

EVALUASI KEANDALAN BOILER UNIT 1 DAN 2 BTG (BOILER TURBINE GENERATOR) PT. SEMEN TONASA MENGGUNAKAN SOFTWARE WEIBULL ++6

Akhmad Taufik¹⁾, Arifuddin Nurdin²⁾

Abstrak: Kelancaran produksi semen di Pabrik PT. Semen Tonasa Unit IV tidak lepas dari pada kontinuitas pelayanan energi listrik, dimana kontinuitas peralatan energi listrik itu sendiri merupakan realisasi dari pada pengoperasian BTG Power Plant/PLTU. Boiler merupakan suatu komponen dalam BTG *Power Plant*/PLTU yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap melalui serangkaian proses yang kompleks dimana didalamnya terjadi perpindahan dan konversi energi kimia ke energi panas. Evaluasi kinerja boiler pada BTG *Power Plant*/PLTU ini dari segi keandalannya, dimana keandalan BTG *Power Plant*/PLTU ini berkaitan dengan frekuensi waktu kegagalan dan frekuensi *downtime*. Data yang diperoleh berupa data *time to failure* (TTF) dan *time to reparaire* (TTR). Tahapan selanjutnya dengan bantuan software Weibull ++6 dilakukan pengujian distribusi untuk mengetahui distribusi yang paling sesuai. Berdasarkan parameter-parameter distribusi yang diperoleh akan dapat ditentukan *mean time to failure* (MTTF) dan *mean time to reparaire* (MTTR), selanjutnya mengitung nilai fungsi distribusi kumulatif (*cumulative distribution function*), nilai keandalan (*reliability*), nilai laju kegagalan (*failure rate*), nilai ketersediaan (*availability*), dan nilai keterawatan (*maintainability*). Selanjutnya kita mencari nilai *reliability* usulan *preventive maintenance* yang kemudian diperoleh waktu untuk melakukan tindakan *preventive maintenance*. Dari penelitian diperoleh nilai MTTF untuk boiler unit I adalah 3904,106304 jam dengan MTTR sebesar 39,26506707 jam, sedangkan untuk boiler unit II nilai MTTF adalah 2435,8519 jam dengan nilai MTTR sebesar 22,59684237 jam. Keandalan Boiler unit I meliputi: *Cumulative Distribution Function* (CDF) = 53,73%, *Reliability* R(t) = 46,26%, *failure rate* $\lambda(t) = 0,000423287$ *failure*/Jam, *Maintanibility* M(t) = 60,91 %, *Availability* (A) = 99,0042%. Sedangkan Keandalan Boiler unit II meliputi: *Cumulative Distribution Function* (CDF) = 50%, *Reliability* R(t) = 50%, *failure rate* $\lambda(t) = 0,000541666$ *failure*/Jam, *Maintanibility* M(t) = 64,07%, *Availability* (A) = 99,0808%. Nilai *reliability* dari boiler unit I sesudah menerapkan usulan *preventive maintenance* yaitu 78,87% yang meningkat sebesar 32,61%, sedangkan boiler unit II sesudah menerapkan usulan *preventive maintenance* yaitu 63,24% yang meningkat sebesar 13,24%.

Kata Kunci: Boiler, *time to failure* (TTF), *time to reparaire* (TTR), keandalan, Weibull++6, *preventive maintenance*.

¹ Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang

² Alumni Program D4 Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang

I. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan sistem yang memegang peranan penting dalam suatu proses produksi energi listrik untuk mensuplai kebutuhan listrik, misalnya pada PT.Semen Tonasa. PT. Semen Tonasa membangun PLTU dengan kapasitas 2x25 MW untuk menanggulangi kebutuhan listrik, terutama dalam menunjang kegiatan di Pabrik PT. Semen Tonasa Unit IV.

Kontinuitas proses produksi dapat tercapai apabila suatu peralatan dapat menjalankan fungsinya sesuai dengan yang diinginkan. Untuk itu semua komponen-komponen yang ada dalam BTG *Power Plant*/PLTU harus dijaga kontinuitas pengoperasiannya, Salah satu komponen penting di BTG *Power Plant*/PLTU adalah boiler. Boiler merupakan suatu komponen dalam BTG *Power Plant*/PLTU yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap melalui serangkaian proses yang kompleks dimana didalamnya terjadi perpindahan dan konversi energi kimia ke energi panas.

Kontinuitas proses produksi didukung oleh banyak sekali aspek, diantaranya adalah aspek keandalan (*reliability*) dan perawatan (*maintenance*) peralatan/mesin yang ada dalam sistem produksi tersebut. Keandalan (*reliability*) merupakan suatu probabilitas bahwa suatu sistem atau komponen akan berfungsi dengan baik dalam periode tertentu. Untuk itu perlu dilakukan suatu evaluasi untuk menghitung seberapa besar kegagalan atau kerusakan terhadap suatu subsistem, sistem dan komponen-komponen. Dengan mengukur parameter keandalannya, dapat diantisipasi kegagalan dan dapat diprediksi suatu faktor penghambat, yang nantinya dapat memperbaiki kinerja pemeliharaan pencegahan (*preventive maintenance*).

Software Weibull ++6 merupakan salah satu *software* yang dapat digunakan untuk menganalisis data dan menyediakan dukungan untuk semua tipe data yang besar. *Software Weibull ++6* menawarkan distribusi *lifetime* seperti distribusi Weibull, normal, lognormal, eksponensial dan gabungan beberapa distribusi.

A. Definisi Keandalan

Keandalan adalah probabilitas suatu sistem atau produk dapat beroperasi dengan baik tanpa mengalami kerusakan pada suatu kondisi tertentu dan waktu yang telah ditentukan (Ebeling, 1997).

B. Manfaat Keandalan

Tujuan utama dari evaluasi keandalan adalah untuk memberikan informasi sebagai basis untuk mengambil keputusan. Selain itu teori keandalan dapat digunakan untuk memprediksi kapan suatu komponen (*sparepart*) pada suatu mesin akan mengalami kerusakan, sehingga dapat menentukan kapan harus dilakukan perawatan, pergantian dan penyediaan komponen.

C. Metode Analisis Keandalan (*Reliability*)

1. Metode Analisis Kualitatif

Metode analisis kualitatif merupakan metode analisa secara *quality* dari suatu mode dan dampak kegagalan.

2. Metode analisis Kuantitatif

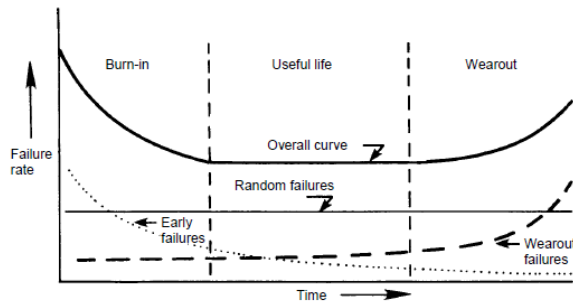
Metode analisis analisis kualitatif merupakan metode analisa yang dilakukan secara perhitungan matematis.

D. Konsep Keandalan

Dalam teori keandalan terdapat empat konsep yang dipakai dalam pengukuran tingkat keandalan suatu sistem atau produk, yaitu Fungsi Kepadatan Probabilitas, Fungsi Distribusi Kumulatif, Fungsi Keandalan, dan Fungsi Laju Kerusakan, *Mean Time to Failure* (MTTF), *Mean Time to Repair* (MTTR).

E. Siklus Hidup dan Laju Kerusakan Komponen

Pada umumnya laju kerusakan suatu sistem selalu berubah sesuai dengan bertambahnya waktu. Dari hasil percobaan, dapat diketahui bahwa laju kerusakan akan mengikuti suatu pola dasar sebagai berikut:



Gambar 1. *The Bathtub Curve* (Kurva laju kerusakan)
 Sumber: David J. Smith, p.17

F. Konsep Downtime

Downtime merupakan waktu mengganggu atau waktu dimana suatu unit tidak dapat lagi menjalankan fungsinya sesuai dengan yang diharapkan. Hal ini dapat terjadi apabila suatu unit mengalami masalah seperti kerusakan mesin yang dapat mengganggu performansi dari mesin secara keseluruhan termasuk mutu produk yang dihasilkan atau kecepatan produksinya sehingga membutuhkan waktu tertentu untuk mengembalikan fungsi unit tersebut pada kondisi awal.

G. Pola Distribusi Weibull

Persamaan yang digunakan pada pola distribusi Weibull sebagai berikut:

- 1) Fungsi Kepadatan Probabilitas

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right]$$

$t \geq \gamma; \eta, \beta \geq 0$ (1)

- 2) Fungsi Distribusi Kumulatif

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right]$$

.....(2)

3) Fungsi Keandalan

$$R(t) = 1 - F(t)$$

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \dots\dots\dots(3)$$

4) Fungsi Laju Kerusakan

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \dots\dots\dots(4)$$

5) MTTF (*Mean Time to Failure*)

$$MTTF = \gamma + \eta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \dots\dots\dots(5)$$

H. Ketersediaan (*Availability*)

Availability didefinisikan sebagai probabilitas bahwa sebuah komponen akan tersedia saat dibutuhkan (dengan berbagai aspek-aspek keandalannya, kemampuan perawatan dan dukungan perawatan), (Dhillon, 2005)

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \dots\dots\dots(6)$$

I. Keterawatan (*Maintainability*)

Maintainability didefinisikan sebagai kemampuan suatu komponen dalam kondisi pemakaian tertentu, untuk dirawat, atau dikembalikan ke keadaan semula dimana komponen itu dapat menjalankan fungsi yang diperlukan (Dhillon, 2005).

Persamaan *maintainability* untuk distribusi Weibull ditunjukkan pada persamaan di bawah ini (Ebeling, 1997).

$$M(t) = 1 - e^{- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \dots\dots\dots(7)$$

Persamaan *maintainability* untuk distribusi lognormal ditunjukkan pada persamaan di bawah ini (Ebeling, 1997).

$$M(t) = \Phi \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right) \dots\dots\dots(8)$$

Persamaan *maintainability* untuk distribusi normal ditunjukkan pada persamaan di bawah ini (Arlanlot and Marvin, 1994).

$$M(t) = \Phi \left(\frac{t - \mu}{\sigma} \right) \dots\dots\dots(9)$$

Persamaan *maintainability* untuk distribusi eksponensial ditunjukkan pada persamaan di bawah ini (Ebeling, 1997).

$$M(t) = 1 - e^{-\lambda t} \dots\dots\dots(10)$$

Sedangkan untuk persamaan waktu rata-rata perbaikan pada beberapa distribusi adalah sebagai berikut (Ebeling, 1997):

a. Distribusi Weibull

$$MTTR = \gamma + \eta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \dots \dots \dots (11)$$

b. Distribusi Lognormal

$$MTTR = \exp \left(\mu + \frac{\sigma^2}{2} \right) \dots \dots \dots (12)$$

c. Distribusi Normal

$$MTTR = \mu \dots \dots \dots (13)$$

d. Distribusi Eksponensial

$$MTTR = \gamma + \frac{1}{\lambda} \dots \dots \dots (14)$$

J. Pengujian Distribusi

Data waktu antar kegagalan (TTF) dan data waktu antar perbaikan (TTR) yang telah diperoleh akan dilakukan uji distribusi terlebih dahulu dengan menggunakan alat bantu uji berupa *software weibull ++6* untuk menentukan jenis distribusi yang mendasari penyebaran data sehingga diperoleh nilai-nilai parameter dari jenis distribusi. Pemilihan distribusi untuk data yang paling sesuai ditentukan oleh 3 parameter uji antara lain *Average Statistical Goodness of Fit (AvGOF)*, *Average Plot Fit (AvPLOT)*, dan *Likelihood Function Value (LKV)*.

K. Keandalan Sebelum dan Sesudah Usulan Tindakan Preventive Maintenance

Peningkatan keandalan dapat ditempuh dengan cara perawatan pencegahan (*preventive maintenance*). Model keandalan berikut ini mengasumsikan sistem ke kondisi baru setelah mengalami perawatan pencegahan. Keandalan pada saat “t” dinyatakan sebagai berikut (Ebeling, 1997):

$$R_m(t) = R(t) \quad \text{untuk } 0 \leq t < T \dots \dots \dots (15)$$

$$R_m(t) = R(T)^n \cdot R(t-nT) \quad \text{untuk } T \leq t < 2T \dots \dots \dots (16)$$

Secara umum persamaannya adalah:

$$R_m(t) = R(T)^n \cdot R(t-nT) \quad \text{untuk } nT \leq t < (n+1)T \text{ dan } n = 0,1,2,3 \dots \dots \dots (17)$$

Boiler

Boiler berfungsi mengubah fasa air menjadi fasa uap dengan tekanan dan temperatur tinggi. Oleh karena fungsinya, maka boiler sering disebut *steam generator*. Ditinjau dari segi proses konversi energi, *boiler* adalah alat untuk merubah energi kimia menjadi energi panas. Panas ini digunakan untuk memanaskan air sehingga berubah menjadi uap yang mengandung energi tinggi.

Software Reliasoft Weibull ++6

Weibull ++6 mencakup semua peralatan dan pilihan yang Anda perlukan untuk analisis data dan menyediakan dukungan untuk semua tipe data yang besar. Weibull ++6 menawarkan distribusi *lifetime* seperti distribusi gamma, Weibull, normal, lognormal, eksponensial dan gabungan beberapa distribusi.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Teknik Pengolahan Data

Untuk memecahkan masalah yang dihadapi, maka dilakukan pengolahan data sebagai berikut:

- Penentuan *Time to Failure* (TTF)
- Penentuan Distribusi *Time to Failure* (TTF)
- Penentuan *Time to Repair* (TTR)
- Penentuan Distribusi *Time to Repair*
-

B. Teknik Analisis Data

Analisis data yang dilakukan merupakan analisa kuantitatif *Boiler* pada BTG *Power Plant*/PLTU meliputi:

- ✓ Perhitungan *Mean Time to Failure* (MTTF)
- ✓ Perhitungan *Mean Time to Repaire* (MTTR)
- ✓ Perhitungan nilai *Cumulative Distribution Function* (CDF)
- ✓ Perhitungan nilai keandalan (*reliability*)
- ✓ Perhitungan laju kegagalan (*failure rate*)
- ✓ Perhitungan nilai keterawatan (*maintainability*)
- ✓ Perhitungan nilai ketersediaan (*availability*)
- ✓ Perhitungan keandalan (*reliability*) dengan usulan *Preventive Maintenance* Boiler unit I & II
- ✓ Perbandingan keandalan (*reliability*) sebelum dan sesudah usulan *Preventive Maintenance* Boiler unit I & II

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Boiler Unit I

1. Perhitungan *Mean Time to Failure* (MTTF)

Hasil dari penentuan parameter uji dengan menggunakan *software reliasoft weibull ++6* yang mengikuti pola distribusi Weibull 2 parameter, sehingga MTTF:

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

$$MTTF = 3904,106304 \text{ Jam}$$

2. Perhitungan *Mean Time To Repaire* (MTTR)

Hasil dari penentuan parameter uji dengan menggunakan *software reliasoft weibull ++6* mengikuti pola distribusi *Lognormal*, Sehingga MTTR:

$$MTTR = \exp \left(\mu + \frac{\sigma^2}{2} \right) = 39,26506707 \text{ Jam}$$

3. Perhitungan *Cumulative Distribution Function* (CDF)

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right]$$

Untuk $t = \text{MTTF} = 3904,106304$ Jam, maka
 $F(3904,106304) = 0,537316594 = 53,73\%$

4. Perhitungan Nilai Reliability

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right]$$

Untuk $t = \text{MTTF} = 3904,106304$ Jam, maka
 $R(3904,106304) = 0,462683406 = 46,26\%$

5. Perhitungan Nilai Failure Rate

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

Untuk $t = \text{MTTF} = 3904,106304$ Jam, maka
 $\lambda(3904,106304) = 0,000423287 \text{ failure/Jam.}$

6. Perhitungan Nilai Maintainability

$$M(t) = \Phi \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)$$

Untuk $t = \text{MTTR} = 39,26506707$ Jam, maka
 $M(39,26506707) = 0,609103913 = 60,91 \%$

7. Perhitungan Nilai Availability

$$A = \frac{\text{MTTF}}{\text{MTTF} + \text{MTTR}} \quad A = 0,990042767 = 99,0042\%$$

B. Boiler Unit II

1. Perhitungan Mean Time to Failure (MTTF)

Hasil dari penentuan parameter uji dengan menggunakan *software reliasoft weibull* ++6 mengikuti pola distribusi Normal, sehingga MTTF:

$$\text{MTTF} = \mu \quad \text{MTTF} = 2435,8519 \text{ Jam}$$

2. Perhitungan Mean Time To Repaire (MTTR)

Hasil dari penentuan parameter uji dengan menggunakan *software reliasoft weibull* ++6 mengikuti pola distribusi Weibull 3 parameter, sehingga MTTR:

$$MTTR = \gamma + \eta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad MTTR = 22,59684237 \text{ Jam}$$

3. Perhitungan Cumulative Distribution Function (CDF)

$$F(t) = \Phi \left(\frac{t - \mu}{\sigma} \right)$$

Untuk $t = MTTF = 2435,8519$ Jam, maka
 $F(2435,8519) = 0,5$

4. Perhitungan Nilai Reliability

$$R(t) = 1 - \Phi \left(\frac{t - \mu}{\sigma} \right)$$

Untuk $t = MTTF = 2435,8519$ Jam, maka
 $R(2435,8519) = 0,5 = 50\%$

5. Perhitungan Nilai Failure Rate

$$\lambda(t) = \frac{\Phi \left(\frac{t - \mu}{\sigma} \right)}{\sigma \cdot R(t)}$$

Untuk $t = MTTF = 2435,8519$ Jam, maka
 $\lambda(2435,8519) = 0,000541666 \text{ failure/Jam}$

6. Perhitungan Nilai Maintainability

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta}$$

Untuk $t = MTTR = 22,59684237$ Jam, maka
 $M(22,59684237) = 0,640778637 = 64,07\%$

7. Perhitungan Nilai Availability

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$

$$A = 0,990808496 = 99,0808\%$$

C. Perhitungan dan Perbandingan Nilai Reliability Sebelum dan Sesudah Usulan Preventive Maintenance

1. Boiler Unit I

Nilai keandalan (*reliability*) boiler unit I yang diinginkan saat dilakukan tindakan *preventive maintenance* adalah sebesar 90%. sehingga Keandalan sistem sebelum *preventive maintenance* $R(t) = 42,26\%$ sedangkan Keandalan sesudah usulan

preventive maintenance $R_m(t) = 78,87\%$ yang berarti nilai keandalan dari boiler unit I meningkat sebesar 32,61%.

2. Boiler Unit I

Nilai keandalan (*reliability*) boiler unit II yang diinginkan saat dilakukan tindakan *preventive maintenance* adalah sebesar 90%. sehingga keandalan sistem sebelum *preventive maintenance* $R(t) = 50\%$ sedangkan keandalan sesudah usulan *preventive maintenance* $R_m(t) = 63,24\%$ yang berarti nilai keandalan dari boiler unit I meningkat sebesar 13,24%.

IV. KESIMPULAN

Beberapa hal yang dapat dijadikan kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Distribusi data waktu antar kegagalan boiler unit I mengikuti distribusi Weibull 2 parameter sedangkan boiler unit II mengikuti distribusi normal. Distribusi data waktu antar perbaikan untuk boiler unit I mengikuti distribusi Lognormal boiler unit II mengikuti distribusi Weibull 3 parameter.
2. Nilai MTTF untuk boiler unit I adalah 3904,106304 jam dengan MTTR sebesar 39,26506707 jam, sedangkan untuk boiler unit II nilai MTTF adalah 2435,8519 jam dengan nilai MTTR sebesar 22,59684237 jam. Dari nilai MTTF dan MTTR yang diperoleh sebelumnya, maka:
 - Keandalan Boiler unit I meliputi:
 - 1) *Cumulative Distribution Function* (CDF) = 0,537316594 = 53,73%
 - 2) *Reliability* $R(t) = 0,462687737 = 46,26\%$
 - 3) *failure rate* $\lambda(t) = 0,000423287$ failure/Jam
 - 4) *Maintanibility* $M(t) = 0,609103913 = 60,91 \%$
 - 5) *Availability* (A) = 0,990042767 = 99,0042%
 - Keandalan Boiler unit II meliputi:
 - 1) *Cumulative Distribution Function* (CDF) = 0,5 = 50%
 - 2) *Reliability* $R(t) = 0,5 = 50\%$
 - 3) *Failure rate* $\lambda(t) = 0,000541666$ failure/Jam.
 - 4) *Maintanibility* $M(t) = 0,640778637 = 64,07 \%$
 - 5) *Availability* A = 0,990808496 = 99,0808%
3. Nilai *reliability* $R(t)$ dari boiler unit I sebelum usulan *preventive maintenance* adalah sebesar 0,462687737 atau 46,26% sedangkan sesudah menerapkan usulan *preventive maintenance* $R_m(t)$ yaitu 0,788752904 atau 78,87% yang meningkat sebesar 32,61%. Nilai *reliability* $R(t)$ dari boiler unit II sebelum usulan *preventive maintenance* adalah sebesar 0,5 atau 50% sedangkan sesudah menerapkan usulan *preventive maintenance* $R_m(t)$ yaitu 0,632426437 atau 63,24% yang meningkat sebesar 13,24%.

V. DAFTAR PUSTAKA

- Arlanjot, H., and Marvin, R. *System Reliability Theory*”, John Wiley & Sons Inc., The Norwegian Institute of Technology, 1994.
- Sultan, A. Zubair. 2009. “Anailisis Reliabilitas Sebagai Strategi Pencegahan Kerusakan Unit Galvanising PT. Sermani Steel”. Dalam Poli Rekayasa, 4 (2): 1858-3709. Makassar.
- Djunaidi, Much. Dan M. F. Sufa. 2007. “Usulan Interval Perawatan Komponen Kritis Pada Mesin Pencetak Botol (Mould Gear) Berdasarkan Kriteria Minimasi Downtime”. Dalam Jurnal Teknik Gelagar, 18 (1): 33-41. Surakarta.
- Nandiroh S. dkk. 2006. “Penentuan Waktu Perawatan Untuk Pencegahan Pada Komponen Kritis Cyclone Feed Pump Berdasarkan Kriteria Minimasi Downtime”. Dalam Jurnal Ilmiah Teknik Industri, 5 (1): 39-44. Surakarta.
- Ebeling, C. Charles. 1997. *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Lewis, E.E. 1994. *Introduction to Reliability Engineering*. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Reidel, D. dkk. 1986. *Reliability Engineering*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers Group.
- Bertsche, B. 2008. *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering*. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Smith, J. David. 2005. *Reliability, Maintainability and Risk*. Seventh Edition. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- _____. 2004. *Software Training Guide Reliasoft’sWeibull++ 6*. Tucson: Reliasoft Corporation.
- Ireson, W. Grant. 1995 *Handbook of Reliability Engineering and Management*. Second Edition. New York: McGraw-Hill.
- Guanbing Yang. 2007. *Life Cycle Reliability Engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.