

Forensic Analysis of a Mini Hydro Power Plant Failure using Failure Mode And Effects Analysis

Claudia Kurniawan^{1,*}, Hendra Maidani¹, dan Sangriyadi Setio¹

¹Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung – Bandung

*Corresponding author: angela.claudia1107@gmail.com

Abstract. The failure of infrastructure development to fulfill its functions and specifications continues to occur. This failure becomes very important if it occurs in the power plant environment where the achievement of infrastructure specifications is the principal thing in maintaining the performance of the power plant. Various efforts have been made to find the root of the problem but the results are still unsatisfactory because the same failures continue to occur. In this paper, forensic analysis will be presented using failure mode and effect analysis to find the true root of the problem which does not stop at product failure but also because of human error. A case study was carried out with a case in a mini hydro power plant (PLTM). From the results, the use of failure mode and effect analysis had provided a very clear picture of the root causes of a true failure so that the same failures were not expected to be repeated.

Abstrak. Kegagalan pembangunan infrastruktur untuk memenuhi fungsi dan spesifikasinya terus terjadi sampai saat ini. Kegagalan ini menjadi sangat kritis jika terjadi di lingkungan pembangkit listrik di mana pencapaian spesifikasi infrastruktur menjadi hal yang utama dalam menjaga performa pembangkit listrik. Berbagai usaha telah banyak dilakukan untuk mencari akar masalah tetapi hasilnya masih kurang memuaskan karena kesalahan yang sama terus terjadi. Pada makalah ini akan disampaikan analisis forensik dengan menggunakan bantuan analisis mode dan efek kegagalan untuk mencari akar masalah yang sebenarnya yang tidak hanya berhenti pada kegagalan produk tetapi juga pada kegagalan manusia dalam mencapai fungsi dan kualitas yang diinginkan. Studi kasus dilakukan pada kasus kegagalan dari beberapa pembangkit listrik tenaga minihidro (PLTM). Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, penggunaan analisis mode dan efek kegagalan pada manusia telah memberikan suatu gambaran yang sangat jelas apa akar masalah dari suatu kegagalan yang sesungguhnya sehingga kegagalan yang sama diharapkan tidak terulang kembali.

Keywords: Forensik, analisis mode dan efek kegagalan, kegagalan manusia, *forensic, failure mode and effects analysis, human error.*

© 2018. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Kegagalan adalah ketidakmampuan alat atau sistem untuk menjalankan fungsinya sesuai dengan fungsi dan spesifikasi yang diinginkan pada waktu yang diperlukan. Kegagalan bisa terjadi karena faktor 4K yaitu Kelalaian, Kekurangtahuan, Ketidakpedulian, dan Keserakahan.

Penyebab utama kegagalan yang sama sering terjadi berulang-ulang adalah karena ketidakmampuan penyelidik untuk mencari akar masalahnya. Umumnya penyelidik sudah berhenti melakukan penyelidikan ketika baru melihat batang masalah yang dikira akar masalah. Hal ini bisa terjadi karena berbagai hal, seperti kurangnya pengetahuan penyelidik akan berbagai alat dan metode yang bisa digunakan untuk mencari akar masalah [1].

Selain itu akar masalah yang sebenarnya juga tidak terungkap karena beberapa faktor lain, seperti kesulitan penyelidik untuk mendapatkan akses

masuk ke lokasi kejadian dan data lengkap mengenai objek yang diselidiki, sehingga terjadi pengkaburan masalah yang sebenarnya.

Selain semua hal tersebut, kegagalan dalam mencari akar masalah juga dapat disebabkan karena adanya tekanan fisik atau pemberian materi.

Forensik adalah penyelidikan yang dilakukan terhadap suatu kegagalan untuk mencari siapa yang bertanggungjawab atas kegagalan dan menentukan peraturan, standar, spesifikasi, atau hukum apa saja yang telah dilanggar atau dibelokkan sehingga kegagalan tersebut terjadi.

Analisis Mode dan Efek Kegagalan (*Failure Mode and Effects Analysis/ FMEA*) adalah sebuah metode yang pertama kali diperkenalkan oleh NASA pada tahun 1960 untuk proyek pendaratan manusia. Pada tahun 1970, Ford mengembangkan FMEA dalam industri otomotifnya. Pada tahun 1980, FMEA mulai populer dan banyak digunakan oleh industri untuk meramalkan terjadinya

kegagalan-kegagalan potensial dan apa saja penyebabnya [2].

Dengan kemampuan meramalkan potensi kegagalan-kegagalan dan kemampuan mengatasinya maka diharapkan produk-produk tidak akan mengalami kegagalan dan kegagalan-kegagalan yang telah terjadi tidak akan terulang kembali [3]. Hal tersebut merupakan semangat dan roh dari ilmu keandalan.

Tujuan dari penelitian ini dilatarbelakangi oleh banyaknya terjadi kegagalan infrastruktur di Indonesia baik kegagalan fungsi atau kegagalan spesifikasi yang terjadi berulang kali untuk kasus-kasus yang selalu sama. Contohnya pada kasus pembangkit listrik tenaga minihidro (PLTM).

Pemilik dan operator pembangkit listrik tentu tidak ingin pabriknya mengalami kegagalan total atau kegagalan parsial. Kegagalan total adalah pembangkit yang tidak dapat memproduksi listrik sedikitpun sehingga menyebabkan kehilangan modal dan potensi keuntungan. Sedangkan kegagalan parsial akan menyebabkan biaya perawatan yang mahal dan performa yang rendah. Mahalnya biaya perawatan yang tidak perlu akan membebani biaya produksi. Performa pembangkit yang rendah akan mengurangi produksi dan keuntungan dari nilai yang sudah direncanakan.

Kegagalan pada saat perencanaan dan atau konstruksi sangat membebani operator pabrik selain performanya yang kurang baik.

Penyelidikan forensik dengan menggunakan FMEA memperlihatkan hasil yang menjanjikan, tidak saja untuk menghilangkan kegagalan-kegagalan yang telah terjadi, tetapi juga kegagalan-kegagalan potensial. Sehingga produk-produk yang dihasilkan bisa mempunyai kualitas yang tinggi dengan biaya operasi yang murah dan yang tidak kalah pentingnya adalah keandalan yang diinginkan dapat dijamin tercapai.

Rekayasa Forensik

Rekayasa forensik pada dasarnya adalah rangkaian kegiatan analisis kegagalan untuk dukungan litigasi, atau dengan makna lain yaitu mengaitkan hubungan antara ilmu teknik dengan ilmu hukum. Tujuan dari program semacam ini adalah untuk mengidentifikasi urutan kejadian yang menyebabkan kegagalan fatal. Rekayasa forensik juga dapat diartikan sebagai penerapan prinsip dan metodologi ilmu teknik untuk menjawab pertanyaan atau mengungkap sebuah fakta.

Rekayasa forensik adalah sebuah proses multi-disiplin untuk menyelidiki dan melaporkan penyebab kegagalan dalam masalah teknik yang mungkin memiliki masalah hukum. Proses ini didasarkan pada metode ilmiah yang sangat penting

untuk solusi sebagian besar masalah teknik, baik itu terkait dengan mesin, sipil, struktural, geoteknik, mekanika, metalurgi, material, industri, kimia, atau bidang teknik lainnya.

Secara umum, rekayasa forensik bertujuan untuk:

1. Menentukan penyebab dari sebuah kegagalan.
2. Membandingkan pernyataan oleh saksi atau pihak yang dirugikan dengan bukti fisik.
3. Memastikan apakah terdapat kegiatan ilegal dalam suatu kegagalan.
4. Menilai kerusakan bahan, produk atau struktur dan mengevaluasi perkiraan perbaikan.

Pihak-pihak yang sering terlibat dalam rekayasa forensik adalah sebagai berikut:

1. Pemilik, pengembang, penyewa objek yang mengalami kegagalan
2. Lembaga publik & pemerintah
3. Kontraktor
4. Desainer
5. Produsen material
6. Pengacara
7. Perusahaan asuransi
8. Penggugat dalam proses pengadilan (pihak yang dirugikan)
9. Terdakwa dalam litigasi (desain, konstruksi, pemeliharaan atau operasi)

Pada saat melakukan investigasi forensik, terdapat rangkaian kegiatan yang secara umum dilakukan dalam rekayasa forensik. Rangkaian kegiatan tersebut adalah:

1. Mengumpulkan informasi
2. Melakukan investigasi ke lokasi kejadian kegagalan
3. Melakukan inspeksi visual
4. Mempelajari dan mengulas dokumen yang terkait
5. Melakukan dokumentasi
6. Mengulas kode, standar industri, dan penelitian produk
7. Melakukan analisis data
8. Memetakan aksi peran dari berbagai pihak
9. Mengembangkan pendapat dan kesimpulan
10. Menjelaskan alasan di balik kesimpulan
11. Mempersiapkan lembar kerja kesalahan
12. Membantu pengacara
13. Memberikan penilaian yang jelas tentang risiko yang terlibat dengan setiap masalah
14. Memberikan kesaksian dari para saksi

C dan D. Prioritas lebih awal berarti kegagalan tersebut harus ditinjau secara lebih mendalam.

- Prioritas A memiliki jangkauan RPN lebih besar dari 150
- Prioritas B memiliki jangkauan RPN antara 100-150
- Prioritas C memiliki jangkauan RPN antara 50-100
- Prioritas B memiliki jangkauan RPN kurang dari 50

Suatu kegagalan dapat dihilangkan atau diminimalkan baik itu intensitas ataupun efeknya. Langkah yang harus dilakukan adalah dengan mengetahui bagaimana suatu kegagalan itu terjadi, mengidentifikasi efek kegagalan, dan mengidentifikasi akar penyebab suatu kegagalan. Kemudian langkah berikutnya adalah dengan membuat tindakan rekomendasi yang dapat dilakukan sehingga kegagalan dapat diminimalkan atau bahkan dihilangkan

Fungsi dan Kegagalan Fungsional

Fungsi mendefinisikan performa operasi termasuk toleransi keluaran yang ingin dicapai. Sedangkan kegagalan fungsional adalah suatu keadaan di mana sebuah sistem atau komponen gagal memenuhi fungsinya.

Penting untuk menentukan semua fungsi-fungsi sebuah sistem atau komponen. Dengan mendefinisikan secara jelas fungsi-fungsi tersebut, maka kegagalan fungsional menjadi terdefinisi dengan jelas. Sebagai contoh, tidak cukup mendefinisikan fungsi dari insinyur perencana menentukan dimensi pondasi. Fungsi dari insinyur perencana juga harus didefinisikan secara spesifik seperti penurunan pondasi, rentang antar pipa, biaya, dan lain-lain.

Mode Kegagalan

Mode kegagalan adalah kegagalan dari pihak-pihak yang terlibat yang mengakibatkan kegagalan fungsional dari sistem atau subsistem. Sebuah kegagalan fungsional juga dapat terjadi jika performa pembangkit mengalami degradasi sehingga tidak tercukupinya kebutuhan operasi. Kebutuhan-kebutuhan operasional ini harus dipandang ketika mengembangkan tugas-tugas perencanaan.

Mode-mode kegagalan dominan adalah mode-mode kegagalan yang bertanggung-jawab terhadap sebagian besar dari semua kegagalan. Ini merupakan mode-mode kegagalan yang paling banyak terjadi dari suatu kejadian kegagalan.

Efek Kegagalan

Efek Kegagalan adalah akibat yang terjadi jika suatu kegagalan terjadi pada sistem, rancangan, proses, alat, ataupun manusia. Contoh efek kegagalan adalah proyek tidak selesai tepat waktu, pipa menjadi patah, pondasi retak, dan kerusakan pada bagian pondasi yang lain.

Pada saat mengidentifikasi setiap mode kegagalan, efek-efek kegagalan juga harus dicatat. Dengan pencatatan tersebut maka dapat dijelaskan apa yang akan terjadi apabila mode kegagalan memang terjadi. Pencatatan juga dapat mencakup kejadian-kejadian seperti suatu saat alat tersebut tidak beroperasi, kualitas operasi, bukti bahwa kegagalan memang terjadi, langkah koreksi yang mungkin dilakukan, dan ancaman terhadap keselamatan atau lingkungan. Langkah-langkah ini memungkinkan untuk menetapkan seberapa besar pengaruh dari setiap kegagalan dan seberapa tinggi tingkat perubahan yang dibutuhkan.

Dengan melakukan proses pencatatan identifikasi fungsi, kegagalan fungsional, mode kegagalan, dan efek kegagalan maka akan memberikan hasil yang mencengangkan dan ada peluang yang sangat menguntungkan untuk memperbaiki prestasi dan keselamatan serta untuk mengeliminasi ketidakefektifan.

Konsekuensi Kegagalan

Dari analisis rinci pada suatu sistem bisa diperoleh banyak mode kegagalan. Masing-masing kegagalan ini dapat mempengaruhi kualitas produk, keselamatan, dan lingkungan.

Konsekuensi-konsekuensi ini sangat mempengaruhi sampai sejauh mana upaya pencegahan kerusakan dapat dilakukan. Dengan perkataan lain, bila kegagalan memiliki konsekuensi yang serius, maka dengan sekuat tenaga akan dicoba untuk mencegahnya. Di lain pihak, bila pengaruhnya kecil atau tidak ada sama sekali, maka dapat diputuskan untuk tidak dilakukan perubahan.

Konsekuensi kegagalan terbagi ke dalam empat kelompok, yaitu

1. Konsekuensi kegagalan tersembunyi

Kegagalan tersembunyi tidak memiliki dampak langsung tetapi dapat merugikan pihak-pihak pembangun PLTM karena adanya kerusakan-kerusakan dengan konsekuensi serius, bahkan sangat berbahaya. Kebanyakan dari jenis kerusakan ini terkait dengan peralatan proteksi yang tidak memiliki sistem pencegah kegagalan.

2. Konsekuensi keselamatan dan lingkungan

Suatu kerusakan memiliki konsekuensi-konsekuensi keselamatan apabila dapat menyebabkan kecelakaan atau kematian. Kerusakan dapat memiliki konsekuensi lingkungan apabila melampaui standar yang telah ditetapkan.

3. Konsekuensi operasional

Suatu kerusakan memiliki konsekuensi terhadap operasional apabila dapat mempengaruhi performa pembangkit listrik. Konsekuensi ini membutuhkan biaya dan besarnya biaya menggambarkan seberapa besar usaha yang harus dilakukan untuk mencoba mencegahnya.

4. Konsekuensi nonoperasional

Kegagalan yang termasuk dalam kategori ini tidak mempengaruhi sama sekali baik keselamatan maupun performa.

Metode berbasis kehandalan menggunakan kategori-kategori ini sebagai dasar untuk proses pengambilan keputusan dalam perencanaan dan pelaksanaan. Dengan mengetahui secara terstruktur konsekuensi-konsekuensi dari setiap mode kerusakan di atas, metode berbasis kehandalan mengintegrasikan tujuan-tujuan operasional, lingkungan, dan keselamatan dari fungsi perawatan.

Metode berbasis kehandalan memfokuskan perhatian pada tugas-tugas yang mempengaruhi prestasi kerja pihak-pihak di PLTM.

Tindakan Rekomendasi

Tindakan rekomendasi adalah tindakan spesifik yang berfungsi untuk mengatasi kegagalan yang terjadi. Tindakan ini harus dapat mengatasi kegagalan atau meminimalkan akibat dari kegagalan yang terjadi.

Standar Penilaian

Angka keparahan, angka keseringan, dan angka deteksi penyebab kegagalan merupakan nilai yang relatif antara satu pihak dengan pihak yang lain. Tabel 1, 2 dan 3 berikut merupakan sistem penilaian tingkat keparahan, keseringan, dan deteksi akibat dari suatu mode kegagalan yang dibuat oleh pihak peneliti.

Tabel 1. Nilai dan kategori tingkat keparahan

Kategori	Keterangan	Nilai
Berbahaya tanpa peringatan	Kegagalan yang sangat berbahaya bagi sistem dan tanpa peringatan	10
Berbahaya dengan peringatan	Kegagalan yang sangat berbahaya bagi sistem dengan peringatan	9
Sangat tinggi	Kegagalan yang dapat menyebabkan sistem tidak bekerja dan tanpa peringatan	8
Tinggi	Sistem tidak dapat beroperasi dan terdapat kerusakan komponen	7
Sedang	Sistem tidak dapat beroperasi dan terdapat sedikit kerusakan	6
Rendah	Sistem tidak dapat beroperasi meskipun tanpa kerusakan	5
Sangat rendah	Sistem dapat beroperasi, namun dengan penyimpangan prestasi yang signifikan	4
Minor	Sistem dapat beroperasi, namun dengan sedikit penyimpangan prestasi	3
Sangat minor	Sistem dapat beroperasi, namun dengan sedikit penyimpangan prestasi	2
Tanpa akibat	Tidak berakibat apa-apa	1

Tabel 2. Nilai dan kategori tingkat keseringan

Kategori	Keterangan	Nilai
Tinggi sekali	Kegagalan selalu terjadi	10
Sangat tinggi	Kemungkinan terjadi kegagalan 1:3 atau kemungkinan gagal sangat tinggi	9
Tinggi	Kemungkinan terjadi kegagalan 1:6 atau kemungkinan gagal tinggi	8
Cukup tinggi	Kemungkinan terjadi kegagalan 1:9 atau kemungkinan gagal cukup tinggi	7
Sedang	Kemungkinan terjadi kegagalan 1:12 atau kemungkinan gagal sedang	6
Sedang-menengah	Kemungkinan terjadi kegagalan 1:15 atau kemungkinan gagal sedang menengah	5
Sedang-	Kemungkinan terjadi kegagalan	4

Kategori	Keterangan	Nilai
rendah	1:18 atau kemungkinan gagal sedang-rendah	
Rendah	Kemungkinan terjadi kegagalan 1:21 atau kemungkinan gagal rendah	3
Sangat rendah	Kemungkinan terjadi kegagalan 1:24 atau kemungkinan gagal sangat rendah	2
Tanpa akibat	Kegagalan hampir tidak pernah terjadi	1

Tabel 3. Nilai dan kategori tingkat deteksi

Kategori	Keterangan	Nilai
Sangat tidak pasti	Tidak ada alat pengontrol yang mampu mendeteksi	10
Sangat jarang	Alat pengontrol saat ini sangat sulit mendeteksi bentuk atau penyebab kegagalan	9
Jarang	Alat pengontrol saat ini sulit mendeteksi bentuk dan penyebab kegagalan	8
Sangat rendah	Kemampuan alat kontrol untuk mendeteksi bentuk dan penyebab kegagalan sangat rendah	7
Rendah	Kemampuan alat kontrol untuk mendeteksi bentuk dan penyebab kegagalan rendah	6
Sedang	Kemampuan alat kontrol untuk mendeteksi bentuk dan penyebab kegagalan sedang	5
Sedang-tinggi	Kemampuan alat kontrol untuk mendeteksi bentuk dan penyebab kegagalan sedang sampai tinggi	4
Tinggi	Kemampuan alat kontrol untuk mendeteksi bentuk dan penyebab kegagalan tinggi	3
Sangat tinggi	Kemampuan alat kontrol untuk mendeteksi bentuk dan penyebab kegagalan sangat tinggi	2
Hampir pasti	Sistem kontrol alat akan mendeteksi bila penyebab kegagalan terjadi	1

Pembuatan Lembar Kerja FMEA dan Analisis

Lembar kerja informasi FMEA merupakan salah satu cara untuk mengelompokkan aset, menjelaskan fungsi dan mode-mode kegagalannya. Dari lembar kerja FMEA, akan jelas terlihat kegagalan-kegagalan yang telah ataupun mungkin terjadi dalam suatu aset.

Pembuatan lembar kerja FMEA dilakukan untuk seluruh objek benda dan manusia. Objek benda yang ditinjau untuk studi kasus pada penelitian ini adalah Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM). Berikut ini adalah komponen yang akan ditinjau.

Komponen benda di PLTM:

1. Bendungan
2. Kolam pengendapan (*sandtrap*)
3. Saluran pembawa (*waterway*)
4. Saluran pemisah (*spillway*)
5. Penyaring sampah (*filter*)
6. Kolam penenang (*headpond*)
7. Pipa pesat (*penstock*)
8. Pondasi penahan (*anchor block*)
9. Rumah pembangkit (*power house*)
10. Saluran pembuangan (*tailrace*)

Pihak-pihak yang terlibat dalam pembangunan PLTM:

1. Pemilik proyek (*Owner*)
2. Konsultan perencana
3. Konsultan pengawas (Manajemen konstruksi)
4. Kontraktor

Hierarki jabatan umum dalam sebuah perusahaan:

1. Direktur utama
2. Direktur
3. Manajer
4. *Chief* insinyur
5. Insinyur

Pada setiap komponen yang mengalami kegagalan dilakukan analisis menggunakan metode FMEA. Sehingga akar masalah kegagalan secara teknis bisa ditemukan. Setelah semua akar penyebab kegagalan pada setiap komponen diketahui, maka tahap selanjutnya adalah melakukan analisis akar penyebab kegagalan menggunakan FMEA pada objek manusia yang terlibat dari mulai tahap perencanaan hingga tahap konstruksi pada suatu proyek PLTM.

Analisis FMEA akan dilakukan pada konsultan perencana, konsultan pengawas (manajemen konstruksi), kontraktor, dan pemilik proyek.

Karena keterbatasan jumlah halaman, maka pada makalah ini hanya akan disampaikan hasil penerapan metode FMEA pada tingkat paling atas dan paling bawah yang dianggap memiliki peran besar terhadap terjadinya kegagalan.

Tabel 4 menunjukkan hasil penerapan metode FMEA untuk mencari akar penyebab kegagalan pada insinyur dari konsultan perencana. Pada Tabel 4, dapat dilihat bahwa kesalahan utama dari insinyur perencana adalah karena kurang memiliki kompetensi, lalai, dan tidak teliti. Selain itu kesalahan dari seorang insinyur perencana juga disebabkan karena *chief* insinyur dan direktur yang lalai dalam melakukan pengawasan.

Tabel 5 menunjukkan hasil penerapan metode FMEA untuk mencari akar penyebab kegagalan pada kontraktor pada saat pelaksanaan pembangunan proyek.

Pada Tabel 5, dapat dilihat bahwa kesalahan utama dari kontraktor adalah karena kontraktor melakukan kecurangan saat memenangkan lelang tender karena ingin mendapat keuntungan yang besar dari pembangunan proyek. Selain itu, kesalahan kontraktor yang berpotensi menyebabkan kegagalan adalah nilai kontrak yang terlalu murah, dan terjadi miskomunikasi antara pemilik dengan kontraktor sehingga kontrak menjadi tidak jelas.

Tabel 6 menunjukkan hasil penerapan metode FMEA untuk mencari akar penyebab kegagalan pada pemilik proyek pada saat tahap perencanaan dan pelaksanaan proyek.

Pada Tabel 6, dapat dilihat bahwa kesalahan utama dari pemilik proyek adalah karena tidak melakukan lelang tender dengan benar atau lelang yang dilakukan secara akal-akalan. Hal tersebut bisa terjadi karena adanya sifat keserakahan pada pemilik proyek dan penerimaan uang suap dari kontraktor yang memenangkan tender proyek.

Dengan menerapkan FMEA pada objek manusia, maka akar penyebab kegagalan dapat diketahui berdasarkan nilai RPN. Nilai RPN yang tinggi berpotensi menyebabkan kegagalan utama pada sistem. Cara paling mudah untuk menurunkan nilai RPN adalah dengan meningkatkan keterdeteksian sistem, sehingga resiko kegagalan dapat dengan mudah dideteksi sebelum kegagalan terjadi.

Kesimpulan

Dengan menerapkan analisis mode dan efek kegagalan untuk analisis forensik pada studi kasus kegagalan di PLTM maka akar masalah dari kegagalan manusia dapat ditemukan dan diharapkan kegagalan manusia tidak terjadi lagi di kemudian hari.

Penghargaan

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, FTMD ITB atas dukungan dan bantuan dana untuk penelitian ini.

Referensi

- [1] H. D. Setio, Studi Perawatan Jaringan Jalan Rel Kereta Api Berbasis Keandalan (RCM), "*Jurnal Dinamika Teknik Sipil, UMS*, Bd. 9, pp. 163-173, 2009.
- [2] Sangriyadi Setio, Manual Kuliah Perawatan Mesin, FTMD ITB, 2000.
- [3] R. Y. Puspitasari, S. Setio dan S. Rachmawati, Penerapan Analisis Mode dan Efek Kegagalan Berbasis Keandalan Pada Pembuatan Mobil Hemat Energi Tim Cikal ITB, "*in Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTM XIV)*, Banjarmasin, 2015.
- [4] Omdhal P., Reliability, availability, and Maintainability Dictionary, Milwaukee: ASQC Quality Press, 1988.
- [5] H.D. Stamatis, Failure Mode and Effect Analysis-FMEA from Theory to Execution, Milwaukee: ASQC Quality Press, 1995.

Tabel 4. Tabel penerapan FMEA pada insinyur perencana

Proyek: PLTM				Analisis Mode dan Efek Kegagalan (FMEA)						Nomor: 4				
Sistem: Pondasi roboh										Tanggal: 28 Agustus 2018				
Sub - sistem: Insinyur Perencana										Halaman: 1 dari: 1				
No.	Fungsi	Kegagalan fungsi	Mode kegagalan	Efek	Penyebab kegagalan	Keparahan	Keseringan	Deteksi	RPN	Tindakan rekomendasi	Baru			
											Keparahan	Keseringan	Deteksi	RPN
1.	Menentukan dimensi pondasi agar penurunan pondasi tidak melebihi 2 cm untuk rentang antar pipa 20m	Hasil desain pondasi naik 4 cm dan miring melebihi 10 derajat	1. Input data salah 2. Salah perhitungan 3. Salah menentukan asumsi	1. Pipa menjadi patah 2. Drag di dalam pipa menjadi tinggi 3. Pondasi retak 4. <i>Expansion joint</i> patah	1. Insinyur tidak kompeten	7	5	5	175	1. Merekrut insinyur yang memiliki kompetensi dan pengalaman kerja lebih dari 3 tahun	6	4	3	72
					2. Insinyur lalai dan tidak teliti	7	4	4	112	2. Membayar insinyur dengan bayaran tinggi sesuai prestasi kerja	5	4	3	60
					3. <i>Chief</i> insinyur tidak kompeten	6	4	4	96	3. Menegur chief insinyur jika lalai dan melakukan pemotongan gaji	5	4	3	60
					4. <i>Chief</i> insinyur lalai dan tidak teliti	5	6	4	120	4. Menegur dan memberikan hukuman pada chief insinyur yang lalai	3	4	3	36
					5. Perusahaan membayar insinyur dengan gaji yang rendah	4	7	5	140	5. Mengulas ulang nilai kontrak sebelum diambil	3	5	4	60
					6. Perusahaan merekrut pegawai tidak sesuai kualifikasi	4	5	5	100	6. Melakukan rekrutmen pegawai sesuai kualifikasi	4	4	3	48
					7. Terlalu banyak pekerjaan yang ditangani	5	4	4	80	7. Menunjuk asisten untuk membantu pekerjaan direktur	4	4	2	32
					8. Perusahaan mengambil kontrak dengan harga murah	4	5	6	120	8. Mengganti direktur jika terbukti melakukan kebohohan	3	4	4	48
					9. Perusahaan ingin mendapatkan keuntungan yang besar	4	5	4	80	9. Membuat aturan baru untuk membatasi keuntungan perusahaan	3	4	3	36

Tabel 5. Tabel penerapan FMEA pada kontraktor

Proyek: PLTM				Analisis Mode dan Efek Kegagalan (FMEA)						Nomor: 4				
Sistem: Pondasi roboh										Tanggal: 28 Agustus 2018				
Sub - sistem: Kontraktor										Halaman: 1 dari: 1				
No.	Fungsi	Kegagalan fungsi	Mode kegagalan	Efek	Penyebab kegagalan	Keparahan	Keseringan	Deteksi	RPN	Tindakan rekomendasi	Baru			
											Keparahan	Keseringan	Deteksi	RPN
1.	Melaksanakan konstruksi sesuai dengan dimensi dan spesifikasi yang telah direncanakan dan ditentukan di dalam kontrak	Hasil konstruksi tidak sesuai dengan spesifikasi dan rusak setelah 6 bulan pasca pembangunan	1. Kontraktor melakukan kecurangan dengan mengurangi dimensi proyek 2. Kontraktor menggunakan material yang tidak sesuai dengan spesifikasi atau kualitasnya buruk 3. Kontraktor tidak melakukan tahapan konstruksi dengan benar	1. Pipa menjadi patah 2. Pondasi retak 3. Drag dalam pipa meningkat 4. <i>Expansion joint</i> patah 5. Pipa terkorosi	1. Nilai kontrak terlalu murah	5	5	4	100	1. Mengulas ulang nilai kontrak sebelum disetujui	3	4	3	36
					2. Kontraktor ingin mendapatkan keuntungan besar	4	4	5	80	2. Memberikan hukuman pidana pada kontraktor yang terbukti korupsi	3	3	4	36
					3. Kontraktor memenangkan lelang tender dengan cara memberikan suap	6	6	4	144	3. Melakukan <i>blacklist</i> terhadap kontraktor yang curang dalam tender	4	4	3	48
					4. Kontrak kurang jelas / detail	5	5	4	100	4. Berkomunikasi kembali dengan pihak pemilik terkait kontrak yang kurang jelas	4	3	3	36
					5. Kontraktor memberikan suap kepada konsultan pengawas	5	6	6	180	5. Memberikan hukuman pidana kepada kontraktor yang terbukti melakukan suap	3	4	4	48
					6. Kontraktor merekrut tenaga kerja yang kurang kompeten	6	7	3	126	6. Menggunakan jasa konsultan HRD untuk mendapatkan kandidat tenaga kerja yang kompeten	4	5	2	40
2.	Memberikan laporan kemajuan proyek meliputi laporan harian, mingguan, dan bulanan kepada pemilik proyek	Laporan diberikan melebihi batas waktu yang ditentukan	1. Laporan tidak lengkap dan tertunda	1. Proyek tidak selesai tepat waktu 2. Jumlah bahan-bahan material yang masuk, tenaga kerja, dan biaya operasi tidak terdata.	1. Sistem manajemen yang buruk	4	5	4	80	1. Membuat sistem manajemen baru	3	4	3	36
					2. Komunikasi antar anggota tim tidak berjalan dengan baik	4	4	6	96	2. Membuat sistem jalur komunikasi antar tim	3	2	4	24
					3. Manajer kurang melakukan <i>follow up</i> terhadap anggota tim	4	5	6	120	3. Melakukan <i>follow up</i> terhadap anggota tim minimal 2 kali dalam 24 jam	3	4	4	48

Tabel 6. Tabel penerapan FMEA pada pemilik proyek

Proyek: PLTM				Analisis Mode dan Efek Kegagalan (FMEA)						Nomor: 5				
Sistem: Pondasi roboh										Tanggal: 28 Agustus 2018				
Sub - sistem: Pemilik										Halaman: 1 dari: 1				
No.	Fungsi	Kegagalan fungsi	Mode kegagalan	Efek	Penyebab kegagalan	Keparahan	Keseringan	Deteksi	RPN	Tindakan rekomendasi	Baru			
											Keparahan	Keseringan	Deteksi	RPN
1.	Memberikan biaya perencanaan dan pelaksanaan proyek kepada konsultan perencana, pengawas, dan kontraktor	Hasil proyek yang diterima pemilik tidak sesuai perencanaan	1. Hasil proyek buruk atau tidak sesuai dengan anggaran biaya 2. Hasil proyek rusak 6 bulan pasca pembangunan	1. Pipa menjadi patah 2. Pondasi retak 3. Drag dalam pipa meningkat 4. <i>Expansion joint</i> patah 5. Pipa terkorosi	1. Pemilik salah dalam memilih konsultan perencana, pengawas, dan kontraktor	5	5	5	125	1. Menggunakan jasa konsultan yang sudah terbukti memiliki kredibilitas dan reputasi yang baik	4	4	3	48
					2. Pemilik menerima suap dari pihak kontraktor yang memenangkan lelang tender	7	4	5	140	2. Membuat aturan ketat dalam lelang proyek	5	3	4	60
					3. Pemilik salah dalam memperkirakan anggaran biaya	5	5	4	100	3. Mengitung ulang dan melakukan survei anggaran biaya supaya tidak terjadi penyimpangan anggaran	4	4	3	48
					4. Pemilik tidak memberikan deskripsi yang jelas mengenai proyek	6	5	5	150	4. Memberikan deskripsi yang jelas tentang proyek yang diharapkan kepada perencana, pengawas, dan kontraktor	5	4	3	60
					5. Lelang kontrak dilakukan tidak benar atau direkayasa	7	5	5	175	5. Membuat aturan ketat dalam lelang proyek	6	4	3	72

