

## SIMULASI DINAMIKA SISTEM PADA SISTEM BAHAN BAKAR MOTOR INDUK: SEBUAH ANALISA SENSITIVITAS KEMAMPUAN ANAK BUAH KAPAL (ABK) TERHADAP BIAYA PEMELIHARAAN DAN KEANDALAN SISTEM

<sup>1</sup>Didiet Sudiro Resobowo, Lahar Baliwangi, <sup>2</sup>Ketut Buda Artana, <sup>3</sup>AAB Dinariyana

<sup>1</sup> Program Pascasarjana Kelautan ITS Surabaya

<sup>2</sup> Laboratorium Keandalan dan Keselamatan, Jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS Surabaya

E-mail: didietsudiro@gmail.com <sup>1</sup>, ketutbuda@its.ac.id<sup>2</sup>, kojex@its.ac.id <sup>3</sup>

### Abstrak

*Pola operasional dan pemeliharaan sistem di kapal sangat tergantung dengan karakteristik dari peralatan dan komponennya yang diwakili oleh laju kegagalan ( $\lambda$ ) dan laju perbaikannya ( $\mu$ ). Namun demikian, pola operasi dan pemeliharaan juga sangat dipengaruhi oleh kemampuan dan keterampilan anak buah kapal (ABK) dalam melakukan pemeliharaan kapal dan sistem permesinannya. Paper ini bertujuan untuk mengetahui hubungan kemampuan dan keterampilan ABK dalam melakukan perawatan terhadap biaya dan keandalan sistem. Metode Dinamika Sistem (system dynamics/SD) digunakan dalam menyelesaikan permasalahan ini karena kemampuan metode ini memformulasikan setiap perubahan perilaku sebuah entitas (variable) terhadap entitas lainnya. Studi ini mengambil kasus sistem bahan bakar motor induk kapal dan berhasil mendapatkan keterkaitan dan pengaruh secara presisi dari ABK dalam melakukan pemeliharaan terhadap biaya pemeliharaan dan keandalan system[1]. Beberapa skenario level kemampuan ABK, tingkat keandalan, dan biaya perawatan disimulasikan dalam penelitian ini. Tingkat kemampuan dan keterampilan ABK di kisaran 120%-130% adalah nilai optimum dengan biaya perawatan minimum untuk bererapa level keandalan yang ditetapkan dalam skenario.*

**Kata kunci :** *Dinamika Sistem, Perawatan Kapal, Crew Skill (keterampilan ABK), Keandalan, Biaya perawatan.*

### 1. PENDAHULUAN

Dinamika Sistem (SD) mempunyai kapasitas dalam memformulasikan perilaku dinamis sebuah sistem dari waktu ke waktu dan dalam berbagai skenario kondisi dan asumsi. SD dapat menginvestigasi penyebab dan dampak hubungan antara peralatan beserta karakteristik serta fungsi suatu sistem yang kompleks. Melalui pemahaman yang lebih baik, proses pembelajaran mengenai interaksi antar peralatan (*equipment*) dalam suatu sistem dapat membantu para pengambil keputusan untuk melakukan pemeliharaan peralatan dan sistem. Ketergantungan kinerja dan keandalan suatu sistem terhadap manajemen operasi dan pemeliharaan adalah suatu hal yang pasti. Dua sistem atau peralatan yang identik mungkin saja tidak memberikan kinerja yang sama ketika bekerja dalam kondisi pemeliharaan dan operasi yang berbeda. Keandalan sistem selalu berkaitan dengan periode waktu operasi, laju kegagalan tiap peralatan, dan laju pemulihan dari tindakan pemeliharaan. Sementara itu total biaya pengeluaran dipengaruhi oleh kerugian kinerja akibat kesalahan pemeliharaan, biaya pemeliharaan dan kerugian produksi

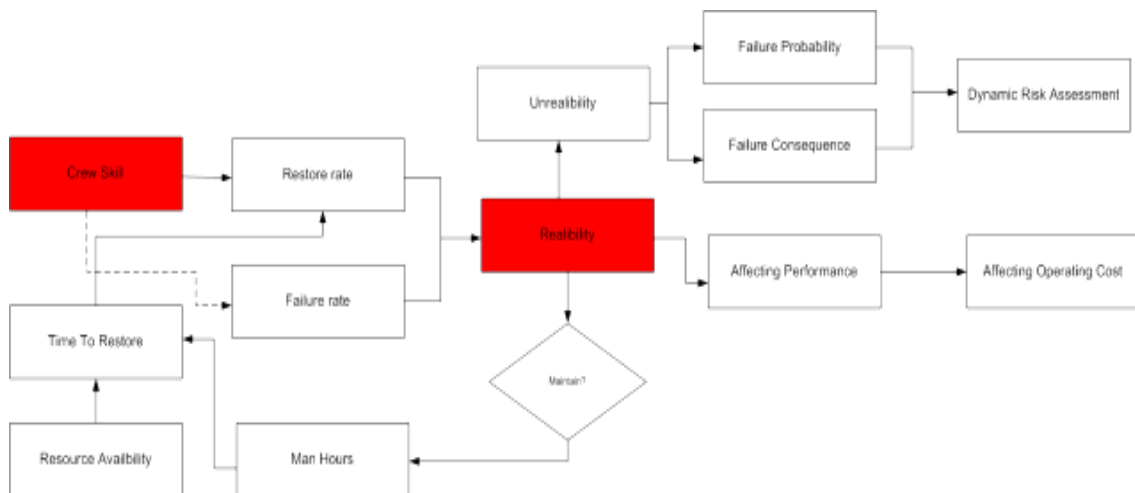
Lebih lanjut, strategi pemeliharaan dan kinerja sistem, khususnya untuk *marine systems*, sangat dipengaruhi oleh kemampuan *engineer* dalam melakukan pemeliharaan. Pengaruh dari kemampuan ABK terhadap biaya dan keandalan kapal, bagaimanapun juga sangat sulit didefinisikan, dalam paper ini dimodelkan hubungan perilaku yang tidak diketahui dari hubungan antara keterampilan ABK, keandalan dan biaya pemeliharaan menggunakan SD, dengan direpresentasikannya sebagai hubungan sebab-akibat yang menghubungkan antar peralatan di suatu sistem. Dengan berbagai skenario, diharapkan pemahaman yang lebih baik dapat dipelajari dalam

mengenal perilaku dari sistem, sehingga untuk kedepannya, manajemen operasi dan pemeliharaan yang lebih baik dapat tercapai.

### 1.1 Logika dari Desain Sebab-Akibat

Simulasi SD mampu menunjukkan tidak hanya apa yang terjadi, tetapi juga penyebab mengapa itu terjadi [4]. SD didesain untuk mengkorespondensi untuk apa atau hal yang mungkin terjadi, dengan keadaan yang sebenarnya. SD secara keseluruhan tertutup terhadap suatu *System Thinking* (ST) yang memproduksi aliran sebab akibat untuk mengilustrasikan perilaku yang sering terjadi ketika SD diterjemahkan untuk mendapatkan pemahaman oleh ST dalam suatu model simulasi di computer [3]. SD bekerja berdasarkan prinsip sebab-akibat dengan umpan balik atau penundaan yang ditentukan oleh tingkat kerumitan sistem [2]. Idenya adalah aksi dan keputusan akan menghasilkan suatu konsekuensi. Ketika aksi dan keputusan berubah, konsekuensi juga akan berubah. Oleh karena itu, kita dapat mensimulasikan beberapa kemungkinan konsekuensi dari sistem operasi dan keputusan pemeliharaan yang akan diambil.

Gambar 1 menunjukkan diagram hubungan sebab akibat dari suatu perilaku peralatan. Perilaku peralatan dapat dijelaskan dengan nilai keandalan dan kinerjanya. Keandalan dan kinerja sistem umumnya bersifat dinamis, memungkinkan untuk berkurang dan meningkat terhadap waktu dan selalu ditentukan oleh faktor lain yang berkaitan seperti kondisi lingkungan, kondisi operasi dan pemeliharaan. Kemampuan ABK memberikan pengaruh secara langsung terhadap laju pemulihan dan juga mempengaruhi laju kegagalan peralatan. Diagram hubungan sebab akibat keandalan di atas dapat diilustrasikan ke dalam suatu model SD sederhana seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Dari model SD dengan mengubah-ubah laju kegagalan melalui panel di sisi tengah, SD akan menunjukkan perbedaan nilai keandalan peralatan terhadap waktu (di sisi kanan).



**Gambar 1. Diagram sebab-akibat antara keandalan dan kinerja**

Hal ini akan memberikan informasi peluang tingkat ketahanan peralatan terhadap waktu. Oleh karena itu, keputusan untuk menjaga atau tidak kemudian juga dapat diterjemahkan atau disimulasikan setelah kita mencapai level minimum dari keandalan. Keputusan untuk melakukan pemeliharaan atau tidak dapat ditentukan atau disimulasikan setelah peralatan mencapai tingkat keandalan minimum tertentu.

## 1.2 Pengembangan Model untuk Sistem Pendingin Mesin Utama

Kita definisikan  $T$  adalah waktu acak dari sebuah kegagalan peralatan dan distribusi kegagalan sebagai fungsi ketidak-andalan diberikan oleh formula:

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(u) du \quad \text{for } t > 0(1)$$

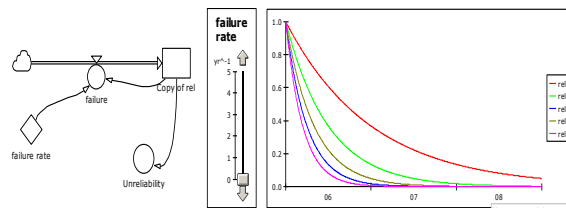
Fungsi keandalan  $R(t)$  merepresentasikan peluang peralatan tidak gagal dalam interval waktu tertentu.  $(0, t)$ , hal ini dapat diekspresikan sebagai berikut,

$$R(t) = 1 - F(t) = P(T > t) \quad \text{for } t > 0(2)$$

Susunan suatu sistem dapat disusun seri, parallel, seri-parallel, parallel-seri,  $k$  out of  $n$ , pleonastis, atau bahkan susunan yang lebih kompleks. Berikut ini adalah diskusi pendek mengenai pemodelan keandalan dari susunan suatu sistem: susunan seri dan parallel.

### Susunan Seri

Susunan seri adalah susunan yang paling sederhana dan paling sering digunakan. Blok diagram dari susunan seri dan susunan parallel ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Simulasi diagram SD .



Gambar 3. Susunan seri

Untuk susunan ini, semua peralatan harus beroperasi untuk memastikan beroperasinya sistem. Sistem tersebut akan diekspresikan sebagai berikut, gagal jika salah satu dari peralatan gagal. Jika  $\Pr(E_i)$  adalah kemungkinan terjadinya kejadian  $E_i$  apabila peralatan  $i$  beroperasi penuh selama periode tertentu sehingga fungsi keandalan dari susunan seri diberikan sebagai berikut,

$$R_s = \Pr(\text{semua peralatan sukses beroperasi})$$

$$R_s = \Pr(E_1 \cap E_2 \cap \dots \cap E_{n-1} \cap E_n)$$

$$R_s = \prod_{i=1}^n \Pr(E_i)$$

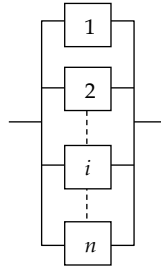
Oleh karena itu, ketika diasumsikan bahwa tiap peralatan tersebut beroperasi sendiri-sendiri, keandalan sistem untuk susunan seri dapat

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (3)$$

Dimana  $R^i$  adalah nilai keandalan dari peralatan  $i$ .

#### Susunan Paralel:

Untuk susunan paralel, sistem akan gagal jika semua peralatan gagal. Dengan kata lain, sistem akan sukses beroperasi jika masing-masing peralatan berfungsi sesuai dengan fungsinya. Peluang susunan *parallel* akan sukses beroperasi adalah gabungan peluang dari seluruh peralatan yang disusun *parallel* yang dapat dilihat pada Gambar 4.



$R_p = \Pr$  (setiap peralatan sukses beroperasi)

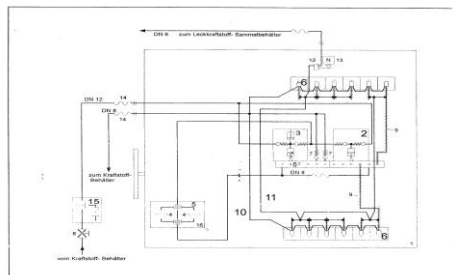
$$R_p = \Pr(E_1 \cup E_2 \cup \dots \cup E_{n-1} \cup E_n)$$

$$R_p = 1 - \Pr(E_1 \cap E_2 \cap \dots \cap E_{n-1} \cap E_n)$$

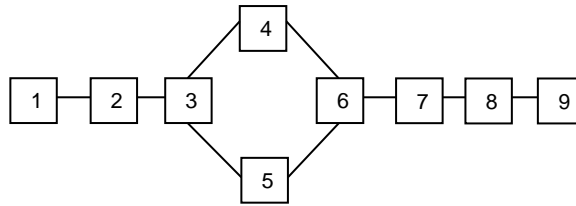
Jika peluang terjadi kegagalan (ketidakandalan) pada satu peralatan diekspresikan dengan  $Q$ , maka

$$R_p = 1 - Q_p = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i \quad (4)$$

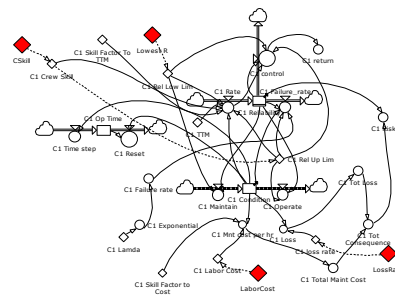
Sistem bahan bakar mesin utama diambil sebagai objek pada penelitian ini. Sistem bahan bakar mesin utama ditunjukkan pada Gambar 6a yang disusun sebagai blok diagram sistem keandalan yang ditunjukkan pada Gambar 5 pompa bahan bakar memompa solar (Bahan Bakar) dari tanki dasar ketanki persediaan melalui Pompa separator. selanjutnya dari tanki persediaan dibawa menuju *Duplex Filter selectable* melalui *Fuel delivery Pump* selanjutnya menuju *Fuel Injection Pump* dipompa ke *Fuel Injector* sisa bahan bakar langsung dialirkan menuju *Over Valve* untuk dikembalikan ke tanki persediaan, proses selanjutnya berulang kali seperti semula. Keandalan sistem dapat diekspresikan pada Gambar 6b menggunakan persamaan Matematika yaitu (1), (2), (3), dan (4). Persamaan tersebut digunakan sebagai rumus perhitungan akhir dari SD: dapat dilihat pada Gambar 6b. Data yang digunakan pada studi kasus ini yang diberikan pada tabel 1 adalah laju kegagalan dari peralatan pada sistem Bahan Bakar [5].



**Gambar 5. Sistem bahan Bakar (FO) Mesin Utama**



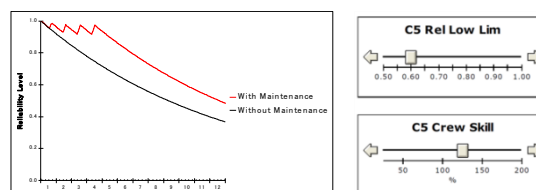
**Gambar 6a. RBD; Reliability Blok Diagram, Sistem Bahan Bakar (FO)**



**Gambar 6b. Diagram Sebab-Akibat sebuah Peralatan.**

**Tabel 1: Laju Kegagalan peralatan**

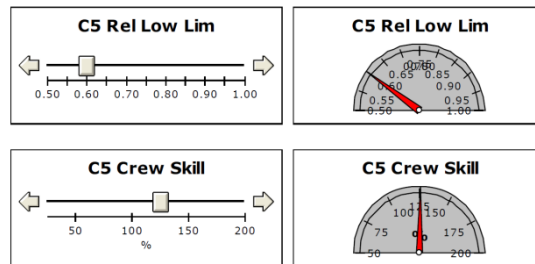
No	Keterangan Gambar	TTR	Reliability	Cost/hour
1	Prefilter with water separator 484,6 jam	0,94 jam	0,46	Rp. 75.000
2	Fuel priming pump 5984,66 jam	2,38 jam	0,69	Rp. 150.000
3	Fuel delivery pump 5984,33 jam	2,41 jam	0,69	Rp. 150.000
4 & 5	Duplex filter selectable 483,66 jam	0,94 jam	0,43	Rp. 75.000
6	Fuel Injection pump 5938,66 jam	43,33 jam	0,67	Rp. 150.000
7	Over flow valve 5742 jam	47,59 jam	0,66	Rp. 150.000
8	Sheet off valve 5859,66 jam	44,33 jam	0,81	Rp. 150.000
9	Fuel Injector 2879,66 jam	47,33 jam	0,71	Rp. 150.000



**Gambar 7. Hubungan Keandalan Peralatan Dengan dan Tanpa Pemeliharaan Untuk Satu Level Kemampuan ABK**

Hubungan antara tingkat keandalan dengan kinerja mungkin tidak dapat dijelaskan secara jelas. Menurunnya tingkat keandalan juga selalu diikuti oleh kerugian kinerja karena menurunnya

tingkat keandalan dipengaruhi oleh faktor usia, keausan, kurangnya pemeliharaan, dan lainnya, juga dapat menurunkan kinerja peralatan atau sistem. Hal ini diilustrasikan pada Gambar 7.



**Gambar 8. Panel Kontrol Simulasi Tiap Peralatan**

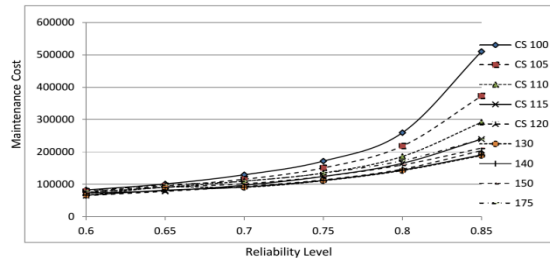
Ketika simulasi dijalankan terhadap untuk kemampuan ABK dan batasan keandalan dalam keputusan perawatan, kondisi tiap peralatan dapat di atur sedemikian rupa baik dalam kondisi beroperasi atau sedang dalam perbaikan/perawatan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Ketika peralatan beroperasi, laju kegagalan akan menurunkan nilai keandalan. Pada waktu yang sama, tidak akan terjadi kerugian biaya melainkan terjadi kerugian kinerja. Ketika peralatan diset sedang dalam kondisi pemeliharaan, laju pemulihan diaplikasikan pada peralatan dan nilai keandalan peralatan dan kinerja peralatan akan meningkat tetapi hal ini akan meningkatkan biaya pemeliharaan. Pada rancangan skenario yang lain, mode pemeliharaan untuk setiap peralatan dapat juga di set sebagai pemeliharaan secara periodik (contohnya setiap tiga bulan) menggunakan perintah *time cycle* dalam program Sistem Dinamik. Pemodelan juga dapat dihubungkan dengan dampak kegagalan dari suatu peralatan terhadap peralatan lain. Hal itu berarti model dapat menyatakan apabila tidak ada peralatan yang beroperasi secara independen. Untuk menghubungkan dampak kegagalan antar peralatan, hasil dari penelitian sebelumnya dapat digunakan .[6]

Gambar 8 menunjukkan panel *control* dari tiap peralatan. Fungsi dari panel control adalah untuk mengontrol karakteristik tiap peralatan berdasarkan data historis, data operasi, dan/atau data nilai keandalan. Sebagai tambahan, keputusan untuk mengoperasikan atau melakukan pemeliharaan juga dikontrol dari panel ini. Hasil simulasi menunjukkan: keandalan sistem, kerugian kinerja, dan biaya pemeliharaan yang diperoleh setelah simulasi dilakukan untuk memberikan skenario tertentu. Oleh karena itu, rencana operasi dan pemeliharaan dapat dengan mudah disimulasikan menggunakan SD untuk mencari perencanaan terbaik berdasarkan faktor keselamatan dan ekonomi.

### 1.3 Sensitivitas Kemampuan ABK terhadap Biaya Pemeliharaan dan Kinerja Sistem

Suatu pertanyaan akan muncul bagaimanakah kemampuan ABK akan mempengaruhi kinerja sistem (keandalan sistem) dan strategi pemeliharaan (penjadwalan). Untuk memungkinkan melakukan analisa terhadap hal tersebut, pemodelan SD yang sudah ada harus dikembangkan berdasarkan variasi kemampuan ABK (menambahkan presentase tertentu terhadap kemampuan tertentu yang dianggap sebagai 100%) dan melakukan pengujian implikasinya terhadap biaya (biaya pemeliharaan) pada berbagai tingkatan nilai keandalan. Keandalan tiap peralatan dianalisis pada kenaikan waktu tertentu dan ketika indeks keandalan mencapai nilai minimum yang diijinkan kemudian peralatan akan dilakukan pemeliharaan pada waktu tertentu (*time to maintenance* (TTM)). TTM sangat ditentukan dari keterampilan ABK dan kondisi eksisting yang diatur menjadi 100%. Keterampilan ABK yang lebih baik membutuhkan waktu pemeliharaan yang lebih sedikit. Semua peralatan keandalan dan konsekuensi biaya sangat dipengaruhi oleh keterampilan ABK, hal

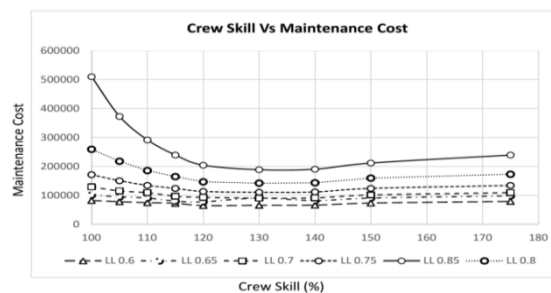
ini terlihat pada Gambar 9 dan Gambar 10 terlihat apabila ABK ditambah akan berpengaruh terhadap total biaya (*maintenance cost*), sehingga dengan model Dinamik Sistem yang telah dibuat dapat terlihat jelas pengaruh keterampilan ABK terhadap semua peralatan reliability (keandalan) dan konsekuensi harga.



**Gambar 9. Pengaruh Kemampuan ABK terhadap biaya pada berbagai tingkat keandalan**

Simulasi diatur untuk durasi waktu 1 tahun. Gambar 9 menunjukkan simulasi SD dari masing-masing kemampuan ABK terhadap berbagai tingkat keandalan terhadap biaya perawatan pada berbagai tingkat keandalan. Seperti ditunjukkan pada gambar, peningkatan kemampuan ABK dapat disimulasikan secara sempurna dalam mempengaruhi peningkatan konsekuensi (biaya perawatan) pada tingkat keandalan tertentu. Hal ini berarti apabila kebijakan meningkatkan kemampuan ABK engineer akan mengurangi biaya perawatan pada waktu yang sama, peningkatan kebutuhan tingkat keandalan pada ABK tertentu akan memberikan pengaruh secara langsung terhadap biaya investasi (dikarenakan untuk meningkatkan kualitas peralatan) dan biaya perawatan (karena frekuensi perawatan yang lebih sering). Berdasarkan fakta tersebut, hal ini akan sangat dibutuhkan untuk menguji peningkatan kemampuan ABK yang akhirnya akan diperoleh biaya yang minimum.

Bagaimanapun juga sangat penting untuk mengetahui peningkatan ketrampilan ABK guna mengatur aset yang menghasilkan keuntungan secara teknis dan ekonomis Program peningkatan ABK yang tidak terukur sangat dibutuhkan untuk menghasilkan solusi terbaik tanpa mempertimbangkan kerumitan dalam sistem, sehingga penelitian ini menunjukkan ada korelasi antara kemampuan ABK dengan biaya pemeliharaan. Simulasi sistem dinamik adalah suatu model yang memerlukan waktu selama 1 tahun, ditemukan biaya pemeliharaan sangat dipengaruhi secara signifikan oleh keterampilan ABK yang ditunjukkan pada Gambar 10. Pada semua tingkat minimum yang diminta pada indeks keandalan (LL 0,6) dan pada tingkatan kemampuan ABK mulai dari 100% sampai 175% pada biaya pemeliharaan minimum diperoleh pada variasi keterampilan ABK pada 120%, sehingga sangat jelas dibutuhkan perbaikan keterampilan ABK untuk mencapai biaya pemeliharaan yang minimum pada tiap tingkat keandalan.



**Gambar 10. Keterampilan ABK Vs Biaya Pemeliharaan**

Pada Gambar 10 menunjukkan gambaran yang jelas dari hasil di atas yang diperoleh dengan membandingkan dua tingkat indeks keandalan. Pada sebuah permintaan tingkat keandalan pada 0,6 terjadi peningkatan keterampilan ABK sebesar 20% terhadap hasil kondisi saat ini (pada 120%) dalam biaya pemeliharaan yang minimum. Ini berarti berkaitan dengan kompleksitas sistem, perbaikan keterampilan lebih dari 20% tidak akan memberikan keuntungan tambahan dalam mengurangi biaya pemeliharaan. Pada situasi yang sama juga dipertunjukkan keandalan pada tingkat 0,7 terjadi peningkatan kemampuan ABK sebesar 30%, terhadap hasil kondisi saat ini (pada 130%) dalam biaya pemeliharaan yang minimum. Dari perbaikan keterampilan ABK secara umum kita dapat melihat gambaran apabila peningkatan kompleksitas sistem membutuhkan ABK yang lebih terampil maupun investasi yang lebih melalui program perbaikan keterampilan.

Simulasi menunjukkan hasil yang bersifat prediktif untuk memberikan skenario terhadap kemampuan ABK. Reliability dan biaya pemeliharaan. Dengan menggunakan simulasi SD, perilaku tiap peralatan dan sistem yang terintegrasi dapat dipelajari.

## 2. KESIMPULAN

Penelitian ini dapat memetakan perilaku perubahan kemampuan ABK terhadap keandalan peralatan sistem bahan bakar kapal dan biaya perawatan. Pengaruh kemampuan ABK dapat terlihat jelas terhadap keandalan dan total konsekuensi juga memberikan optimasi terhadap biaya perawatan dan keandalan dari sistem yang dirawat, agar cost effective terhadap kinerja perawatan dan keandalan secara keseluruhan. Kemampuan ABK optimum berkisar 120% pada beberapa tingkat keandalan 0.6 sampai dengan 0.85 yang disimulasikan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Artana KB, Ishida K, 'Spreadsheet Modeling of Optimal Maintenance Schedule for Components in Wear-Out Phase', *Journal of Reliability Engineering and System Safety*, ELSEVIER, Vol. 77 pp. 81-91, 2002.
- Baliwangi L. et al, *Optimizing Ship Machinery Maintenance Scheduling Through Risk Analysis And life cycle cost analysis in 25th International Conference on offshore Mechanics and Arctic Engineering 2006 Hamburg Germany ASME*.
- Baliwangi L. et al, *Risk Modification Through Sistem Dynamics Simulation Injusted Modelling and Simulation 2007*. Montreal PC Canada ACTAPRESS.
- Artana KB, Ishida K, *Optimum replacement and Maintenance Scheduling Process for Marine Machinery in wear out period*, 3rd New Ship and Marine Technology p 111-120.
- Artana KB and K.Ishida, *Optimum Replament and Maintenance Scheduling Process For Marine Machinery in Wearout Phase A Case Study of Main Engine Cooling Pumps Reliability Engineering and Safety 2002*. 81(2002) p.81-91.
- Baliwangi L., et al. *Research on Marine Incidents Trend in Indonesia 2001 to 2004, in Japan Society for the Promotion of Science International Seminar in Marine Transportation, 2005*. Hirshima : JSPS.
- Artana KB, Ishida K, 'Spreadsheet Modeling to Determine Optimum Ship Main Dimensions and Power Requirements at Basic Design Stage', *Journal of Marine Technology* Vol. 40 No. 1, Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), January 2003.
- Artana KB, Ishida K (2001). *Determination of ship machinery performance and its maintenance management scheme using MARKOV process analysis*. *Marine Technology IV*, WIT Press: 379-389.
- Pham, Hoang and Wang, Hongzhou, *Imperfect maintenance, European Journal of Operational Research* 94 (1996) 425-438.
- Reliability Analysis Centre, *Non-Electronic Reliability Part Data, New York*.
- Machinery in wear out period*, 3rd New Ship and Marine Technology. pp.111-120, 2002.