**OPTIMASI INTERVAL PEMELIHARAAN PERIODIK**

**BERDASARKAN ANALISA TERHADAP**

***RELIABILITY, AVAILABILITY DAN MAINTAINABILITY* (RAM)**

**DI PLTA SAGULING**

**TOTO WARDOYO**

**Magister Teknik Industri Universitas Pasundan**

**Jl Sumatra no.41 Bandung**

**toto,wardoyo@gmail.com**

**ABSTRAK**

Di dalam operasi dan pemeliharaan pembangkit listrik, faktor ketersediaan atau kesiapan adalah salah satu yang sangat penting untuk mengukur kinerja suatu pembangkit. Kinerja yang tinggi ini dapat dicapai jika kehandalan (*reliability*) dari pembangkit senantiasa dijaga pada nilai yang tinggi sehingga tingkat resiko kegagalan menjadi rendah. Namun hal ini membutuhkan sebuah interval dan durasi *Preventif Maintenance* (PM) yang maksimal. Di sisi lain biaya juga akan bertambah jika frekuensi PM ditingkatkan. Maka diperlukan keseimbangan antara tiga faktor ini kinerja, resiko dan biaya. Penelitian ini dimaksudkan untuk melakukanoptimasi interval dan durasi pemeliharaan periodik PLTA Saguling berdasarkan karakterikstik RAM (*Reliability , Availability, Maintainability*) yang disimulasikan dengan tiga model kebijakan anggaran operasional yaitu minimum syarat kehandalan, syarat anggaran maksimum dan minimalkan total biaya untuk mencapai kehandalan optimal.

*Kata kunci*: Reliability, Interval dan Durasi Pemeliharaan, Optimasi Biaya Pemeliharan.

Permasalahan lain yang sangat penting yang dihadapi pemillik asset adalah perencanaan anggaran. Banyak perusahaan ingin mempertahan atau bahkan menaikkan kinerja dari asset yang mereka miliki namun terbatasi oleh jumlah anggaran yang ada. Sebagian perusahaan juga memilih untuk meminimalkan anggaran meskipun mereka sadar akan dampaknya pada resiko dan kinerja asset. Pada akhirnya perusahaan selalu ingin agar alokasi anggaran yang mereka keluarkan dapat memberikan keuntungan dan mafaat kepada perusahaan dengan korelasi yang lebih kuantitatif.

Dalam perkembangan ilmu managemen kehandalan selanjutnya disebut RAM (Reliability, Availability, and Maintainability). Hal ini untuk lebih untuk lebih menyatukan pembahasan antara ketersediaan yg merupakan sisi kinerja asset,

1. Pendahuluan

Pelaku industri yang akan menaikkan kinerja dari peralatannya harus juga memahami tentang resiko yang ada padanya. Hal in karena terkadang margin kenaikan kinerja tidak sebanding dengan kenaikan tingkat resiko yang akan diterima. Tingkat resiko sebuah asset pembangkit dapat dilihat dari sejauh mana tingkat kehandalannya (*reliability*). Pembangkit yang memiliki kehandalan yang tinggi akan memiliki tingkat resiko yang rendah dan demikian sebaliknya. *“Reliability is a critical factor that will influence the estimation of plant productivity”* (Freiheit and Hu dalam M Chan, 2006). Dengan mengetahui nilai *reliability* maka estimasi terhadap ketersediaan dan target produkstivitas suatu pembangkit akan lebih akurat.

**Tujuan Penelitian ini adalah:**

1. Mengukur kehandalan (reliability), ketersediaan (Availability) dan kemampuan rawat (maintainability) peralatan PLTA Saguling 5 tahun terakhir.
2. Menganalisa besarnya pengaruh penyesuaian kebijakan anggaran pemeliharaan periodik terhadap kehandalan , kemampurawatan dan pencapaian kinerja operasional PLTA Saguling.
3. Menentukan model pemeliharaan periodik yang dapat digunakan oleh PLTA Saguling agar kinerja operasionalnya optimal memenuhi keseimbangan faktor kinerja, resiko dan biaya untuk mencapai standar kinerja internasional.

**Pembatasan dan Asumsi**

Pengambilan data riwayat pemeliharaan adalah pada batas level peralatan saja dan tidak sampai ke batas komponen peralatan. Hal ini dilakukan mengingat banyaknya jumlah peralatan dan kompleksitas permasalahan.

Asumsi penting yang digunakan dalam penelitian ini adalah bahwa data biaya pemeliharaan dan riwayat peralatan PLTA 2010 sampai dengan 2016 adalah valid.

**Tinjauan pustaka**

PLTA memanfaatkan energi potensial air dan menggunakan proses sederhana untuk mengubah energi tersebut menjadi listrik. Dalam proses ini air ditampung dalam sebuah waduk , dialirkan melalui pipa bertekanan, memutar turbin dan generator, menghasilkan listrik dan disalurkan memalui sebuah transformer dan kabel-kabel transmisi

Ada bermacam-macam definisi tentang preventive maintenance namun pada dasarnya semuanya berdasar kepada waktu ( time-driven). Dalam definisi lain, kegiatan pemeliharaan adalah kegiatan yang mengacu kepada jam operasi dari peralatan (Mobley, 2002). Aktivitas yang dilakukan dalam pemeliharaan ini berupaya mencegah terjadinya kegagalan atau

reliability yang merupakan ukuran nilai resiko, dan maintainability yang merupakan faktor biaya. RAM adalah karakteristik yang melekat dari sebuah sistem peralatan, yang mana berpangkal pada design dan sangat mempengaruhi biaya waktu manfaat selama kepemilikan Mitchel (2006).

Implementasi RAM dalam upaya optimalisasi dan efisiensi produksi sudah banyak digunakan di industri strategis negara-negara maju seperti penerbangan, nuklir, gas dan minyak bumi, dan transportasi. Para pelaku industri di negara-negara maju ingin ada optimalisasi terhadap pemeliharaan periodik yang mereka lakukan karena pemeliharaan ini berdampak pada pengeluaran biaya yang signifikan dan kehilangan kesempatan produksi. Namun masih sedikit informasi yang didapatkan tentang implementasinya di industri yang ada di Indonesia.

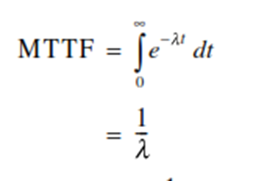
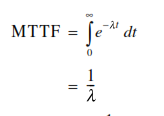
Penelitian RAM di PLTA belum banyak dilakukan sehingga perlu dilakukan sebuah penelitian yang dapat menjadi sebuah gambaran bagaimana pengoperasian PLTA yang optimal ditinjau dari beberapa sisi baik teknik ataupun ekonomi. PLTA banyak tersebar dan beroperasi di Jawa Barat dengan beragam ukuran kapasitas produksi sehingga hasil penilitian ini dapat dijadikan pilot project penelitaian RAM di Industri pembangkit kelompok PLTA di Indonesia.

**Perumusan Masalah**

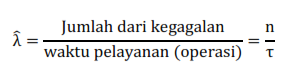
Berdasarkan uraian di atas, maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimanakah kehandalan (reliability), ketersediaan ( availability) dan kemampuan rawat (maintainability) peralatan PLTA Saguling dalam 5 tahun terakhir.
2. Berapa besar pengaruh penyesuaian kebijakan anggaran operasional terhadap kehandalan, kemampuan rawat dan pencapaian kinerja operasional PLTA.
3. Pemeliharaan periodik seperti apakah yang dapat digunakan oleh operator PLTA agar kinerja operasinya optimal memenuhi keseimbangan faktor kinerja, resiko (berbasis RAM) dan biaya untuk mencapai standar internasional .

Dalam manajemen pemeliharaan preventif , pemeliharaan mesin dijadwalkan berdasar atas nilai statistic dari MTTF. Waktu rata-rata terjadi kegagalan atau disebut Mean Time To Failure (MTTF) dapat dihitung dengan formula sebagai berikut:



Data yang dibutuhkan untuk mengestimasi failure rate, λ adalah jumlah failure yang diobservasi, n, dan waktu pelayanan (operasi), τ. Sehingga estimasi failure rate, λ, dapat ditunjukan seperti dibawah ini



**Availability** adalah ketersediaan dari sebuah system dalam beroperasi. Ini merupakan status kondisi berbasis waktu tertentu. Hal ini merupakan total waktu “up time” atau waktu siap dan beroperasi dari sebuah system atau komponen. Persamaan dari ketersediaan ini secara umum adalah

A= MTTF/(MTTF+MTTR)

Dimana MTTR (Mean Time to Repair) adalah sebuah dasar pengukuran dari maintainability. Jumlah keseluruhan waktu perbaikan dibagi dengan dari system dibagi dengan jumalh kerusakan yang diperbaiki, dalam sebuah interval tertentu yang di tetapkan (Military Handbook, 1998).

Kemampurawatan (***Maintainability***) adalah karakteristik dari peralatan yang menggambarkan kemungkinan bahwa sebuah system atau peralatan danpat dipelihara atau dirawat pada sebuah batas waktu yang diinginkan dengan ketentuan prosedur dan sumberdaya yang ditetapkan.

kerusakan pada sebuah peralatan atau system peralatan, dengan sebuah program yang terjadwal, sistematis, tindakan koreksi secara dini, dan berupaya mempertahankan fungsi kerja peralatan dalam sebuah sistem. Beberapa aspek yang diperhatikan dalam pemeliharan preventif adalah frekuensi inspeksi, interval pemeliharaan, panduan penggantian komponen, dan manajemen suku cadang (EBrahimi,2010). Maka kemudian beberapa industri memisahkan kembali pemeliharaaan preventif menjadi dua kelompok berdasar interval waktunya yaitu pemeliharaan rutin dan pemeliharaan periodic.

RAMS analysis lahir dari prediksi statistic terhadap kinerja komponen dan sering ditunjukkan dalam terminology probability. Jadi reliability adalah kemungkinan sebuah komponen atau system akan dapat memenuhi fungsinya pada waktu yang dipersyaratkan (Ghobbar, 2008).

Analisa RAMS menjelaskan karakteristik pada sebuah komponen atau system. Reliability fokus pada frekuensi kegagalan dari komponen, maintainability pada perbaikan atau frekuensi pemeliharaan pada komponen, availability pada total uptime dari komponen dan supportability fokus pada permintaan dari komponen untuk mendukungnya (Ghobbar, 2008).

Secara umum fungsi kehandalan (***reliability***) dinyatakan dalam bentuk persamaan eksponensial sebagai berikiut :



R(t) adalah fungsi keandalan dan F(t) adalah fungsi kegagalan. λ adalah frekuensi kegagalan. Pengukuran nilai reliability dinyatakan dengan sebuah notasi peluang sehingga tidak bersifat deterministik.

Fungsi keandalan R(t) pada multi komponen pada sebuah system dapat dibedakan menjadi dua bagian yaitu jaringan seri dan jaringan parallel.

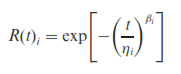
Jaringan Seri :

Jaringan Paralel :

T ,Sembarang konstanta yang diinginkan untuk siklus waktu pemeliharaan yang realistic,

Ii ,Interval pemeliharaan untuk komponen i

Jika dalam hal ini dianggap reliability system mengikuti distribusi weibull maka



R(t) fungsi kehandalan,

e adalah logaritma natural,

ηi adalah MTTF komponen,

βi parameter bentuk dari weibull

t adalah waktu.

Dan untuk tingkat system fungsi *reliability* menjadi



**Model 2** : Maksimalkan nilai reliability dengan biaya yang tersedia

Dalam bagian ini sasaran dan pembatas telah berubah. Sasarannya adalah mendapatkan nilai interval pemeliharaan yang terbaik untuk nilai reliability yang maksimal terhadap biaya yang tersedia. Model optimasinya dapat dituliskan sebagai berikut :

Maksimalkan



Mengikuti batasan



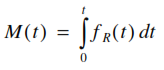
Dimana

Ii=αiT, Ii≥0, αi integer positif

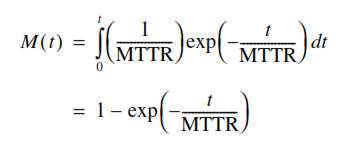
B ,biaya yang tersedia (rupiah/tahun),

Y siklus jam operasi pertahun

Maka fungsi kemampurawatan ini memprediksi bahwa perbaikan dapat dilakukan , yang dimulai dari t=0 dan selesai pada waktu t. Fungsinya adalah sebagai berikut

, 

Maka didapatkan :



dimana t = waktu, M(t) fungsi kemampurawatan

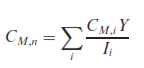
**Optimasi Interval Pemeliharaan Periodik**

Untuk melakukan optimasi terhadap pola pemeliharaan maka ada tiga model yang bisa dikembangkan sehingga optimasi biaya dan keandalan dapat dilakukan oleh para operator pembangkit listrik. (A. S. B. Tam et al,2006) menyampaikan beberapa model yang mudah dan realistis diimplementasikan. Model 1 dapat digunakan untuk mencapai kebutuhan keandalan yang minimum. Model 2 digunakan untuk menghitung interval pemeliharaan dengan pembatasan biaya. Dan model 3 digunakan ketika ingin menghitung interval pemeliharaan yang optimal dengan total biaya yang minimum.

**Model 1**: Minimalkan biaya dengan syarat batas kehandalan yang ditetapkan

Total biaya pemelihara untuk rentang waktu satu tahun dapat digambarkan sebagai berikut :

Minimalkan



Mengikuti batasan



Dimana Ii=αiT, Ii0, αi integer positif

CM,n ,Total biaya pemeliharaan dalam setahun n

CM,i , Biaya pemeliharaan untuk komponen i

R(t)System , Reliability dari system

R(t)REQ , Reliability yang ditetapkan

**Hasil dan Pembahasan**

**Daftar Asset dan Fungsi**

Peralatan utama pembangkit PLTA dibagi kedalam beberapa bagian hirarki dan fungsi dengan menggunakan model KKS (Kraftwerk-Kennzeichen System). KKS sangat dekat dengan standar internasional untuk klasifikasi peralatan pembangkit DIN 6779 dan IEC 61346 in particular. Dengan berdasar pada KKS ini PLTA Saguling pada setiap unitnya memiliki 6 system dan 15 sub system yang digambarkan di Tabel 1

Tabel 1. Hirarki Peralatan Utama PLTA



(Sumber Dokumen Enjinering PLTA Saguling)

**Pemeliharaan Pembangkit PLTA Saguling**

PLTA ini mempunyai beberapa jenis kegiatan pemeliharaan periodik seperti yang digambar di Tabel 4.2. Jenis pemeliharaan pembangkit dibagi menjadi 3 kategori yaitu Annual inspection (AI), General Inspection (GI), dan Major Inspection (MI).

Tabel 4.2. Interval dan durasi pemeliharaan

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Jenis Pemeliharaan | Interval ( Jam ) | Durasi (hari) | Keterangan |
| AI | 4000-5000 | 10 | Annual Inspection |
| GI | 25000-30000 | 24-30 | General Inspection |
| MO | 50000-60000 | 60-70 | Major Inspectiom |

**Model 3**: Minimalkan biaya total untuk interval pemeliharaan yang optimal.

Model ini berupaya mengoptimalkan total biaya, yaitu biaya kegiatan pemeliharaan dan perkiraan kerugian biaya tidak berproduksi. Hal ini karena ketidakhdandalan dari sebuah sistem adalah kemungkinan sebuah sitem tidak berfungsi atau berproduksi, dan ini disebut dengan istilah perkiraan kerugian biaya tidak berproduksi (contohnya rupiah per jam). Maka perkiraan kerugian biaya tidak produksi adalah perkalian antara biaya tidak produksi per waktu dengan nilai ketidakhandalan untuk satu tahun siklus, yang ini bisa dituliskan sebagai :

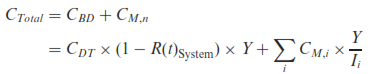


CBD , perkiraan kerugian karena tidak berproduksi

CDT , biaya tidak berproduksi per jam

Karena tujuan dari model ini adalah untuk menentukan pola interval pemeliharan yang optimal sehingga total biaya menjadi minimal maka model ini dapat dituliskan dengan persamaan :

Minimalkan



Dimana

Ii=αiT, Ii≥0, αi integer positif, dan

CTotal ,Total biaya keseluruhan

**Pengolahan Data dengan Aplikasi Software**

Perhitungan reliability peralatan akan dilakukan dengan bantuan statistic sotfware Minitab13. Hal ini dapat mempercepat perhitungan nilai reliability peralatan. Fasilitas yang ada di software ini memuat analisa grafik beberapa fungsi seperti weibull, eksponensial, dan lognormal. Hal ini akan mempercepat perhitungan nilai kehandalan peralatan dengan data yang terbatas.

Software MINITAB 13 dapat melakukan uji goodness of fit dengan metoda Anderson-Darling untuk melihat pola distribusi kegagalan dari peralatan yang ada.

**Analisa *Reliability***

Dalam perhitungan seberapa besar tingkat kehandalan (reliability) sebuah asset dapat ditentukan melalui 2 cara (Iswahyudi, 2010), yaitu: 1)Mengetahui secara langsung dari pabrik dari pembuat (vendor equipment). Hal ini dikenal dengan nama inherent reliability. 2)Mengetahui besarnya tingkat kehandalan asset dengan cara mengevaluasi data operasi dan data perawatan aset, untuk kemudian dihitung reliability perasionalnya dengan persamaan model matematis

Dalam analisa ini (Iswahyudi, 2010) menjelaskan bahwa distribusi eksponensial digunakan terhadap suatu komponen dengan jumlah kegagalan di bawah 5 kali. Namun pada penelitian ini distribusi eksponensial digunakan untuk mencari nilai MTTF yang memiliki gangguan di bawah 4 kali. Hal ini mengingat jumlah unit yang adalah 4 sehingga cukup representative terhadap kondisi lapangan.

Untuk peralatan yang memiliki minimal 4 data riwayat gangguan maka analisanya menggunakan analisa statistic dengan bantuan software MINITAB13. Untuk peralatan yang tidak ada riwayat gangguannya maka ditetapkan nilai keandalannya sama dengan 1 (satu).

Dan khusus peralatan BAC dan MEY yang mengalami 2 kali gangguan, sesuai yang dijelaskan (Hoyland dan Rausand (1994) dalam (OREDA 2002), maka nilai MTTF dihitung dengan menggunakan rata-rata gangguan selama 6 tahun yang berasal dari 4 unit,

**Riwayat Gangguan Peralatan**

Penelitian ini mengambil data riwayat gangguan selama 6 tahun terakhir mulai 1 Januari 2011 sampai dengan 31 Desember 2016 , seperti digambarkan di Tabel 3.

Dari Tabel 4.4. kita mendapati bahwa peralatan yang paling banyak mengalami kegagalan adalah MKC yaitu sebanyak 10 kali dan sementara MEB, MKD,MKX,BAY,MPR sebanyak 0 kali atau tidak pernah mengalami gangguan. Jika dilihat lebih tinggi maka unit 4 memiliki jumlah gangguan tertinggi yaitu 24 kali dan yang terendah adalah unit 3 sebanyak 6 kali.

**Parameter Ketersediaan (Availability Factor)**

Pola pemeliharaan di atas akan menghasilkan suatu nilai kinerja availability pembangkit sesuai dengan formula yang tertuang di PROTAP DKIKP (PT PLN, 2007). Dengan mengabaikan unsur forced outage dan schedule outage lainnya maka perhitungan AF (Availability Factor) dapat menggunakan menggunakan formula berikut:

POH = Planed Outage Hours, PH = Period Hours (8760 h), AH = Availability Hours, AH = PH-POH

Dan dengan mengambil nilai maksimal dari POH yang diijinkan pada tiap jenis pemeliharaan maka nilai rata-rata AF yang akan dicapai oleh setiap unit pembangkit selama siklus 10 tahun secara teoritis adalah 95,34%. Hal ini ditunjukkan di tabel..4

Tabel 3. Data Riwayat Gangguan pada Level SubSystem



Tabel 4. Nilai Availability Factor Interval 10 tahun



dengan perhitungan MTTF *(Mean Time To Failure)* sebagai berikut :

MTTF = (jam)

t = waktu agregat layanan (jam)

n = jumlah kegagalan

Sehingga MTTF untuk subsistem BAC dan MEY adalah : dan memiliki distribusi eksponensial.

Analisa distribusi kegagalan untuk peralatan dengan data gangguan minimal 4 kali menggunakan software MINITAB 13. Rincian keseluruhan di tabel 5.

Tabel 5 . MTTF pada Level System



Selanjutnya dilakukan uji goodness of fit dengan metoda Anderson-Darling yang tersedia di software MINITAB 13 untuk sub system peralatan MEA yang memiliki jumlah gangguan minimal 4. Uji dilakukan untuk 4 kategori distribusi yaitu Weibull, Lognormal base e, Exponential dan Normal . dan Hasilnya dapat dilihat pada tabel 6

Tabel 6 Hasil Tes Good of Fitness untuk Subsystem MEA

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **No** | **Distribution** | **Anderson-Darling** | |
| **Result(adj)** | **Rank** |
| 1 | Weibull | 2.167 | 2 |
| 2 | Lognormal base e | 2.215 | 4 |
| 3 | Exponential | 2.169 | 3 |
| 4 | Normal | 2.002 | 1 |

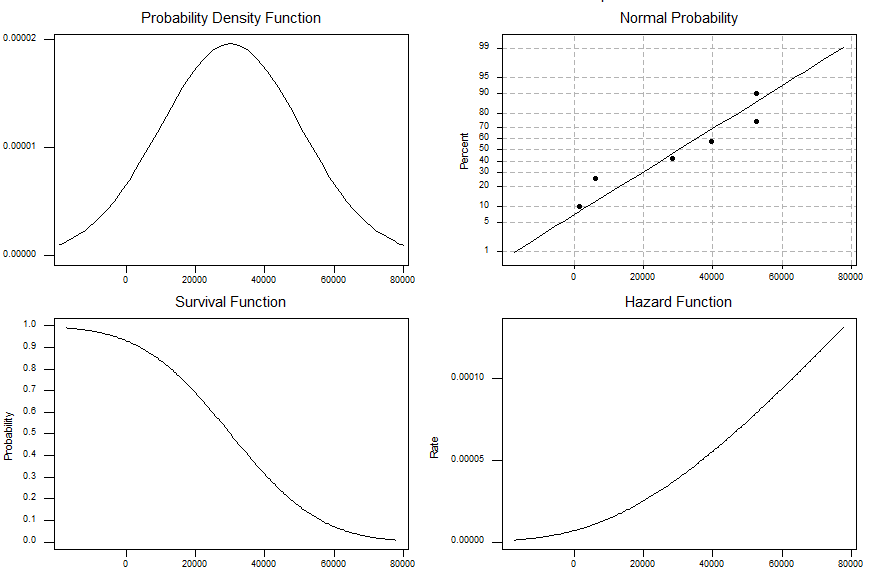
Dari tabel diatas dapat disimpulkan untuk MEA memiliki distribusi dengan nilai terrendah yaitu Normal 2.002 dan peringkat kedua adalah Weibull 2.167.

Selanjutnya dilakukan analisa distribusi peluang kegagalan untuk MEA dengan mengikuti distribusi Normal . Dan hasilnya adalah Location 30072, Scale 20419, MTTF 30072. Grafik dari perhitungan ini dapat dilihat di gambar grafik 1

Mengingat peringkat kedua dari goodmess of fit nilainya sangat dekat maka di sini diuji kembali dengan distribusi Weibull. Dan hasilnya adalah sebagai berikut, Shape (ß) 1.1217, Scale (Time To Failure) 31113, dan MTTF 29834. Hasil MTTF Weibull ini sangat dekat dengan hasil sebelumnya menggunakan distribusi Normal.

(Abernethy,2004) menjelaskan keuntungan dari Weibull analysis adalah kemampuannya untuk menghasilkan analisa dan prediksi kegagalan yang akurat dan beralasan dengan jumlah sampel data yang sangat sedikit. Atas dasar ini kemudian analisa kegagalan pada penelitiannya ini hanya menggunakan model analisa Weibull. Dengan harapan ada keseragaman parameter pada perhitungan analisa optimasi biaya nantinya maka perhitungan reliability pada setiap subsystem peralatan yang ada mengikuti distribusi Weibull. Adapun peralatan yang tidak memiliki jumlah data kurang dari 4 maka dianggap memiliki distribusi eksponensial dengan nilai β = 1. Secara keseluruhan nilai MTTF dan β seperti pada tabel 7

Gambar 1. Gambar Grafik Distribusi Normal untuk MEA



Hubungan reliability antar komponen dari PLTA dapat dilihat di gambar 4.3 terdapat 15 peralatan yang hubungannya serial, tidak ada sub system peralatan yang memiliki hubungan parallel. Dalam hubungan serial maka kegagalan pada sebuah peralatan dapat menyebabkan kegagalan satu unit PLTA. Dengan demikian nilai reliability dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

RUnit = (RMEA x RMEB x RMEA x RMED x RMEX x

RMEY ) x (RMPR )x (RMKX x RMKY x

RMKD x RMKC x RMKA ) x (RBAC x RBAY )

x (R CWF)

Setelah semua variable penting dari reliability didapatkan maka perhitungan reliability R(t) dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut :

R(t)=

Dimana , t adalah waktu pengamatan reliability

Kemudian dilakukan perhitungan untuk menentukan failure rate pada pengamatan interval waktu 8760 jam, dimana waktu ini adalah layanan selama 1 tahun kalender, dengan persamaan sebagai berikut :

λ=

λ = Failure rate (kegagalan/jam)

Y = Waktu pelayanan per tahun

Sebagai contoh laju kegagalan (λ) untuk subsystem MKA (generator) dengan interval waktu layanan 4500 jam adalah :

λ=

Analisa distribusi kegagalan pada tingkat dengan unit dapat dilakukan dengan cara yang sama pada perhitungan di tingkat subsystem. Data gangguan di tingkat unit semuanya lebih dari 4 data gangguan sehingga hanya satu cara yang digunakan yaitu analisa dengan menggunakn software MINITAB. Hasilnya dapat dilihat di tabel 8 dan gambar 2

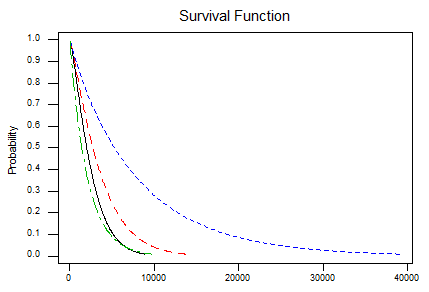
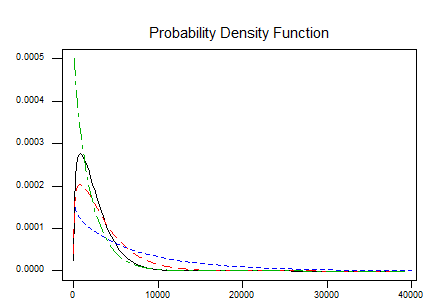
Tabel 7 Tabel Parameter Reliability pada Level Subsytem PLTA Saguling



Tabel 8 Tabel Parameter Reliability pada Unit-Unit PLTA Saguling

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **Unit 1** | **Unit 2** | **Unit 3** | **Unit 4** |
| **Jumlah gangguan (n)** | 20 | 12 | 5 | 24 |
| **Rata-rata Durasi gangguan (jam)** | 5.86 | 3.36 | 28.09 | 40.65 |
| **MTTF (jam)** | 2481 | 3545 | 7990 | 2063 |
| **β** | 1.2725 | 1.1752 | 0.9456 | 0.9797 |
| **Failure Rate λ (8760h)** | 1.81 | 1.27 | 0.56 | 2.18 |

Gambar 2 Grafik Fungsi Padat Peluang dan Distribusi Komulatif Unit 1,2,3,4



**Perhitungan biaya pemeliharaan**

Rincian biaya pemeliharaan periodik yang digunakan dalam pembahasan di dalam penelitian ini adalah bersifat pembulatan dan tidak sama persis dengan kondisi yang ada.

Gambaran biaya periodik dilihat di tabel 10

Faktor biaya pemeliharaan ( CM)

Biaya penggantian dan perbaikan peralatan atau bisa disebut biaya pemeliharaan peralatan adalah biaya untuk memulihkan peralatan yang mengalami gangguan atau mengalami penurunan kondisi. Masing-masing biaya pemeliharaan pada system setiap tahunnya dapat dilihat di tabel 11. Biaya ini diasumsikan sama untuk semua unit.

Tabel 11. Biaya pemeliharaan Level system



Menurut (A. S. B. Tam et al,2006) Biaya penggantian dan perbaikan peralatan ini dikeluarkan untuk satu kali interval yang ditetapkan.

Contoh untuk melihat reliability dari MEA (Turbine) yang memiliki nilai λ = 0.29362 (8760jam) sehingga pada saat 1000 jam maka perhitungan keandalannya adalah ,

] = 0.01898

Dan jika kita masukkan nilai MTTF sebagi interval sebagian acuan untuk melihat relibiliity pada waktu interval maka akan didapatkan bahwa nilainya sama pada 0.37. Hal ini menunjukkan bahwa pada failure rate 1-0.37=0.63 unit akan mulai gagal. Hal ini bisa ditunjukkan di tabel 9 Jadi upaya untuk mendapatkan unit yang handal dapat dilakukan dengan menetapkan batas minimal reliability pada 0.37 %.

Tabel 9 Reliabilty pada titik MTTF



Tabel 10. Biaya Kegiatan Inspeksi.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Jenis Inspeksi | Biaya Pemeliharaan  (Rp Juta) | Kehilangan Produksi (Rp.Juta) |
| *Annual Inspection (AI)* | 600 | 2000 |
| *General Inspection (GI)* | 2300 | 4800 |
| *Major Inspection* | 15000 | 12000 |

CBD = Y

CBD = biaya perkiraan kerusakan

CDT = biaya kerusakan per jam

Ft = Laju kegagalan ( 1-Rt )

Y = waktu pelayanan = 8760 jam

Dari data Annual Inspection (AI) yang berdurasi 10 hari (240 jam) maka biaya kehilangan pendapatan per jam ( BP) dari PLTA per unit pembangkit dihitung sebagai berikut :

BP­­­ = = 8.3 jt/jam

Sehingga dengan memperhatikan rata-rata durasi gangguan pada setiap unit dapat memberikan gambaran bahwa biaya perkiraan kerusakan selama waktu layanan setahun (8760jam) adalah nilai biaya kehilangan pendapatan (BP) dikalikan dengan rata-rata durasi gangguan. Gambaran perhitungan rata-rata CBD dan CDT untuk system ME unit 1 selama pengamatan 6 tahun adalah sebagai berikut.

=

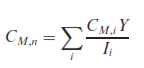
=Rp. 24,783,953.-

Td : total durasi gangguan

Bp: Biaya kehilangan pendapatan per jam

Nilai CDT yang merupakan nilai resiko biaya kerusakan dapat dihitung dengan langkah sebagai berikut :

Menurut (A. S. B. Tam et al,2006) Biaya penggantian dan perbaikan peralatan ini dikeluarkan untuk satu kali interval yang ditetapkan. Sehingga bila dalam satu tahun ada 3 kali siklus penggantian maka besar dari biaya totalnya adalah 3 x biaya pemeliharaan per satu interval. Penjelasan formula untuk biaya ini adalah sebagai berikut :



Dimana i: integer positif

CM,n: Total biaya pemeliharaan dalam setahun

Ii : Interval penggantian Komponen I

CM,i : Biaya pemeliharaan untuk komponen i

Y : Waktu layanan operasi dalam setahun

Faktor Biaya Resiko Kerusakan ( CBD)

Biaya resiko kerusakan (CDB) adalah nilai perkiraan kerugian karena kerusakan peralatan. Biaya ini berdasar kepada perinsip bahwa semakin lama interval waktu pemeliharaan maka semakin turun nilai kehandalan peralatan atau semakin tinggi nilai laju kegagalan.

Dalam kondisi ini maka semakin banyak komponen di dalamnya yang mengalami kegagalan dan atau semakin parah tingkat kerusakan yang dialami sehingga waktu durasi perbaikan dan biaya yang dibutuhkan akan semakin tinggi. (A. S. B. Tam et al,2006) kemudian menjelaskan bahwa unsur dari biaya ini adalah biaya kerusakan (CDT) persatuan waktu dikalikan dengan nilai laju kegagalan dan waktu layanan dalam setahun. Dimana dapat ditulis sebagai berikut :

Tabel 4.13 Biaya Down Time ( CDT) dan CBD Pada Tingkat System



Untuk mendapatkan reliability yang lebih tinggi maka interval (I) harus dikurangi, tapi di sisi lain untuk mendapatkan biaya yang lebih rendah maka I harus ditambah. Kedua hal yang bertolak belakang ini mempunyai nilai optimal yang yang tergantung pada batasan yang akan diberikan (A. S. B. Tam et al,2006).

**Model 1 :**

**Pembatasan Nilai Reliability Minimum**

Untuk Model ini akan dihitung total biaya minimum yang bisa didapatkan jika reliability sebuah unit PLTA diminta 36%. Dengan menggunakan data reliability dan biaya pada unit 1 sebelumnya, kemudian dilakukan analisa model optimasi menggunakan Solver Ms Excel. Targetnya adalah mencari nilai biaya yang optimal melalui variasi perubahan interval pada setiap system sehingga batasan nilai reliability 30% tercapai. Hasilnya disajikan di tabel 12.

Hasilnya menunjukkan masing-masing dari system memiliki interval yang berbeda-beda. Bahkan untuk system MP memiliki interval hingga 43532 jam. Dalam kenyataannya para pengelola pembangkit lebih menginginkan keteraturan interval pemeliharaan selain pertimbangan proses bisnis, hal utama yang jadi perhatian adalah pencapaian kinerja availability.

Nilai biaya untuk keseluruhan system di masing-masing unit di gambarkan pada tabel 11.

Total biaya pemeliharaaan adalah jumlah dari jumlah biaya pemeliharaan dalam setahun pengamatan dan biaya kerugian tidak produksi . Tujuan pembahasan nanti adalah berupaya meminimalkan total biaya ini. Hal ini dilakukan dengan mencari tahu interval pemeliharan yang optimal sehingga kemudian total biaya menjadi minimal. Sesuai penjelasan (A. S. B. Tam et al,2006) total biaya yang akan diminimalkan dapat dituliskan sebagai berikut :



Dimana CTotal : Total biaya keseluruhan

**Optimasi Interval Pemeliharaan**

Dengan diperolehnya data reliability peralatan dan biaya pemeliharaan maka dapat dilakukan optimasi biaya pemeliharaan yang terdapat di PLTA Saguling. Pembatas dalam perhitungan optimasi ini dapat dilakukan terhadap dua variable ini baik sisi reliability ataupun sisi pemeliharaan atau bahkan keduanya.

Selanjutnya dibuat kombinasi interval ME ( 3000,4000), MK (3000,4000), BA (7000,8000), CW (3000,4000), MP (7000,8000) dan CH ( 5000,6000). Sehingga didapatkan 64 kemungkinan kombinasi interval dengan hasil reliability yang mendekati nilai 0.3 . Hasil grafik hubungan reliability dan total biaya dapat dilihat di gambar 3

Gambar 3 Grafik Reliability dan Total Biaya



**Model 2 : Pembatasan Biaya Pemeliharaan**

Beberapa pengelola pembangkit terkadang harus memberlakukan pembatasan biaya pemeliharaan mengingat kondisi keuangan perusahaan yang harus meningkatkan efisiensi biaya produksi mereka. Dalam hal ini dimisalkan bahwa biaya maksimal yang diberikan adalah Rp. 1.5 M untuk Unit 2. Nilai reliability dan kombinasi interval pemeliharaan dapat dilihat di tabe 14.

Tabel 14 Optimasi biaya Model 2 pada Unit 2



**Analisa sensitivitas Model 2**

Model dua ini digunakan mencari nilai reliability maksimum dengan batasan biaya yang diberikan.

Tabel 12 Penerapan Model 1 di Unit 1 Reliability Min 0.3



Berdasar pertimbangan di atas maka pembatas tambahan dapat diberlakukan terhadap nilai interval. Dalam contoh kali ini akan dibatasi semua system interval (I) maks 8000 jam, ME dan MK sama dengan 3500 jam. Hasilnya dapat dilihat di tabel 13. Dimana hasilnya ada kenaikan biaya dibanding perhitungan sebelumnya yang membebaskan interval dari masing-masing system peralatan. Dan dapat diketahui bahwa untuk mendapatkan reliability 0.3 maka biaya yang dibutuhkan adalah Rp. 1.431.784.000/tahun.

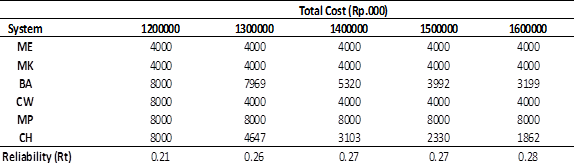
Tabel 13.Penerapan Model 1 di Unit 1 Reliability Min 0.3



**Analisa sensitivitas Model 1**

Pengujian model 1 ini dengan menghitung beragam nilai keandalan unit yang berdampak pada perubahan kombinasi interval dan biaya yang dibutuhkan. Hasilnya adaalah bahwa kenaikan reliability membutuhkan interval yang lebih rapat atau rendah. Kenaikan nilai reliability akan menaikkan biaya yang bersifat eksponensial seperti yang sudah dibahas pada pembahasan sebelumnya. Perhitungan dibatasi dengan nilai interval maksimal di 8000 jam guna melihat nilai biaya yang dibutuhkan dalam 1 tahun kalender.

Tabel 15 Tabel Sensitivitas Model 2



Oleh karena itu Model 1 Pembatasan Nilai Reliability lebih tepat digunakan oleh managemen PLTA Saguling untuk melakukan upaya menaikkan reliability dengan biaya yang optimal khususnya di unit 1,2,4. Upaya peningkatan keandalan bisa menggunakan unit 3 sebagai rujukan yang cukup rasional sesuai data di lapangan dimana keandalannya bisa mencapai 33.6 %.

Implementasi model 1 di Unit 1,2,4 PLTA Saguling ini perlu memperhatikan kondisi operasi seperti maintainability peralatan, variasi interval, dan kebutuhan pelanggan. Batasan-batasan ini penting sehingga Reliability, Availability dan Maintainability dapat terpenuhi secara optimal pada proses analsia.

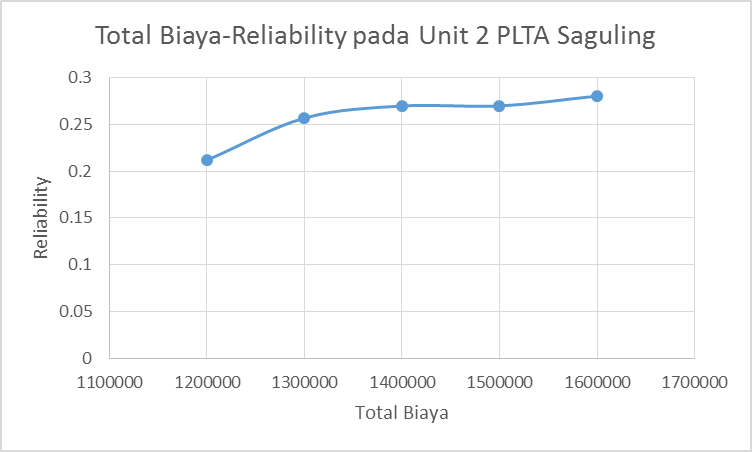
Beberapa pembatas yang dimaksud adalah pertama dimana reliability diharapkan mampu mencapai lebih dari 33,6%. Batasan kedua adalah bahwa minimal interval harus lebih dari 2000 jam. Batasan ke tiga adalah bahwa maksimal interval adalah 8000 jam. Dan hal terakhir yang perlu dipersyaratkan adalah bahwa semua interval harus merupakan kelipatan 1000.

Maka pemodelan matematiknya dapat diberikan sebagai berikut :

Minimalkan :

Dari gambar 4 didapatkan informasi bahwa kenaikan biaya akan menaikkan nilai keandalan. Dimana hubungan anatara dua parameter ini tampak mengikuti garis polynomial.

Gambar 4 Grafik Total Biaya-Reliability Model 2

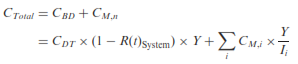


**Optimasi Interval Pemeliharaan Untuk PLTA Saguling untuk menaikkan RAM**

Setelah mengamati data riwayat gangguan di PLTA Saguling yang tinggi dan hasil perhitungan reliability menunjukkan bahwa nilainya juga sangat rendah. Pada waktu ke 8760 jam maka reliability pada setiap unit adalah Unit 1 0.7 % , Unit 2 5.5 % dan Unit 3 33.6% dan Unit 4 1.6%. Nilai ini ini menunjukkan bahwa hanya unit 3 yang menunjukkan keandalan yang tinggi. Sementara unit 1,2,4 kemungkinannya sangat besar bahwa dalam interval 8760 jam unit-unit ini akan mengalami gangguan (downtime).

Namun mengingat interval yang ada belum semua memenuhi kriteria kelipatan 1000 jam maka perlu dilakukan perhitungan kombinasi interval menggunakan tabel kombinasi interval yang memiliki 24 kemungkinan seperti yang ditunjukkan di Tabel 17 Dimana hasilnya menunjukkan bahwa reliability yang optimal adalah 0.34 dengan total biaya Rp. 1.610.258.000 dan interval (jam) ME 3000, MK 3000, BA 8000, CW4000, MP 8000 dan CH 5000.

Kemudian analisa dilanjutkan untuk unit 1,2 dan 4 dengan menggunakan Solver MsExcel menghasilkan tabel 4.22 sampai dengan tabel 4.24 .Mengingat data reliability menggunakan data yang sama maka interval yang didapatkan memiliki kesamaan dengan apa yang ada di perhitungan unit 1 yaitu mendekati pola interval (jam) ME 3000, MK 3000, BA 8000, CW4000, MP 8000 dan CH 5000. Sehingga perhitungan menggunakan tabel kombinasi interval tidak perlu dilakukan karena akan menghasilkan pola interval yang sama.



Dengan syarat



R(t) system ≥ 0.336

2000 ≤ Ii ≤ 8000 (jam)

Ii Kelipatan 1000

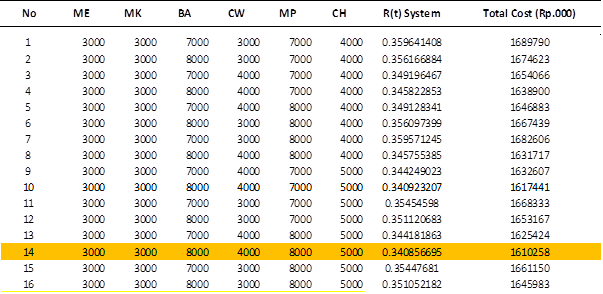
Dimana Ii =αiT,Ii≥0,T= Waktu Pemeliharaan dan αi =positive integer.

Hasil perhitungan menggunakan solver MsExcel untuk unit 1 ditampilkan pada tabel 4.20 Dapat diketahui bahwa ME dan MK sudah memiliki nilai yang berdekatan, semua interval di antara 2000-8000 jam. Dan persyaratan reliability minimal 0.336 sudah tercapai.

Tabel 16. Hasil Optimasi Biaya dengan Beberapa Pembatasan Interval



Tabel 17. Daftar Beragam Kejadian Interval



Namun demikian ada acara lain yang dapat dilakukan untuk meningkatkan reliability ini yaitu dengan memperbaiki kualitas peralatan pembangkit sehingga memiliki nilai MTTF yang lebih tinggi terutama pada beberapa peralatan yang memiliki tingkat gangguan yang tinggi seperti MEX (10786 jam), MKC (16557jam) dan MKA (13494jam).

Perhitungan untuk mendapatkan nilai reliability 0.336 dengan interval seragam pada 8000jam untuk semua system peralatan membutuhkan perubahan MTTF pada semua subsystem MEX, MKA, dan MKC menjadi 100921jam, 99749jam, 100215jam secara berurutan. Nilai keandalan dapat menjadi 0.336 seperti yang ditampilkan di Tabel 21

Tabel 21. Kenaikan Reliability dengan Perbaikan MTTF



Perbaikan MTTF yang merupakan pada dasarnya perbaikan kualitas komponen dan peralatan akan memunculkan biaya tambahan pada umumnya. Dari data sebelumnya diketahui pada tabel 4.14 bahwa biaya pemeliharaan tahunan adalah 600 juta rupiah pertahun. Jika menggunakan strategi perubahan interval maka dibutuhkan biaya pertahun sejumlah Rp (1511058000-600000000) = Rp.911.058.000 untuk kasus Unit 1. Maka perlu analisa efektivitas biaya sehingga perbaikan kualitas peralatan untuk perbaikan nilai MTTF tidak lebih tinggi dari nilai ini

Namun disini ada perbedaan nilai total cost diantara masing-masing unit yang dipengaruhi oleh Down Time Cost (CDT) yang berbeda-beda. Total Cost (Rp.000) dari terendah sampai dengan tertinggi secara berurutan adalah Unit 2 = 1508470, Unit 1 = 1511058, Unit 3 = 1553085 dan Unit 4 = 1562382 .CDT ini adalah risk cost yang nilainya dipengaruhi oleh riwayat jumlah dan durasi gangguan.

Tabel 18. Optimasi Biaya Unit 1 

Tabel 19. Optimasi Biaya Unit 2 

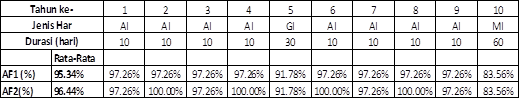
Tabel 20. Optimasi Biaya Unit 4



**Perbaikan MTTF Peralatan untuk Peningkatan Reliability**

Pada kasus PLTA Saguling dapat disimpulkan perlunya mengubah pola pemeliharaan dari Annual Inspection ( Interval 8760 jam) menjadi lebih variatif sehingga ada 4 interval pemeliharaan yang berbeda dalam satu tahun, yang berarti juga bahwa ada 4 kali waktu downtime yang terjadi selama interval setahun.

Tabel 22. Peningkatan Availability Factor karena kenaikan nilai MTTF Unit



**Penerapan Optimasi Interval Pemeliharaan dan Dampaknya Terhadap Kinerja Ketersediaan (*Availability*) Pembangkit**

Seperti yang sudah dibahas sebelumnya adalah bahwa reliabililty minimum untuk sebuah unit tidak gagal adalah 0.37%. Dengan dasar ini maka upaya untuk membuat sebuah unit memiliki waktu interval pemeliharaan lebih panjang dengan jaminan tetap memiliki kehandalan yang cukup dapat dilakukan dengan membuat optimasi nilai MTTF sehingga reliability tetap diatas 37% sesaat sebelum downtime/outage dilakukan. Dan dengan mengubah MTTF unit menjadi 17600 jam hal ini dapat dicapai.

Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai ketersediaan dengan mengubah interval pemeliharaan tahunan AI menjadi 2 tahun sekali. Durasi AI tetap sama 10 hari karena tidak ada perubahan desain system yang membuat pemeliharaan(MTTR) menjadi lebih lama. Hasilnya menunjukkan ada kenaikan rata-rata availability dalam interval waktu 10 tahun yang semula 96.34% menjadi 96.44%. Pencapaian nilai AF yang baru ini akan membuat PLTA Saguling mampu mencapai kinerja yang tinggi di level internasional. Hasil selengkapnya ditunjukkan di Tabel 22.

**Kesimpulan dan Saran**

Berdasarkan uraian bab sebelumnya maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Karakteristik RAM PLTA Saguling adalah sebagai berikut :

a. Kehandalan (reliability) peralatan PLTA Saguling dalam 6 tahun pengamatan adalah sangat rendah. Pada interval terendah 1000 jam tidak unit yang mencapai reliability 90%. Nilai tertinggi hanya dicapai unit 3 dengan reliability 86.9%. Unit 1, 2, dan 4 pada interval 4000 jam memiliki reliability kurang dari 37% sehingga secara teoritis hampir pasti unit akan mengalami kegagalan. Hanya Unit 3 yang mampu tetap handal pada interval 7000 jam. Dan dapat disimpulkan tidak ada unit yang mampu tetap beroperasi tanpa kegagalan sampai interval 8760 jam.

Pada level system beberapa peralatan memiliki nilai MTTF yang rendah dimana nilainya kurang dari 17520 jam ( 2 tahun operasi ). Perlatan tersebut adalah seperti MEX, MKA dan MKC yang secara berurutan memiliki MTTF (jam) 10786, 13494, dan 16557. Peralatan inilah yang membuat reliability unit PLTA secara keseluruhan menjadi rendah.

3. Pemeliharaan periodik perlu disesuaikan oleh operator PLTA agar kinerja operasinya optimal memenuhi keseimbangan faktor kinerja, resiko (berbasis RAM) dan biaya untuk mencapai standar internasional NERC . Dengan mengubah MTTF unit menjadi 17600 jam dimana ini juga bermakna bahwa semua peralatan yang ada harus memiliki nilai MTTF yang sama atau lebih tinggi, maka reliability tetap tinggi atau diatas 37% pada interval 17520 jam (2 tahun). Jika pemeliharaan Annual Inspection ( AI) dapat diubah menjadi Two Years Inspection maka ada kenaikan rata-rata availability factor dalam interval waktu 10 tahun yang semula 96.34% menjadi 96.44%.

**Saran**

Saran yang dapat diberikan peneliti kepada semua pihak yang menjadi pengelola PLTA Saguling dan peneliti yang mendalami analisa RAM adalah:

1. Pengelola PLTA Saguling segera melakukan tindakan perbaikan terhadap peralatan yang memiliki reliability rendah sehingga kinerja unit PLTA Saguling dalam menghasilkan listrik yang bersubser dari energy terbarukan dapat di pertahankan bahan ditingkatkan. Program rehabilitasi perlu dilakukan secara menyeluruh sehingga umur peralatan PLTA Saguling dapat ditingkatkan sehingga kontribusi energy terbarukan dalam system kelistrikan di Jawa Barat bisa dipertahanakan.

2. Pengelola PLTA Saguling perlu melakukan kerjasama dengan pengelola PLTA lain yang setipe untuk saling bertukar data reliability dan upaya perbaikan sehingga memperluas pengetahuan dalam mengelola PLTA .

b. Ketersediaan ( availability)

Meskipun jumlah gangguan yang terjadi di PLTA sangat tinggi hingga mencapai 61 gangguan, namun total durasi dangguan cukup rendah yaitu hanya 441.68 jam. Nilai ini hanya 0.84% dari total jam operasi selama 52560 jam ( 6 tahun) pengamatan. Sehingga nilai Availability Factor (AF) dari PLTA Saguling lebih banyak dipengaruhi oleh downtime karena kegiatan pemeliharaan ( inspection) dengan tipe AI, GI, dan MI yang masing masing berdurasi (jam) 240, 720, 2160 secara berurutan. Dan dengan mengambil nilai maksimal dari POH yang diijinkan pada tiap jenis pemeliharaan maka nilai rata-rata AF yang akan dicapai oleh setiap unit pembangkit selama siklus 10 tahun secara teoritis adalah 95,34%.

c. Kemampuan Rawat (maintainability) PLTA Saguling memiliki nilai yang sudah tetap dengan kegiatan pemeliharaan (inspection) tipe AI, GI, dan MI yang masing masing berdurasi (jam) 240, 720, 2160 secara berurutan. Dan biaya yang yang tetap pada masing-masing tipe secara berurutan dalam (Rp Milyar) adalah 0.6, 2.3 dan 15.

2. Penyesuaian kebijakan anggaran operasional sangat mempengaruhi kehandalan perlatan. Jika reliability sebuah unit 1 diminta tidak kurang dari 36% , dimana harapannya tidak ada kegagalan selama selang interval pemeliharaan tahunan ( AI ) maka dibutuhkan kenaikan biaya pemeliharaan dari Rp 600 juta menjadi Rp.1508 juta. Dengan cara yang sama maka kenaikan anggaran unit 2 adalah Rp 1553 juta dan unit 4 kenaikannya adalah Rp 1562 juta. Sementara unit 3 tidak perlu dilakukan penambahan biaya karena kehandalannya cukup baik.

3. Kepada Peneliti yang akan melanjutkan atau mengembangkan penelitian ini agar mengambil data riwayat pemeliharaan yang lebih lama dan bersumber dari beragam unit PLTA yang memiliki karakteristik operasi dan lingkungan identik sehingga analisa reliability lebih mendekati kepada kondisi yang sesungguhnya.

**DAFTAR PUSTAKA**

Abernethy Robert B,2004, The New Weibull Handbook, Fifth Edition, Robert B. Abernethy Publisher, Florida USA.

Allen J Wood and Bruce F Wollenberg. 1984. Power Generation , Operation, and Control. Power Technologies. Inc. New York.

Andrea Saltelli, Stefano Tarantola,Francesca Campolongo and Marco Ratto ,2004. Sensitivity Analysis In Practice A Guide To Assessing Scientific Models. John Wiley & Sons Ltd, England

A.S.B. Tam, W.M. Chan and J. W. H. Price,2006. Optimal maintenance intervals for a multi-component system. Monash University. Australia.

Bani Bhattacharya. 2009. Hydro power Engineering. NPTL CE IIT, Kharagpur.

DEN. Energi Outlook 2014 DEN.

Dhillon B.S., 2002, Engineering Maintenance A Modern Approach, CRC Press, Florida USA.

EBrahimi Ali. 2010. Effect analysis of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS ) Parameters in design and operation of Dynamic Positioning (DP) systems in floating offshore structures. Royal Institute of Technology. Stockholm.

ESDM.2015. Permen ESDM No 19 2015.

Ghobbar Adel A.2008. Implementing Reliability, Availability, Maintainability and Supportability RAMS for the MRO Industry: a Case Study at European Airlines. Delft University of Technology. Netherlands.

IEEE Std 493. 2007. Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems. Power Systems Reliability Subcommittee. New York, USA.

IEEE Std 762. 2006. Standard Definitions for Use in Reporting Electric Generating Unit R e l i a b i l i t y, Av a i l a b i l i t y, and Productivity. IEEE Power Engineering Society, New York, USA.

John Moubray. 1991. Reliability Centered Maintenance. Penerbit ITB. Bandung.

John S. Mitchell,2006. Physical Asset Management Handbook Fourth Edition, Clarion Technical Pub, Pennsylvania USA.

Military Handbook, 1998. Electronic Reliability Design Handbook, Departments and Agencies of the Department of Defense , New York USA.

Mjumde, M Ghosh,S. 2013. Decisio Making Algoriths for Hydro-Power Plant Location, Springer. India.

Mobley R. Keith, 2002, An Introduction to Predictive Maintenance, Elsevier Science, USA.

NERC GAR,2012. Generating Availability Report Introduction and Table of Contents, North American Electric Reliability Corporation Atlanta USA.

OREDA Project Manager, 2002. Offshore Reliability Data Handbook 4th edition, SINTEF Industrial Management. Trondheim Norway.

Pierce K,2015, A Guidebook to Implementing Condition-Based Maintenance (CBM) Using Real-time Data, OSISoft, CA USA

PT PLN. 2015. RUPTL PLN 2015

PT PLN, 2007, Prosedur Tetap Deklarasi Kondisi Pembangkit dan Indeks Kinerja Pembangkit.

Ravi K. Iyer Probability with Engineering Applications Lecture 20, Dept. of Electrical and Computer Engineering. University of Illinois. USA.

Richard D Palmer. 2006. Maintenance Planning and Scheduling Handbook. McGraw-Hill. USA.

Richard Edwards. 2011. Asset Management – an anatomy. The Institue of Asset Management. London.

Ronald EW dan Raymond H M, Ilmu peluang dan statistika untuk insinyur dan ilmuwan, ITB.

Siswanto Y, 2010. Perancangan Preventive Maintenance Berdasarkan Metode Reliability Centered Maintenance (RCM) pada PT. Sinar Sosro, Universitas Sumatera Utara. Medan.

Syahmuhammadnoor,2011.http://syahmuhammadnoor.blogspot.co.id/2013/10/makalah-pembangkit-listrik-tenaga-air.html (Maret, 20 2016)

Szkod AM, 2014. Assessment of Reliability, Availability and maintainability of Rail Gauge Change systems. Cracow University of Technology. Krakow Poland.

Szkoda M, 2014, EURO – ZEL 2014 22nd International Symposium3rd – 4th, June 2014, Žilina, Slovakia.

Yong Sun, 2006. Reliability Prediction of Complex repairable system: an engineering approach. Queensland University of Technology. Australia.

Zavagnin R, 2008, An Overview of a Root Cause Failure Analysis (RCFA) Process. IPEIA Conference, Banff, Canada.