

ANALISIS KEANDALAN DALAM PERANCANGAN TEKNIK, STUDI KASUS SISTEM KENDALI ELEVATOR PESAWAT CN235-220

I Wayan Suweca⁽¹⁾, Rosyidin Sufyani⁽²⁾

⁽¹⁾Laboratorium Perancangan Mesin ITB

⁽²⁾Alumni Departemen Teknik Mesin ITB

Abstrak

Tulisan ini menyajikan suatu kajian analisis keandalan sistem mekanik berupa sistem kendali elevator pesawat CN235-220. Analisis dilakukan dengan menggunakan teorema Bayes. Analisis keandalan dilakukan untuk berbagai macam konfigurasi sistem, yaitu untuk sistem yang ada dan dua sistem hasil modifikasi. Berdasarkan hasil perhitungan nilai keandalan diperoleh bahwa salah satu sistem hasil modifikasi memberikan nilai keandalan, yang relatif lebih baik dari sistem yang ada. Walaupun dari aspek keandalan sistem hasil modifikasi memberikan nilai yang relatif lebih baik, tetapi masih diperlukan kajian lain (kekuatan, kestabilan, dan sebagainya.) untuk dapat mengetahui apakah sistem hasil modifikasi tersebut dapat memenuhi semua persyaratan yang berlaku.

Abstract

This paper presents a reliability analysis of elevator control system for CN235-220 aircraft. The analysis is carried out using Bayes theorem. Reliability analysis is performed for several system configurations, existing system and two modified systems. Reliability calculation shows that one of the modified systems has reliability relatively higher than the existing system. To insure all requirement needed, the other analysis i.e. strength, stability, etc. must be conducted for the modified system.

Keywords: reliability, Bayes theorem, elevator control system.

1. PENDAHULUAN

Sistem kendali terbang berfungsi untuk mengendalikan pesawat, baik dalam kondisi terbang maupun dalam kondisi taxiing. Seperti sistem-sistem lainnya, sistem kendali harus memiliki keandalan tertentu dan memenuhi persyaratan dari regulasi yang berlaku. Untuk mencegah terjadinya kesalahan perancangan, analisis keandalan sistem selayaknya dilakukan sejak awal proses perancangan. Pesawat terbang CN235-220 memiliki sistem kendali terbang yang sepenuhnya mekanik.

Makalah ini mengkaji keandalan sistem kendali yang ada pada pesawat CN235-220. Dalam studi kasus, kajian dibatasi hanya pada sistem kendali terbang elevator saja. Hal ini karena sistem tersebut merupakan sistem yang paling kritis dibanding sistem kendali yang lain yang ada pada pesawat CN235-220. Analisis keandalan dilakukan baik terhadap sistem yang ada maupun sistem hasil modifikasi.

2. METODOLOGI ANALISIS

Berbagai metode untuk analisis keandalan sistem tersedia dalam literatur, [1-2]. Metode analisis keandalan yang digunakan dalam tulisan ini didasarkan pada teorema Bayes, [2]. Untuk dapat menggunakan teorema ini, terlebih dahulu perlu dikenalkan beberapa pengertian seperti misalnya keandalan, fungsi keandalan, diagram

blok keandalan, susunan seri, susunan paralel, dan sebagainya.

2.1. Keandalan

Keandalan suatu sistem didefinisikan sebagai kemungkinan (*probability*) suatu sistem untuk dapat melakukan fungsinya selama kurun waktu tertentu dan dalam kondisi operasi yang telah ditetapkan, [3-4]. Pada umumnya, keandalan suatu sistem dinyatakan dalam bentuk fungsi keandalan, [4], $R(t)$ yang dapat dituliskan sebagai

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(u) du \quad (1)$$

yang mana $F(t)$ adalah kemungkinan kegagalan sistem sebagai fungsi waktu, sedangkan t adalah variabel acak waktu dengan fungsi padat $f(t)$.

Dengan mengasumsikan bahwa variabel acak waktu, t didiskripsikan sebagai fungsi padat eksponensial, fungsi keandalan dapat dituliskan menjadi

$$R(t) = \int_t^{\infty} \frac{1}{\theta} e^{-u/\theta} du = e^{-t/\theta} \quad (2)$$

dengan θ adalah umur rata-rata dari sistem yang sedang dianalisis.

Untuk kasus di mana variabel acak waktu dinyatakan dengan fungsi padat eksponensial, umur rata-rata akan bernilai sama dengan waktu rata-rata antara kegagalan

sistem (*Mean Time Between Failure, MTBF*). Kebalikan dari MTBF dikenal dengan istilah laju kegagalan (*failure rate*) yang diberi simbol λ . Sebagai fungsi MTBF atau sebagai fungsi laju kegagalan, fungsi keandalan dengan fungsi padat waktu berupa fungsi eksponensial, dapat dituliskan

$$R(t) = e^{-t/MTBF} = e^{-\lambda t} \quad (3)$$

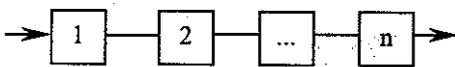
Pengambilan asumsi di mana variabel waktu memiliki fungsi padat eksponensial, dapat merepresentasikan keadaan di mana laju kegagalan adalah konstan selama periode operasi dari sistem tersebut. Dalam istilah perawatan (*maintenance*), periode operasi dengan laju kegagalan yang konstan dikenal dengan istilah waktu manfaat (*useful life*).

Untuk sistem mekanik, nilai keandalan setiap komponennya pada umumnya diperoleh dari katalog, [5]. Berdasarkan nilai keandalan tiap komponen, suatu sistem yang terdiri dari berbagai komponen, dapat dihitung nilai keandalannya dengan bantuan model yang disebut diagram blok keandalan.

2.2. Diagram blok Keandalan

Diagram blok keandalan adalah suatu model sederhana yang dapat digunakan untuk merepresentasikan secara visual karakteristik keandalan suatu sistem. Ada dua hubungan dasar dalam diagram blok keandalan, yaitu hubungan seri dan hubungan paralel. Untuk merepresentasikan keandalan suatu sistem yang kompleks, dibutuhkan kombinasi dari kedua hubungan tersebut.

1. Sistem dengan hubungan seri



Gambar 1 Diagram blok keandalan hubungan seri

Keandalan sistem yang memiliki hubungan seri dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut.

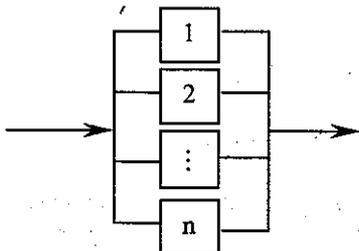
$$R_s = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_{n-1} \times R_n \quad (4)$$

atau dapat dituliskan sebagai

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (5)$$

dengan $R_i, i=1 \dots n$ adalah keandalan dari masing-masing komponen penyusun sistem tersebut.

2. Sistem dengan hubungan paralel



Gambar 2 Diagram blok keandalan hubungan paralel

Keandalan sistem yang memiliki hubungan paralel dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut.

$$R_s = 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2) \dots (1 - R_{n-1})(1 - R_n)] \quad (6)$$

atau dapat dituliskan

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (7)$$

dengan $R_i, i=1 \dots n$ adalah keandalan dari komponen ke i dari sistem.

2.3. Teorema Bayes

Teorema Bayes dapat dinyatakan sebagai berikut, [2]: Keandalan suatu sistem sama dengan keandalan dari sistem tersebut, dengan asumsi bahwa suatu unit yang dipilih, misalnya unit A, dalam keadaan baik, $R_s|A_g$, dikalikan dengan keandalan unit A, R_A , ditambah keandalan sistem dengan asumsi unit yang dipilih dalam keadaan jelek, $R_s|A_b$ dikalikan ketidakandalan unit A, $(1 - R_A)$. Atau secara matematik dapat dituliskan

$$R_s = (R_s|A_g) \times R_A + (R_s|A_b) \times (1 - R_A) \quad (8)$$

yang mana

R_s = keandalan sistem

$R_s|A_g$ = keandalan sistem jika unit A yang dipilih dalam kondisi baik (*good*)

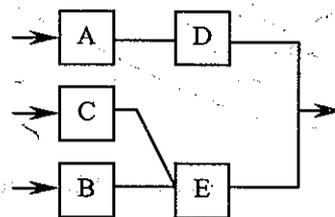
$R_s|A_b$ = keandalan sistem jika unit A yang dipilih dalam kondisi jelek (*bad*)

R_A = keandalan dari unit A

Sebagai contoh ilustrasi, pada Gambar (3) diberikan diagram blok keandalan suatu sistem. Sistem pada Gambar (3) akan sukses, jika paling sedikit salah satu dari jalur AD, CE, atau BE ada dalam keadaan baik. Dengan mengambil asumsi tersebut akan dihitung keandalan sistem menurut teorema Bayes.

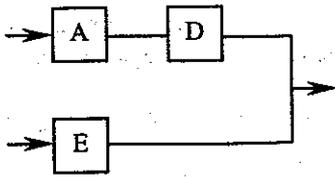
Agar keandalan sistem dapat dihitung, pertama-tama harus diambil satu unit, misalkan unit C, sebagai unit yang dipilih. Aplikasi teorema Bayes, dengan mengambil unit C yang dipilih, menghasilkan keandalan sistem sebagai berikut.

$$R_s = (R_s|C_g) \times R_C + (R_s|C_b) \times (1 - R_C) \quad (9)$$



Gambar 3 Contoh ilustrasi teorema Bayes

Asumsi bahwa unit C dalam keadaan baik, menghasilkan diagram blok seperti pada Gambar (4).



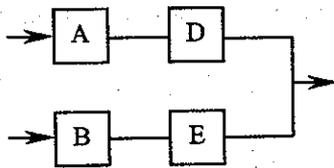
Gambar 4 Diagram blok keandalan $R_S|C_g$

Berdasarkan Gambar (4) keandalan $R_S|C_g$ dapat dituliskan sebagai berikut

$$R_S|C_g = 1 - (1 - R_A R_D)(1 - R_E) \quad (10)$$

Sedangkan asumsi unit C jelek, akan menghasilkan blok diagram keandalan seperti pada Gambar (5) dan memberikan keandalan $R_S|C_b$ sebagai berikut.

$$R_S|C_b = 1 - (1 - R_A R_D)(1 - R_B R_E) \quad (11)$$



Gambar 5 Diagram blok keandalan $R_S|C_b$

Substitusi persamaan (10) dan (11) ke persamaan (9) akan memberikan keandalan sistem keseluruhan sebagai berikut.

$$R_S = [1 - (1 - R_A R_D)(1 - R_E)]R_C + [1 - (1 - R_A R_D)(1 - R_B R_E)](1 - R_C) \quad (12)$$

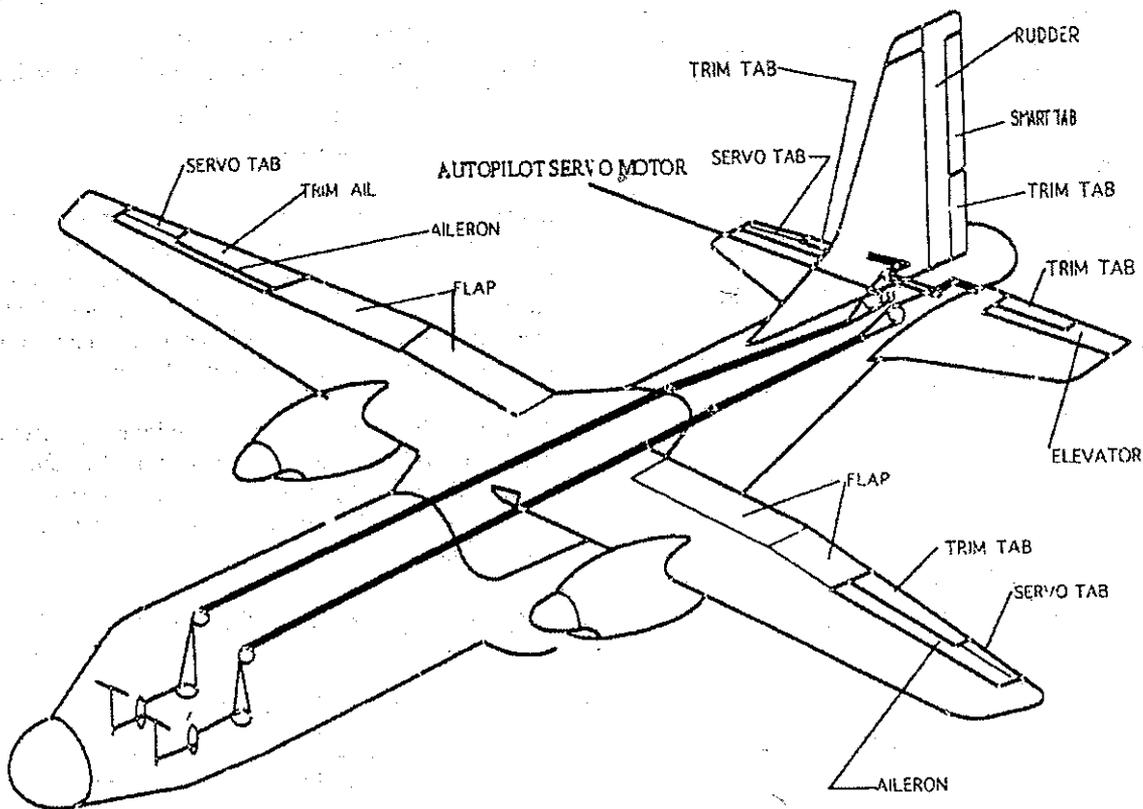
atau dapat dituliskan

$$R_S = R_A R_D + R_B R_E + R_C R_E - R_B R_C R_E - R_A R_C R_D R_E - R_A R_B R_D R_E + R_A R_B R_C R_D R_E \quad (13)$$

Hasil seperti ditunjukkan pada persamaan (13) dapat juga diperoleh dengan mengambil salah satu unit sebagai unit yang dipilih. Aplikasi teorema Bayes untuk menghitung keandalan sistem yang kompleks sangat menguntungkan, karena dengan memilih satu unit yang tepat, keandalan sistem dapat dianalisis dengan lebih mudah.

3. STUDI KASUS

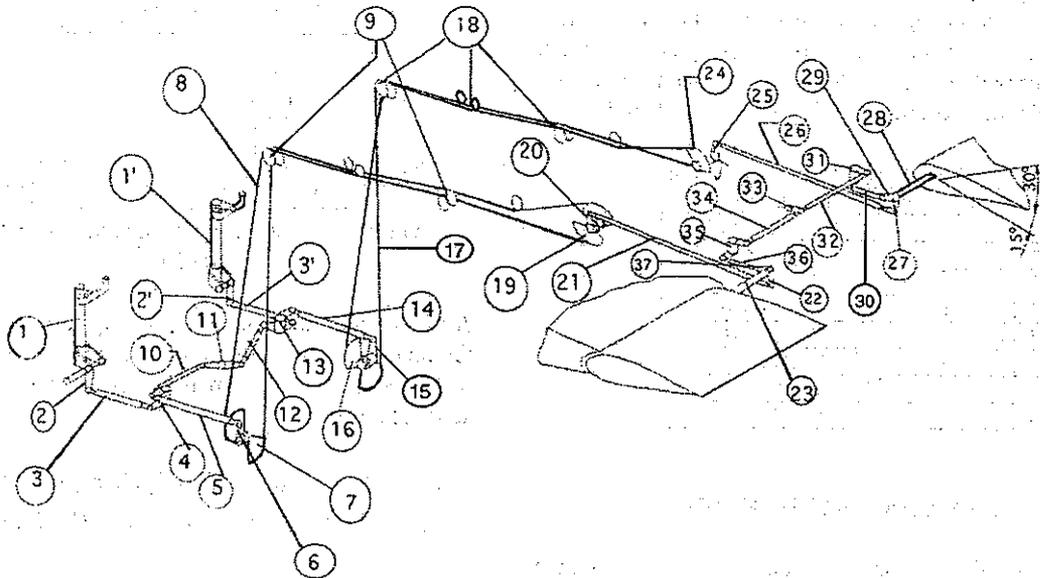
Pada Gambar (6) ditunjukkan secara keseluruhan sistem kendali yang ada pada pesawat CN235-220. Secara umum, sistem kendali terbang pesawat CN235-220 dapat dikelompokkan menjadi 2, yaitu sistem kendali primer (*primary control system*), dan sistem kendali sekunder (*secondary controls system*).



Gambar 6 Sistem kendali dalam pesawat terbang CN235-220 [Ref 3]

Sistem kendali primer terdiri dari *Aileron*, *Rudder* dan *Elevator*. Sedangkan sistem kendali sekunder terdiri dari *Aileron trim*, *Rudder trim* dan *Elevator trim*.

Studi kasus yang dibahas dalam makalah ini dibatasi hanya untuk sistem kendali elevator. Skema sistem kendali elevator pesawat CN235-220 diberikan pada Gambar (7).



Gambar 7 Sistem kendali elevator pesawat CN235-220 [Ref 3]

3.1. Kendali Elevator

Sistem kendali elevator pesawat CN235-220, seperti ditunjukkan pada Gambar (7), berfungsi untuk memberikan kendali pesawat terbang pada arah longitudinal, yaitu untuk mendapatkan gerakan *pitching*. Sistem kendali elevator pesawat CN235-220 terdiri dari 37 komponen. Keseluruhan komponen kendali elevator pesawat CN235-220 beserta kemungkinan modus serta laju kegagalannya (*failure rate*) diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1
Komponen Kendali Elevator Pesawat CN235-220

No.	Nama komponen	Modus dan Laju kegagalan per 10 ⁶	
		Macet/Jammed	Putus/Break
1/1'	Control Coloum	1.3717(x2)	0.1
2/2'	Lever	0.01	0.1
3/3'	Rod	0.025	0.025
4	Bell Crank	1.3717(x2)	0.025
Jumlah		5.5218	0.25
5	Rod	0.025	0.025
6	Lever	0.01	0.1
7	Kuadran	1.3717(x2)	1
8	Kabel	1	0.5
9	Pulli	0.033(x7)	0.025(x7)
Jumlah		3.9884	1.8
10	Rod	0.025	0.025
11	Lever	1.3717(x2)	0.1
12	EDR	0.1	9.5
Jumlah		2.8684	9.625
13	Bell Crank	1.3717(x2)	0.025
14	Rod	0.025	0.025
15	Lever	0.01	0.1
16	Quadrant	1.3717	1
17	Cable	1	0.5
18	Pulley	0.03(x7)	0.025(x7)
Jumlah		6.7138	1.825
19	Tension Regulator	1.3717(x2)	8.04
20	Lever	0.01	0.1
21	Rod	0.025	0.025
22	Lever	0.01	0.1
23	Torsional Tube	1.3717(x2)	0.1
Jumlah		5.5318	8.365
24	Tension Regulator	1.3717(x2)	8.04

25	Lever	0.01	0.1
26	Rod	0.025	0.025
27	Lever	0.01	0.1
28	Torsional Tube	1.3717(x2)	0.1
Jumlah		5.5318	8.365
29	Lever	0.01	0.1
30	Rod	0.025	0.025
31	Bell Crank	1.3717(x2)	0.1
32	EDR	0.1	9.5
33	Lever	0.01	0.1
34	Rod	0.025	0.025
35	Bell Crank	1.3717(x2)	0.1
36	Rod	0.025	0.025
37	Lever	0.01	0.1
Jumlah		6.3824	10.075

3.2. Blok Keandalan Ekuivalen

Untuk memudahkan analisis sistem kendali elevator, terlebih dahulu perlu dilakukan penyederhanaan terhadap sistem yang asli. Penyederhanaan sistem keandalan tersebut akan menghasilkan blok keandalan unit ekuivalen.

Penyederhanaan kendali elevator pesawat CN235-220 dilakukan dengan mengambil 8 unit ekuivalen yang diberi nama mulai dari unit A sampai dengan unit H. Pada Tabel 2 berikut ini diberikan daftar ekuivalensi kedelapan unit tersebut serta hubungannya dengan komponen-komponen sistem kendali elevator.

Tabel 2 Unit Ekuivalen Kendali Elevator

No.	Nama Unit	Ekuivalensi
1	A	Susunan seri dari komponen 1, 2, 3 dan 4.
2	B	Susunan seri dari komponen 1', 2' dan 3'.
3	C	Susunan seri dari komponen 5, 6, 7, 8, dan 9.
4	D	Susunan seri dari komponen 10, 11, dan 12.
5	E	Susunan seri dari komponen 13, 14, 15, 16, 17, dan 18.
6	F	Susunan seri dari komponen 19, 20, 21, 22, dan 23.
7	G	Susunan seri dari komponen 24, 25, 26, 27, dan 28.
8	H	Susunan seri dari komponen 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 dan 37.

Berdasarkan laju kegagalan, seperti diberikan pada Tabel 1, dari masing-masing komponen penyusun kendali elevator pesawat CN235-220, laju kegagalan unit-unit ekuivalen dapat dihitung dan diberikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Laju Kegagalan Unit Ekuivalen

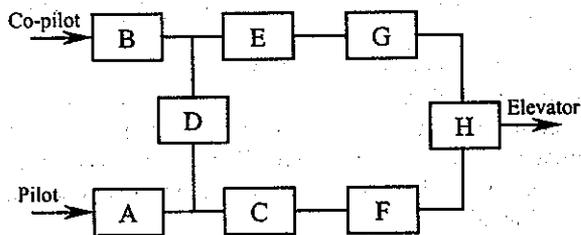
No	Nama Unit	Laju kegagalan
1	A	5.7718×10^{-6}
2	B	3.0034×10^{-6}
3	C	5.7884×10^{-6}
4	D	12.4934×10^{-6}
5	E	8.5568×10^{-6}
6	F	13.8968×10^{-6}
7	G	13.8968×10^{-6}
8	H	16.4574×10^{-6}

4. ANALISIS STUDI KASUS

Sebagai studi kasus, pertama-tama dilakukan perhitungan keandalan sistem yang telah ada. Kemudian dilakukan beberapa modifikasi terhadap sistem yang ada. Modifikasi 1 dilakukan dengan menghilangkan interkoneksi belakang dan modifikasi 2 dilakukan dengan menghilangkan interkoneksi depan. Selanjutnya dilakukan perhitungan keandalan dari kedua sistem hasil modifikasi tersebut. Nilai keandalan sistem hasil modifikasi kemudian dibandingkan dengan nilai keandalan sistem yang ada.

4.1. Keandalan Sistem Yang Ada

Diagram blok ekuivalen dari sistem kendali elevator pesawat CN235-220 yang ada (*existing system*) diberikan pada Gambar (8).



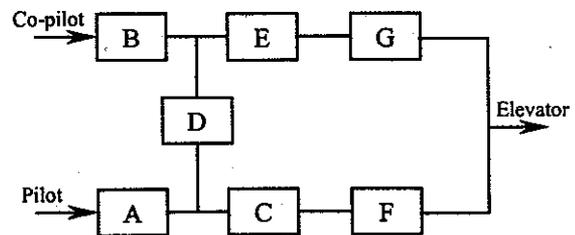
Gambar 8 Diagram blok keandalan sistem yang ada

Berdasarkan diagram blok pada Gambar (8) di atas dan dengan menggunakan teorema Bayes, dengan mengambil unit A sebagai unit yang dipilih, keandalan sistem dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$R_{SE} = [1 - (1 - R_C R_F R_H)(1 - R_D R_E R_G)] R_A + R_B [1 - (1 - R_E R_G)(1 - R_D R_C R_F R_H)] (1 - R_A) \quad (14)$$

4.2. Keandalan Sistem Modifikasi 1

Modifikasi 1 dilakukan dengan menghilangkan interkoneksi belakang (unit H). Diagram blok ekuivalen dari sistem kendali elevator pesawat CN235-220 hasil modifikasi 1 diberikan pada Gambar (9).



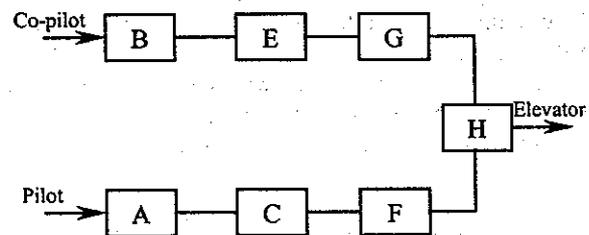
Gambar 9 Diagram blok keandalan sistem hasil modifikasi 1

Aplikasi teorema Bayes terhadap diagram blok pada Gambar (9) di atas, dengan mengambil unit A sebagai unit yang dipilih, menghasilkan keandalan sistem sebagai berikut.

$$R_{SE} = [1 - (1 - R_C R_F)(1 - R_D R_E R_G)] R_A + R_B [1 - (1 - R_E R_G)(1 - R_D R_C R_F)] (1 - R_A) \quad (15)$$

4.3. Keandalan Sistem Modifikasi 2

Modifikasi 2 dilakukan dengan menghilangkan interkoneksi depan (unit D). Pada Gambar (10) diperlihatkan diagram blok ekuivalen dari sistem kendali elevator pesawat CN235-220 hasil modifikasi 2.



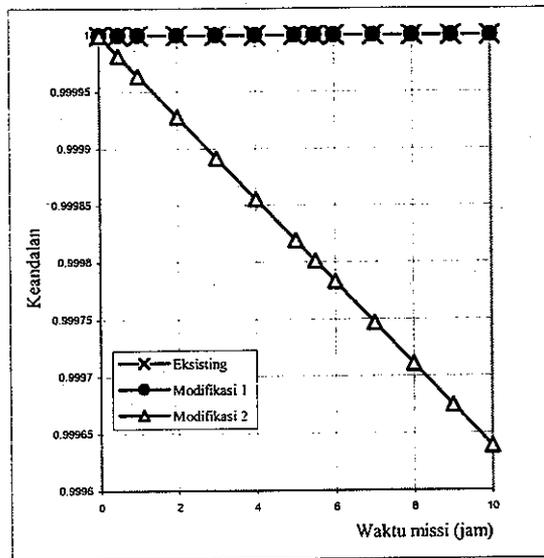
Gambar 10 Diagram blok keandalan sistem hasil modifikasi 2

Aplikasi teorema Bayes pada diagram blok pada Gambar (10) di atas, dengan mengambil unit A sebagai unit yang dipilih, menghasilkan rumus keandalan sistem modifikasi 2 sebagai berikut.

$$R_{SE} = (R_C R_F R_H) R_A + (R_B R_E R_G R_H) (1 - R_A) \quad (16)$$

4.4. Perhitungan Keandalan Sistem

Perhitungan keandalan sistem kendali elevator pesawat CN235-220, baik sistem yang ada maupun kedua sistem hasil modifikasi, dilakukan dengan menggunakan persamaan (14), (15) dan persamaan (16). Dalam bentuk grafik perbandingan keandalan ketiga sistem tersebut diberikan pada Gambar (11).



Gambar 11 Keandalan sistem kendali elevator

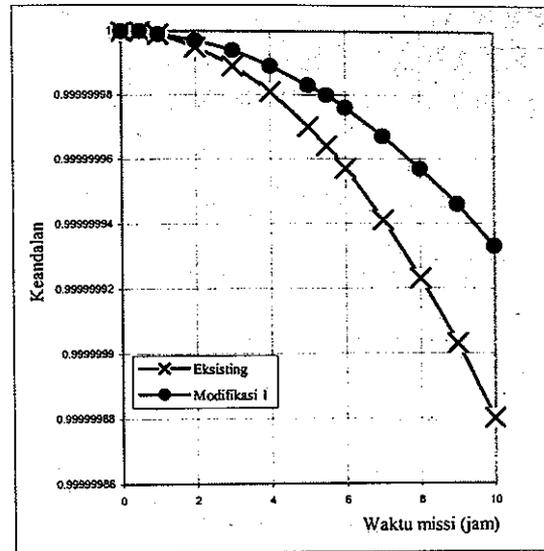
Berdasarkan hasil yang ditunjukkan oleh grafik pada Gambar (11), dapat dilihat bahwa nilai keandalan sistem hasil modifikasi 1 memiliki nilai yang hampir sama dengan sistem yang asli. Sedangkan sistem modifikasi 2 memberikan keandalan yang lebih rendah. Hal ini disebabkan oleh karena sistem modifikasi 1 menghasilkan sistem yang mendekati sistem paralel, sedangkan sistem modifikasi 2 menghasilkan sistem yang mendekati susunan seri. Karakteristik sistem paralel berperilaku seolah-olah ada 2 buah sistem, sehingga jika satu sistem gagal, maka sistem yang lainnya akan mengambil alih kendali, sehingga menghasilkan keandalan yang lebih tinggi.

Untuk melihat seberapa dekat keandalan sistem hasil modifikasi 1 dengan sistem yang ada, pada Gambar (12) ditunjukkan grafik kedua sistem tersebut. Menyimak grafik pada Gambar (12), dapat dilihat bahwa sistem hasil modifikasi 1 mempunyai nilai keandalan yang relatif lebih baik dari sistem yang ada. Hal ini dapat disebabkan karena sistem hasil modifikasi 1 memiliki komponen yang lebih sedikit dibandingkan dengan sistem yang ada dan seolah-olah memiliki karakteristik sistem paralel yang lebih banyak dibandingkan dengan sistem yang ada.

5. ANALISA DAN KESIMPULAN

Dari hasil analisis studi kasus yang dikaji, beberapa kesimpulan dapat diambil sebagai berikut:

1. Hasil perhitungan keandalan terhadap sistem yang ada dan kedua sistem hasil modifikasi menunjukkan bahwa ternyata nilai keandalan modifikasi 1 relatif lebih baik dari sistem yang ada.
2. Walaupun dari aspek keandalan sistem hasil modifikasi 1 dapat memenuhi persyaratan, tetapi masih perlu dilakukan analisis dari aspek-aspek yang lainnya seperti misalnya aspek kekuatan struktur, kestabilan, dan sebagainya.



Gambar 12 Keandalan sistem kendali elevator yang ada dan hasil modifikasi 1

6. DAFTAR PUSTAKA

1. Dhillon B.S, 1988, *Mechanical Reliability, Theory, Model and Applications*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.370 L'Enfant Promanade, SW, Washington.
2. Dimitri,K, 1991, *Reliability Hand Book, Vol II*, Departemen Aero Space and Mechanical Engineering, University Arizona, Cliss, New Jersey.
3. Rao SS, 1992, *Reliability Based Design*, McGraw Hill, Inc, New York.
4. Benjamin S. Blanchard, Dinesh Verma, Elmer L. Peterson, 1995, *Maintainability: A Key to Effective Serviceability and Maintenance Management*, John Wiley & Sons.
5. *Nonelectronic Parts Reliability Data*, 1995, Reliability Analysis Center, Rome, NY.
6. Respati B, 1994, *Flight Control System Description for CN235-220*, IPTN, Bandung.