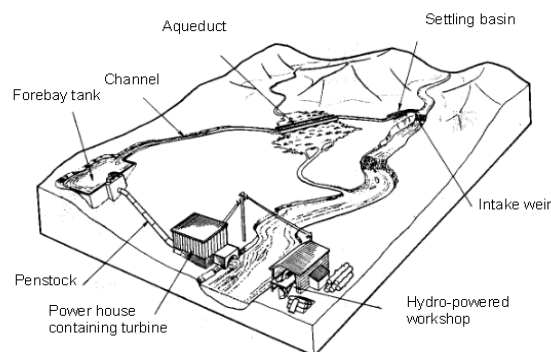
Pembangkit listrik tenaga air dengan kapasitas daya di bawah 100 kW termasuk ke dalam Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) seperti ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Klasifikasi PLTA [1]

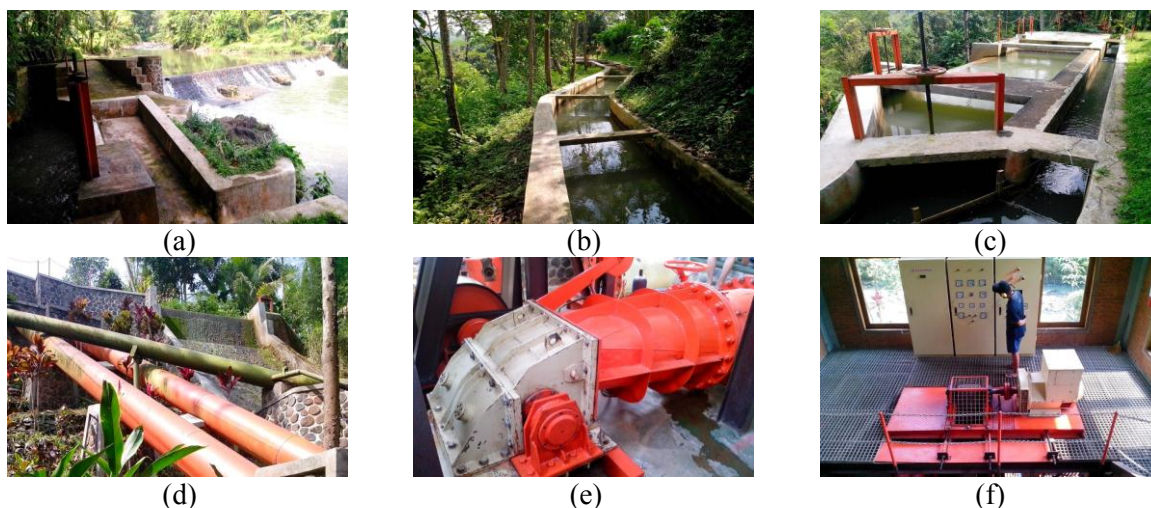
Klasifikasi	Kapasitas Daya (kW)
Big-Hydro	>1000
Small-Hydro	501 to 1000
Mini-Hydro	101 to 500
Micro-Hydro	< 100

Pada umumnya PLTMH terdiri dari beberapa sistem utama yaitu: Bendung dan *Intake*, Bak Pengendap, Saluran Pembawa, Bak Penenang, Pipa Pesat, serta Rumah Pembangkit yang

didalamnya terdapat Turbin, Sistem Kelistrikan dan Kontrol. Skema dan gambar sistem PLTMH seperti terlihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.

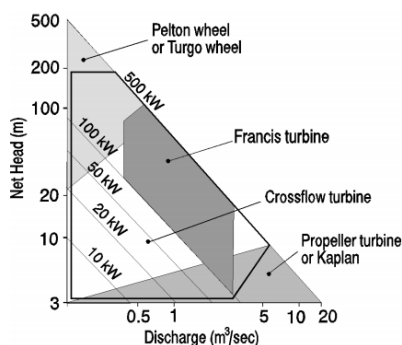


Gambar 1 Skema PLTMH [2]



Gambar 2 Sistem-sistem utama pada PLTMH, (a) Bendung dan Intake, (b) Saluran Pembawa, (c) Bak Penenang, (d) Pipa Pesat, (e) Turbin *Cross Flow*, (f) Generator dan Panel Kontrol

Turbin *cross flow* merupakan tipe turbin air yang banyak digunakan dalam Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) karena dapat beroperasi pada beda ketinggian yang rendah (*low head*) dengan debit yang kecil seperti terlihat pada Gambar 3. Selain itu karena konstruksinya yang sederhana memungkinkan dapat dibuat oleh bengkel-bengkel yang memiliki peralatan standar dan mesin konvensional.



Gambar 3 Beda ketinggian (*Head*) vs Debit untuk daerah operasi turbin air [3]

Ketersediaan potensi sumber energi air yang cukup besar di tanah air, memungkinkan untuk terus dikembangkan pembangunan PLTMH. Dengan demikian, para produsen turbin air skala mikrohidro harus meningkatkan kemampuan dalam merancang dan memproduksi turbin air yang dapat beroperasi dengan andal.

Menurut Ireson [4], keandalan atau *reliability* didefinisikan sebagai peluang sebuah sistem atau komponen dapat memenuhi fungsinya tanpa mengalami kegagalan pada kondisi operasi tertentu dan dalam jangka waktu yang telah ditentukan.

Metode FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) merupakan salah satu metode sistematis yang digunakan untuk menetapkan, mengidentifikasi, serta mengurangi atau menghilangkan kegagalan pada suatu sistem. FMEA merupakan metode yang digunakan untuk menganalisis keandalan dan keselamatan dari suatu sistem, produk atau proses.

Dalam FMEA dilakukan sebuah perhitungan untuk menentukan tingkat resiko tertinggi modus kegagalan pada suatu sistem yang disebut *Risk Priority Number* (RPN). RPN merupakan hubungan antara tiga buah parameter yaitu *Severity* (tingkat keparahan), *Occurrence* (frekuensi kejadian) dan *Detection* (deteksi kegagalan). Untuk menghitung RPN ditentukan dengan rumus:

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

Severity merupakan tingkat keparahan yang ditimbulkan yang berdampak pada keselamatan kerja (orang), lingkungan, maupun operasi sistem. Kriteria *Severity* antara 1 sampai 10. Nilai 10 diberikan jika kegagalan yang terjadi memiliki dampak yang sangat besar terhadap operasi dan keselamatan orang. *Occurrence* adalah tingkat frekuensi terjadinya kegagalan. Kriteria rating *occurrence* antara 1 sampai 10. Nilai 10 diberikan jika kegagalan yang terjadi memiliki nilai kumulatif yang sangat tinggi. *Detection* adalah tingkat kemampuan untuk mendeteksi kegagalan beserta penyebabnya.

Yuniarto dan Aprizal [5], melakukan penelitian dalam rangka peningkatan umur operasi pompa sentrifugal tipe P951E. Penerapan metode RCFA dan FMEA dilakukan untuk menentukan kerusakan dan akar penyebab pada pompa. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa kerusakan dan akar penyebab pada pompa antara lain keausan

pada *impeler*, *bearing breakage*, *looseness*, *misalignment* dan *unbalance*.

Penelitian lainnya telah dilakukan oleh Azadeh dan kawan-kawan [6], Penerapan metode RCM dan FMEA pada sistem mekanik dan hidrolik pompa sentrifugal untuk peningkatan keandalan pompa. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa keandalan dapat ditingkatkan dengan memaksimalkan ketersediaan peralatan serta adanya jadwal pemeliharaan yang teratur.

Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian adalah untuk mengidentifikasi, menghilangkan atau mengurangi kegagalan yang berhubungan dengan rancangan turbin *cross flow* serta menyusun rekomendasi perbaikan rancangan turbin untuk meningkatkan keandalan turbin *cross flow*.

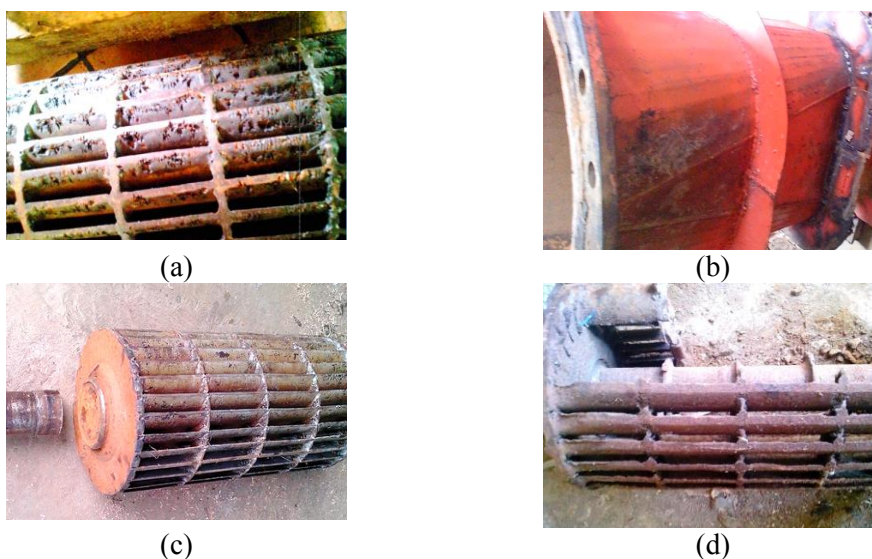
Pada makalah ini hasil penelitian akan dilaporkan sampai pada tahapan *screening* untuk memperlihatkan modus kegagalan yang memiliki nilai RPN tinggi, untuk kemudian dicari solusi untuk menekan angka RPN, baik dari aspek perancangan, manufaktur, instalasi, maupun operasi dan pemeliharaan.

Metodologi Penelitian

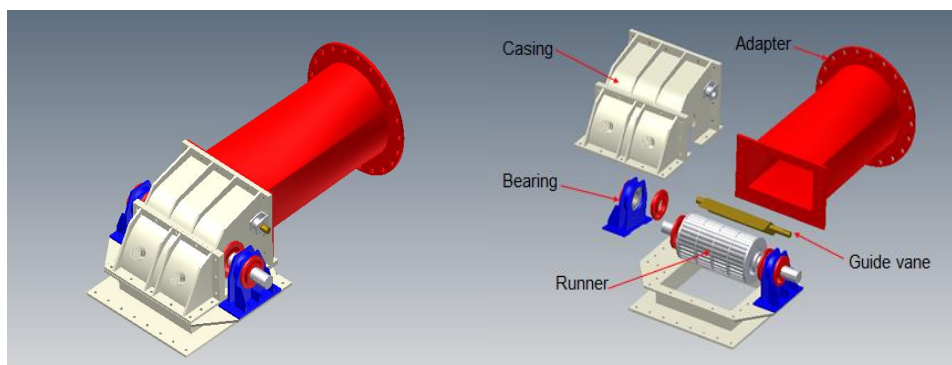
Metodologi penelitian diawali dengan menentukan sistem yang akan dianalisis, membuat diagram blok sistem, identifikasi dan penentuan modus-modus kegagalan, identifikasi dan penentuan efek kegagalan serta identifikasi penyebab kegagalan. Analisis kualitatif dan kuantitatif dilakukan untuk menentukan penilaian pada parameter efek keparahan (*Severity*), frekuensi kejadian (*Occurrence*) dan deteksi penyebab dan modus kegagalan (*Detection*). Dari ketiga parameter tersebut, angka prioritas resiko, atau *Risk Priority Number* (RPN) dapat dihitung yang selanjutnya dilakukan proses *screening* untuk memperlihatkan modus kegagalan dengan angka RPN tinggi.

Dalam penelitian ini studi kasus dipilih pada salah satu Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) yang ada di Kabupaten Subang-Jawa Barat. PLTMH ini memiliki data-data sebagai berikut:

- | | |
|---------------------------|--------------------------|
| a) Jenis turbin | : <i>Cross Flow</i> |
| b) <i>Head</i> | : 18 meter |
| c) Debit | : 0,55 m ³ /s |
| d) Kapasitas | : 60 kW |
| e) Diameter <i>runner</i> | : 0,3 m |



Gambar 4 Kegagalan komponen turbin (a) Sudu *runner* cacat (berlubang), (b) Dinding *adapter* retak, (c) Poros *runner* patah, (d) Sudu *runner* dan *side disk* patah



Gambar 5. Komponen-komponen turbin *cross flow*

Berdasarkan hasil observasi, beberapa komponen turbin air tipe *cross flow* mengalami masalah seperti kegagalan komponen yang berulang-ulang dan dalam waktu yang lebih pendek serta mengalami penurunan kualitas komponen yang menyebabkan penurunan performa PLTMH. Bentuk bentuk kegagalan pada turbin *cross flow* seperti terlihat pada Gambar 4.

Proses FMEA

Pada penelitian ini, Evaluasi FMEA akan meliputi komponen – komponen utama penyusun turbin *cross flow* yaitu: *Adapter*, *Casing*, *Guide Vane*, *Bearing* dan *Runner* seperti terlihat pada Gambar 5, dengan fungsi sebagai berikut: *Adapter* berfungsi mengadaptasi bentuk penampang aliran air dari bentuk lingkaran (dari pipa pesat) menjadi segiempat dan kemudian mengarahkan aliran air dengan $Q=0,55 \text{ m}^3/\text{s}$ ke dalam *casing* yang berfungsi juga sebagai tumpuan *adapter*. Dengan mengatur posisi *guide vane*, kemudian aliran air dengan $Q=0,55 \text{ m}^3/\text{s}$ diubah menjadi pancaran air (jet) dan diarahkan menuju sudu *runner*. Agar *runner* dapat berfungsi dengan baik, maka peranan *bearing* sangat penting dalam menumpu putaran *runner*. Pada saat pancaran air (jet) menyentuh sudu *runner* maka energi kinetik air diubah menjadi energi mekanik oleh *runner* berupa putaran poros *runner* pada kecepatan putar rancang sebesar 548 rpm dan daya poros rancang sebesar 77,52 kW.

Dari keseluruhan proses FMEA yang telah dilakukan, maka didapat sejumlah fungsi beserta modus kegagalan dari komponen-komponen turbin seperti terlihat pada Tabel 2.

Analisis kualitatif dan kuantitatif dilakukan terhadap setiap modus kegagalan, untuk pemberian nilai *severity*, *occurrence* dan *detection*, berdasarkan kondisi aktual baik dari aspek rancangan, instalasi, operasional maupun pemeliharaan turbin.

Tabel 2 Fungsi dan Modus Kegagalan (MK) komponen turbin *cross flow*

Komponen	Jumlah Fungsi	Jumlah MK
<i>Adapter</i> (TA)	1	6
<i>Casing</i> (TC)	4	9
<i>Guide Vane</i> (TG)	1	3
<i>Bearing</i> (TB)	1	3
<i>Runner</i> (TR)	1	7
Jumlah	8	28

Berikut ini beberapa contoh analisis kualitatif dan kuantitatif untuk memberikan nilai *severity*, *occurrence* dan *detection*.

1. Modus kegagalan bocor pada dinding *casing* (TC-4). Dalam kondisi ini turbin masih dapat beroperasi normal, sementara tetesan air akibat bocor dapat membasahi dan membuat lingkungan tidak nyaman serta dalam waktu yang lama dapat mengakibatkan korosi pada komponen lain. Sehingga bobot *severity* sebesar 3. Korosi pada dinding *casing* tidak dapat dihindari. Tetapi prediksi kegagalan komponen turbin akibat korosi dapat ditentukan dengan mengetahui laju korosi pada baja dengan fluida air sekitar 0.2 mm/tahun [7]. Untuk mengambat laju korosi biasanya dilakukan pengecatan. Dengan ketebalan *casing* 13 mm, kebocoran akibat korosi pada dinding *casing* hampir tidak pernah terjadi sampai umur operasi turbin mencapai 15 tahun, maka bobot *occurrence* sebesar 2. Kemudian bocor pada dinding *casing* kesempatannya cukup dapat terdeteksi oleh teknisi atau operator pada saat melakukan perawatan rutin, maka bobot *detection* sebesar 5.
2. Modus kegagalan TB-2 yaitu *Bearing* macet. *Bearing* macet secara tiba-tiba akan berdampak pada berhentinya putaran *runner* secara mendadak, dan dapat mengakibatkan poros *runner* patah karena menerima beban kejut yang besar, maka bobot *severity* untuk TB-2 sebesar 8. Dari data laporan harian tercatat

sekitar 8 kali kejadian bearing rusak selama operasi. Sehingga dengan kejadian berulang-ulang, bobot *occurrence* sebesar 7. Karena tidak dilakukan pemeriksaan getaran secara rutin, sehingga pendeteksian gejala kerusakan *bearing* kesempatannya sangat rendah dapat terdeteksi oleh operator atau teknisi, maka bobot *detection* TB-2 sebesar 7.

Tabel 3. Data Penggantian Komponen Turbin Juli 2004 - Januari 2014 [8]

No	Nama Komponen	Total Penggantian (Kali)	Keterangan
1	Adapter	1	Perbaikan Adapter retak
2	Casing	0	-
3	Guide Vane	0	-
4	Bearing	8	Bearing rusak/macet
5	Runner	5	Poros patah
		2	sudu bolong-bolong

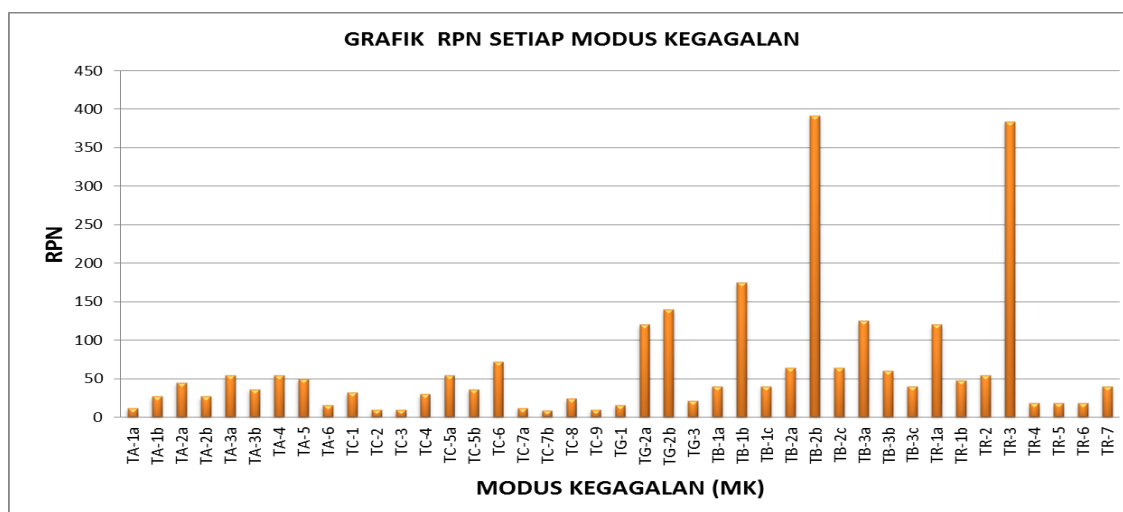
Pada Lampiran A ditampilkan contoh hasil proses FMEA mulai dari penentuan modus-modus kegagalan, efek kegagalan beserta penyebab kegagalan, nilai setiap parameter *severity*, *occurrence* dan *detection* serta hasil perhitungan RPN.

Dari eksplorasi berbagai modus kegagalan yang mungkin terjadi pada komponen-komponen utama yang meliputi: *Adapter*, *Casing*, *Guide Vane*,

Bearing dan *Runner*, maka melalui proses *screening* diperoleh beberapa modus kegagalan yang mendominasi dengan harga RPN yang tinggi, yaitu: *Bearing* macet (TB-2b), Patah poros *runner* (TR-3). Kelompok modus kegagalan dengan RPN yang cukup tinggi termasuk: *Bearing* aus (TB-1b), *Bearing* terkorosi (TB-3a), Kavitasi pada sudu *runner* (TR-1a), Kavitasi pada *guide vane* (TG-2b) dan erosi pada *guide vane* (TG-2a). Distribusi RPN terhadap setiap modus kegagalan dapat dilihat pada Gambar 6.

Hal menarik yang perlu dianalisis lebih lanjut adalah pada modus kegagalan yang tinggi yaitu *Bearing* macet (TB-2b), Patah poros *runner* (TR-3). Berdasarkan data aktual dari lapangan seperti ditampilkan pada Tabel 3, maka kegagalan *bearing* menduduki urutan yang paling tinggi jika dibandingkan dengan komponen turbin yang lain.

Berdasarkan informasi, bahwa pada awal pemasangan turbin, pondasi dan *base farne* dudukan turbin dan puli transmisi permukaannya dalam kondisi tidak rata dengan beda ketinggian sekitar 3-5 mm. Hal ini memungkinkan dapat menyebabkan ketidaksegarisan (*misalignment*) antara sumbu poros turbin dengan sumbu puli transmisi sehingga efeknya dapat menimbulkan beban berlebih pada *bearing*.



Gambar 6 Harga RPN dari setiap Modus Kegagalan : TA –*Adapter*, TC –*Casing*, TG – *Guide Vane*, TB–*Bearing* dan TR–*Runner*

Analisis kuantitatif dilakukan untuk menunjukkan bahwa nilai *misalignment* tertentu dapat menimbulkan beban berlebih sehingga mempengaruhi umur *bearing*.

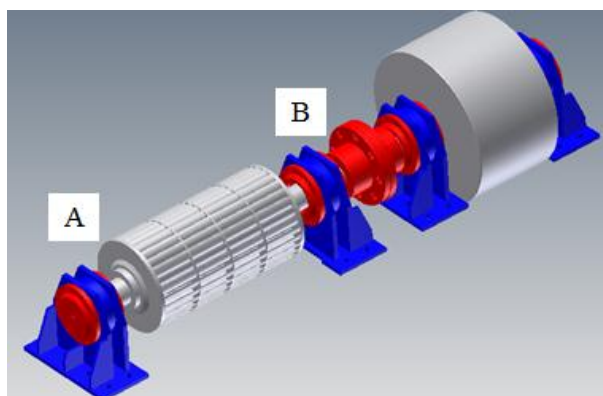
Gambar 7 memperlihatkan ilustrasi posisi *runner* turbin. Metode analisisnya yaitu: Gaya-gaya dari sudu *runner* yang bekerja pada poros *runner* dimodelkan sebagai gaya terdistribusi secara merata, dan ditumpu di dua ujung oleh

bearing di posisi A dan B. Gaya akibat berat *runner* dan poros diasumsikan sebagai gaya terdistribusi merata yang masing-masing adalah w_R dan w_P , w_V dan w_H merupakan gaya terdistribusi secara merata akibat jet air pada sudu *runner*. Sementara F_8 adalah gaya yang timbul akibat adanya *misalignment*.

Sebagai *input* analisis, maka beberapa perhitungan telah dilakukan dalam penentuan

gaya-gaya yang bekerja yaitu $w_R = 917,73 \text{ N/m}$, $w_V = 1.243,45 \text{ N/m}$, $w_H = 13.575 \text{ N/m}$ dan $w_H = 14.524 \text{ N/m}$. Sedangkan Gaya F_δ dihitung menggunakan persamaan (2).

Berdasarkan informasi bahwa pada saat proses *alignment* sumbu poros *runner* dengan sumbu poros puli transmisi ke generator, tidak menggunakan peralatan yang memadai yaitu hanya menggunakan *water pass* dan bantuan indera penglihatan dan peraba saja. Sementara karena keterbatasan kemampuan mata manusia tanpa bantuan alat ukur yang tepat, akan sulit untuk mendeteksi *misalignment* kurang dari 1 mm. Dengan demikian *misalignment* kurang dari 1 mm kemungkinannya dapat terjadi. Sementara indera peraba diperkirakan sulit mendeteksi *misalignment* lebih kecil dari 0,2 mm.



Gambar 7 Posisi *runner*

Dengan menganggap sebagai kasus batang *cantilever*, maka besar gaya F_δ karena defleksi akibat *misalignment* dapat dihitung dengan persamaan:

$$F_\delta = \frac{3EI \cdot \delta_{maks}}{l^3} \quad (2)$$

Untuk menghitung umur *Roller bearing* L_{10}

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{10}{3}} \quad (3)$$

Berdasarkan iterasi perhitungan menggunakan persamaan (3) telah dilakukan, dan ternyata dengan asumsi angka *misalignment* 0,12 mm, hasilnya menunjukkan umur *bearing* L_{10} dapat bertahan sampai 6.674 jam atau sekitar 11,1 bulan operasi. Artinya akan ada 1 dari 10 jenis *bearing* tersebut akan mengalami kegagalan sebelum mencapai 11,1 bulan operasi. Dengan demikian untuk penilaian kegagalan umur *bearing* kurang dari 11,1 bulan ini dapat masuk pada kategori frekuensi kejadian yang sering atau berulang-ulang sehingga angka *occurrence* menjadi tinggi.

Selain *misalignment*, kemungkinan penyebab kegagalan prematur pada *bearing*, adalah akibat proses pemasangan *bearing* yang tidak benar. Demikian juga apabila program pemeliharaan

tidak terjadwal dengan baik serta kurangnya pencatatan (dokumentasi) kejadian kegagalan juga dapat mengakibatkan kegagalan *bearing* yang berulang-ulang.

Dengan demikian aspek pemasangan dan pemeliharaan *bearing* perlu ditingkatkan dengan menyelenggarakan pelatihan untuk teknisi dan operator mengenai prosedur pemasangan *bearing* yang benar serta penggunaan peralatan yang tepat dan pemeliharaan dapat ditingkatkan dengan melakukan pemeriksaan *alignment* turbin dengan menggunakan peralatan yang memadai dan metode yang tepat, serta pemeriksaan getaran dengan *vibration meter* untuk mendeteksi kemungkinan terjadinya getaran yang tinggi akibat adanya gejala kerusakan pada komponen turbin.

Dengan peningkatan aspek pemasangan dan pemeliharaan di atas, maka diharapkan dapat mengurangi kegagalan sehingga nilai *occurrence* menjadi rendah. Bahkan apabila dilakukan pencatatan dengan baik dan lengkap mengenai peristiwa kegagalan *bearing* yang berulang-ulang, maka penggantian dengan *bearing* yang baru dapat dilakukan sebelum *bearing* mengalami kegagalan sehingga nilai *occurrence* semakin kecil mendekati nilai "1". Demikian juga halnya dengan melakukan pemeriksaan getaran secara rutin, maka potensi kegagalan *bearing* dapat terdeteksi dengan mudah sehingga akan menurunkan nilai *detection*.

Kesimpulan dan Saran

1. Hasil eksplorasi FMEA, menunjukkan ada beberapa modus kegagalan yang mendominasi dengan harga RPN tinggi, meliputi: *Bearing* macet (TB-2b) dengan RPN sebesar 392, Patah poros *runner* (TR-3) dengan RPN sebesar 384, serta modus kegagalan dengan RPN cukup tinggi meliputi: *outer* dan *inner ring bearing* aus (TB-1b) dengan RPN sebesar 175, erosi pada *guide vane* akibat kavitasi (TG-2b) dengan RPN sebesar 140, *outer* dan *inner ring bearing* terkorosi (TB-3a) dengan RPN sebesar 125, erosi pada sudu *runner* (TR-1a) dengan RPN sebesar 120 dan erosi pada *guide vane* akibat material abrasif (TG-2a) dengan RPN sebesar 120.
2. Penyebab modus kegagalan dengan resiko tinggi pada *bearing* dan poros *runner* adalah akibat *misalignment* yang disebabkan oleh ketidaktepatan pada saat proses penyambungan antara poros turbin dengan poros puli transmisi ke generator karena tidak menggunakan peralatan yang memadai.

3. Pemeriksaan *alignment* turbin harus dilakukan secara berkala dengan menggunakan peralatan yang memadai serta metode yang tepat.
4. Berdasarkan hasil *FMEA* terhadap kondisi aktual turbin, potensi perbaikan dapat dilakukan terutama pada tahap instalasi turbin sehingga lebih memperhatikan kesegaran antara poros turbin dan puli transmisi serta pemeliharaan rutin dengan melakukan pemeriksaan kondisi getaran turbin secara berkala menggunakan alat *vibration meter*, sehingga apabila hal ini dilakukan diharapkan keandalan PLTMH dapat meningkat.

Daftar Pustaka

1. **Ueli Meier, Jean-Max Baumer.** *Harnessing Water Power On a Small Scale (Local Experience With Micro-Hydro Technology)*. s.l. : SKAT, 1981.
2. **JICA.** *Manual and Guidelines for Micro-Hydropower Development in Rural Electrification*. Juni 2009.
3. **DTI.** *Hydropak (Concept Design And Analysis of A Packed Cross Flow Turbine)*. April 2004.
4. **Headquarters, Departement Of The ARMY.** *Faliure Modes, Effect And Critically Analysis (FMECA) For Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance And Reconnaissance (C4ISR) Facilities*. 29 September 2006.
5. **Yuniarto, Farandy Afrizal dan Muhammad Nur.** *Analisa Kerusakan Centrifugal Pump P951E di Surabaya* : s.n., 2013.
6. **A. Azadeh, V. Ebrahimpour, P. Bavar.** *A Pump FMEA Approach to Improve Reliability Centered Maintenance Procedure: The Case of Centrifugal Pumps in Onshore Industry*. Tehran : s.n., 2009.
7. **Bardal, Einar.** *Corrosion and Protection* . 1933.
8. *Data Perbaikan Komponen*. 2014.
9. **Mockmore, C. A.** *The Banki Water Turbine*. February 1949.
10. **Dhillon, B.S.** *Design Reliability (Fundamentals and Applications)*. Canada : s.n., 1999.
11. **Norton, Robert L.** *Machine Design (An Integrated Approach)*. 1998.
12. **Sularso, Kiyokatsu Suga.** *Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin*. Jakarta : Pradnya Paramita, 1991.
13. **Lazor, J.D.** *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) and Fault Tree Analysis (FTA)*.

Lampiran A Tabel FMEA Sistem Turbin *Cross Flow* (Contoh)

KODE	NAMA SUBSISTEM / KOMPONEN	FUNGSI	KODE MK	MODUS KEGAGALAN (MK)	EFEK MODUS KEGAGALAN			KEMUNGKINAN PENYEBAB KEGAGALAN	SEVERITY	OCCURRENCE	DETECTION	RPN
					EFEK LOKAL (KOMPONEN / ASEMBLY)	EFEK SELANJUTNYA (SUB SISTEM)	EFEK AKHIR (SISTEM)					
TA	ADAPTER	Mengadaptasi perbedaan penampang aliran air dari bentuk lingkaran (dari pipa pesat) menjadi segiempat (menuju mulut turbin) serta mengarahkan aliran air ke dalam <i>casing</i> tanpa mengalami kebocoran.	TA-2a	Bocor pada dinding <i>Adapter</i>	Membasahi subsistem, komponen yang lain	Mengakibatkan korosi pada subsistem, komponen yang lain	Tidak mempengaruhi performa turbin	Korosi	3	3	5	45
TC	CASING	Mengarahkan pancaran air (jet) tepat ke sudu <i>runner</i> .	TC-1	Pancaran air (jet) tidak terarah tepat ke sudu <i>runner</i>	Pancaran air (jet) pada sudu <i>runner</i> tidak merata	Putaran <i>runner</i> tidak optimal	Performa turbin turun	Bentuk kelengkungan nosel pada <i>casing</i> kurang tepat	4	2	4	32
		Mencegah adanya kebocoran baik pada badan maupun sambungan <i>flanges</i>	TC-4	Bocor pada dinding <i>casing</i>	Membasahi komponen, subsistem yang lain	Mengakibatkan korosi pada komponen, subsistem yang lain	Tidak mempengaruhi performa turbin	Korosi	3	2	5	30
TG	GUIDE VANE	Mengatur kapasitas pancaran air (jet) dan mengarahkannya ke sudu <i>runner</i>	TG-2b	Erosi pada permukaan <i>guide vane</i>	Pengurangan dimensi <i>guide vane</i>	Kekuatan <i>guide vane</i> menurun	Performa turbin turun	Proses kavitasi	4	5	7	140
TB	BEARING	Menyediakan tumpuan untuk poros/ <i>runner</i> dengan beban berat maupun operasi pada putaran 548 rpm dengan rentang getaran yang diijinkan antara 1,12 - 2,80 mm/s	TB-1b	Aus pada inner ring, outer ring atau rolls bearing	Temperatur tinggi, getaran tinggi	Putaran <i>runner</i> tidak lancar	Performa turbin turun	Beban terlalu besar akibat misalignment	5	5	7	175
			TB-2b	<i>Bearing</i> macet	<i>Runner</i> tidak dapat berputar	<i>Runner</i> tidak dapat berputar	Sistem turbin tidak dapat beroperasi	Beban terlalu besar akibat misalignment	8	7	7	392
			TB-3a	Korosi pada inner ring, outer ring atau rolls bearing	Temperatur tinggi, getaran tinggi	Putaran <i>runner</i> tidak lancar	Performa turbin turun	Seal rusak	Seal rusak	5	5	5
TR	RUNNER	Mengubah energi kinetik air menjadi energi mekanik berupa putaran poros <i>runner</i> dengan kecepatan putar rancang 548 rpm dan daya poros rancang 77,52 kW	TR-1a	Erosi pada Sudu <i>runner</i>	Pengurangan dimensi dan penurunan kekuatan sudu	Pancaran air (jet) pada sudu <i>runner</i> berubah	Performa turbin turun	Proses kavitasi	4	5	6	120
			TR-3	Poros <i>runner</i> patah	<i>Runner</i> tidak dapat berputar	<i>Runner</i> tidak dapat berputar	Sistem turbin tidak dapat beroperasi	Beban terlalu besar akibat misalignment	8	8	6	384