

ANALISIS PENGARUH KESIAPAN PEMILIK KAPAL DALAM PELAKSANAAN *RETROFITTING* SISTEM BALLAST KAPAL TANKER MENGGUNAKAN PENDEKATAN DINAMIKA SISTEM

Hardiyanto¹, Zulyani¹, Jamal², Muhammad Helmi²

¹) Jurusan Kemaritiman, Politeknik Negeri Bengkalis

²) Jurusan Teknik Perkapalan, Politeknik Negeri Bengkalis

Jl. Bathin Alam, Sungai Alam Bengkalis Riau – Indonesia 28711

Email: hardiyanto@polbeng.ac.id, zulyani@polbeng.ac.id, jamal@polbeng.ac.id, mhelmi@polbeng.ac.id

Abstrak

IMO mewajibkan semua kapal *existing* yang beroperasi pada rute internasional untuk memasang *Ballast Water Treatment System (BWTS)*. Pemasangan BWTS dilakukan dengan melakukan *retrofitting* kapal *existing* yang dijadwalkan bersamaan dengan pembaruan survei *International Oil Pollution Prevention (IOPP)* dan paling lambat sebelum 8 September 2024. *Retrofitting* sistem *Ballast Water Treatment System (BWTS)* pada kapal *existing*. *Retrofitting* BWTS merupakan langkah yang memerlukan persiapan cermat oleh pemilik kapal, termasuk persiapan dokumen dan pelaksanaan survei atau *3D scanning*. Hasil pengembangan model menggunakan pendekatan dinamika sistem menunjukkan bahwa ketidaktersediaan dokumen yang diperlukan dapat menyebabkan peningkatan biaya sebesar 1,7% dan penambahan durasi sebesar 1,4% dalam proses *retrofitting* kapal tanker. Hasil simulasi ini dapat digunakan sebagai dasar untuk merancang strategi mitigasi untuk menghindari kegagalan pemenuhan standar BWTS, mengurangi *downtime*, dan mengoptimalkan pengeluaran biaya.

Kata Kunci: *retrofitting*, dinamika sistem, kapal *existing*, pemilik kapal, BWTS

Abstract

The IMO mandates that all existing ships operating on international routes must install a Ballast Water Treatment System (BWTS). The installation of BWTS is carried out through retrofitting existing ships, scheduled to coincide with the International Oil Pollution Prevention (IOPP) survey updates and before September 8, 2024. Retrofitting the Ballast Water Treatment System (BWTS) on existing ships is a process that requires careful preparation by ship owners, including document readiness and the execution of surveys or 3D scanning. The development of a model using a system dynamics approach indicates that the unavailability of required documents can lead to 1.7% increase in costs and 1.4% extension of the retrofitting duration. The results of this simulation can serve as the basis for designing mitigation strategies to avoid BWTS compliance failures, reduce downtime, and optimize cost expenditures.

Keyword: retrofitting, system dynamics, existing ship, shipowner, BWTS

1. PENDAHULUAN

Implementasi regulasi telah menyebabkan peningkatan investasi yang telah membuat perusahaan pelayaran merasa tidak nyaman dalam menjalankan bisnisnya [1]. Namun, terkadang penerapan regulasi baru tidak dapat dihindari sebagai respons terhadap peristiwa berbahaya, seperti kasus kerusakan lingkungan akibat invasi air ballast ini. Diperkirakan total kerugian tahunan yang disebabkan oleh NIS terhadap pertanian, kesehatan manusia, dan lingkungan di Asia Tenggara mencapai sekitar 33,5 miliar dolar [2]. *International Maritime*

Organization (IMO) merespon keadaan darurat ini dengan mengadopsi *Ballast Water Management Convention (BWMC)* pada tahun 2004. Hal ini menjadi langkah awal dalam upaya pencegahan penyebaran spesies invasif atau *Invasive Alien Species (IAS)* [3]. Meskipun kerugian akibat IAS ini sangat merugikan, dampak kebijakan pencegahan dengan menerapkan BWMC akan berdampak pada kelangsungan bisnis terutama dari perspektif pemilik kapal sehingga diperlukan kajian secara holistik agar penerapan regulasi dapat optimal.

BWMC memiliki tujuan utama untuk mengatasi dampak negatif yang mungkin diakibatkan oleh spesies invasif, yang dapat membahayakan ekosistem laut dan sumber daya alam yang ada di dalamnya. Konvensi ini diberlakukan pada kapal yang melakukan pelayaran rute internasional termasuk kapal eksisting. Implementasi konvensi ini dimulai sejak 8 September 2017 dengan waktu transisi pemenuhan standar D-2 dan instalasi BWTS pada kapal sebelum 8 september 2024. Pemilik kapal harus melakukan *retrofitting* kapal eksisting yang memerlukan beberapa analisa sehingga perlu mempersiapkan dengan cermat agar pelaksanaan *retrofitting* tidak merugikan pemilik kapal.

Beberapa kajian telah dilakukan untuk menganalisa dampak implementasi dengan pendekatan *cost-benefit analysis* dan diperoleh biaya mitigasi spesies IAS berpotensi meningkatkan biaya pengiriman antara 1,6% hingga 4% [4-5]. Namun Peningkatan tarif pengiriman dapat mempengaruhi permintaan sewa dan kemampuan daya saing pemilik kapal dalam menjalankan bisnisnya. Beberapa pemilik kapal tidak menggunakan opsi tersebut dan berupaya menekan besaran penambahan biaya pemenuhan regulasi (*compliance cost*) berdasarkan aspek teknis proses instalasi, biaya operasional dan jenis BWTS yang akan sesuai dengan kebutuhan kapal.

Beberapa model kerangka menggunakan pendekatan *fuzzy logic* dibangun untuk memilih teknologi BWTS dengan melibatkan aspek teknik dan pengoperasian untuk mendapatkan hasil pemilihan teknologi yang optimal [6]. Selain itu faktor ketersediaan berbagai teknologi BWTS yang tersedia di pasar mengharuskan pemilik harus memilih BWTS yang paling cocok untuk kapal mereka dengan mempertimbangkan efisiensi, harga, durasi pemasangan, pengeluaran operasional, dan lain-lain [7].

Pemenuhan standar D-2 memerlukan tambahan biaya yang lebih besar dibandingkan dengan pemenuhan standar D-1 karena diperlukan penambahan komponen baru di kapal. Komponen biaya tambahan ini meliputi

biaya *retrofitting* dan biaya untuk mengoperasikan dan pemeliharaan BWTS yang digunakan [8]. Besarnya biaya *retrofitting* bervariasi, berkisar antara USD.700.000 hingga USD 1.100.000 per kapal, tergantung pada kapasitas kapal dan tipe BWTS yang digunakan [9]. Sedangkan biaya operasional diperhitungkan berdasarkan biaya mengoperasikan dan perawatan BWTS selama 30 tahun atau tergantung *lifetime* kapal berkisar USD 9.000 hingga USD 18.000 per tahun [10].

Setiap kapal memiliki karakteristik yang berbeda, seperti kapasitas tangki, sistem pipa, laju aliran pompa, dan ketersediaan daya listrik sehingga dibangun model yang dapat digunakan untuk menganalisis biaya investasi untuk memasang BWTS. Perbedaan ketersediaan BWTS dan kebutuhan kapal ini akan menyebabkan perbedaan biaya pemenuhan yang kompleks sehingga sulit untuk diestimasi. Pemilik kapal menjadi *stakeholder* utama yang berperan penting dalam pemenuhan konvensi memerlukan model yang dapat mengestimasi biaya *retrofitting* sesuai dengan kebutuhan kapalnya [11]. Dalam proses *retrofitting*, pemasangan BWTS ini dapat mempengaruhi konstruksi, instrumen, operasi, dan kapasitas muatan kapal [12]. Pemilik kapal harus berkolaborasi dengan *stakeholder* lain yang terlibat dalam proses pemenuhan regulasi seperti pihak *drawing designer*, produsen atau *supplier* BWTS, galangan kapal dan Biro Klasifikasi.

Model *compliance cost* telah dibangun untuk mensimulasikan biaya yang harus dikeluarkan pemilik kapal dengan memperhatikan aspek kebutuhan untuk kapal tipe kapal tanker kategori *small tanker* hingga *afamax* dengan menggunakan pendekatan dinamika sistem [13]. Pendekatan dinamika sistem dalam model ini terbukti telah mampu mengintegrasikan beberapa variabel yang dapat mengurai kompleksitas pemenuhan BWTS dari beberapa *stakeholder* yang terlibat seperti *design engineering*, *supplier BWTS*, galangan dan regulator [14]. Namun kajian ini belum menekankan pembahasan secara rinci

terkait pengaruh kesiapan aspek teknis dari pemilik kapal sendiri dalam melaksanakan *retrofitting* kapalnya. Aspek teknis ini berupa kesiapan dukungan proses *retrofitting* seperti ketersediaan dokumen kapal dan kesiapan survei kapal sebagai dasar pembuatan *drawing design*. Padahal kegagalan dalam aspek teknis dari pemilik kapal ini akan mempengaruhi proses dan tahapan selanjutnya seperti peningkatan biaya *drawing* saat dokumen kapal tidak lengkap dan *delay* dalam proses pelaksanaan *retrofitting* secara keseluruhan. Dengan demikian diperlukan kajian untuk menganalisa dampak dari aspek kesiapan pemilik kapal menggunakan pendekatan dinamika sistem sebelum memutuskan untuk melakukan *retrofitting* BWTS pada kapal.

Dalam artikel ini diuraikan beberapa pokok kajian terkait dengan aspek penting dalam implementasi *retrofitting* yang melibatkan peran pemilik kapal. Dengan menggunakan pendekatan dinamika sistem, faktor-faktor yang dipengaruhi peran pemilik kapal seperti ketersediaan dokumen kapal dan kesiapan kapal saat pelaksanaan survei dalam proses design dianalisa pengaruhnya terhadap biaya dan durasi pelaksanaan *retrofitting* BWTS pada kapal.

2. METODE

Untuk menjawab permasalahan dibangun metode penelitian sebagai kerangka berpikir berkaitan dengan objek penelitian, data yang digunakan, variabel dan prosedur yang menyusun model. Prosedur model disusun dalam menggambarkan tahapan dalam membangun model dengan menggunakan metode dinamika sistem. Dalam prosedur ini juga akan menunjukkan beberapa variabel yang mempengaruhi variabel biaya dan durasi.

2.1 Objek Penelitian

Objek yang menjadi dasar bahan kajian penelitian ini adalah *retrofitting* kapal tanker kategori *small tanker* di salah satu *shipping*

company di Indonesia dengan spesifikasi kapal dimaksud sebagai berikut.

Tabel 1. Spesifikasi Kapal tanker

Parameter	Nilai	Satuan
Umur kapal	8	tahun
Kapasitas tangki ballast	42.107	m ³
Kapasitas pompa ballast	300	m ³ /jam
Daya pompa ballast	60	kW
Jumlah pompa ballast	2	m
Kapasitas <i>auxiliary engine</i>	7.806	kW
<i>Displacement</i>	9110	ton
<i>Dead Weigh Tonnage (DWT)</i>	6700	ton
Frekuensi Pelayaran	54	trip/tahun
Jadwal <i>Renewal IOPP</i>	08/09/2019	-

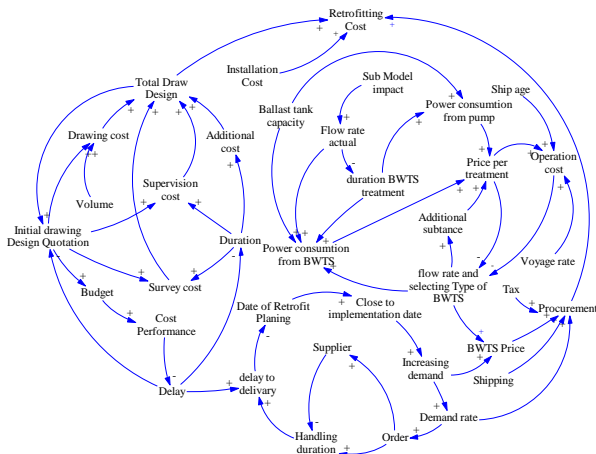
2.2 Data

Data yang digunakan untuk membangun model meliputi data spesifikasi BWTS, *supplier* BWTS dan biaya serta durasi instalasi BWTS pada galangan kapal di Indonesia mengacu pada data sekunder yang diperoleh dari beberapa sumber seperti jurnal dan laporan proyek [15-16].

2.3 Variabel Model

Variabel model diidentifikasi berdasarkan hasil *expert judgment* dari beberapa *stakeholder* yang terlibat dalam pelaksanaan proses *retrofitting* dan juga perusahaan pelayaran yang telah melakukan *retrofitting* BWTS pada kapal. Hasil dari identifikasi ini

digunakan sebagai dasar untuk membangun *Causal Loop Diagram (CLD)* seperti disajikan dalam gambar 1 berikut.



Gambar 1. *Causal Loop Diagram (CLD)*

2.4 Prosedur Metode Dinamika Sistem

Dalam alur penelitian ini dilakukan formulasi model, penentuan batas model, validasi model, membangun skenario kebijaksanaan dan penerapan model. Secara garis besar tahapan dalam proses dinamika sistem antara lain:

1. Identifikasi masalah dan penetapan batasan (*Problem Articulation: Boundary Selection*).
2. Formulasi dinamika hipotesis (*Formulation of Dynamic Hypothesis*).
3. Formulasi model simulasi (*Formulation of Simulation Model*).
4. Pengujian (*Testing*)
5. Perancangan kebijakan dan evaluasi (*Policy Design and Evaluation*).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Retrofitting cost mencakup semua biaya yang dikeluarkan untuk instalasi sistem BWTS pada kapal yang sudah ada. Biaya ini termasuk biaya *drawing design*, *procurement* dan *installation*. Biaya tiap komponen ini berhubungan dengan aktivitas dalam setiap tahapan *retrofitting* sehingga untuk mengetahui biayanya semua aktivitas tersebut digunakan

pendekatan *Work Breakdown Structure (WBS)*. *WBS* digunakan untuk menguraikan tiap tahapan *retrofitting* menjadi aktivitas atau tugas-tugas yang lebih kecil dan lebih terperinci sehingga diperoleh biaya yang lebih akurat. Hasil dari CBS ini digunakan untuk membangun dan mengelompokkan komponen biaya *retrofitting* yang terdiri dari *Total drawing design*, *Procurement* dan *Installation Cost*.

Aspek kesiapan dukungan proses *retrofitting* dari pemilik kapal sendiri akan mempengaruhi proses *retrofitting*. Aspek yang menjadi variabel dalam kajian ini meliputi ketersediaan dokumen kapal dan kesiapan pelaksanaan yang akan mempengaruhi *design engineering cost*. Dalam *design engineering cost* terdiri dari *Survey Cost*, *Drawing Cost*, *Additional Cost* dan *supervision*. *Survey cost* adalah biaya yang dikeluarkan untuk melakukan survei ke atas kapal. Umumnya aktivitas survei ini memerlukan koordinasi antara *engineering* dengan pemilik kapal untuk menentukan jadwal. Koordinasi yang baik diperlukan untuk menentukan jadwal pelaksanaan survei, durasi dan *3D scanning*. Hal ini penting untuk menghindari penundaan akibat kapal yang tidak tersedia ketika akan disurvei karena masih berlayar atau sedang berada di pelabuhan yang jauh dari jangkauan tim survei.

Durasi survei dapat bervariasi tergantung pada kompleksitas kapal, luas area yang akan disurvei, serta kebutuhan pengumpulan data dan informasi yang diperlukan. Semakin lama durasi survei, maka semakin tinggi biaya yang diperlukan. Survei dapat mencakup pemeriksaan menyeluruh jika kapal memerlukan *re-drawing* dokumen kapal akibat dokumen kapal yang tidak tersedia sebagai syarat untuk mengajukan *approval* dokumen *drawing design retrofitting* ke klas. Biaya survei ini termasuk biaya transportasi, biaya akomodasi, biaya *engineer* atau konsultan yang dilibatkan dalam survei.

Dalam *quotation* yang diberikan pihak *engineer* pula terdapat beberapa aktivitas yang termasuk ke dalam *drawing cost* meliputi

biaya untuk melakukan aktivitas *Ship Document Interpretation, Feasibility Study, Develop Preliminary Design, Identify BWTS Options, Engineering Study, 3-D Modelling and System, Detailed Engineering Drawings, Manufacturing Drawing & Installation Material List* dan *Installation Drawing*. Durasi yang ditawarkan untuk aktivitas di atas bervariasi bergantung pada kemampuan tiap *engineer*. Namun biaya yang ditawarkan dalam *quotation* ini diberikana dalam satu paket atau *lot (Large of Tander)* sehingga fungsi biaya *drawing* tidak bergantung pada waktu atau durasi. *Additional cost* dan *supervision* merupakan biaya tambahan untuk mendukung proses *retrofitting* seperti asuransi dan supervisi yang berguna untuk mengawasi dan mengevaluasi proses instalasi sistem. Biaya *supervision* terdiri dari biaya *supervisor* atau manajer proyek dan akomodasi selama melakukan aktivitas tersebut. Durasi aktivitas ini bergantung pada proses instalasi dan kemampuan galangan sehingga biaya *supervision* termasuk akomodasi merupakan fungsi waktu atau durasi instalasi.

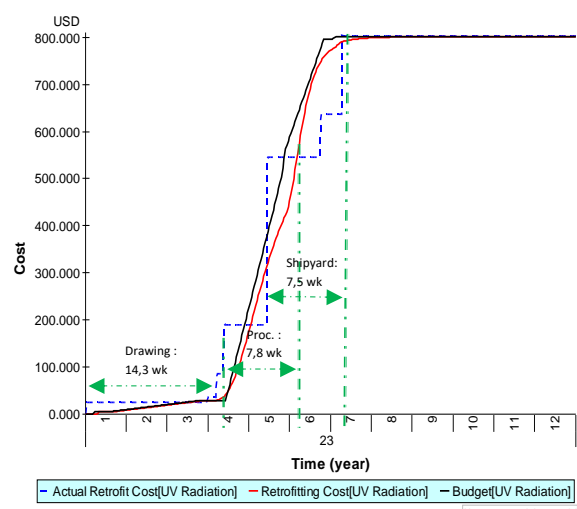
Besarnya biaya ini sebanding dengan fasilitas yang ditawarkan dan kemampuan pihak *engineer* dalam menyelesaikan tugas *drawing* yang dipengaruhi oleh fasilitas dan sumber daya seperti teknologi 3D scanning dan juga kemampuan *engineer* yang bertugas. Semakin banyak pekerjaan dan faktor eksternal yang mempengaruhi akan menambah durasi pekerjaan yang berarti akan menambah biaya secara keseluruhan.

3.1 Hasil Simulasi

Dengan menggunakan CLD maka dikembangkan *Stock Flow Diagram (SFD)* dengan menggunakan *Softwere Powersim Studio Academic 10* sehingga model dapat disimulasikan dan dilakukan penerapan beberapa skenario. Simulasi dilakukan dengan memasukkan data spesifikasi kapal yang akan estimasikan melakukan *retrofitting* sebagai kondisi awal sistem ke dalam model dan memperhitungkan aliran yang terjadi dalam waktu tertentu untuk memprediksi bagaimana

biaya *retrofitting* akan dipengaruhi oleh *variable* tertentu seiring waktu.

Berdasarkan data *input* spesifikasi kapal disimulasikan biaya *retrofitting* BWTS. Dalam proses *retrofitting*, biaya, durasi pelaksanaan dan beberapa hal teknis dianalisis untuk mengetahui pengaruhnya terhadap proyek *retrofitting*. Beberapa variabel yang dipertimbangkan adalah laju pomp ballast, kapasitas tanki ballast, *auxiliary engine* dan ukuran kapal. Selain itu beberapa faktor lain yang berpotensi akan menyebabkan penambahan diskenariokan dan disimulasikan.



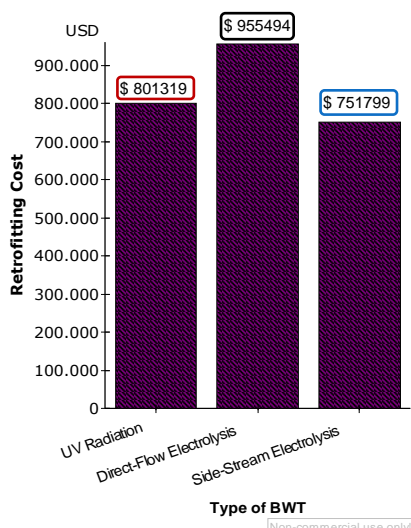
Gambar 2. Perbandingan grafik *budget, actual retrofit* dan model *retrofit*

Berdasarkan hasil simulasi diperoleh grafik biaya *retrofit* pada tipe kapal *small tanker* seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Grafik tersebut terdiri dari *actual retrofit cost* yang merupakan laju biaya sesuai biaya yang dikeluarkan oleh pemilik kapal mengacu pada *quotation*.

Laju pembayaran disesuaikan dengan jadwal yang telah ditentukan seperti pada saat *down payment*, saat barang diterima atau saat pekerjaan telah selesai. *Budget* pula merupakan laju biaya yang divisualkan dari tahapan pekerjaan dari *work breakdown structure*. Sedangkan *retrofitting cost* merupakan grafik yang dihasilkan dari model simulasi. Dengan menggunakan grafik ini, dapat dilihat perbedaan antara biaya *Budget*

dari data histori, biaya *retrofit cost* dari biaya estimasi model dan biaya aktual *retrofit* merupakan laju biaya yang dikeluarkan pemilik kapal.

Untuk mengukur akurasi model yang dibuat maka hasil simulasi divalidasi menggunakan metode *Absolut Mean Error (AME)* dan *Absolut Variance Error (AVE)*.



Gambar 3. Biaya *retrofitting* menggunakan beberapa jenis teknologi BWTS

Hasil validasi menunjukkan model simulasi yang telah dibuat dapat memberikan hasil yang akurat dan dapat diandalkan tingkat kesalahan pada validasi metode *AME* sebesar 1,67% sedangkan untuk metode *AVE* 0,84%. Dari hasil validasi tersebut, dapat disimpulkan bahwa model simulasi yang telah dibuat cukup akurat dalam memprediksi biaya *retrofitting* BWTS.

Dari hasil simulasi yang disajikan dalam Gambar 3 menunjukkan biaya *retrofitting* BWTS menggunakan teknologi *UV radiation* sebesar USD 801.319 dan durasi pelaksanaan *retrofitting* untuk kondisi sesuai dengan standar dilaksanakan selama 214 hari terhitung sejak mulai dari penentuan sub kontraktor untuk melakukan design *engineer* hingga kapal selesai *sea trial*. Sedangkan penggunaan teknologi *Direct Flow Electrolysis* sebesar 955.494 USD, dan menggunakan teknologi *Side Stream Electrolysis* sebesar 751.799

USD. Biaya *retrofitting* tersebut mencakup biaya *drawing design*, pengadaan BWTS dan biaya instalasi termasuk semua biaya pendukung proses *retrofit* lainnya.

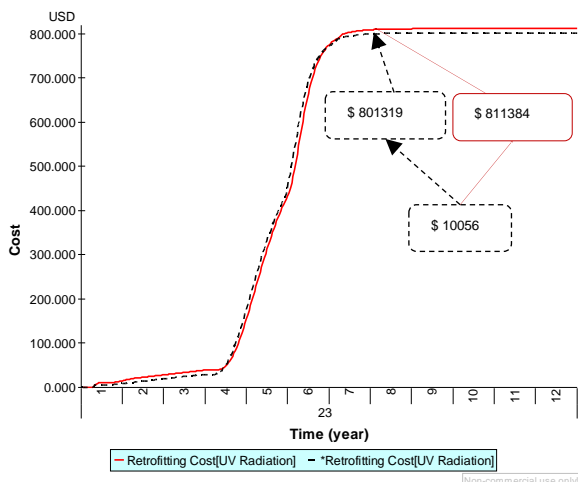
3.2 PEMBAHASAN

Untuk menganalisis pengaruh kesiapan pemilik kapal sesuai dengan tujuan kajian ini maka digunakan pendekatan analisis sensitivitas. Analisis sensitivitas digunakan untuk memahami seberapa sensitif hasil model terhadap perubahan pada parameter atau asumsi yang digunakan dalam model. Dalam konteks *retrofitting* BWTS pada kapal, analisis sensitivitas dapat membantu memahami faktor-faktor yang paling mempengaruhi biaya dan waktu *retrofitting*. Hal ini memungkinkan pengambil keputusan untuk memprioritaskan sumber daya dan memfokuskan upaya pada faktor-faktor kunci yang mempengaruhi hasil model. Selain itu, analisis sensitivitas juga dapat digunakan untuk memprediksi dampak perubahan pada parameter atau asumsi terhadap hasil model di masa depan. Hal ini dapat membantu pengambil keputusan dalam merencanakan strategi jangka panjang dan meminimalkan risiko yang terkait dengan ketidakpastian pada parameter atau asumsi.

Dalam analisis sensitivitas ini digunakan pendekatan *One-factor-at-a-time (OFAT)*. Pendekatan ini dilakukan dengan mengubah satu parameter pada suatu waktu sambil mempertahankan nilai parameter lainnya tetap konstan. Dalam analisis sensitivitas *OFAT*, satu-satu parameter diubah secara terpisah dan perubahan dalam output model diamati. variabel yang dirubah, ketersediaan dokumen kapal dan kesiapan kapal saat pelaksanaan survei dan *3D scanning*.

Dalam analisis sensitivitas *OFAT*, pengaruh ketersediaan dokumen kapal dan proses survei dapat dilihat dengan membandingkan *output* model *retrofitting cost* pada kondisi ketersediaan dokumen kapal yang berbeda-beda. Dalam hal ini, dokumen kapal dapat menjadi parameter yang diubah sementara parameter lainnya tetap konstan.

Simulasi dapat memberikan informasi tentang pengaruh ketersediaan dokumen kapal terhadap biaya retrofitting yang disajikan seperti pada gambar 4 berikut.



Gambar 4. Pengaruh ketersediaan dokumen kapal dan pelaksanaan survei terhadap proses biaya retrofitting

Dalam kasus dokumen kapal yang diperlukan tidak tersedia atau tidak lengkap maka diperlukan usaha tambahan untuk menghasilkan dokumen yang diperlukan. Salah satu pendekatan yang dapat diambil adalah dengan melakukan *re-drawing* dokumen kapal tersebut. Proses ini biasanya dilakukan oleh seorang *drafter* yang berpengalaman. Tugas utama dari seorang *drafter* adalah mengumpulkan informasi dari berbagai sumber, termasuk survei langsung pada kapal, dan menggunakan data tersebut untuk menghasilkan gambar teknis yang akurat.

Penambahan biaya dari tugas ini akan menyebabkan penambahan durasi survei dan volume pekerjaan. Berdasarkan Gambar 4 terjadi perbedaan biaya dan durasi total Retrofitting. Penambahan biaya ini akibat dari dokumen kapal yang tidak tersedia sebesar USD 10.056 atau 1,7% dan penambaha durasi akibat dokumen yang tidak lengkap sebesar 1,4%. Penambahan durasi dan biaya dari parameter ketersediaan dokumen kapal dapat mengakibatkan peningkatan biaya aktual yang lebih besar daripada kenaikan biaya yang

direncanakan. Namun di satu sisi penambahan durasi ini menyebabkan serapan *budget* juga melambat yang berdampak pada *performance* pekerjaan *retrofitting* sistem ballast kapal. Sehingga untuk menganalisis *performance* pekerjaan diperlukan kajian lebih lanjut.

4. KESIMPULAN

IMO mewajibkan semua kapal *existing* yang beroperasi pada *rute* internasional untuk memasang *Ballast Water Treatment System (BWTS)* bersamaan dengan pembaruan survei *International Oil Pollution Prevention (IOPP)*. *Retrofitting sistem Ballast Water Treatment System (BWTS)* memerlukan persiapan cermat dari pemilik kapal sebelum pelaksanaan *retrofitting*. Kesiapan pemilik kapal meliputi ketersediaan dokumen kapal dan pelaksanaan survei atau *3D scanning* berpengaruh pada proses *retrofitting* kapal. Hasil pengembangan model menggunakan pendekatan dinamika sistem diperoleh penambah pekerjaan akibat dokumen yang diperlukan tidak tersedia telah menyebabkan penambahan biaya sebesar USD 10.0056 atau 1,7% dan penambaha durasi akibat dokumen yang tidak lengkap sebesar 1,4%.

Hasil simulasi model ini dapat digunakan oleh pemilik kapal sebagai masukan karena model telah divalidasi dengan akurasi yang sangat baik dengan nilai *error* kurang dari 2%. Selain itu, hasil simulasi ini dapat digunakan sebagai dasar untuk merancang upaya mitigasi potensi keterlambatan pelaksanaan *retrofitting* sistem ballast pada kasus kasus lain yang disebabkan faktor-faktor eksternal yang belum dikaji dalam penelitian ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bengkalis dan seluruh rekan sejawat yang telah membantu dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Karahalios, Hristos, Z. L. Yang, and J. Wang, "A risk appraisal system regarding the implementation of maritime regulations by a ship operator," *Maritime Policy and Management*, vol. 42, no. 4, pp. 389–413, 2015, doi: 10.1080/03088839.2013.873548.
- [2] L. T. P. Nghiem *et al.*, "Economic and Environmental Impacts of Harmful Non-Indigenous Species in Southeast Asia," *PLoS ONE*, vol. 8, no. 8, 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0071255.
- [3] IMO, "Economic assessments for ballast water management: A guideline. GloBallast Monography Series No. 19," no. 19, 2010.
- [4] J. A. Fernandes *et al.*, "Costs and benefits to European shipping of ballast-water and hull-fouling treatment: Impacts of native and non-indigenous species," *Marine Policy*, vol. 64, pp. 148–155, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.marpol.2015.11.015.
- [5] Z. Wang, D. Nong, A. M. Countryman, J. J. Corbett, and T. Warziniack, "Potential impacts of ballast water regulations on international trade, shipping patterns, and the global economy: An integrated transportation and economic modeling assessment," *Journal of Environmental Management*, vol. 275, p. 110892, 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110892.
- [6] S. da S. Jorge and T. Satir, "Framework and implementation of a fuzzy logic filter—an optimization strategy for the BWMS based on stakeholders' perspectives," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, no. 30, pp. 37790–37801, Oct. 2020, doi: 10.1007/s11356-020-09807-9.
- [7] D. Šateikiene, J. Januteniene, M. Bogdevičius, and R. Mickevičienė, "Analysis into the selection of a ballast water treatment system," *Transport*, vol. 30, no. 2, pp. 145–151, 2015, doi: 10.3846/16484142.2015.1045025.
- [8] W. A. Gerhard, K. Lundgreen, G. Drillet, R. Baumler, H. Holbech, and C. K. Gunsch, "Installation and use of ballast water treatment systems – Implications for compliance and enforcement," *Ocean & Coastal Management*, vol. 181, no. July, p. 104907, 2019, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2019.104907.
- [9] Z. Wang, M. Saebi, J. J. Corbett, E. K. Grey, and S. R. Curasi, "Integrated Biological Risk and Cost Model Analysis Supports a Geopolitical Shift in Ballast Water Management," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 55, no. 19, pp. 12791–12800, 2021, doi: 10.1021/acs.est.1c04009.
- [10] D. M. King and P. T. Hagan, "Economic and Logistical Feasibility of Port-Based Ballast Water Treatment: A Case Study at the Port of Baltimore (USA)." MERC Ballast Water Economics Discussion Paper No. 6, 2013.
- [11] L. Čampara, M. Slišković, and G. J. Mrčelić, "Key ballast water management regulations with a view on ballast water management systems type approval process," *Nase More*, vol. 66, no. 2, pp. 78–86, 2019, doi: 10.17818/NM/2019/2.5.
- [12] Hardiyanto, T. Pitana, and D. W. Handani, "The Impact of Implementation New Regulation on Maritime Industry: A Review of Implementation BWTS," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, p. 10. doi: 10.1088/1755-1315/557/1/012058.
- [13] Hardiyanto, T. Pitana, and D. W. Handani, "Development Dynamic Compliance Cost Model For Implementation Of Ballast Water Management Convention: Shipowner Perspective," *JAES*, pp. 1–14, 2023, doi: 10.5937/jaes0-42108.
- [14] Hardiyanto, T. Pitana, and D. W. Handani, "System Dynamics Model of Retrofitting Ship System to Comply with Ballast Water Convention," *IREA*, vol. 11, no. 2, pp. 101–110, 2023, doi: <https://doi.org/10.15866/irea.v11i2.22692>.

- [15] D. M. King, M. Riggio, and P. T. Hagan, "Preliminary Cost Analysis of Ballast Water Treatment Systems." MERC Ballast Water Economics Discussion Paper No. 1, 2009.
- [16] Hardiyanto, "Desain Model Compliance Cost Untuk Implementasi Konvensi Ballast Water Management (Bwm) Dengan Pendekatan Dinamika Sistem," Dissertation, INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER, Surabaya, 2023.