PERHITUNGAN KEANDALAN DAN KETERSEDIAAN SISTEM YANG DAPAT DIPERBAIKI DENGAN ANALISIS PENDEKATAN MARKOV

Syarip
PusatPenelitianNuklirYogyakarta.

ABSTRAK

PERHITUNGAN KEANDALAN DAN KETERSEDIAAN SISTEM YANG DAPAT DIPERBAIKI DENGAN ANALISIS PENDEKATAN MARKOV. Di dalam makalah ini dibahas dasar-dasar teori analisis pendekatan Markov untuk menghitung keandalan dan ketersediaan suatu sistem yang dapat diperbaiki. Analisis Markov diterapkan untuk mendapatkan ketelitian yang lebih tinggi dalam perhitungan keandalan/ketersediaan suatu sistem. Sebagai contoh penerapan, dihitung besarnya nilai keandalan dan ketersediaan dari sistem penyedia daya darurat RSG G.A. Siwabessy sebagai fungsi waktu pulih kembali dari generator diesel. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa jika terpaksa sistem penyedia daya darurat RSG harus beroperasi kontinyu selama 20 hari dan 30 hari, maka keandalan dan ketersediaaan sistem masing-masing adalah : 0.9748 ; 0.9999 dan 0.9620 ; 0.9999 untuk T_{gd}= 1 jam. Untuk waktu pulih kembali generator diesel T_{gd} = 8 jam dan T_{gd} = 24 jam, besarnya nilai keandalan menurun dengan faktor ± 0,21 nilai ketersediaan menurun dengan faktor ± 0,006.

ABSTRACT

Basic theori of Markov for calculating the availability and reliability of the repairable system is discused in this paper. Markov analysis is used to obtain a higher accuracy in the availability and reliability calculation of the system. For the sample problem, the availability and reliability of the emergency power supply system of the RSG GA Siwabessy is calculating as a function of recovery time of diesel generator. The results show taht for the 20 days and 30 days continous operation of the emergency power supply system, the reliability and availability of the system are : 0.9748 ; 0.9999 and 0.9620 ; 0.9999 , for T_{gd} = 1 hour respectively. For the recovery time of diesel generator T_{gd} = 8 hour and T_{gd} = 24 hour, the reliability decrease by the factor of ± 0.21 and the availability decreases by the factor of ± 0.006.

PENDAHULUAN

Untuk mengevaluasi keandalan dari berbagai sistem biasanya dipakai cara-cara analitis. Untuk sistem yang dapat diperbaiki, biasanya diambil anggapan bahwa proses perbaikan adalah konstan atau dapat diabaikan terhadap waktu operasi. Suatu cara yang banyak dipakai dan lebih teliti untuk sistem yang sederhana adalah cara pendekatan Markov/ analisis Markov.

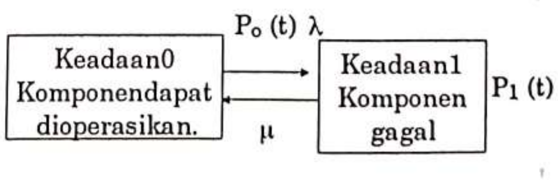
Pendekatan Markov dapat diterapkan pada sistem-sistem dengan perilaku acak terhadap waktu dan ruang baik secara diskrit maupun secara kontinu (proses stokastik). Pendekatan Markov menyatakan bahwa perilaku sistem harus sama pada semua titik-titik keadaan, yaitu keboleh jadian pembuatan transisi dari suatu keadaan yang lain harus sama/ *stasioner*.

Di dalam makalah ini akan dibahas mengenai prinsip-prinsip dasar analisis pendekatan Markov, pemakaian dari Markov analisis untuk menghitung ketersediaan dan keandalan dari sistem, dihitung sebagai fungsi waktu atau periode operasi 20 hari dan 30 hari secara kontinu, dan sebagai fungsi waktu pulih kembali dari generator diesel.

DASAR TEORI

KonsepModelingLajuTransisi.

Tinjau suatu komponen di mana laju perbaikan dan laju kegagalannya konstan yaitu dengan karakteristik distribusi eksponensial, maka diagram transisi keadaannya adalah sebagai berikut:



di sini λ dan μ masing-masing adalah laju kegagalan atau laju kerusakan dan laju perbaikan dari komponen. $P_o(t)$ adalah keboleh jadian komponen dapat dioperasikan dan $P_1(t)$ adalah keboleh jadian komponen gagal pada waktu t.

Keboleh jadian bahwa komponen berada di keadaan 0 pada waktu $(t + dt)$ adalah :

$$P_o(t + dt) = P_o(t)(1 - \lambda dt) + P_1(t)(\mu dt)$$

demikian pula pada keadaan 1

$$P_1(t + dt) = P_1(t)(1 - \mu dt) + P_1(t)(\lambda dt)$$

Dari kedua persamaan di atas diperoleh :

$$\frac{P_o(t + dt) - P_o(t)}{dt} = -\lambda P_o(t) + \mu P_1(t)$$

$$\frac{P_o(t + dt) - P_o(t)}{dt}\Big|_{dt \to 0} = \frac{d P_o(t)}{dt} = P'(t)$$

atau

$$P'_o(t) = -\lambda P_o(t) + \mu P_1(t) \qquad (1)$$

dan dengan cara yang sama diperoleh

$$P'_1(t) = -\lambda P_o(t) - \mu P_1(t) \qquad (2)$$

Persamaan (1) dan (2) dapat ditulis dalam bentuk matriks

$$\begin{vmatrix} P'_o(t) \\ P'_1(t) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\lambda + \mu \\ \lambda - \mu \end{vmatrix} \begin{vmatrix} P_o(t) \\ P_1(t) \end{vmatrix} \qquad (3)$$

Matriks 2x2 pada persamaan di atas dikenal sebagai matriks transisi. Persamaan (3) merupakan persamaan diferensial linier simultan dengan koefisien konstan, dapat diselesaikan dengan berbagai cara (yang paling mudah adalah dengan transformasi Laplace).

Dengan memamsukkan syarat awal $P_o(0) = 1$ dan $P_1(0) = 0$

$$P_o(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda \exp[-(\lambda + \mu)t]}{\lambda + \mu}$$

dan

$$P_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda \exp[-(\lambda + \mu)t]}{\lambda + \mu}$$

yaitu masing-masing merupakan keboleh jadian komponen dapat dioperasikan $P_o(t)$ dan kebolehjadian komponen gagal $P_1(t)$ sebagai fungsi waktu t.

Di dalam teori keandalan, persamaan di atas umumnya dikenal sebagai ketersediaan / *availability* (A) dan ketidak tersediaan/ *unavailability* (U) dari sistem sebagai fungsi waktu. Ketersediaaan dari sistem (A) perlu di- bedakan dengan keandalan/ reliability (R) dari sistem yang diberikan oleh persamaan :

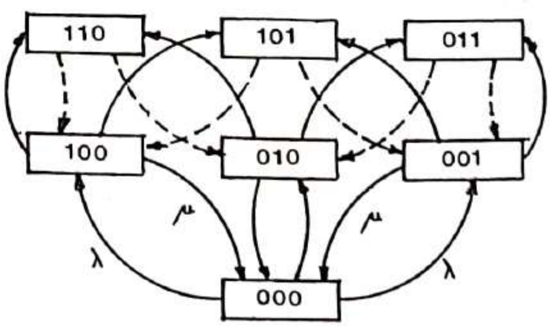
$$R(t) = \exp[-\lambda t]$$

yang merupakan penyelesaian dari persamaan (1) untuk U = 0.

Ketersediaan adalah kebolehjadian bahwa sistem ditemukan berada pada kondisi operasi (normal) pada suatu waktu t dengan kondisi sebaik kondisi awal ($t = 0$), tanpa menghiraukan apa yang telah terjadi sebelumnya. Sedangkan keandalan adalah kebolehjadian bahwa sistem tetap tinggal/ berada pada kondisi operasi (sistem tidak mengalami kegagalan) selama interval waktu $0 - t$. Dengan kata lain jika suatu komponen gagal sebelum waktu t, kemudian diperbaiki dan menjadi normal kembali pada waktu t maka komponen tersebut akan memberikan koontribusi pada ketersediaan tetapi tidak pada keandalan. Jadi : $A(t)$ $R(t)$, untuk komponen yang dapat diperbaiki, dan $A(t) = R(t)$, untuk komponen yang tidak dapat diperbaiki.

Model Sistem Dua Dari Tiga

Pada suatu sistem yang disusun dengan cara dua dari tiga, yaitu sistem akan gagal jika dua dari tiga komponen mengalami kegagalan, maka diagram transisinya adalah sebagai berikut (lihat gambar 1.):



Gambar 1. Diagram transisi untuk sistem 2 dari 3

Catatan:
Garis terputus-putus, untuk perhitungan keandalan sistem.

Kombinasi komponen yang membentuk keandalan dari sistem dan mengakibatkan kegagalan adalah keadaan-keadaan : (1,1,0) , (0,1,1), (1,0,1), sedangkan keadaan-keadaan (0,0,0), (0,1,0) , (0,0,1), dan (1,0,0) merupakan keadaan-keadaan sukses. Ketiga keadaan yang mengakibatkan kegagalan tersebut merupakan keadaan absobsi dari diagram transisi, yaitu keadaan di mana sekali terjadi sistem tetap gagal sampai mulai dengan missi yang baru.

Dari diagram transisi, dapat dibuat persamaan diferensial seperti persamaan (1) dan persamaan (2), untuk keadaan-keadaan nonabsorpsi persamaannya adalah (abaikan garis putus-putus) :

$$\frac{dP\,(010)}{dt} = -\,(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)\,P\,(000) + \mu_1 P(100) + \mu_2 P(101) + \mu_3 P(001)$$

$$\frac{dP\,(010)}{dt} = \lambda_1\,P\,(000) - (\mu_1 = \mu_2 + \mu_3)\,P(100) + \mu P(101) \qquad (4)$$

$$\frac{dP\,(101)}{dt} = \lambda_2\,P\,(000) - (-\,\lambda - \mu_2 + \lambda_3 - \mu_3)\,P6(010) + \mu\,P\,(110)$$

$$\frac{dP\,(001)}{dt} = \lambda_3\,P\,(100) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3)\,P\,(001)$$

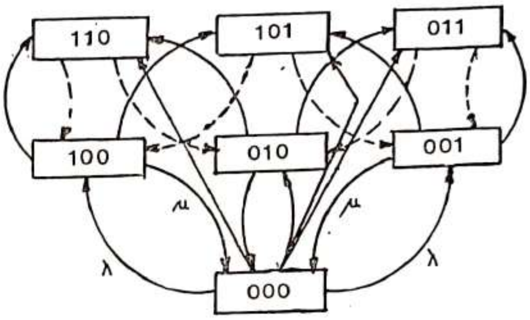
Syarat awal dari keempat persamaan diferensial simultan di atas adalah :
$P(000,0) = 1$, *dan* $P(100,0) = P(010,0) = P(001,0) = 0$

Penyelesaian persamaan (4) menghasilkan nilai kebolehjadian dari tiap-tiap keadaan, kebolehjadian sistem sukses (keandalan sistem) adalah: $R(t) = P_s(t) = P(000,t) + P(100,t) + P(010,t) + P(001,t)$.

Sedangkan ketersediaan/ A(t) dihitung dengan persamaan yang sama seperti di atas tetapi dengan mengikutkan garis terputus-putus pada diagram transisi (gambar 1) yang akan menghasilkan persamaan diferensial seperti persamaan (4) ditambah dengan suku-suku :$\mu_3 P(101)$ + $\mu_2 P(110)$ pada baris kedua, $\mu_1 P(110) + \mu_3 P(101)$ pada baris ketiga, $\mu_1 P(101) + \mu_2 P(011)$ pada baris keempat.

Model Sistem Dua Dari Tiga Dengan Common Cause/Mode

Common cause atau *common mode* adalah suatu kondisi atau kejadian yang mengakibatkan berlipatnya kejadian-kejadian dasar, misalnya banjir/ kebakaran yang mengakibatkan semua komponen redudant gagal secara simultan. Di dalam suatu pusat reaktor nuklir misalnya hanya tersedia satu sistem alat pencegah kebakaran di mana sistem pompanya terletak di dalam suatu ruang yang sama, hal ini bisa mengakibatkan kegagalan sistem air pendingin normal maupun sistem air pendingin darurat. Dengan kata lain kegagalan *common cause* merupakan kegagalan yang dependen.



Gambar 2. Diagram transisi untuk sistem 2 dari 3 dengan Common Cause/ mode.

Diagram transisi untuk sistem 2 dari 3 dengan *common cause*, dapat dilihat pada gambar 2. Di mana keadaan absorpsi mendapat masukan dari keadaan (0,0,0) dengan laju kegagalan common cause. Dengan cara menambahkan 3 λ_{cc} pada koefisien suku P(000) pada baris pertama dari persamaan (4), maka diperoleh persamaan diferensial linier simultan untuk sistem 2 dari 3 dengan common cause, yaitu :

$$\frac{dP\,(010)}{dt} = -\,(\lambda_1 + \lambda_2 + 3\lambda_{cc}) + \mu_1 P\,(110) + \mu_2\,P\,(010) + \mu_3\,P\,(001)$$

$$\frac{dP\,(010)}{dt} = -\,(\lambda_1\,P\,(000) - (\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3)\,P\,(100) + \mu\,P\,(101) \qquad (5)$$

$$\frac{dP\,(101)}{dt} = -\,\lambda_2\,P\,(000) + (-\,\lambda_2 - \mu_2 + \lambda_3)\,P\,(010) + \mu\,P\,(110)$$

$$\frac{dP\,(001)}{dt} = \lambda_3\,P\,(100) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3)\,P\,(001)$$

ANALISIS KEANDALAN DAN KETERSEDIAAN SISTEM PENYEDIA DAYA DARURAT RSG G.A.SIWABESSY

Deskripsi Sistem Penyedia Daya Darurat RSG G.A.Siwabessy

Pada kondisi normal sistem listrik di RSG G.A. Siwabessy disuplai dari buah jaringan PLN 20 kV. Tegangan rendah disediakan dengan tiga buah transformer masing-masing dihubungkan dengan kedua jaringan 20 kV.

-Penyedia daya normal 380 V AC
-Penyedia daya darurat 390 V AC
-Penyedia daya tak terputuskan + 24 V DC

Dalam hal terjadi kegagalan pada penyedia daya normal, sistem penyedia daya darurat secara otomatis bekerja. Sistem penyedia daya darurat terdiri dari tiga buah generator diesel. (BRV 10, BRV 20 dan BRV 30). Pada sistem ini juga terdiri dari tiga sistem redudan yang bebas. Suatu kegagalan paad sebuah diesel generator tidak akan membahayakan sistem yang lainnya. Tiap generator dan kotak distribusinya terletak dalam ruang yang berbeda.

MetodePerhitunganDanHasilPerhitungan.

Perhitungan keandalan dan ketersediaan sistem penyedia daya darurat reaktor G.A.Siwabessy, sebagai fungsi dari waktu/periode operasi dan waktu pulih kembali dari generator diesel, dilakukan dengan mengambil asumsi dan data-data sebagai berikut :

- Tiap generator diesel mempunyai laju kegagalan dan laju perbaikan yang sama dan konstan terhadap waktu.
- Tersedia satu tim perbaikan untuk setiap sistem generator diesel.
- Laju kegagalan untuk dapat dihidupkan (fail to start atau fail to run) dari generator diesel diambil dari daftar pustaka (2) dengan nilai rerata $\lambda = 3.10^{-3}$/jam

Dengan asumsi-asumsi di atas dan dengan menggunakan persamaan (6) dan persamaan (7), maka tiap-tiap keadaan (state probability) dari diagram transisi dapat dihitung.

Harga kebolehjadian gagal akibat kejadian *common cause* (λ_{cc}) dianggap mengikuti model Marshall-Olkin (metode faktor beta) yaitu :

$$\beta = \frac{\lambda_{cc}}{\lambda + \lambda_{cc}}$$

harga parameter beta untuk peralatan seperti keandalan diesel dan pompa-pompa, bervariasi dari 0,1 s/d 0,2.

Hasil perhitungan kebolehjadian tiap-tiap keadaan, keandalan dan ketersediaan dari sistem generator diesel, sebagai fungsi waktu pulih kembali ($\tau = 1/\mu$) disajikan dalam tabel 1 dan tabel 2. (terlampir)

KESIMPULAN

Dari pembahasan dan contoh perhitungan penggunaan metode analisis Markov, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- Metode analisis Markov dipakai untuk menghitung keandalan dan ketersediaan sistem yang dapat diperbaiki (dengan memperhatikan faktor pulih kembali akibat adanya perbaikan/ perawatan).
- Analisis Markov hanya praktis untuk sistem yang sederhana, untuk sistem yang komplek akan memberikan persamaan diferensial simultan yang banyak (matrik transisi yang besar).
- Dari contoh perhitungan dapat dilihat bahwa semakin pendek waktu pulih kembali atau waktu perbaikan generator diesel, keandalan dan ketersediaan sistem generator diesel semakin tinggi.
- Demikian pula semakin panjang periode waktu operasi, keandalan sistem generator diesel semakin menurun dengan tajam, tetapi ketersediaan sistem tetap (tidak terpengaruh oleh periode waktu operasi).
- Dari tabel 1 dan tabel 2 dapat dilihat sebagai contoh untuk τ_{gd} = 1 jam, keandalan sistem generator diesel pada periode operasi 20 hari adalah 0.9748, dan pada periode operasi 30 hari adalah 0.9620, sedangkan ketersediaan sistem generator diesel baik untuk periode operasi 20 hari maupun 30 hari , adalah tetap sebesar 0.9999.

DAFTARPUSTAKA

1. Ernest J.Henley and Hiromitsu Kumamoto, *Reliability Engeneering And Risk Assessment* Prentice-HallInc.,1981.
2. Norman J.Mc Cormick, *Reliability and Risk Analysis Methods and Nuclear Power Applications,* Academic Press Inc. (London), 1981.

ANALISIS KEANDALAN DAN KETERSEDIAAN SISTEM PENYEDIA DAYA DARURAT RSG G.A.SIWABESSY

Deskripsi Sistem Penyedia Daya Darurat RSG G.A.Siwabessy

Pada kondisi normal sistem listrik di RSG G.A. Siwabessy disuplai dari buah jaringan PLN 20 kV. Tegangan rendah disediakan dengan tiga buah transformer masing-masing dihubungkan dengan kedua jaringan 20 kV.

-Penyedia daya normal 380 V AC

-Penyedia daya darurat 390 V AC

-Penyedia daya tak terputuskan + 24 V DC

Dalam hal terjadi kegagalan pada penyedia daya normal, sistem penyedia daya darurat secara otomatis bekerja. Sistem penyedia daya darurat terdiri dari tiga buah generator diesel. (BRV 10, BRV 20 dan BRV 30). Pada sistem ini juga terdiri dari tiga sistem redudan yang bebas. Suatu kegagalan paad sebuah diesel generator tidak akan membahayakan sistem yang lainnya. Tiap generator dan kotak distribusinya terletak dalam ruang yang berbeda.

Metode Perhitungan Dan Hasil Perhitungan.

Perhitungan keandalan dan ketersediaan sistem penyedia daya darurat reaktor G.A.Siwabessy, sebagai fungsi dari waktu/periode operasi dan waktu pulih kembali dari generator diesel, dilakukan dengan mengambil asumsi dan data-data sebagai berikut :

- Tiap generator diesel mempunyai laju kegagalan dan laju perbaikan yang sama dan konstan terhadap waktu.
- Tersedia satu tim perbaikan untuk setiap sistem generator diesel.
- Laju kegagalan untuk dapat dihidupkan (fail to start atau fail to run) dari generator diesel diambil dari daftar pustaka (2) dengan nilai rerata $\lambda = 3.10^{-3}$/jam

Dengan asumsi-asumsi di atas dan dengan menggunakan persamaan (6) dan persamaan (7), maka tiap-tiap keadaan (state probability) dari diagram transisi dapat dihitung.

Harga kebolehjadian gagal akibat kejadian *common cause* (λ_{cc}) dianggap mengikuti model Marshall-Olkin (metode faktor beta) yaitu :

$$\beta = \frac{\lambda_{cc}}{\lambda + \lambda_{cc}}$$

harga parameter beta untuk peralatan seperti keandalan diesel dan pompa-pompa, bervariasi dari 0,1 s/d 0,2.

Hasil perhitungan kebolehjadian tiap-tiap keadaan, keandalan dan ketersediaan dari sistem generator diesel, sebagai fungsi waktu pulih kembali ($\tau = 1/\mu$) disajikan dalam tabel 1 dan tabel 2. (terlampir)

KESIMPULAN

Dari pembahasan dan contoh perhitungan penggunaan metode analisis Markov, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- Metode analisis Markov dipakai untuk menghitung keandalan dan ketersediaan sistem yang dapat diperbaiki (dengan memperhatikan faktor pulih kembali akibat adanya perbaikan/perawatan).
- Analisis Markov hanya praktis untuk sistem yang sederhana, untuk sistem yang komplek akan memberikan persamaan diferensial simultan yang banyak (matrik transisi yang besar).
- Dari contoh perhitungan dapat dilihat bahwa semakin pendek waktu pulih kembali atau waktu perbaikan generator diesel, keandalan dan ketersediaan sistem generator diesel semakin tinggi.
- Demikian pula semakin panjang periode waktu operasi, keandalan sistem generator diesel semakin menurun dengan tajam, tetapi ketersediaan sistem tetap (tidak terpengaruh oleh periode waktu operasi).
- Dari tabel 1 dan tabel 2 dapat dilihat sebagai contoh untuk τ_{gd} = 1 jam, keandalan sistem generator diesel pada periode operasi 20 hari adalah 0.9748, dan pada periode operasi 30 hari adalah 0.9620, sedangkan ketersediaan sistem generator diesel baik untuk periode operasi 20 hari maupun 30 hari , adalah tetap sebesar 0.9999.

PUSTAKA

1. Ernest J.Henley and Hiromitsu Kumamoto, *Reliability Engeneering And Risk Assessment* Prentice-HallInc.,1981.
2. Norman J.Mc Cormick, *Reliability and Risk Analysis Methods and Nuclear Power Applications,* Academic Press Inc. (London), 1981.
3. C.L.Atwood, J.A.Steverson, *Common Cause Fault Rates for Diesel Generators Eliminates Based On Licences Event Reports at U.S. Commercial Nuclear Power Plants 1976 - 1778, EG & G Idaho,Inc,1982.*
4. Badan Tenaga Atom Nasional ; Multipurpose Research Reactor MPR- 30, Safety Analysis Report, 1986.
5. C.A.Clarotti, G.De Cola, *MARKAN CÒDE Theoritical Manual and User Guide*, Progetto Sistem Nuclears,ENEA-NIRA,1983.

DISKUSI

P.Ilham Y. :

Bagaimana cara menghitung λ dan μ ?
Faktor apa saja yang mempengaruhinya ?
Jika λ dan μ diperoleh dari analisis statistik ata yang terkumpul, berapa data minimum terkumpul dan dalam selang waktu berapa?

Syarip :

λ dan μ dicari atau ditentukan dari data-data yang terkumpul (mislicencee Event Report ?LER) di USA. Bisa dilihat pada ref.3.
Data yang terkumpul harus sudah bisa membentuk suatu *probability distribution function*, selang waktunya tergantung kepada jumlah sistem/ komponen yang diamati.

B.Gultom :

1.Apakah "waktu tunggu" tidak ditinjau ?
2.Apa artinya mencari solusi sistem persamaan diferensial dalam hubungan dengan keandalan sistem ?

Syarip :

1.Dalam hal ini dianggap diskrit, hanya ada 2 state (keadaan), yaitu sukses atau gagal. Jadi tidak ada/ tidak ditinjau waktu tunggu (jika yang dimaksud dengan "waktu tunggu" adalah *time lag*).
2.Solusi tersebut merupakan besarnya nilai keandalan.

Lampiran 1 :

Tabel 1. Kebolehjadian keadaan (S_ι), keandalan dan ketersediaan (R_ι dan A_ι) sebagai fungsi waktu pulih kembali generator diesel (τ_{gd}).

τ_{gd}	periode operasi	20 hari		30 hari	
	S_ι	R_ι	A_ι	R_ι	A_ι
1 jam	1	9.662 10-1	$0.991\ 10^{-1}$	$9.535\ 10^{-1}$	$0.991\ 10^{-1}$
	2	2.882 10-3	$2.973\ 10^{-3}$	$2.844\ 10^{-3}$	$2.973\ 10^{-3}$
	3	2.882 10-3	$2.973\ 10^{-3}$	$2.844\ 10^{-3}$	$2.973\ 10^{-3}$
	4	2.882 10-3	$2.973\ 10^{-3}$	$2.844\ 10^{-3}$	$2.973\ 10^{-3}$
	1-4	0.9748	0.9999	0.9620	0.9999
	5	8.378 10-3	$8.919\ 10^{-6}$	$1.267\ 10^{-2}$	$8.919\ 10^{-6}$
	6	8.378 10-3	$8.919\ 10^{-6}$	$1.267\ 10^{-2}$	$8.919\ 10^{-6}$
	7	8.378 10-3	$8.919\ 10^{-6}$	$1.267\ 10^{-2}$	$8.919\ 10^{-6}$
8 jam	1	7.795 10-1	$9.313\ 10^{-1}$	$7.107\ 10^{-1}$	$9.313\ 10^{-1}$
	2	1.793 10-2	$2.235\ 10^{-2}$	$1.635\ 10^{-2}$	$2.235\ 10^{-2}$
	3	1.793 10-2	$2.235\ 10^{-2}$	$1.635\ 10^{-2}$	$2.235\ 10^{-2}$
	4	1.793 10-2	$2.235\ 10^{-2}$	$1.635\ 10^{-2}$	$2.235\ 10^{-2}$
	1-4	0.8333	0.9983	0.7597	0.9983
	5	5.558 10-2	$5.364\ 10^{-4}$	$8.008\ 10^{-2}$	$5.364\ 10^{-4}$
	6	5.558 10-2	$5.364\ 10^{-4}$	$8.008\ 10^{-2}$	$5.364\ 10^{-4}$
	7	5.558 10-2	$5.364\ 10^{-4}$	$8.008\ 10^{-2}$	$5.364\ 10^{-4}$
24 jam	1	5.363 10-1	$8.121\ 10^{-1}$	$4.259\ 10^{-1}$	$8.121\ 10^{-1}$
	2	3.456 10-2	$5.843\ 10^{-2}$	$2.745\ 10^{-2}$	$5.843\ 10^{-2}$
	3	3.456 10-2	$5.843\ 10^{-2}$	$2.745\ 10^{-2}$	$5.843\ 10^{-2}$
	4	3.456 10-2	$5.843\ 10^{-2}$	$2.745\ 10^{-2}$	$5.843\ 10^{-2}$
	1-4	0.6033	0.9874	0.5082	0.9874
	5	1.200 10-1	$4.203\ 10^{-3}$	$1.639\ 10^{-1}$	$4.203\ 10^{-3}$
	6	1.200 10-1	$4.203\ 10^{-3}$	$1.639\ 10^{-1}$	$4.203\ 10^{-3}$
	7	1.200 10-1	$4.203\ 10^{-3}$	$1.639\ 10^{-1}$	$4.203\ 10^{-3}$

Lampiran 2 :

Tabel 2. Keandalan (R_t) dan ketersediaan (A_t) pada keadaan (S_t) sebagai fungsi waktu pulih kembali generator diesel (τ_{gd}). dengan *common cause* β = 0,15

τ_{gd}	periode operasi	20 hari		30 hari	
	S_t	R_t	A_t	R_t	A_t
1 jam	1	5.105 10^{-1}	9.919 10-1	3.623 10^{-1}	0.910 10^{-1}
	2	1.526 10^{-3}	2.973 10^{-3}	1.086 10^{-3}	2.973 10^{-3}
	3	1.526 10^{-3}	2.973 10^{-3}	1.086 10^{-3}	2.973 10^{-3}
	4	1.526 10^{-3}	2.973 10^{-3}	1.086 10^{-3}	2.973 10^{-3}
	1-4	0.5151	0.9999	0.3665	0.9999
	5	1.616 10^{-1}	8.919 10^{-6}	2.112 10^{-1}	8.919 10^{-6}
	6	1.616 10^{-1}	8.919 10^{-6}	2.112 10^{-1}	8.919 10^{-6}
	7	1.616 10^{-1}	8.919 10^{-6}	2.112 10^{-1}	8.919 10^{-6}
8 jam	1	4.258 10^{-1}	9.313 10-1	2.842 10^{-1}	9.313 10^{-1}
	2	9.935 10^{-3}	2.235 10^{-2}	6.630 10^{-3}	2.235 10^{-2}
	3	9.935 10^{-3}	2.235 10^{-2}	6.630 10^{-3}	2.235 10^{-2}
	4	9.935 10^{-3}	2.235 10^{-2}	6.630 10-^{3}	2.235 10^{-2}
	1-4	0.4556	0.9984	0.3041	0.9984
	5	1.814 10^{-1}	5.364 10^{-4}	2.320 10^{-1}	5.364 10^{-4}
	6	1.814 10^{-1}	5.364 10^{-4}	2.320 10^{-1}	5.364 10^{-4}
	7	1.814 10^{-1}	5.364 10^{-4}	2.320 10^{-1}	5.364 10^{-4}
24 jam	1	3.081 10^{-1}	7.799 10-1	1.834 10^{-1}	7.799 10^{-1}
	2	2.043 10^{-2}	6.452 10^{-2}	1.216 10^{-2}	6.452 10^{-2}
	3	2.043 10^{-2}	6.452 10^{-2}	1.216 10^{-2}	6.452 10^{-2}
	4	2.043 10^{-2}	6.452 10^{-2}	1.216 10^{-2}	6.452 10^{-2}
	1-4	0.3694	0.9753	0.2199	0.9753
	5	2.102 10^{-1}	8.850 10^{-3}	2.600 10^{-1}	8.850 10^{-3}
	6	2.102 10^{-1}	8.850 10^{-3}	2.600 10^{-1}	8.850 10^{-3}
	7	2.102 10^{-1}	8.850 10^{-3}	2.600 10^{-1}	8.850 10^{-3}