

Analisis Pengaruh Tingkat Kevakuman Terhadap Produksi Air Tawar Pada *Fresh Water Generator* Di Kapal MT. Savir Lion

Laso Alfasa Yusuf¹, Agus Prawoto², Trisnowati Rahayu³, Shofa Dai Robbi⁴, Wulan Marlia Sandi⁵

^{1,2,3,4,5}Teknologi Rekayasa Pemesinan Kapal (TRPK), Politeknik Pelayaran (Poltekpel) Surabaya

Jl. Gunung Anyar Boulevard No. 1, Gunung Anyar, Surabaya, Jawa Timur

Email: lasoalfa0812@gmail.com, prawotoagus35@gmail.com, trisnowati.rahayu@poltekpel-sby.ac.id,
shofa_dai@kemenhub.go.id, wulan.marlia@poltekpel-sby.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk memahami bagaimana tingkat kevakuman memengaruhi produksi air tawar pada *Fresh Water Generator* (FWG) tipe Sondex SFD23/35 di kapal MT. Savir Lion. FWG merupakan mesin penting di kapal karena menyediakan air tawar untuk kebutuhan sehari-hari, baik untuk akomodasi maupun untuk keperluan ruang mesin. Selama penulis melaksanakan praktek berlayar, produksi air tawar mengalami penurunan yang cukup besar—dari kapasitas normal 10–15 ton per hari menjadi sekitar 5 ton per hari. Kondisi ini menimbulkan kendala dalam pemenuhan kebutuhan air di kapal. Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kualitatif melalui observasi langsung, wawancara dengan masinis yang bertanggung jawab, serta peninjauan dokumen operasional FWG. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan kevakuman terutama disebabkan oleh melemahnya tekanan pada ejector pump, kerusakan pada air ejector, penyumbatan pada jalur kondensor, serta penumpukan kerak pada plate evaporator. Setelah dilakukan perawatan seperti pembersihan plate, perbaikan sistem pemipaan, dan penggantian air ejector, tingkat kevakuman kembali meningkat dan produksi air tawar pulih ke kondisi normal. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa tingkat kevakuman merupakan faktor utama yang menentukan efisiensi proses penguapan di dalam FWG. Semakin stabil dan kuat kevakumannya, semakin optimal produksi air tawar yang dihasilkan. Oleh karena itu, perawatan rutin, pemeriksaan berkala, dan pemantauan tekanan sistem sangat diperlukan untuk memastikan FWG dapat beroperasi dengan baik selama pelayaran.

Kata kunci: *fresh water generator*, kevakuman, *ejector pump*, produksi air tawar, MT Savir Lion.

ABSTRACT

This research focuses on understanding how the vacuum level affects the freshwater production of the Sondex SFD23/35 Fresh Water Generator (FWG) on board MT Savir Lion. The FWG plays an essential role on the ship because it supplies freshwater for daily needs, including accommodation and engine-room operations. During the author's sea practice, the FWG's production dropped significantly—from its normal output of 10–15 tons per day to only around 5 tons per day. This situation made it difficult to meet the ship's daily water requirements. The research uses a qualitative descriptive method that includes direct observation, interviews with the engineers responsible for the equipment, and a review of operational records. The results show that the decrease in vacuum level was mainly caused by weak ejector pump pressure, a faulty air ejector, blockages in the condenser pipelines, and scale buildup on the evaporator plates. After maintenance was carried out—such as cleaning the plates, repairing the pipelines, and replacing the air ejector—the vacuum level improved and the freshwater production returned to normal. Overall, this study highlights that vacuum level is a crucial factor in the evaporation process. When the vacuum is stable and strong, the FWG can produce freshwater more efficiently. Therefore, regular maintenance, routine inspections, and continuous monitoring of the system are needed to ensure the FWG operates properly during the voyage.

Keywords: *Fresh Water Generator*, vacuum level, *ejector pump*, freshwater production, MT Savir Lion

Pendahuluan

Kapal memegang peranan vital dalam transportasi global untuk memindahkan muatan besar, di mana definisinya menurut Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2008 mencakup kendaraan air dengan berbagai tenaga penggerak serta struktur terapan lainnya [1]. Untuk mendukung operasional pelayaran jarak jauh, ketersediaan air tawar di atas kapal adalah kebutuhan mutlak, baik untuk konsumsi awak kapal maupun kebutuhan teknis seperti pendingin mesin dan pengisi *auxiliary boiler*. Mengandalkan suplai air tawar sepenuhnya dari darat (bunker) dinilai tidak efisien karena biaya yang tinggi dan

pengurangan kapasitas ruang muat kargo, sehingga keberadaan pesawat bantu *Fresh Water Generator* (FWG) menjadi solusi esensial untuk memproduksi air tawar secara mandiri di tengah laut.

Secara teknis, FWG berfungsi mengubah air laut menjadi air tawar melalui proses evaporasi dan kondensasi, di mana air hasil produksi harus memiliki kadar garam di bawah 2 ppm agar layak digunakan [2]. Prinsip kerja utama alat ini adalah menciptakan kondisi vakum di ruang evaporator untuk menurunkan titik didih air laut (di bawah 48°C), sehingga penguapan dapat terjadi dengan memanfaatkan panas buang dari mesin induk [3]. Kestabilan kevakuman menjadi kunci efisiensi energi; jika vakum menurun akibat kebocoran atau kerusakan, proses produksi akan terganggu. Oleh karena itu, jika kadar garam melebihi batas, sistem akan memproses ulang air tersebut sebelum dialirkan ke tangki penampungan.

Pentingnya menjaga tingkat kevakuman didukung oleh berbagai literatur dan studi terdahulu. Penelitian pada kapal MT. Galunggung menunjukkan bahwa rendahnya vakum dan suplai panas secara langsung menghambat laju produksi air tawar [4]. Studi termodinamika modern dan sistem membran menegaskan bahwa semakin rendah tekanan operasi (vakum tinggi), semakin besar laju penguapan dan fluks yang dihasilkan [5], [6]. Hal ini juga berlaku pada teknologi terbaru seperti sistem *multi-stage* dan *mechanical vapour compression* (MVC), yang sangat bergantung pada stabilitas vakum untuk efisiensi kompresi uap dan kondensasi [7], [8], terlepas dari variasi desain modul vertikal maupun horizontal yang digunakan [9].

Meskipun teknologi FWG terus berkembang, gangguan operasional tetap menjadi tantangan yang memerlukan keahlian teknis kapal. Masalah umum yang sering terjadi meliputi penyempitan aliran pada ejektor serta penumpukan kerak padat pada pelat evaporator dan kondensor yang menghambat perpindahan panas dan aliran air laut [10]. Gangguan-gangguan ini menyebabkan penurunan kualitas maupun kuantitas produksi air tawar. Oleh karena itu, para ahli mesin di kapal dituntut untuk memiliki keterampilan dalam mendeteksi anomali dan melakukan perawatan agar pasokan air tawar tetap terjaga demi kelancaran operasional kapal.

Penelitian terdahulu telah banyak membahas aspek termodinamika dan simulasi sistem FWG. Studi pada MT. Galunggung menyoroti pengaruh suplai panas, sementara riset lain berfokus pada pemodelan *multi-stage* dan sistem membran. Namun, sebagian besar literatur tersebut bersifat teoretis atau berfokus pada desain sistem baru. Masih terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) mengenai analisis kegagalan operasional FWG pada kapal tua (*aging vessel*) yang menghadapi tantangan degradasi material dan variasi kondisi lingkungan laut yang ekstrem.

Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada pendekatan investigatif berbasis bukti (*evidence-based*) menggunakan *Root Cause Analysis* (RCA) pada kasus nyata gangguan vakum yang persisten. Studi ini tidak hanya mengidentifikasi gejala, tetapi memetakan interaksi kompleks antara faktor hidrolik, mekanis, dan lingkungan yang menyebabkan kegagalan sistemik pada FWG tipe pelat.

Urgensi penelitian didasari insiden pada MT. Savir Lion (21 November 2024), di mana produksi anjlok hingga 5 ton/hari akibat hilangnya kevakuman. Artikel ini bertujuan menganalisis penyebab akar masalah tersebut dan merumuskan strategi perawatan yang efektif.

Metode Penelitian

Landasan Teori dan Komponen Sistem

Dalam kerangka metode penelitian ini, konsep Analisis merupakan usaha pengamatan mendetail terhadap komponen-komponen pembentuk suatu objek studi untuk dikaji lebih lanjut [11]. Kebutuhan air tawar di kapal sering kali dipenuhi melalui proses *bunkering* yang melibatkan penerimaan cairan dari fasilitas darat [12]. Air tawar tersebut didefinisikan sebagai air dengan konsentrasi garam terlarut yang rendah, yakni di bawah 0,5 gram per liter [13]. Untuk mendapatkan air murni bebas mineral, dilakukan proses distilasi melalui pemanasan dan kondensasi [14]. *Fresh Water Generator* (FWG) adalah pesawat bantu yang menghasilkan kondensat tersebut dengan mendinginkan uap air laut [15]. Sistem ini menjadi pilihan utama di kapal niaga karena menawarkan keandalan serta kesederhanaan teknis [16]. Tipe yang umum digunakan adalah *Low Pressure Evaporator* yang bekerja pada tekanan vakum -88 bar dengan suhu 58–60°C [17]. Selain itu, terdapat teknologi *Reverse Osmosis* (RO) yang mampu memproduksi air tawar tanpa panas menggunakan tekanan tinggi [18]. Sistem RO ini semakin diminati di kapal modern karena ukurannya yang ringkas dan efisiensi tinggi [19]. Alternatif lainnya adalah FWG tipe pelat yang sangat cocok untuk ruang mesin terbatas karena efisiensi perpindahan panasnya yang baik [20]. Secara fisika, air laut akan mendidih ketika tekanan uap jenuhnya setara dengan tekanan lingkungan sekitarnya [21]. Penggunaan sistem vakum pada FWG sangat menguntungkan karena dapat menghemat energi dan meminimalkan pembentukan kerak [22]. Prinsip kerja ini didasarkan pada hukum termodinamika yang menggabungkan hukum Boyle dan hukum Charles [23]. Operasional sistem ini pun dapat dioptimalkan melalui metode kontrol berbasis model matematis neraca energi [24].

Komponen utama FWG dimulai dari evaporator, tempat di mana fluida mengalami perubahan fase dari cair menjadi uap [25]. Uap tersebut kemudian masuk ke kondensor yang berfungsi sebagai penukar panas untuk mengubahnya kembali menjadi cairan [26]. Proses pendinginan di dalam kondensor ini memanfaatkan medium pendingin seperti air laut atau udara [27]. Untuk menciptakan kondisi vakum, digunakan ejektor yang memindahkan gas atau cairan yang tidak dapat dikondensasikan [28]. Secara spesifik, *air ejector* bertugas membuang air garam pekat atau residu kontaminan kembali ke laut [29]. Kualitas air hasil produksi dipantau menggunakan salinometer untuk memastikan kelayakannya [30]. Alat ini bekerja dengan mendeteksi kadar garam melalui *salinity cell* yang terpasang [31]. Air tawar yang dihasilkan kemudian dipindahkan oleh pompa distilat sentrifugal yang terletak di bagian bawah unit [32]. Aliran fluida tersebut dideteksi

keberadaannya dalam jalur pipa menggunakan *flow meter* [33]. Instrumen ini berfungsi mengukur laju aliran serta total volume massa fluida dalam periode tertentu [34]. Tingkat kevakuman sistem dipantau menggunakan *pressure vacuum gauge* yang mengukur tekanan negatif di bawah atmosfer [35]. Alat ukur ini secara khusus memantau kondisi tekanan di dalam *shell separator* [36]. Pemantauan ini penting untuk memastikan tekanan tetap berada pada kisaran vakum ideal demi efisiensi [37]. Riset menunjukkan bahwa pencapaian vakum optimal berbanding lurus dengan peningkatan volume produksi air tawar [38]. Guna menjaga kinerja tersebut, perawatan rutin dilakukan untuk mempertahankan keawetan mesin [39]. Pemeliharaan ini mencakup segala tindakan perbaikan dan perlindungan fasilitas agar operasional kapal tetap berjalan lancar [40].

Parameter Kritis dan Metodologi Penelitian

Penelitian ini menerapkan desain deskriptif kualitatif untuk menyajikan gambaran sistematis dan faktual mengenai fenomena operasional tanpa memanipulasi variabel di lingkungan alaminya [41]. Pendekatan ini dipilih guna memahami mekanisme kegagalan sistem *Fresh Water Generator* (FWG) secara mendalam di lokasi penelitian, yakni kapal tanker MT. Savir Lion, selama periode 31 Januari 2024 hingga 31 Januari 2025 [42]. Data dikumpulkan melalui dua sumber utama, yaitu data primer yang diperoleh dari observasi parameter harian, inspeksi visual komponen saat *overhaul*, dan wawancara teknis dengan perwira mesin [43]. Sementara itu, data sekunder didapatkan dari studi literatur, *manual book* Sondex, diagram perpipaan, serta *engine log book* untuk melengkapi validitas informasi [44].

Untuk menjamin akurasi data, teknik pengumpulan dilakukan melalui triangulasi yang mencakup observasi partisipatif saat jaga laut, dokumentasi bukti fisik, serta wawancara mendalam guna menggali *tacit knowledge* dari para ahli [45]. Data yang terhimpun kemudian diolah menggunakan metode *Root Cause Analysis* (RCA) untuk mengidentifikasi akar masalah secara fundamental, bukan sekadar gejala yang muncul di permukaan [46]. Proses analisis ini didukung oleh dua instrumen utama, yaitu teknik *5 Whys Analysis* untuk menelusuri hubungan sebab-akibat secara linear dan *Diagram Fishbone* (Ishikawa) yang memetakan faktor penyebab kegagalan berdasarkan kategori manusia, mesin, metode, material, dan lingkungan [47]. Validitas pendekatan ini selaras dengan studi pada MT. Pangkalan Brandan yang membuktikan bahwa identifikasi faktor teknis utama seperti rendahnya proses evaporasi, kondensasi, dan tekanan pompa ejector melalui analisis yang tepat terbukti efektif dalam memulihkan kapasitas produksi air tawar [48].

Hasil Dan Pembahasan

Gambaran Kasus dan Temuan Lapangan

Selama periode observasi, ditemukan tiga insiden utama yang menyebabkan kegagalan vakum pada FWG Sondex SFD23/35, yang memiliki spesifikasi desain kapasitas 36 ton/hari namun beroperasi optimal di 15-20 ton/hari.

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Fresh Water Generator MT. Savir Lion

Type	SFD23/35
Capacity (m3/24h)	36
Voltage	3x440V / 60 Hz
Normal temperature sea water and	32°C
Temperature jacket water inlet	80°C
Normal temperature sea water and	44°C
Temperature jacket water outlet	77°C
Normal sea water and jacket water pressure	4 bar
	6 bar
Salt Content	5 ppm
Jacket water flow	100 m3/h
Sea water flow	96 m3/h
Classification	LRS
Ejector type	SE 23/25
Dimensions	L x W x H 2200 x 1300 x 1620 mm

Meskipun memiliki kapasitas desain 36 ton/hari, kondisi operasional riil di kapal sering kali menargetkan produksi stabil di angka 15-20 ton/hari untuk efisiensi energi pompa. Namun, data awal menunjukkan penurunan produksi hingga level kritis 5 ton/hari, yang memicu investigasi ini.

- Kasus 1 (Penyumbatan Filter): Pada 21 November 2024, tekanan *discharge* pompa ejector turun drastis menjadi 0.5 bar (Standar: 4.0-6.0 bar), menyebabkan vakum gagal terbentuk (<50%). Inspeksi menemukan *strainer sea chest* tersumbat lumpur akibat operasional di perairan dangkal, menyebabkan fenomena *starvation* pada sisi hisap pompa.

Tabel 2. Data Parameter Operasional Sebelum Perbaikan

Parameter	Pembacaan	Standar Normal	Analisis
Ejector Pressure (Discharge)	0.5 bar	4.0 - 6.0 bar	Sangat Rendah
Vakum Evaporator	< 50%	90 - 95%	Gagal Vakum
Produksi Air Tawar	0.7 ton/shift	~4 ton/shift	Gagal Produksi
Suhu Air Laut Masuk	15°C	-	Dingin (Normal)

- Kasus 2 (Kerusakan Mekanis): Pada 23 November 2024, meskipun filter bersih, tekanan drop ke 0.2 bar. *Overhaul* mengungkap erosi kavitasi parah pada *impeller* pompa dan kerusakan geometri *nozzle air ejector* akibat abrasi pasir, yang menghalangi terciptanya efek Venturi. Investigasi lebih dalam melalui pembongkaran (*overhaul*) komponen utama mengungkapkan kerusakan fisik yang serius:

1. Impeller Pompa Ejektor: Ditemukan mengalami korosi kavitasi (*cavitation erosion*) yang parah. Permukaan *impeller* berlubang-lubang dan keropos (Gambar 1). Kavitasi ini kemungkinan besar merupakan dampak lanjutan dari operasional pompa dengan filter tersumbat pada hari-hari sebelumnya (Kasus 1), yang menyebabkan tekanan hisap turun di bawah tekanan uap jenuh air, memicu ledakan gelembung uap yang mengikis logam.



Gambar 1. Impeller Ejector Pump Korosi

2. Air Ejector: Unit *air ejector* lama ditemukan mengalami kerusakan pada *nozzle* internal (Gambar 2). Erosi akibat aliran air berkecepatan tinggi yang mengandung partikel pasir (*abrasive wear*) telah mengubah geometri *nozzle*, sehingga tidak lagi mampu menciptakan efek Venturi yang efisien untuk menghisap udara.



Gambar 2. Air Ejector

Tindakan Perbaikan:

Dilakukan penggantian *impeller* pompa dengan suku cadang baru. Untuk *air ejector*, dilakukan penggantian unit. Namun, karena ketidakcocokan dimensi lubang baut pada *spare part* baru, dilakukan modifikasi kanibalisasi: menggabungkan *nozzle* baru dengan *housing/casing* lama. Langkah ini berhasil mengembalikan fungsi hisap, memulihkan vakum ke 97%, dan produksi air kembali ke 3 ton/shift (Tabel 3).

Tabel 3. Peningkatan Produksi Air Tawar Setelah Maintenance

Tanggal	Jam jaga	Sw in dan out temp.	Jw in dan out temp.	Ejector pressure	vacuum	Produksi m3
23 November	12.00-16.00	15-25	79-70	3.5 bar	97%	3

- Kasus 3 (Kebocoran Sistem): Pada 28 November 2024, tekanan pompa stabil (2.0 bar) namun vakum drop ke 50%. Ditemukan *air ingress* melalui lubang korosi (*pinhole leak*) pada pipa air laut dan getasnya *rubber seal* kondensor akibat penuaan (*aging*).

Analisis Kejadian:

Pemeriksaan kebocoran (*leak test*) menemukan dua titik kegagalan integritas sistem:

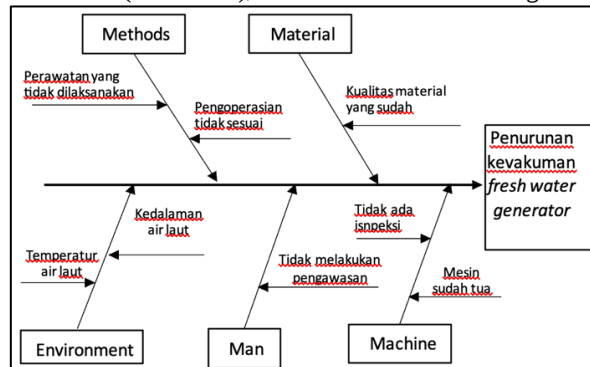
- Kebocoran Pipa Air Laut: Pipa suplai air laut kondensor mengalami kebocoran halus (*pinhole leak*) akibat korosi (Gambar 4.8). Material pipa baja karbon yang digunakan terbukti tidak tahan terhadap korosifitas air laut jangka panjang.
- Kegagalan Rubber Seal: Karet penyekat (*gasket*) pada *casing* dan pelat kondensor telah mengalami penuaan (*aging*), menjadi keras dan getas, sehingga tidak mampu lagi menahan perbedaan tekanan antara atmosfer luar dan ruang vakum dalam.

Tindakan Perbaikan:

Dilakukan pengelasan (*welding*) darurat pada pipa yang bocor untuk menutup lubang korosi. *Rubber seal* yang rusak diganti dengan yang baru, dengan penambahan aplikasi *sealant* (lem) untuk memastikan kedekatan. Pasca perbaikan, vakum kembali stabil di 97% dan kebocoran teratasi.

Analisis Akar Masalah (Root Cause Analysis)

Menggunakan diagram *Fishbone* (Gambar 3), analisis kausalitas dikategorikan ke dalam lima faktor:



Gambar 3. Diagram Fishbone

Faktor Methods (Metode)

Evaluasi menunjukkan adanya celah dalam pelaksanaan prosedur. Meskipun SOP pengoperasian ada, pelaksanaan jadwal perawatan (PMS) tidak konsisten. Prosedur pembersihan filter dan inspeksi pompa sering kali terlewat atau hanya dilakukan secara administratif tanpa eksekusi fisik yang berkualitas. Selain itu, tidak adanya instruksi kerja spesifik untuk mematikan atau mem-*bypass* FWG saat melewati perairan dangkal/kotor menjadi penyebab langsung penyumbatan filter yang memicu kavitasi pompa.

Faktor Environment (Lingkungan)

Kondisi lingkungan perairan sangat berpengaruh. Kualitas air laut yang mengandung sedimen tinggi (lumpur, pasir) di area pesisir mempercepat penyumbatan filter dan abrasi pada *nozzle* ejektor. Selain itu, temperatur air laut yang bervariasi memengaruhi efisiensi kondensasi; air laut yang terlalu hangat di daerah tropis menurunkan efisiensi kondensasi, mempersulit pencapaian vakum tinggi.

Faktor Material (Bahan)

Kualitas material menjadi isu krusial. Penggunaan **pipa baja karbon** biasa untuk jalur air laut kondensor terbukti rentan terhadap korosi galvanik dan *pitting corrosion*. Seharusnya, material yang lebih tahan korosi seperti *Cupro-Nickel* (CuNi) atau pipa berlapis karet (*rubber-lined*) menjadi standar. Selain itu, **degradasi rubber seal** akibat panas dan usia adalah proses alami yang tidak diantisipasi dengan penggantian preventif yang terjadwal.

Faktor Man (Manusia)

Faktor manusia berkontribusi pada keterlambatan deteksi masalah. Kurangnya pengawasan intensif saat mesin beroperasi menyebabkan gejala awal penurunan kinerja (seperti penurunan tekanan pompa yang gradual) tidak terdeteksi hingga alarm berbunyi. Ada indikasi kurangnya sensitivitas operator terhadap parameter operasional normal vs abnormal, serta kecenderungan untuk reaktif daripada proaktif dalam perawatan.

Faktor Machine (Mesin)

Faktor usia mesin (aging) tidak bisa diabaikan. Unit FWG yang telah beroperasi sejak 2007 mengalami kelelahan material (*fatigue*) pada komponen statis dan dinamis. Kavitasi impeller adalah bukti nyata dari stres hidrolis yang berkepanjangan akibat operasional di luar parameter desain (misalnya, terus dipaksa jalan meski filter mulai buntu).

Pembahasan:

Hasil penelitian ini secara empiris memvalidasi teori termodinamika bahwa tingkat kevakuman adalah variabel independen paling dominan yang menentukan kinerja FWG. Hubungan antara tekanan ejektor, tingkat vakum, dan produksi air tawar terbukti bersifat linear dan kausal:

1. Korelasi Tekanan Ejektor - Vakum: Ejektor adalah "inti" dari sistem vakum. Data menunjukkan bahwa tekanan *discharge* minimum 3.5 bar mutlak diperlukan untuk menghasilkan kecepatan jet fluida yang mampu menghisap udara dan *brine*. Penurunan tekanan di bawah ambang batas ini (seperti 0.5 bar pada Kasus 1 dan 0.2 bar pada Kasus 2) menyebabkan kegagalan total pembentukan vakum.
2. Korelasi Vakum - Produksi: Tanpa vakum yang memadai (>85%), titik didih air laut tetap tinggi (mendekati 100°C), jauh di atas suhu media pemanas (air jaket 80°C). Akibatnya, perpindahan panas tidak terjadi, dan evaporasi terhenti. Sebaliknya, saat vakum pulih ke 97%, titik didih turun ke ~45°C, memungkinkan yang besar untuk perpindahan panas yang efisien, sehingga produksi melonjak kembali ke 10-15 ton/hari.
3. Efek Domino Kegagalan: Penelitian ini mengungkap rantai kegagalan sistemik:
Berdasarkan analisis RCA, faktor dominan penurunan kinerja adalah ketidakstabilan kevakuman yang dipicu oleh rantai kegagalan sistemik. Hubungan kausalitas tersebut diringkas sebagai berikut:
 - Hambatan Aliran: Filter kotor → Tekanan Ejektor Drop → Vakum Hilang.
 - Kerusakan Komponen: Kavitasi Impeller/Erosi Nozzle → Kecepatan Jet Fluida Rendah → Gagal Hisap Udara.
 - Kebocoran: *Air Ingress* → Tekanan Ruang Evaporator Naik → Titik Didih Naik (>80°C) → Evaporasi Terhenti.

Upaya perbaikan yang dilakukan kru kapal mulai dari pembersihan sederhana hingga penggantian komponen kritis dan pengelasan terbukti efektif secara teknis (*corrective maintenance*). Namun, analisis RCA menegaskan bahwa keberhasilan jangka panjang hanya dapat dicapai dengan mengubah paradigma dari perawatan korektif (perbaiki setelah rusak) menjadi perawatan preventif (cegah sebelum rusak) dan prediktif (monitor tren kinerja).

Kontribusi Praktis

Hasil penelitian ini memberikan panduan praktis bagi teknisi kapal (*marine engineers*) dalam melakukan *troubleshooting* FWG. Temuan ini menegaskan bahwa penanganan masalah vakum tidak bisa bersifat parsial; pemeriksaan harus mencakup integritas hidrolis (pompa/filter), kondisi mekanis (nozzle/impeller), dan kedap sistem (seal/pipa). Strategi ini relevan untuk diterapkan pada manajemen perawatan kapal niaga guna meminimalkan *downtime*.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki keterbatasan, yakni hanya berfokus pada satu unit studi kasus di kapal tanker spesifik, sehingga generalisasi hasil mungkin terbatas pada tipe FWG serupa. Selain itu, pengambilan data masih mengandalkan pembacaan *gauge* analog manual dan *logbook*, tanpa dukungan data *real-time* dari sensor digital yang lebih presisi.

Simpulan

Berdasarkan analisis data dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa: Tingkat kevakuman merupakan variabel independen paling kritis; penurunan di bawah 85% secara langsung menghentikan proses evaporasi dan menurunkan produksi air tawar secara signifikan. Akar penyebab penurunan kevakuman bersifat multifaktorial, meliputi aspek hidrolis (penyumbatan filter, kavitasi impeller), mekanis (erosi nozzle ejector), dan degradasi material (korosi pipa, seal getas). Intervensi teknis melalui perbaikan komponen kritis terbukti efektif mengembalikan performa sistem, memvalidasi bahwa kerusakan bersifat *reversible* dengan diagnosis yang tepat. Rekomendasi Guna mencegah berulangnya kegagalan dan menjamin keandalan operasional, direkomendasikan: Optimalisasi PMS: Mengubah paradigma dari perawatan korektif menjadi preventif dengan disiplin

membersihkan filter *sea chest* dan ejektor sebelum memasuki perairan dangkal. Peningkatan Material: Melakukan penggantian bertahap jalur pipa air laut menggunakan material tahan korosi seperti *Cupro-Nickel* (CuNi) atau pipa berlapis karet. Kompetensi Kru: Melaksanakan *toolbox meeting* rutin untuk meningkatkan pemahaman kru terhadap gejala awal penurunan vakum dan prosedur standar operasi. Manajemen Suku Cadang: Memastikan ketersediaan suku cadang kritis (*critical spare parts*) seperti *repair kit air ejector* dan *mechanical seal* di ataskapal.

Daftar Pustaka

- [1] K. P. R. Indonesia, *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2008 tentang Pelayaran*. Jakarta: Kementerian Perhubungan, 2008.
- [2] A. Ramadhan, "Analisis kerja fresh water generator berbasis vakum pada kapal niaga," *Jurnal Teknologi Kelautan*, vol. 14, no. 2, pp. 122–131, 2022.
- [3] H. Hartanto, "Factors affecting the performance of fresh water generator," *TEM Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 330–336, 2020, doi: 10.18421/TEM91-45.
- [4] I. K. G. Purustoma and B. Riyanto, "Optimalisasi kinerja fresh water generator dalam pemenuhan kebutuhan air tawar di kapal MT Galunggung," *Jurnal Teknologi Maritim*, vol. 11, no. 1, pp. 66–75, 2023.
- [5] A. Gkountas, A. C. Mitropoulos, and Z. B. Maroulis, "Modelling and parametric analysis of a brine treatment process based on vacuum evaporation," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 11, p. 5689, 2022, doi: 10.3390/app12115689.
- [6] B. H. Ismael, A. M. Khlaifat, A. M. Al-Jubouri, and M. Al-Hussein, "Permeation flux prediction of vacuum membrane distillation using artificial neural networks," *Processes*, vol. 11, no. 5, p. 1342, 2023, doi: 10.3390/pr11051342.
- [7] H. Liu, "Advances in multi-stage vacuum evaporation systems for marine freshwater production," *Desalination*, vol. 530, p. 115663, 2022, doi: 10.1016/j.desal.2022.115663.
- [8] A. Date, S. Agarwal, and A. Akbarzadeh, "Experimental and theoretical study on mechanical vapour compression for freshwater production," *Sustainability*, vol. 14, no. 14, p. 8573, 2022, doi: 10.3390/su14148573.
- [9] L. Zhang, Y. Wang, and H. Chen, "Comparative study of vertical and horizontal vacuum distillation modules for marine desalination," *J. Clean. Prod.*, vol. 445, p. 141233, 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.141233.
- [10] S. R. Mahadir, "Analisis menurunnya produksi air tawar pada fresh water generator di kapal MT Gloria Sentosa," *Jurnal Teknologi Maritim*, vol. 11, no. 2, pp. 77–85, 2023.
- [11] Prawiro, "Analisis: Definisi dan penerapannya dalam penelitian sosial," *Jurnal Pendidikan dan Penelitian*, vol. 20, no. 1, pp. 1–12, 2020.
- [12] R. Syahputra, "Analisis sistem bunker air tawar pada kapal," *Jurnal Teknik Perkapalan Nusantara*, vol. 4, no. 2, pp. 65–72, 2021.
- [13] P. H. Gleick, "The world's freshwater resources: A comprehensive review," *Annu. Rev. Environ. Resour.*, vol. 48, pp. 1–28, 2023, doi: 10.1146/annurev-environ-032122-023821.
- [14] M. Rofiq, "Kualitas air distilasi dan penggunaannya dalam industri maritim," *Jurnal Kimia Terapan*, vol. 12, no. 2, pp. 33–41, 2020.
- [15] Nawawi, "Optimalisasi Serah Terima Tugas Jaga sebelum Crew melaksanakan Tugas Jaga di Kapal MV. Amanah Morowali Amc," *Journal Marine Inside*, pp. 11–19, Jul. 2022, doi: 10.56943/ejmi.v4i1.38.
- [16] M. Asman Ala, R. A. Muhammad, and R. Irwansyah, "Penerapan sistem fresh water generator tipe vacuum distillation untuk pengolahan air laut menjadi air tawar di kapal niaga," *Jurnal Meteor STIP Jakarta*, vol. 21, no. 2, pp. 55–62, 2021, [Online]. Available: <https://ejournal.stipjakarta.ac.id/index.php/meteor/article/view/180>
- [17] M. Baihaqi, A. Naufal, and D. Santoso, "Analisis performa low pressure fresh water generator pada kapal niaga," *Marine Engineering Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 77–88, 2024.
- [18] Y. Chen, W. Zhao, and J. Sun, "Review of reverse osmosis technology for shipboard freshwater production," *Desalination*, vol. 556, p. 116565, 2023, doi: 10.1016/j.desal.2023.116565.
- [19] A. Prasetyo, Y. Putra, and S. Nugroho, "Efisiensi sistem reverse osmosis pada fresh water generator di kapal modern," *Jurnal Teknologi Kelautan*, vol. 15, no. 2, pp. 144–153, 2023.
- [20] T. Rahman, D. Lestari, and F. Nugraha, "Plate-type fresh water generator untuk kapal niaga menengah," *Marine Engineering Review*, vol. 8, no. 3, pp. 99–107, 2022.
- [21] Widodo, "Hubungan tekanan dan suhu titik didih pada sistem fresh water generator," *Jurnal Termodinamika*, vol. 10, no. 2, pp. 88–96, 2021.
- [22] S. Rahmawati, "Pengaruh tekanan vakum terhadap efisiensi produksi fresh water generator," *Jurnal Termodinamika Terapan*, vol. 5, no. 1, pp. 11–20, 2023.
- [23] A. N. Pramono, *Termodinamika untuk ahli mesin kapal*. Jakarta: Erlangga, 2019.

- [24] A. Kralj, B. Frankovic, and M. Jeromel, "Optimization of freshwater generator operation by energy-based control," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 5, p. 543, 2021, doi: 10.3390/jmse9050543.
- [25] Ismiyati, "Prinsip kerja evaporator dalam sistem pendingin dan destilasi," *Jurnal Teknologi Mesin*, vol. 12, no. 2, pp. 55–63, 2020.
- [26] Jurnal Ilmiah Teknik Mesin dan Industri, "Analisis Efektivitas Perpindahan Panas Kondensor pada Proses Destilasi," *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin dan Industri*, vol. 2, no. 1, pp. 31–40, 2023.
- [27] E. Maulana, M. T. H. Pardede, and D. Mahardika, "Perancangan Proses Pembuatan Kondensor Untuk Pendingin Reaktor Pirolisis Kapasitas 75 Kg/Jam," Jakarta, Indonesia: Universitas Muhammadiyah Jakarta, 2020.
- [28] A. Rowa and Aryandi, "Ejector system pada fresh water generator kapal," *Jurnal Teknik Mesin Maritim*, vol. 9, no. 2, pp. 77–85, 2023.
- [29] R. Mehta, "Performance of air ejectors in vacuum distillation systems," *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 19, no. 3, pp. 122–133, 2024.
- [30] Antonius, "Penggunaan salinometer dalam sistem fresh water generator kapal," *Jurnal Teknik Maritim Nusantara*, vol. 6, no. 1, pp. 44–52, 2024.
- [31] Rahman, "Peranan salinometer dalam sistem fresh water generator," *Jurnal Instrumen Kapal*, vol. 6, no. 1, pp. 25–32, 2024.
- [32] Lio, "Analisis pompa distilat pada fresh water generator di kapal niaga," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 8, no. 1, pp. 99–108, 2020.
- [33] Ferdyan, "Peran flow meter dalam sistem distribusi air tawar di kapal," *Jurnal Alat Ukur Maritim*, vol. 5, no. 2, pp. 33–42, 2024.
- [34] Simonson, "Flow meter applications in closed and open marine systems," *Journal of Fluid Measurement*, vol. 18, no. 2, pp. 122–134, 2023.
- [35] Paul, "Pressure vacuum gauge application in marine engineering," *International Journal of Marine Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 77–84, 2024.
- [36] I. W. G. Astawa, "Penggunaan pressure vacuum gauge pada permesinan bantu kapal," *Jurnal Rekayasa Maritim*, vol. 4, no. 2, pp. 70–78, 2020.
- [37] Widodo, "Pengukuran kevakuman pada fresh water generator kapal," *Jurnal Teknologi Kelautan*, vol. 15, no. 1, pp. 55–62, 2023.
- [38] E. Susanto, B. Wahyudi, and D. Kurniawan, "Analisis pengaruh tekanan ejector terhadap produksi fresh water generator," *Jurnal Energi Maritim*, vol. 5, no. 2, pp. 55–66, 2021.
- [39] R. R. S. Wulandari, D. Prayogo, Suhartini, and M. F. Fauzi, "Optimalisasi Perawatan Fresh Water Generator guna Mempertahankan Produksi Air Tawar di Kapal PGN FSRU Lampung," *Airman: Jurnal Teknik dan Keselamatan Transportasi*, vol. 2, no. 1, pp. 60–72, 2019, [Online]. Available: <https://jurnal.poltekbangmakassar.ac.id/index.php/airman/article/download/101/119>
- [40] Nurlaela, "Pemeliharaan peralatan kapal: Konsep dan penerapan," *Jurnal Teknologi Transportasi Laut*, vol. 7, no. 1, pp. 15–27, 2024.
- [41] Ashley, "Planned maintenance: Definition, examples, & how to implement," 2022, *Maintainx*. [Online]. Available: <https://www.getmaintainx.com/learning-center/planned-maintenance>
- [42] Sargun Sethi, "Marine Freshwater Generators: Common Problems And Solutions," *Marine Insight*, May 2021, Accessed: Nov. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.marineinsight.com/guidelines/troubleshooting-marine-freshwater-generators/>
- [43] M. R. Fadli, "Pemahaman penelitian kualitatif: Konsep dan praktik," *Jurnal Ilmu Sosial*, vol. 18, no. 1, pp. 9–18, 2021.
- [44] A. Subagyo and I. Kristian, *Metode penelitian kualitatif*. Bandung: Aksara Global Akademia, 2023. [Online]. Available: <https://fisip.unjani.ac.id/books/metode-penelitian-kualitatif/>
- [45] Sugiyono, *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Bandung: Alfabeta, 2021.
- [46] L. J. Moleong, *Metodologi penelitian kualitatif*. Bandung: Remaja Rosdakarya, 2021.
- [47] Sugiyono, *Metode penelitian kualitatif*. Bandung: Alfabeta, 2022.
- [48] A. Prawoto, I. L. Fauzi Muryadih, and I. Sutrisno, "Analisis Komprehensif Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Produksi Air Tawar FWG di Kapal MT. Pangkalan Brandan", *Innovative*, vol. 4, no. 2, pp. 4431–4444, Mar. 2024.