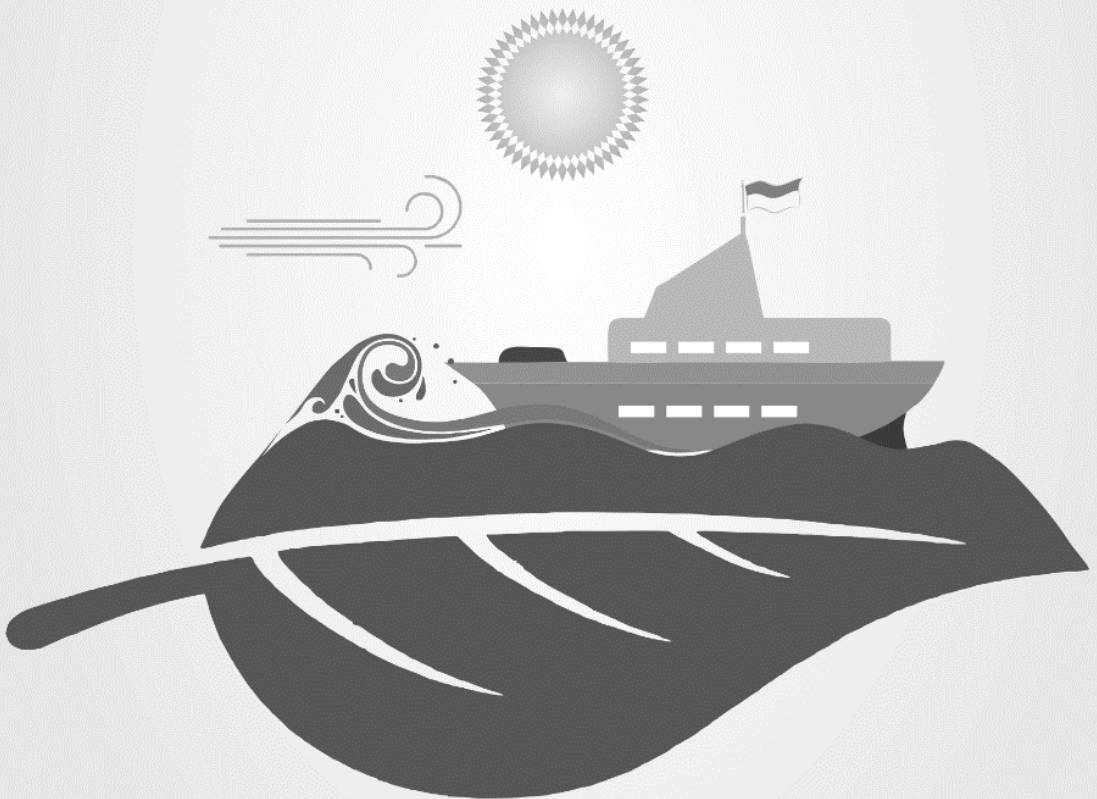


Dr. Betty Ariani, S.T., M.T



Teknologi Hijau Bidang Perkapalan, Upaya Menuju Zero Carbon 2050 (GREEN TECHNOLOGY FOR SHIP)



Rizky Chandra Ariesta – Betty Ariani – Dian Purnamasari –
Indra Ranu Kusuma – Tuswan – M. Zaed Yuliadi – Alhazman –
Dori Yuvenda – Frengki M Felayati – Dian Prasetyawati – Sunarsih

TEKNOLOGI HIJAU BIDANG
PERKAPALAN, UPAYA MENUJU ZERO
CARBON 2050
(GREEN TECHNOLOGY FOR SHIP)

Editor:

Dr. Betty Ariani S.T., M.T

Kontributor:

Rizky Chandra Ariesta - Betty Ariani – Dian Purnamasari – Indra
Ranu Kusuma – Tuswan – M.Zaed Yuliadi – Alhazman – Dori
Yuvenda – Frenki M Felayati – Dian Prasetyawati – Sunarsih

Penerbitan Buku Ini Atas Pendanaan Hibah Riset Keilmuan
Kemendikbudristek – LPDP 2021



Teknologi Hijau Bidang Perkapalan, Upaya Menuju Zero Carbon 2050 (Green Technology For Ship)

Author:

Rizky Chandra Ariesta, Betty Ariani, Dian Purnamasari, Indra Ranu Kusuma, Tuswan, M.Zaed Yuliadi, Alhazman, Dori Yuvenda, Frenki M Felayati, Dian Prasetyawati, Sunarsih

Editor : Dr. Betty Ariani S.T., M.T

Tata Letak : Ahmad Sofi

Cover : Aliyul Murtadlo

copyright © 2022

Penerbit



Unisma Press
Gedung Umar bin Khattab Kantor Pusat LT. 3,
Universitas Islam Malang
Jl. Mayjen Haryono 193 Malang, 65144
Telp. 0341-551932 ext 232
unismapress@unisma.ac.id

Cetakan Pertama : Juni 2022
Ukuran : 15,5 cm x 23 cm
Jumlah Halaman : xiv + 246 halaman

Anggota IKAPI No.303/JTI/2021

ISBN: 978-623-99161-9-0

Hak cipta dilindungi oleh Undang-undang Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku tanpa izin tertulis dari Penerbit



DAFTAR ISI

Daftar Isi | v

Daftar Tabel | vii

Daftar Gambar | ix

Prolog Editor | 1

Chapter 1

Pengantar tentang konsep Eco Friendly Vessel | 3

*Rizky Chandra Ariesta, Mohammad Sholikhan Arif, I Ketut Aria
Pria Utama Hendriyadi* | 3

v

Chapter 2.

Konsep Teknologi Bahan Bakar Alternative dan Energi
Terbarukan Di Kapal | 25

Betty Ariani

Chapter 3.

Advanced Rudder and Propulsion System | 43

Dian Purnamasari

Chapter 4

Welding proses di Industri Galangan | 67

Mochamad Zaed Yuliadi

Chapter 5

Sistem Distribusi DC untuk Kelistrikan Hibrida Dan
Optimalisasi Konsumsi Bahan Bakar di Kapal | 83

Indra Ranu Kusuma

Chapter 6

Penggunaan Dual-Fuel Engine (DFE) di Kapal | 115

Frengky Mohammad Felayati

Chapter 7

Exhaust Gas Recirculation | 131

Dori Yuvenda, Wagino, Randi Purnama Putra, Ahmad Arif, Toto Sugiarto

Chapter 8

Perkembangan Penerapan Material Sandwich untuk Struktur Kapal: Regulasi, Desain dan Aplikasi | 147

Tuswan, Ocid Mursid, Hartono Yudo, Wilma Amiruddin, Sarjito Jokosisworo

Chapter 9

Optimalisasi Rute Pelayaran | 171

Muhammad Al Hazman

vi

Chapter 10

Konsep Daur Ulang Kapal Ramah Lingkungan | 185

Dian Prasetyawati

Chapter 11

Waste Heat Recovery System | 199

Sunarsih

Tentang Penulis | 233



DAFTAR TABEL

Chapter 1

Tabel 1. Batasan pada Lambung kapal | 8

Chapter 2

Tabel 1. Potensi reduksi CO₂ terhadap bahan bakar alternative
| 30

Chapter 3

Tabel 1. Sifat umum material MCP | 46

Tabel 2. Perbandingan dari 2 blade (blade berongga dan blade
tanpa rongga) | 47

Tabel 3. Parameter RSN | 50

Tabel 4. Asumsi orientasi gaya manuver | 54

Tabel 5. Asumsi gerakan AUV | 54

Tabel 6. Validasi parameter studi kasus | 55

Tabel 7. Parameter kapal | 61

Tabel 8. Hambatan model dan fullscale | 62

Chapter 4

Tabel 1. Kode standard las busur listrik | 70

Chapter 5

Tabel 1. Permintaan Pemilik Kapal | 91

Tabel 2. Optimasi Ukuran Kapal Trimaran | 92

Tabel 3. Total Kebutuhan Listrik tiap kondisi operasi | 94

Tabel 4. Pemilihan Kapasitas Generator | 95

Tabel 5. Pemilihan Sistem Pembangkit Hibrida | 98

Tabel 6. Spesifikasi Baterai | 99

Tabel 7. Data SFOC dengan persen beban dari Wartsila
12V34DF | 105

Tabel 8. Parameter PSO | 107

Chapter 8

Tabel 1. Rangkuman badan klasifikasi internasional yang mengatur regulasi sandwich untuk aplikasi struktur laut | 152

Tabel 2. Kriteria standar sandwich material | 158

Chapter 10

Tabel 1. Daftar limbah berbahaya yang ditimbulkan akibat penutuhan kapal | 193

Chapter 11

Tabel 1. Fraksi masukan panas ke aliran limbah panas mesin diesel | 203

Tabel 2. Tingkat pemulihan daya berbagai konfigurasi WHRS pembangkit tenaga | 220

DAFTAR GAMBAR

Chapter 1

- Gambar 1. Tipe modifikasi Lambung | 7
- Gambar 2. Hasil prediksi hambatan kapal pada sarat berbeda
| 8
- Gambar 3. Proses sirkulasi ballast free pada kapal bulk carrier
| 10
- Gambar 4. Penggunaan kombinasi bahan bakar | 11
- Gambar 5. Bentuk buritan dan penggunaan propeller daun 4
| 12
- Gambar 6. Efisiensi Propeller dengan konsep ESD | 13
- Gambar 7. Proses coating pada lambung | 13
- Gambar 8. Kondisi permukaan cat lambung | 15
- Gambar 9. Konfigurasi Material Sandwich | 16
- Gambar 10. Penerapan proyeksi ECA di dunia | 21

Chapter 2

- Gambar 1. Roadmap efisiensi energi IMO 2013 – 2050 | 28

Chapter 3

- Gambar 1. Skema MCP (a) Propeller konvensional (b) Penyederhanaan MCP (c) Rongga-rongga MCP (d) desain akhir | 46
- Gambar 2. Kurva analisa metode kedua (a) Kurva $K_T - \theta$ (b) Kurva $10K_Q - \theta$ (c) Kurva $\eta - \theta$ (d) Kurva $T_f - \theta$
| 48

- Gambar 3. Kontur deformasi sudut rotasi $-5^\circ - +5^\circ$ (a)
Distribusi tegangan sudut rotasi $-5^\circ - +5^\circ$ | 49
- Gambar 4. Propulsor RSN tampilan unit yang dirancang (a)
Uji kavitasi model propulsor RSN (b) | 50
- Gambar 5. Tekanan pada blade rotor sebagai fraksi dari
depresurisasi maksimum | 52
- Gambar 6. Kurva kinerja propeller (perhitungan verifikasi vs
CFD) data perhitungan (biru) vs hasil pengujian
model (merah) (b) | 52
- Gambar 7. Evolusi *pitch* posisi azimuth: (a) tidak ada *pitch*, (b)
hanya *collective*, (c) hanya *cyclic* (d) *collective* dan
cyclic | 54
- Gambar 8. Hasil studi validasi (a) gaya manuver (newton) (b)
orientasi gaya manuver | 55
- Gambar 9. Besaran Gaya Manuver (a) Orientasi gaya
maneuver (b) | 56
- Gambar 10. Gaya dorong | 57
- Gambar 11. (a) Desain kemudi tampak samping (b) Model uji
gate rudder (tampak belakang) | 57
- Gambar 12 Daya dorong kemudi non-dimensional span-
wise (T_{gr}/T_{gr_max}) (a) penghematan daya dengan
Gate Rudder (b) | 58
- Gambar 13 Flap Rudder Kapal A (kiri) dan gate rudder Kapal
B (kanan) (a) Hasil test spiral | 59
- Gambar 14 Hasil uji kecepatan Kapal A (Flap Rudder) dan
Kapal B (gate rudder) | 60
- Gambar 15 Tes Lingkaran Skala Penuh untuk Kapal A dan B
(Flap Rudder/gate rudder) | 60
- Gambar 16 Distribusi beban pada permukaan | 61
- Gambar 17 Hambatan kemudi pada model dan fullscale | 61
- Gambar 18 Modifikasi prosedur powering untuk kapal dengan
Sistem Propulsi Gate Rudder | 62
- Gambar 19 Pengaruh koreksi drag/lift pada prediksi kurva daya
dan hasil sea trial | 63

Chapter 4

- Gambar 1. Peralatan las SMAW | 71
- Gambar 2. Peralatan las GTAW | 72
- Gambar 3. Peralatan las GMAW | 74
- Gambar 4a. Flux Cored Wire degan gas pelindung | 75
- Gambar 4b. Flux Cored Wire tanpa gas pelindung (Seld Shielded) | 75
- Gambar 5. Diagram SAW | 76
- Gambar 6a. Friction Strir Welding | 77
- Gambar 6b. Tool Friction Strir Welding | 78
- Gambar 7. Pembangunan Lambung Kapal Sistem Blok | 79
- Gambar 7. Pengelasan SAW pada pelat geladak kapal | 80

Chapter 5

- Gambar 1. Kelemahan Sistem Tenaga Listrik Hibrida | 85
- Gambar 2. Jaringan Listrik Hibrida dengan Konsep FACTS | 86
- Gambar 3. Jaringan Listrik Hibrida dengan Konsep Distribusi DC | 8
- Gambar 4. Kapal trimaran pemanding (Condor Liberation) | 90
- Gambar 5. 3D View Kapal Penumpang Trimaran | 93
- Gambar 6. Alur optimasi penjadwalan generator menggunakan metode PSO | 103
- Gambar 7. Grafik fungsi SFOC dengan daya mesin (kW) pada mode operasi kecepatan konstan 750 rpm dan variable | 105
- Gambar 8. Grafik fungsi SFOC berdasarkan kecepatan putar *engine* (RPM) pada mode operasi | 106
- Gambar 9. Grafik fungsi kecepatan putar *engine* (RPM) berdasarkan beban *engine* (kW) operasi kecepatan | 107

- Gambar 10. Hasil optimasi PSO untuk mode berlayar dengan menggunakan 4 generator dengan baterai | 108
- Gambar 11. Hasil optimasi PSO untuk mode manuver dengan menggunakan 5 generator tanpa baterai | 109
- Gambar 12. Hasil optimasi PSO untuk mode memasuki pelabuhan dengan menggunakan 3 generator tanpa baterai | 110

Chapter 6

- Gambar 1. Konsep kapal ramah lingkungan dengan menggunakan DFE | 117
- Gambar 2. Pengaturan komponen ruang bakar DFE menyesuaikan kombinasi bahan bakar | 120
- Gambar 3. Proses pembakaran DFE di ruang bakar berdasarkan HRR dibandingkan dengan sudut putaran (*crank angle*) | 123
- Gambar 4. Sistem permesinan sederhana kapal dengan DFE | 125

xii

Chapter 7

- Gambar 1. Rangkaian dan Komponen sistem EGRICS pada Mesin Diesel Tipe *Cold EGR* | 138
- Gambar 2. Pengaruh mapping durasi injeksi pada ECU terhadap emisi asap (soot) pada putaran mesin berbeda pada EGRICS | 139

Chapter 8

- Gambar 1. *Sandwich effect* | 151
- Gambar 2. Perbandingan konstruksi antara model konvensional dan konstruksi *sandwich* | 151
- Gambar 3. Ruang witch board dibuat dari steel sandwich panel | 156
- Gambar 4. Deckhouse kapal Zumwalt class destroyer selama proses konstruksi | 157
- Gambar 5. AC75 Luna Rossa terbuat dari CFRP-aluminum honeycomb sandwich panels | 157
- Gambar 6. Data densitas material inti pada tiap variasi | 160

- Gambar 7. Nilai kekuatan tarik pada tiap tiap variasi | 161
- Gambar 8. Nilai kekerasan pada tiap tiap variasi material inti
| 162
- Gambar 9. Prospek penerapan sandwich ditinjau dari
pengurangan tegangan, deformasi, dan berat | 164
- Gambar 10. Prospek penerapan sandwich ditinjau dari
pengurangan tegangan, deformasi, dan berat | 165

Chapter 9

- Gambar 1. Panjang Lintasan | 174
- Gambar 2. Tahapan Metode Simple Hill Climbing | 175
- Gambar 3. Konsep *Hub and Spoke Network* | 177

Chapter 10

- Gambar 1. Siklus hidup sebuah kapal | 189
- Gambar 2. Pekerjaan pembongkaran kapal di Kalibaru, Jakarta
Utara | 190

Chapter 11

- Gambar 1. Diagram panas mesin 12S90ME-C9.2 dengan dan
tanpa WHRS | 205
- Gambar 2. Anatomi rumus EEDI kapal | 205
- Gambar 3. Susunan kamar mesin dan engine casing kapal
kontainer dengan WHRS | 207
- Gambar 4. Konfigurasi dasar WHRS dengan RC | 208
- Gambar 5. Konfigurasi dasar WHRS dengan sistem KC | 209
- Gambar 6. ORC WHRS configuration | 212
- Gambar 7. Konfigurasi tipikal sistem minyak termal untuk
pemanasan kargo tanker | 213
- Gambar 8. Sistem uap WHR sederhana dan sistem gas buang
dengan boiler WHRS | 214
- Gambar 9. Sistem distilasi termal MSF dan MED untuk
desalinasi dengan WHRS | 215
- Gambar 10. WHRS bertingkat untuk mesin diesel besar | 216

- Gambar 11. Sistem pemanasan biofuel dengan panas gas buang
| 217
- Gambar 12. Komponen utama WHRS | 218
- Gambar 13. Konfigurasi dasar WHRS pembangkit tenaga | 219
- Gambar 14. Diagram proses konfigurasi WHRS PTG | 221
- Gambar 15. Generator turbin uap WHRS STG | 222
- Gambar 16. Diagram proses sistem uap gas buang tekanan
tunggal dan ganda | 222
- Gambar 17. Diagram proses konfigurasi WHRS ST-PT | 224
- Gambar 18. Diagram blok WHRS TEG | 225



PROLOG EDITOR

Melakukan revolusi terhadap konsep fundamental adalah lompatan yang memerlukan pemikiran dan tindakan yang lebih. Teknologi bidang transportasi perkapalan mengalami adaptasi yang hebat terkait dengan upaya mitigasi bencana pemanasan global dan perubahan iklim. Pertimbangan ekonomi dan isu lingkungan menjadi dasar perubahan konsep teknologi konvensional menjadi teknologi hijau yang menjadikan banyak perubahan terjadi pada segala aspek yang menyangkut teknik manajemen produksi kapal, operasional hingga penanganan pasca kapal tidak lagi layak beroperasi.

Dalam setiap perubahan tentu menyisakan tahapan-tahapan yang terus membutuhkan waktu, tenaga dan pemikiran untuk menyempurnakannya. Tingkat emisi global yang terus menghantui, ketersediaan sumber energi fosil yang semakin berkurang, tingkat kebutuhan akan transportasi dan pengiriman melalui laut yang terus meningkat, dan kebutuhan adaptasi terhadap regulasi yang mengatur ketat demi kelangsungan hidup mengharuskan kita semua berupaya mewujudkan suatu wahana yang solutif dengan segala perubahan yang membutuhkan penyempurnaan dan penyesuaian.

Tulisan-tulisan yang ada dalam buku ini dihimpun dari berbagai pemikiran para akademisi yang bersepakat dalam pemahaman betapa pentingnya aplikasi teknologi hijau dalam bidang perkapalan. Teknologi hijau perkapalan menjadi salah satu solusi yang harus terus dikembangkan demi kelangsungan hidup yang lebih baik di masa depan.

Ucapan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi dan LPDP atas hibah pendanaan melalui skema riset keilmuan Rispro Mandatory 2021 sehingga dapat terselesaikannya luaran buku tentang teknologi hijau bidang perkapalan ini.

PENGANTAR TENTANG ECO FRIENDLY VESSEL

Rizky Chandra Ariesta^{1,3*}, Mohammad Sholikhlan Arif¹,
I Ketut Aria Pria Utama, Hendriyadi²

¹⁾ Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

²⁾ PT. Samudera Indonesia Ship Management

³⁾ Prodi Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas
Muhammadiyah Surabaya, Indonesia

Abstrak

Dekarbonisasi merupakan isu yang diperhatikan oleh pemerintah dunia akhir-akhir ini, dengan sektor pelayaran memiliki kontribusi sebesar 3% dalam menyumbang emisi gas. International Maritime Organization (IMO) menargetkan dekarbonisasi hingga tahun 2050, tentunya dengan mengajak industri pelayaran dalam upaya pengurangan emisi gas buang. Tujuan artikel ini adalah untuk menunjukkan gambaran terkini dan memberikan argumentasi yang tepat mengenai teknologi desain kapal ramah lingkungan dan penerapan konsep dekarbonisasi dalam industri pelayaran, khususnya pada operasional kapal. Pembahasan diskusi memiliki beberapa ruang lingkup diantaranya aturan dicetuskannya dekarbonisasi, konsep desain kapal ramah lingkungan, tinjauan umum dan upaya yang dapat dilakukan untuk meningkatkan performa kapal, dan

usaha optimalisasi manajemen dalam bidang pelayaran untuk efisiensi bahan bakar. Hasil memberikan beberapa saran dan rekomendasi teknologi desain yang dapat diberikan dan upaya optimalisasi yang dapat dilakukan sehingga potensi pengurangan emisi dapat dilakukan. Penggunaan konsep *eco friendly* di industri pelayaran sangat diperlukan karena membantu peningkatan aspek efisiensi. Aplikasi konsep ini masih sedikit diterapkan karena keterbatasan teknologi dan mengandalkan metode lama, sehingga penggunaannya saat ini belum mencapai hasil yang maksimal karena terbatasnya pengetahuan dalam desain dan penerapannya. Oleh karena itu, pembaharuan pedoman dan peraturan sangat penting untuk mendorong peningkatan efisiensi dan performa kapal yang akan mendukung konsep dekarbonisasi untuk industri pelayaran yang berkelanjutan.

Kata kunci: Dekarbonisasi, desain kapal, *eco friendly*, efisiensi, performa.

Pendahuluan

Pelayaran merupakan sektor penting yang digunakan untuk perdagangan, lebih dari 80-90% alur barang terjadi melalui pelayaran, maka dari itu menjadi salah satu faktor utama yang mempengaruhi ekonomi. Karena kontribusinya yang besar, pelayaran menyumbang sebesar 3% *green house gas* (GHG) emisi, oleh karena itu regulasi pembatasan kadar NO_x , SO_x , dan CO_2 lebih ditingkatkan yang bertujuan untuk mencegah pencemaran dari industri secara besar-besaran. Upaya pengurangan emisi dilakukan oleh Kapal dengan memanfaatkan *Liquefied Natural Gas* (LNG) sebagai bahan bakar sebagai peningkatan performa kapal, disisi lain juga menurunkan resiko produksi gas *methane*. Dekarbonasi pada industri sangat penting untuk diterapkan, beberapa hal yang dapat diupayakan antara lain, penggunaan bahan bakar alteratif ramah

lingkungan, meningkatkan efisiensi dan performa kapal dengan bentuk desain lambung, melakukan perawatan rutin pada lambung kapal dengan membersihkan lapisan *biofouling* di bagian lambung kapal, dan memilih jenis desain propeller yang sesuai untuk mendapatkan performa yang optimum dari kapal. Namun, realitanya masalah dekarbonasi masih sangat banyak dan harus diselesaikan.

Di sisi lain, kebutuhan akan industri pelayaran semakin meningkat di tiga dekade terakhir. Survey dilakukan oleh Shell dan Diloitte dengan melihat nilai pasar dan perkembangan trend kebutuhan. Dihasilkan lebih dari 90% perusahaan pelayaran menyatakan bahwa masalah dekarbonasi pada industri harus diselesaikan. Dalam hal ini, *International Maritime Organization* (IMO) berambisi untuk mengurangi emisi dari industri pelayaran kurang lebih 50% pada tahun 2050 yang dibandingkan dari hasil pengukuran awal di tahun 2008. Pengukuran penurunan emisi pada sektor maritim akan dibagi menjadi dua aspek: (i) aspek teknik yang meliputi ukuran kapal, kunjungan kapal ke pelabuhan, dan (ii) aspek operasional kapal yang meliputi kecepatan, pembuangan panas dan sistem ballast manajemen. Selain itu, usaha yang diberikan oleh *International Transport Forum* (ITF) adalah dengan mengoptimalkan rute dengan mempertimbangkan penggunaan bahan bakar alternatif yang berkelanjutan, dan memanfaatkan angin sebagai salah satu sumber daya untuk kelistrikan hal ini termasuk aspek teknis yang diberikan.

Berdasarkan besarnya volume transportasi untuk pengiriman barang di perairan dunia dan Indonesia khususnya, maka ruang lingkup dari tulisan ini bertujuan untuk memberikan studi awal tentang hubungan industri pelayaran dengan potensi isu dekarbonisasi serta upaya pengurangan karbon yang akan dibagi menjadi beberapa bagian. Bagian awal membahas mengenai konsep desain kapal yang ramah lingkungan untuk meningkatkan efisiensi

dan performa kapal, bagian lanjutan akan membahas potensi upaya yang dapat dilakukan untuk mengatur emisi pada sektor pelayaran, upaya yang sudah dilakukan di pelayaran nasional, dan penerapan optimasi rute untuk peningkatan efisiensi bahan bakar. Akhirnya, akan diperoleh ringkasan usaha pengurangan karbonisasi di Indonesia dan rekomendasi untuk peluang yang dapat dilakukan dimasa mendatang.

Konsep Desain Kapal Ramah Lingkungan

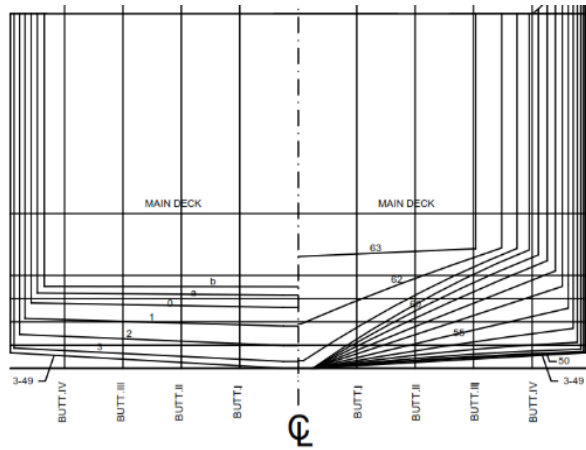
Dalam industri perkapalan tidak hanya mempertimbangkan keuntungan pada sektor usaha tetapi juga wajib berkontribusi tentang lingkungan yang berkelanjutan. Sehingga pada proses desain dan manufaktur di industri maritim memanfaatkan teknologi terbaru untuk memastikan bahwa kapal akan beroperasi dengan performa yang baik dan memiliki emisi yang rendah. Saat ini, kapal dalam mendesain kapal wajib memenuhi standard lingkungan dan regulasi yang baru. Banyak teknologi mengembangkan dan menerapkan konsep ramah lingkungan untuk membangun kapal “green concept” dengan tujuan menghasilkan polusi karbon yang rendah. Konsep desain kapal ramah lingkungan di masa mendatang dirangkum menjadi beberapa poin sebagai berikut:

Geometry System

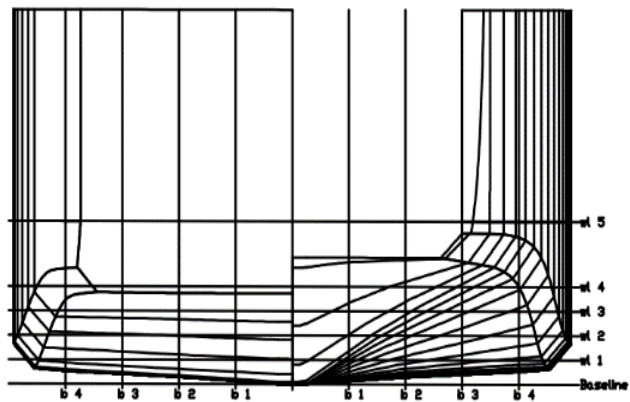
Bentuk geometri lambung secara tidak langsung mempengaruhi performa dari kapal, hal ini dapat dipengaruhi oleh koefisien-koefisien dari karakteristik lambung. Ariesta et al, (2021) melakukan pengembangan penelitian karakteristik performa lambung dengan perbandingan koefisien blok (CB) pada kapal penumpang, Investigasi ini berfokus pada konsep desain utama kapal, dengan mempertimbangkan aspek kelayakan desain dan ekonomis pada kapal. Analisis dilakukan dengan parameter mesin induk yang sama. Data kapal dimodifikasi pada bagian Bilga dengan analisis pada

variasi sarat kapal. Desain kriteria lambung dapat dilihat pada Gambar 1.

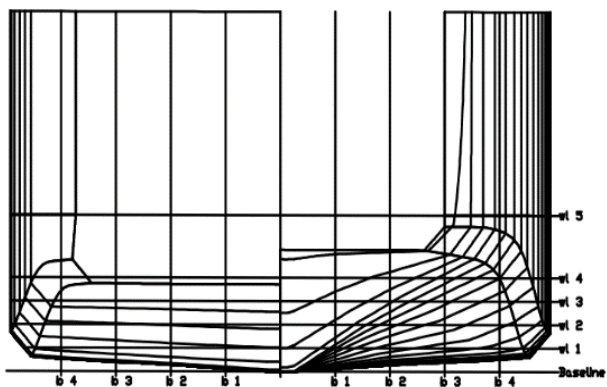
(a) Model 1



(b) Model 2



(c) Model 3



Gambar 1. Tipe modifikasi Lambung

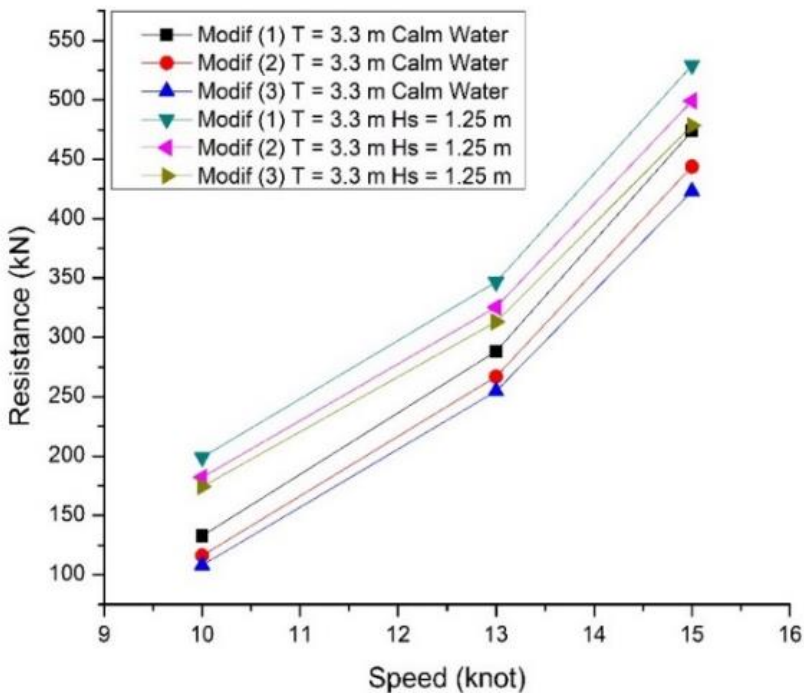
Analisis dilakukan dengan memvariasikan radius dari bilga dengan mengunci faktor CB dengan toleransi yang kecil. Konsep ini dilakukan untuk mengurangi luasan tercelup dengan tidak merubah *payload* secara signifikan. Sehingga didapatkan hasil modifikasi kapal dengan batasan parameter dapat dilihat pada Tabel 1.

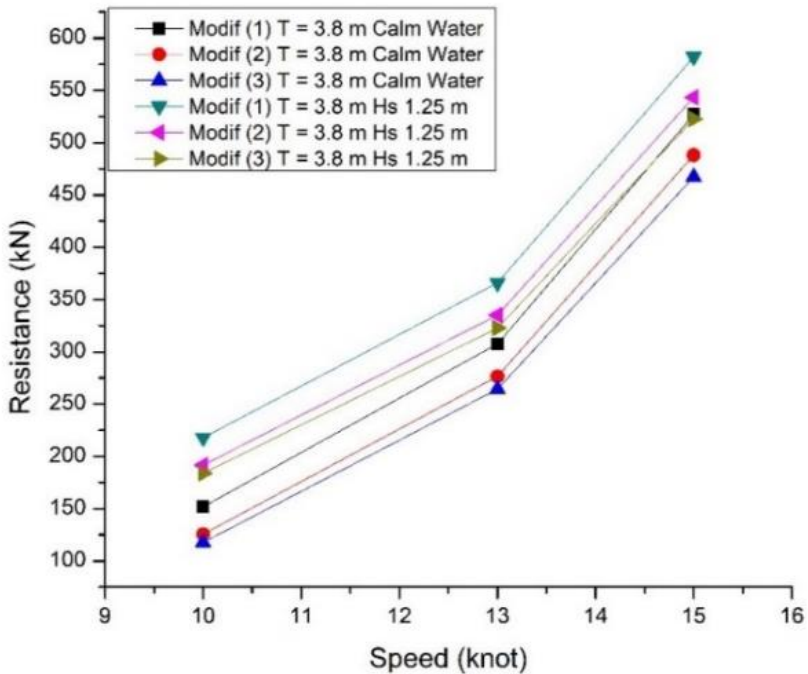
Tabel 1. Batasan pada Lambung kapal

Hull	CB	Displacement at draft 3.3 m	Displacement at draft 3.8 m
Existing (1)	0.802	5413	6384
Modification (2)	0.794	5345	6324
Modification (3)	0.790	5320	6298

Studi komprasi ini dimaksudkan untuk melihat nilai power yang dapat dicapai. Dapat dilihat pada Gambar 2. Perbedaan power ketika lambung belum dimodifikasi dan setelah dimodifikasi.

8



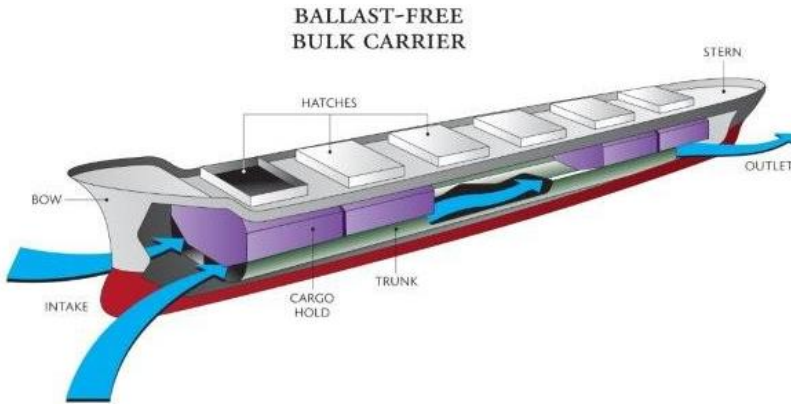


Gambar 2. Hasil prediksi hambatan kapal pada sarat berbeda

Berdasarkan hasil analisis diperoleh hasil penurunan hambatan pada modifikasi lambung ke 3 sebesar 10 % sehingga kecepatan dan performa kapal dapat meningkat. Dengan pendekatan NORDFOSK kriteria *seakeeping* dikaji dan dihasilkan pada kondisi lambung modifikasi ketiga secara keseluruhan masih memenuhi kriteria tersebut, sehingga dapat diketahui bahwa bentuk lambung memiliki kontribusi untuk meningkatkan efisiensi.

No Ballast System

Konferensi ballast water yang diselenggarakan IMO berfokus pada pengurangan invansi dari endapan dan mikroorganisme antar wilayah, sehingga untuk mencegah hal tersebut diberlakukan kapal tanpa ballast yang secara signifikan mampu mengurangi masalah tersebut.



Gambar 3. Proses sirkulasi ballast free pada kapal bulk carrier

Sumber: marineinsight

Fitur yang diberikan pada kapal tanpa balas adalah *ballast trunk* atau tangkin ballast yang secara memanjang kapal diganti dengan sirkulasi ballast dibawah ruang muat yang terhubung pada pompa yang secara otomatis mengatur sarat kapal pada area dekat bow dan stern. Hal ini dilakukan untuk memastikan kondisi bouyancy kapal seimbang.

Alternative Fuel for Engine

Penggunaan LNG di industri pelayaran akan membantu mengurangi polusi gas buang yang dihasilkan oleh kapal, dengan mengkombinasikan bahan bakar alternatif (LNG) dan solar akan meningkatkan efisiensi pada performa engine sehingga bahan bakar dapat dihemat. Teknologi terbaru yang dikembangkan adalah penggunaan *Tri-Fuel Diesel Electric Propulsion (TFDE) Over Diesel Engine Propulsion*.



Gambar 4. Penggunaan kombinasi bahan bakar

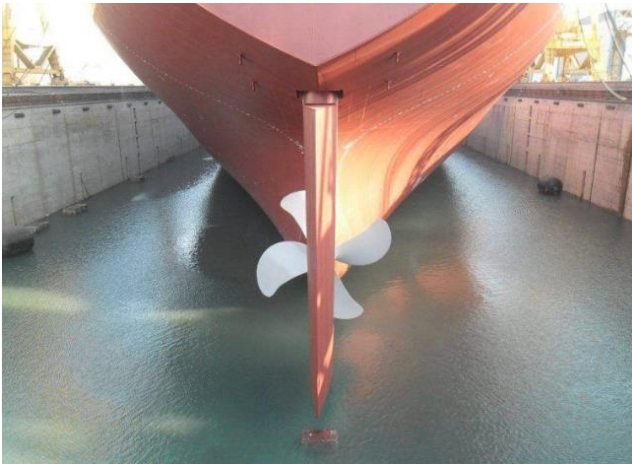
Sumber: (marineinsight, 2021)

Penggunaan teknologi ini hampir 100 % tidak memerlukan perawatan apabila dibandingkan dengan penggunaan mesin utama berjenis diesel. Dengan alih teknologi ruangan tempat mesin utama hampir kosong dan lebih mudah dalam mengatur penempatan propulsi mesin elektrik yang tidak menghabiskan ruang. Selain itu, tidak memerlukan pipa udara untuk melakukan starting untuk kompresor pada mesin. Sehingga tidak ada pemurnian HFO atau MDO yang dijalankan seperti pada mesin diesel. Endapan yang dihasilkan dari mesin sangat minim bahkan bisa diabaikan. Dengan kemudahan memonitor kinerja propulsi ini, hampir tidak ada getaran dan noise yang dihasilkan jika dibandingkan dengan mesin diesel. Namun, diperlukan investasi yang cukup besar diawal untuk mendapatkan keuntungan ringannya perawatan dibandingkan mesin diesel.

Disamping itu, penggunaan teknologi TFDE juga dapat diaplikasikan pada mesin bantu, peningkatan teknologi ini akan memberikan performa tambahan dengan harapan nilai angka emisi dapat dikurangi secara drastis.

Advanced Rudder, Speed Nozzle and Propeller System

Desain propeller yang didukung dengan desain rudder yang tepat mampu mengurangi konsumsi bahan bakar sebesar 4%. Desain yang baik tidak hanya mampu melakukan penghematan bahan bakar, tetapi dapat meningkatkan performa pada kapal. Alternatif yang dapat dilakukan dengan menambahkan kort nozzle pada area sekeliling propeller untuk mendapatkan peningkatan efisiensi sebesar $\pm 5\%$. Desain yang baik dipengaruhi dari diameter propeller yang dari studi telah dipertimbangkan minimum besar diameter untuk mendapatkan nilai kecepatan yang diinginkan. Ketidakesesuaian desain propeller dengan lambung kapal dapat menurunkan performa kapal terlihat pada Gambar 5.

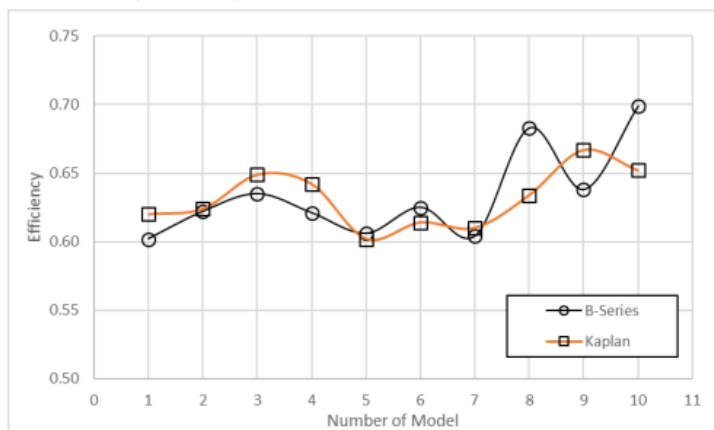


Gambar 5. Bentuk buritan dan penggunaan propeller daun 4

Sumber: (marineinsight, 2021)

Untuk meningkatkan energi saving devices Adietya (2022) mengemukakan penerapan Propeller Boss Cap Fins (PBCF) dan Ducted Propeller mampu meningkatkan gaya dorong hingga 20%. Telah dilakukan pemodelan pada bagian propeller untuk mendapatkan efisiensi dan peningkatan *Energy Saving Device* (ESD). Pada analisisnya Adietya (2022) meneliti peningkatan efisiensi pada

propeller B Series dan Kaplan Series dengan hasil efisiensi yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Efisiensi Propeller dengan konsep ESD

Sumber: (Adietya, 2022)

Hull Paint and Lightweight Structure

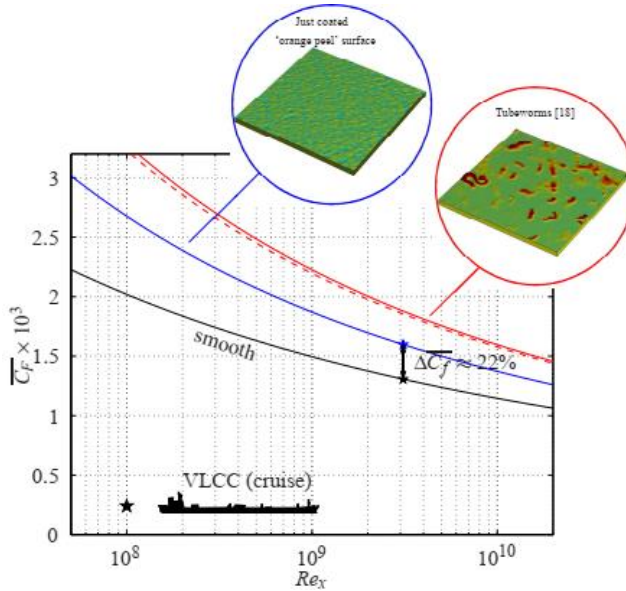
Kondisi lambung pada kapal niaga merupakan faktor utama yang mengakibatkan penurunan efisiensi bahan bakar. Pertumbuhan fouling merupakan penyebab utama penurunan kecepatan dan mengakibatkan peningkatan bahan bakar sehingga diperlukan penggunaan cat yang tepat untuk mencegah pertumbuhan biofouling. Pertumbuhan biofouling mengakibatkan peningkatan hambatan gesek pada lambung pada Gambar 7.



Gambar 7. Proses coating pada lambung

Marine Growth Prevention System (MGPS) pada lambung kapal harus diperkuat untuk memonitor dan mencegah pertumbuhan fouling pada lambung kapal. Penggunaan sistem ini akan meningkatkan efisiensi terutama dalam menjaga pipa agar tidak berkarat, membantu melancarkan sirkulasi air laut pada mesin, dan meningkatkan energy saving pada kapal. Untuk memastikan MGPS berfungsi dengan baik diperlukan pemeriksaan berkala untuk mengetahui bahwa alat berfungsi secara baik dan apabila anoda pada MGPS mengalami penurunan performa akan dilakukan penggantian setiap kapal naik ke atas dock.

Disamping itu, Hutchins et al (2016) melakukan pengukuran pada *boundary layers* yang diberkembang dari kekasaran permukaan yang berlebih telah dianalisis secara *full-scale* di laboratorium dan dilakukan analisis numerik pada investigasi *in-situ* pada pengukuran kapal yang sedang beroperasi. Pengukuran dan eksperimen ini bertujuan untuk dapat memperkirakan kerugian yang lingkungan dan penambahan hambatan yang dapat ditimbulkan akibat kekasaran permukaan lambung kapal ketika kapal beroperasi. Kekasaran ini muncul akibat pertumbuhan *marine organisms* atau disebut *biofouling* pada permukaan cat lambung. Sehingga pengamatan *in-situ* yang dilakukan sangat tepat untuk mengukur *boundary layer* akibat kekasaran ketika kapal beroperasi. Sehingga diperoleh gambaran kekasaran yang ditunjukkan pada Gambar 8.



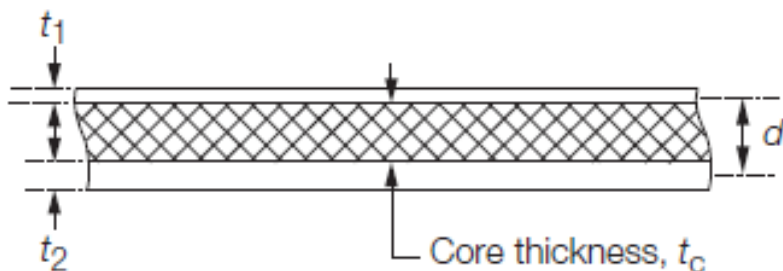
Gambar 8. Kondisi permukaan cat lambung

Selain penggunaan cat yang tepat, desain dan berat konstruksi juga mempengaruhi kecepatan kapal, semakin berat kapal maka semakin berat beban yang ditahan oleh mesin utama. Ariesta et al (2021) melakukan penerapan struktur ringan menjadi salah satu alternatif yang dikaji untuk menjawab permasalahan tersebut. Llyod Register (2021) merumuskan konversi tebal untuk penggunaan struktur ringan berjenis sandiwch dengan persamaan berikut:

$$R = 0,01A_R 0,1 \left[\frac{b^2}{d(t_1+t_2)} + 11,7 \left(\frac{bt_c}{d^2} \right)^{1,3} \right] kP_{eq}; R \leq 1 \quad (1)$$

dimana,

- AR : rasio panjang terhadap lebar
- a : panjang pada tepi pelat terpanjang (mm)
- b : lebar pelat pada tepi terpendek (mm)
- d : parameter tebal (mm)
- l : panjang pelat (mm)
- Peq(R) : 0.0017 (Zrule/l2)
- Zrule : ekuivalensi modulus penampang (MPa)



Gambar 9. Konfigurasi Material Sandwich (LR, 2021)

R merupakan indeks kekuatan yang dihitung untuk memperoleh ketebalan pelat luar dan lapisan inti material untuk menggantikan pelat eksisting.

Aturan Mengatur Emisi Pada Sektor Pelayaran

Saat ini, International Maritime Organization (IMO) mempunyai misi “Mempromosikan Pelayaran yang aman, ramah lingkungan, efisien dan berkelanjutan melalui kerjasama”. Pada April 2018, IMO mengenakan sebuah strategi yang bertujuan untuk mengurangi emisi GHG dari pelayaran sekurang-kurangnya 50% pada tahun 2050 dibandingkan dengan 2008. Adapun target yang ingin dicapai oleh IMO adalah sebagai berikut:

- Mengurangi Intensitas Karbon dibandingkan dengan tahun 2008 turun sebesar 40% pada tahun 2030.
- Mengurangi Intensitas Karbon dibandingkan dengan tahun 2008 turun sebesar 70% pada tahun 2050.
- Mengurangi Emisi GHG dari pelayaran internasional, dibandingkan dengan tahun 2008 turun sebesar 50% pada tahun 2050.
- Untuk mencapai Zero Emisi GHG secepatnya pada abad ini.

Untuk mencapai target tersebut, IMO memiliki 3 term pengukuran yaitu, short term, mid term dan long term. Adapun term tersebut adalah sebagai berikut:

1. Pengukuran Jangka Pendek (2018 – 2023)
 - a. Meningkatkan EEDI dan SEEMP
 - b. Mengembangkan langkah-langkah efisiensi energy teknis dan operasional untuk kapal baru dan kapal existing dengan pendekatan tiga langkah
 - c. Program Peningkatan Armada yang Ada
 - d. Pengoptimalan dan pengurangan kecepatan
 - e. Langkah-langkah untuk metana dan voes
 - f. Rencana Aksi Nasional, Kerjasama teknis dan pengembangan kapasitas, pengembangan Pelabuhan (AMP dll), Kegiatan R&D, Insentif untuk penggerak pertama, Pedoman lifecycle bahan bakar, studi GHG
2. Pengukuran Jangka menengah (2023 – 2030)
 - a. Program untuk bahan bakar alternatif
 - b. Langkah-langkah efisiensi energi operasional untuk baik kapal baru maupun yang sudah ada
 - c. Mekanisme Pengurangan Emisi (MBM)
 - d. Kerjasama teknis dan pengembangan kapasitas, Mekanisme umpan balik
3. Pengukuran jangka Panjang (setelah tahun 2030)
 - a. Bahan bakar tanpa karbon atau bebas fosil
 - b. Mekanisme Pengurangan Emisi

Dalam pengukuran jangka pendek IMO telah membentuk the Energy Efficiency Existing

Ship Index (EEXI) untuk target 2030 dan and the Carbon Intensity Index (CII). Langkah-langkah efisiensi energy dapat dibedakan sebagai berikut:

1. Secara teknis: Untuk kapal eksisting EEXI, mengambil EEDI dan mengaplikasikan ke kapal eksisting
2. Secara operasional: Penambahan Indeks Intensitas Karbon wajib dengan skema peringkat dari A ke E

Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)

Adalah rencana pengelolaan yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar melalui peningkatan operasional, dan dapat diterapkan pada kapal baru dan kapal yang ada. SEEMP adalah ukuran operasional. Sebagai mekanisme manajemen untuk perusahaan dan kapal, SEEMP bercita-cita untuk efisiensi energi yang lebih baik dalam operasi kapal dan, pada akhirnya, pengurangan emisi kapal. SEEMP khusus untuk kapal, tapi tentu saja mungkin terkait dengan kebijakan manajemen energi perusahaan. Dirancang dengan baik SEEMP harus dilihat bermanfaat bagi lingkungan -karena berkontribusi pengurangan emisi, serta perusahaan- dengan membantu mengurangi konsumsi bahan bakar. SEEMP berlaku untuk semua kapal -baik yang baru maupun yang lama- yang termasuk dalam lingkup Peraturan 19 dari Annex VI (MARPOL Annex VI, Reg 22.1). Berdasarkan Resolusi MEPC.278 (70), peraturan baru tentang pengumpulan data sistem untuk konsumsi bahan bakar minyak diperkenalkan ke MARPOL Annex VI, dan diharapkan mulai berlaku pada 1 Maret 2018 (IMO 2016a). Di bawah ketentuan baru, kapal-kapal dengan tonase kotor 5000 dan di atasnya diharuskan untuk memasukkan SEEMP deskripsi metodologi yang akan digunakan untuk mengumpulkan konsumsi data bahan bakar minyak, yang kemudian harus dilaporkan ke Administrasi kapal (MARPOL Lampiran VI, Regs 22.2 dan 22A).

Energy Efficiency Design Index (EEDI)

Tahun 2001, Energy Efficiency Design Index (EEDI) ditambahkan ke MARPOL [1]. EEDI adalah langkah teknis yang bertujuan untuk mempromosikan penggunaan desain kapal yang hemat energi dengan tujuan akhir untuk mengurangi emisi dari kapal. EEDI tidak membahas langkah-langkah operasional; hanya berfokus pada desain.

EEDI berlaku untuk: kapal baru; kapal baru yang telah mengalami konversi besar; dan kapal baru atau yang sudah ada yang telah mengalami konversi besar yang ekstensif dan dianggap sebagai kapal yang baru dibangun oleh flag state (MARPOL Annex VI, Regs 20 dan 21). Kapal-kapal eksisting yang belum mengalami konversi besar-besaran yang ekstensif dibiarkan berada di luar lingkup penerapan peraturan EEDI. Setiap kapal harus memiliki EEDI spesifiknya sendiri yang menunjukkan perkiraan kinerja kapal untuk tujuan efisiensi energi. Dua nilai EEDI disediakan untuk: (a) EEDI yang dicapai, yang didefinisikan sebagai nilai EEDI yang dicapai oleh sebuah kapal individu sesuai dengan Peraturan 20; dan (b) EEDI yang disyaratkan, yang didefinisikan sebagai nilai maksimum dari EEDI yang dicapai yang diperbolehkan menurut Peraturan 21 untuk jenis dan ukuran kapal tertentu (misalnya, kapal peti kemas atau kapal tanker) dan ukurannya. Dengan kata lain, EEDI yang dicapai harus sama atau di bawah EEDI yang dipersyaratkan.

Setelah mengetahui aturan mengenai pengurangan emisi di pelayaran maka saat ini terdapat beberapa pilot project yang sedang dilakukan untuk mendukung aturan tersebut diantaranya adalah:

1. Bahan bakar alternative untuk pelayaran
2. Energy saving Devices
3. Pertimbangan faktor cuaca ketika pelayaran untuk memperoleh rute yang terbaik.

Aplikasi Optimasi Rute Dalam Industri Pelayaran Terhadap Peningkatan Efisiensi Bahan Bakar

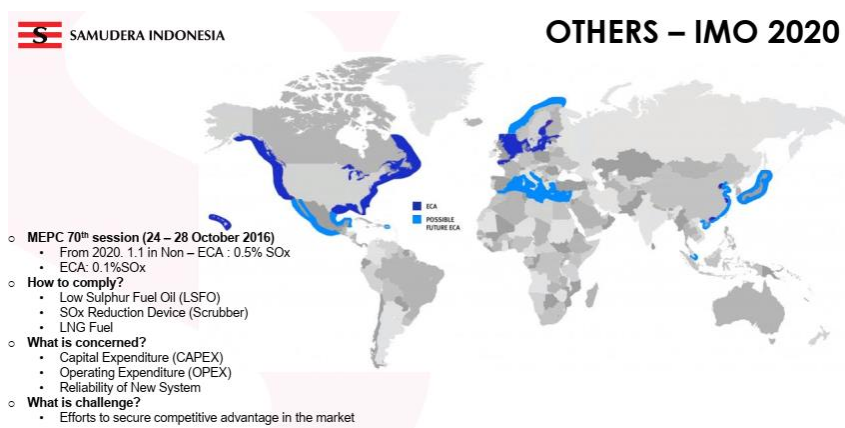
Dengan penggunaan 90% transportasi pelayaran sebagai pilihan untuk perdagangan karena memiliki kelebihan ekonomis dengan *low-cost* dan efisien untuk digunakan. Meskipun demikian, pelayaran pada dasarnya menjadi salah satu sumber polusi udara dan air. IMO mengatur pencegahan polusi pada kapal, selanjutnya konsep *green shipping* menjadi trend untuk mengurangi dan meminimalisir

kerusakan ekologi dan gangguan kesehatan yang ditimbulkan. Konsep ini sangat relevan untuk diterapkan sehingga dapat mengontrol emisi yang terjadi dan dapat terwujud pelayaran yang ramah lingkungan.

Kajian *green shipping* menjadi fokus di dunia, ditambah dengan beberapa kajian yang telah dilakukan sebelumnya, misalnya oleh Woo dan Moon ditahun 2014, evaluasi sistem dinamis pada model lingkungan dengan menerapkan kecepatan optimum yang digunakan terbukti mampu mengurangi biaya operasional dan emisi karbondioksida, sehingga hal tersebut membantu upaya IMO. Fridell (2010) melakukan analisis pada kuantitas dan partikel emisi selama kapal bermanuver, pengukuran dilakukan pada *exhaust* kapal tanker dan kapal ferry. Pengembangan perkiraan emisi yang dihasilkan dikaji oleh Chang, Song, dan Roh (2013) dengan karakteristik kapal dan data yang digunakan di pelabuhan mulai tahun 2012 untuk memperkirakan *greenhouse gas* (GHG) emisi. Pada perairan China untuk membantu mengukur dan mengatur polusi Tian et al (2014) melakukan pengukuran dan mengevaluasi GHG yang dihasilkan setelah penerapan *energy saving* untuk penurunan polusi. Research lain berfokus pada analisis hubungan antara perlindungan lingkungan dan performa ekonomi, sebagai contoh Hoffmann et al (2012) memperkirakan kemungkinan pendapatan daerah yang terbayarkan dari industri pelayaran jika diukur dari pengukuran penurunan emisi. Selanjutnya, Yang et al (2012), mengumpulkan data survey kontainer yang berlayar dari thailand dengan menganalisis *green shipping* berdasarkan *green performance*, *external green integration*, kompetisi aturan dan peningkatan penurunan emisi. Kemudian Lai et al (2013) melanjutkan investigasi bagaimana *green shipping* diterapkan melalui desain pelayaran dan penerapan aturan serta performa kapal. Luo (2018) dan Qiu (2018) mengevaluasi efisiensi cargo, dan alur

pelayaran yang mempertimbangkan kondisi cuaca dan peningkatan pelayanan pelayaran liner sehingga peningkatan profit dapat tercapai dan penurunan emisi karbon secara signifikan.

Di Indonesia perusahaan pelayaran menerapkan ship management untuk mengelola kapal antara pemilik dan operator, kapal dipastikan terdaftar, berlayar, dan memiliki aspek teknik yang baik, sehingga kapal selalu dalam kondisi prima untuk memperoleh performa yang baik dan emisi yang rendah. IMO memberikan beberapa aturan terkait *green shipping* yang harus diratifikasi oleh perusahaan pelayaran dalam negeri khususnya dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 10. Penerapan proyeksi ECA di dunia

Selain itu, semua kapal wajib mengatur mengenai ballast water management (BWM) convention untuk mencegah dan menghentikan penyebaran *invasive aquatic species*. Hal ini mulai dikaji tahun 2017 dengan menerbitkan manajemen plan, database dan sertifikat, berlanjut ke tahun 2019 dengan memperbarui sertifikat, dengan melakukan survey dengan harapan ditahun 2024 dapat tercapai semua kapal memenuhi standard BWMS sesuai kriteria IMO.

Kesimpulan

Penerapan green konsep pada desain kapal diharapkan mampu mengurangi emisi GHG, menjaga kondisi lingkungan, dan peningkatan profit bagi industri pelayaran. Pencegahan ini diterapkan dengan berlandaskan aturan yang berlaku seperti MARPOL dan IMO, yang selalu mengkaji dan memperbarui aturan untuk pelayaran yang sehat dan ramah lingkungan. Disamping itu, Indonesia sebagai negara kepulauan juga wajib berkontribusi dalam konsistensi penerapan *green shipping* untuk mendukung program penurunan emisi dan dekarbonisasi yang sedang berlangsung.

References

- Adietya, B A., Sutiyo, Aryawan, W D., Utama, I K A P. (2022). CFD Analysis into the Effect of using Propeller Boss Cap Fins (PBCF) on Open and Ducted Propellers, Case Study with Propeller B-Series and Kaplan-Series. *CFD Letters*. (In Press).
- Ariesta R.C., Aliffrananda, MHN., Riyadi, S., Utama, I K A P (2021). An Investigation into the Justification of the Service Speed of Ro-Ro Ferry with Block Coefficient 0.8 Based on the Resistance and Seakeeping Performance, ICSOT 2021. (In Press)
- Ariesta R.C., Zubaydi, A., Ismail, A., Al-Syachri, M.Z. (2021a). Identification of damage in a Ship Hull Sandwich Plate by Natural Frequency. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1034, 012012.
- Ariesta R.C., Zubaydi, A., Ismail, A., Tuswan, T. (2021b). Damaged Evaluation for Sandwich Material on Side Plate Hull using Experiment Modal Analysis. *Material Today: Proceedings*, 47(10), 2310-2314.
- Chang, Y. T., Song, Y., & Roh, Y. (2013). Assessing greenhouse gas emissions from port vessel operations at the Port of Incheon. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 25, 1-4.

- Gong, X., Wu, X., & Luo, M. (2018). Company performance and environmental efficiency: A case study for shipping enterprises. *Transport Policy*
- Hoffmann, P. N., Eide, M. S., & Endresen, Ø. (2012). Effect of proposed CO₂ emission reductions scenarios on capital expenditure. *Maritime Policy & Management*, 39(4), 443-460.
- Lai, K., Wong, C. W. Y., Lun, Y. H. V., Cheng, T.C.E. (2013). Shipping design for compliance and the performance contingencies for shipping firms. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 55, 74-83.
- LR, (2021). Rules for the Application of Sandwich Panel Construction to Ship Structure. © 2022 Lloyd's Register Group Services Limited.
- Mallouppas, G.; Yfantis, E.A. (2021). Decarbonization in Shipping Industry: A Review of Research, Technology Development, and Innovation Proposals. *J. Mar. Sci. Eng.*, 9, 415. <https://doi.org/10.3390/jmse9040415>
- Insight, Marine, (2021). 14 Technologies to Make the Ultimate Green Ship. <https://www.marineinsight.com/green-shipping/13-technologies-to-make-the-ultimate-green-ship/>, diakses Maret 2022.
- UNEP, FAO, IMO, UNDP, IUCN, World Fish Center, GRID-Arendal. (2012). Green Economy in a Blue World. Retrieved from http://www.unep.org/pdf/green_economy_blue.pdf
- Qiu, X., Wong, E. Y., & Lam, J. S. L. (2018). Evaluating economic and environmental value of liner vessel sharing along the maritime silk road. *Maritime Policy & Management*, 45(3), 336-350
- Tian, Y., Zhu, Q., Lai, K., Lun, Y.H.V. (2014). Analysis of greenhouse gas emissions of freight transport sector in China. *Journal of Transport Geography*, 40, 43-52
- Winnes, H., & Fridell, E. (2010). Emissions of NO_x and particles from manoeuvring ships. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 15, 204-211.

- Woo, J. K., & Moon, D. S. H. (2014). The effects of slow steaming on the environmental performance in liner shipping. *Maritime Policy & Management*, 41, 176-191.
- Yang, Z. L., Zhang, D., Caglayan, O., Jenkinson, I.D., Huang, M., Yan, X.P. (2012). Selection of techniques for reducing shipping NOx and SOx emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17, 478-486

KONSEP TEKNOLOGI BAHAN BAKAR ALTERNATIF DAN ENERGI TERBARUKAN DI KAPAL

Betty Ariani

Teknik Perkapalan -Universitas Muhammadiyah Surabaya

Abstrak

Sektor perkapalan mengambil peran yang sangat vital dan penting dalam pola perdagangan dunia dimana mayoritas tonase dagangan menggunakan sarana angkut perkapalan. Berdasarkan data yang dilansir UNCTAD telah terjadi peningkatan tonase pelayaran global yang terus bertumbuh. Tentu saja tren pengiriman barang melalui jalur laut semakin meningkat pesat dari tahun ke tahun. Peningkatan ekonomi, perubahan tingkat konsumsi masyarakat dan pertumbuhan penduduk semakin menuntut peningkatan rantai pasok yang cepat dan efisien melalui jalur laut. Dalam bidang perkapalan sendiri, terjadi beberapa perubahan yang cukup signifikan terkait dengan energi dan bahan bakar. Peningkatan konsumsi bahan bakar secara signifikan menjadikan tingkat ketersediaan bahan bakar fosil terus berkurang dan yang terburuk adalah sektor perkapalan menjadi contributor emisi CO₂ sekitar 2,8% dari total emisi global. Meskipun terlihat dan tergolong rendah diantara mode transportasi maupun industry yang lainnya namun emisi ini akan

menjadi tidak terkendali dan diperkirakan akan meningkat hingga tiga kali lipat pada tahun 2050 jika terus dibiarkan dan tidak ada upaya preventif maupun solutif dalam pengelolaannya. Salah satu upaya yang dapat ditempuh adalah dengan melakukan ekspansi dan substitusi terhadap bahan bakar kapal dengan menggunakan energi terbarukan. Melakukan upaya penggunaan bahan bakar terbarukan dan mengganti bahan bakar fosil tentu tidak bisa serta merta dapat dilakukan saat ini. Banyak hal yang perlu dipersiapkan baik perubahan teknologi permesinannya, infrastruktur pendukung layanan bahan bakar, ketersediaan produksi bahan bakar yang harus terjamin kuantitas dan kualitasnya lebih bersih dibanding bahan bakar fosil.

Kata kunci : bahan bakar alternative, emisi, energi terbarukan, perkapalan

Pendahuluan

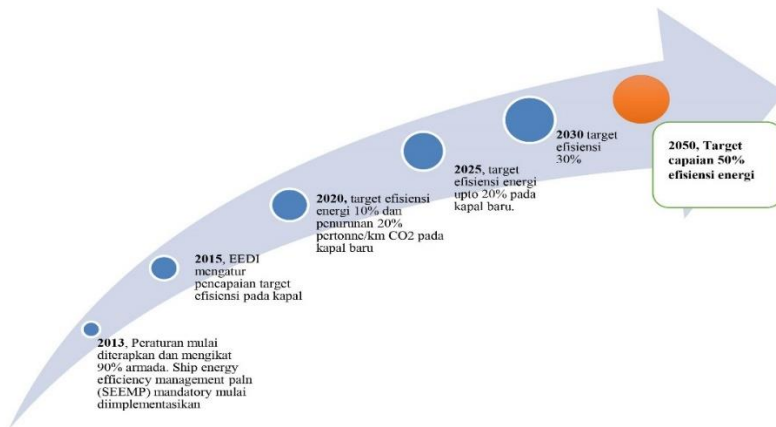
Pandangan terbaru terkait dengan teknologi perkapalan adalah terkait intervensi lingkungan terhadap operasional perkapalan. Teknologi hijau bidang perkapalan menjadi sebuah upaya intervensi program yang dilakukan untuk mendukung target zero emisi 2050. Menurut (“GreenShip’s Treatment Technology: Environment and Health as Competitive Items,” 2001) upaya intervensi ini jika dilakukan akan menghijaukan lingkungan 15-20% lebih baik dan penjagaan lingkungan 33% lebih baik dibandingkan tanpa intervensi teknologi hijau. Terdapat 7 hal yang dapat dikategorikan sebagai upaya intervensi yang dimaksud yaitu, upaya penurunan emisi (Nox, CO₂, SO_x, jelaga, partikel pencemar lainnya, pengolahan limbah sampah kapal, tata kelola air bilga, ballast, black waste, grey waste dan aplikasi coating bawah air. Terkait dengan upaya penurunan emisi yang dihasilkan oleh operasional kapal salah satunya adalah dengan melakukan implementasi dan substitusi bahan bakar yang

lebih bersih dan ramah lingkungan. Seperti yang diketahui sumber energi penggerak kapal mengalami transformasi dan perubahan yang signifikan mulai dari konvensional dengan dayung atau layar, batubara, hingga bahan bakar minyak HFO dan MDO. Dengan semakin meningkatnya kebutuhan armada dan operasional angkutan laut maka terjadi peningkatan kebutuhan terhadap bahan bakar fosil ini. Peningkatan konsumsi bahan bakar fosil ini menjadikan peningkatan emisi termasuk gas rumah kaca global (DNV GL - Maritime, 2019)(Ariani et al., 2020). Menurut data yang dilansir International Maritime Organisation (IMO) diperkirakan peningkatan emisi akan terjadi pada kisaran 3 kali lipat pada 2050 dibandingkan saat ini yang berada pada 2,8% kontribusi emisi global saat ini, kondisi ini tentu akan sangat berdampak pada pemanasan global dan perubahan iklim dunia. Melalui Marpol, konvensi internasional untuk pencegahan pencemaran dari kapal dibuat beberapa peraturan yang menjadi kesepakatan yang mengikat tentang langkah-langkah efisiensi energi, penggunaan sumber energi dan pengurangan emisi hasil operasional perkapalan. Target capaian adalah 20% pengurangan emisi karbondioksida pada tahun 2020 dan 50% pada tahun 2050. Dorongan peraturan inilah yang menjadikan pilihan bahan bakar yang lebih bersih menjadi target pada industri perkapalan.

Penggunaan bahan bakar fosil sejauh ini memiliki beberapa permasalahan yang mengharuskan semua pihak bersama-sama mencari solusi. Seperti yang dikatakan oleh (“DNV GL Says Oil & Gas Industry Sees Hydrogen as Key to Decarbonisation,” 2020), (Ariani et al., 2020)(Ambarita, 2017) selain faktor ketersediaan bahan bakar fosil yang terbatas dan terus mengalami penurunan jumlah maka faktor yang berikutnya adalah dampak emisi yang dihasilkan oleh bahan bakar fosil. Hal-hal ini yang kemudian menjadi daya dorong perkembangan teknologi dan bahan bakar

alternative di kapal. Intervensi menjadi semakin kuat dengan dibuatnya peraturan-peraturan yang mengikat melalui IMO. Sebagai bentuk adaptasi dan dinamisasi yang dilakukan perubahan peraturan dilakukan melalui annex I hingga VI dengan cakupan target yang diperluas dan standar peraturan yang semakin ketat. Seperti yang disampaikan oleh (International Maritime Organization, 2020) perkembangan peraturan mengalami perkembangan cakupan yang dimulai dari pengaturan terhadap usaha pengurangan polusi laut oleh minyak dan zat berbahaya yang dihasilkan selama operasional kapal maupun saat berlabuh seperti SO_x dan NO_x hingga peraturan tentang pencegahan kecelakaan kapal dilaut karena hal ini menjadi contributor pencemaran laut terbesar. Hingga peraturan terus diperketat dalam pengaturan mulai tahap desain hingga proses bongkar muatnya. Dalam hal ini tentu saja control dari otoritas pelabuhan juga terlibat (Wan et al., 2018).

Berikut kita sajikan target dan kesepakatan capaian IMO terkait teknologi pengurangan CO₂ yang dihasilkan oleh operasional kapal.



Gambar 1. Roadmap efisiensi energi IMO 2013 – 2050

Berdasarkan riset yang dilakukan oleh (Bouman et al., 2017) metode efisiensi energi dan penurunan CO₂ dapat ditempuh dengan melakukan cara sebagai berikut:

1. **Optimasi desain lambung**, dalam hal ini terkait aspek yang berhubungan dengan dimensi lambung, bentuk dan berat serta pengaturan lain yang berhubungan dengan peningkatan kinerja hidrodinamik dan meminimalkan tahanan kapal.
2. **Pengaturan skala ekonomi**, cara ini ditempuh dengan alasan bahwa biasanya dilakukan penggantian kapasitas angkut kargo agar mengurangi konsumsi bahan bakar per unit pengiriman. Kapal kargo cenderung lebih hemat energi per unit pengangkutan.
3. **Pengaturan daya dan propulsi termasuk penggunaan alat penghemat energi**. Solusi inovasi yang dapat dilakukan pada upaya ini antara lain, optimalisasi desain sistem tenaga dan mesin, hybrid energi dengan efisiensi propulsi yang lebih tinggi seperti kombinasi baterai dengan mesin dimana operasional diatur berdasarkan kebutuhan, *waste heat recovery* maupun dengan penambahan layar ataupun *wind kite* untuk mengurangi pemenuhan beban daya terpasang.
4. **Pengaturan kecepatan**, hal ini berhubungan dengan pengaturan kecepatan dinas dan maksimal dari kapal sesuai rancangan awalnya. Kapal dirancang beroperasi pada batas hidrodinamiknya dimana kecepatan untuk bentuk lambung tertentu terdapat kondisi kurva resistensi naik seiring dengan kenaikan kecepatan. Sehingga diperlukan pengaturan kecepatan terutama pada kondisi batas tadi agar bahan bakar yang dikonsumsi dapat berkurang dengan tidak mengurangi ketercapaian operasional kapal.
5. **Penggunaan bahan bakar atau sumber energi alternative**, yang dimaksud dengan bahan bakar alternative adalah semua aspek yang terkait dengan penggantian atau pelengkapan HFO – MDO dengan energi lain seperti LNG, biofuel, hydrogen, angin maupun matahari. Harapan terbesar dari penggunaan energi

alternative adalah penurunan emisi CO₂ dan total emisi lain yang lebih rendah.

6. **Pengaturan rute dan penjadwalan**, konsep ini terkait dengan pengaturan rute pelayaran dan kecepatan optimal dengan mempertimbangkan arus, gelombang, cuaca serta penjadwalan pengiriman untuk meminimalkan hambatan dan konsumsi bahan bakar.

Bahan Bakar dan Sumber Energi Alternatif untuk Kapal

Energi terbarukan dan sumber energi alternative menjadi wacana yang terus didorong untuk diimplementasikan pada bidang perkapalan global pada semua tingkatan dan dalam besaran yang bervariasi. Intervensi dilakukan pada pengangkutan barang domestic dan internasional, kapal layanan orang, penangkap ikan, pariwisata maupun aplikasi kapal lainnya. Adapun pilihan teknologi yang dikembangkan mulai dari bahan bakar pengganti primer 100 % energi alternatif, hybrid atau penggerak bantu, maupun untuk sumber energi onboard. Untuk mendorong penggunaan energi bersih ini maka program diintegrasikan dalam pembuatan desain kapal baru.

Pengembangan bahan bakar dan sumber energi alternative merupakan salah satu upaya green technology bidang perkapalan yang cukup menjanjikan dalam upaya penurunan emisi carbon sebagai bentuk mitigasi pemanasan global dan perubahan iklim dunia. Menurut ITF Decarbonising Maritime Transport. Pathways to Zero-Carbon Shipping by 2035; International Transport Forum: Paris, France, 2018

Tabel 1. Potensi reduksi CO₂ terhadap bahan bakar alternatif

No	Bahan bakar	Potensi Reduksi
1	Advanced biofuels	25 – 100%
2	Liquified Natural Gas	0 – 20%

No	Bahan bakar	Potensi Reduksi
3	Hydrogen	0 – 100%
4	Ammonia	0 – 100%
5	Fuel Cell	2 – 20%
6	Elektrikal	0 – 100%
7	Angin	1 – 32%
8	Matahari	0 – 12%
9	Nuklir	0 – 100%

Sumber : ITF, 2018

Berdasarkan informasi yang terdapat dalam table diatas dapat kita simpulkan bahwa beberapa sumber energi alternative berpotensi besar dalam pengurangan resiko emisi CO₂ dengan peluang berkisar 0–100%, tentu hal ini sangat menjanjikan sebagai upaya mitigasi perubahan iklim.

a. Advanced Biofuel (biofuel canggih)

Advanced Biofuel atau biofuel canggih merupakan istilah yang diberikan kepada bahan bakar yang dihasilkan dari bahan organik dengan cara ekstraksi lanjut dengan bahan baku dapat berasal dari bagian tumbuhan, kotoran hewan maupun limbah lainnya. Sejauh ini sumber utama biofuel dapat berasal dari kelapa sawit, kedelai, kacang-kacangan, tebu maupun lobak. Hal ini menjadikan perkembangan biofuel menjadi sedikit terkendala karena harus bersaing dengan bahan pangan yang juga dibutuhkan umat manusia. Intervensi program harus memperhatikan harga pangan, luas ladang pasokan serta kondisi sosial. Bagaimanapun biofuel menawarkan potensi pengurangan emisi CO₂ dalam kisaran 25–100%, dan juga menghasilkan emisi belerang yang rendah sehingga sangat layak untuk dikembangkan. Saat ini dalam perkembangannya, advanced biofuel terbagi atas tiga generasi yaitu generasi satu yang diperoleh dari ekstraksi bahan pangan seperti diatas, generasi kedua berusaha

menjawab tantangan dan hambatan dari keterbatasan generasi satu yaitu dengan melakukan pengembangan bahan baku berasal dari non pangan seperti sampah ataupun limbah. Sedangkan generasi tiga diperoleh dari hasil rekayasa bahan seperti ganggang. Terlepas dari semua perkembangan yang ada maka produk biofuel ini pada aplikasi bidang perkapalan secara teknis sangat dimungkinkan diterapkan karena kompatibel dengan permesinan yang ada, jaringan pipa maupun infrastruktur bunker yang mendukung sehingga adaptasi teknologi yang ada tidak terlalu banyak menghabiskan biaya. Akan tetapi kendala muncul karena pada beberapa tipe biofuel memiliki karakteristik cenderung mudah teroksidasi dan terdegradasi dalam penyimpanan lebih dari 6 bulan. Selain itu juga diperkirakan bahan bakar ini hanya mampu memasok 15% dari total kebutuhan bahan bakar armada perkapalan.

b. Liquefied Natural Gas (LNG)

Liquefied Natural Gas (LNG) atau sering dikenal sebagai gas alam cair sebenarnya merupakan bahan bakar fosil juga. Beberapa karakter dasarnya yang relatif bersih dan secara jumlah lebih tersedia melimpah menjadikannya alasan sebagai salah satu bahan bakar alternatif di kapal. Salah satu karakter dari gas alam cair ini adalah dapat disimpan lebih mudah dan aman karena pada saat didinginkan -162°C volume gas mengecil hingga 600 kali. LNG dalam keadaan cair juga tidak mudah meledak dan menyala. Sifat dan karakter LNG yang relatif lebih bersih terbukti dengan adanya pengurangan SO_x dan partikel pencemar hingga hampir 100% dibandingkan dengan bahan bakar fosil lainnya. Seperti yang dikatakan oleh (Bouman et al., 2017) potensi mitigasi pemanasan global akibat green house gases cukup besar, dimana potensi pengurangan CO_2 berkisar pada 5-30% dibandingkan dengan HFO. Dibalik kelebihanannya penggunaan LNG menyisakan permasalahan salah satunya adalah fenomena methane slip (Ariani et al., 2020). Methane slip adalah terlepasnya

gas metana dari LNG yang tidak terlibat dalam pembakaran dan keluar bersama dengan gas buang dan menimbulkan potensi emisi metana yang juga merupakan GHG. Emisi metana memiliki dampak pemanasan global 28 kali lebih hebat dibandingkan CO₂ pada jumlah yang sama. Methane slip dapat juga terjadi pada saat fase bunkering, saat produksi, pengolahan maupun pengiriman-nya. Ketika emisi metana lebih tinggi dari 5,8 gr/kWh maka penggunaan LNG akan kehilangan potensi mitigasinya dan menyebabkan emisi gas rumah kaca justru lebih tinggi.

c. Hydrogen (H₂)

Hydrogen (H₂) merupakan salah satu bahan bakar alternatif yang dapat diaplikasikan di kapal dalam beberapa cara yaitu melalui sel bahan bakar (fuel cell), campuran bahan bakar ganda (dual fuel) dengan HFO dan bahan bakar primer pengganti HFO. Perkembangan penggunaan hidrogen memang belum sempurna dan masih membutuhkan banyak riset yang mendukung terutama terkait desain standar dan prosedur pengisian bahan bakar untuk kapal, infrastruktur bunker, desain keselamatan terkait volatilitas bahan bakar (Lindstad & Riolland, 2020). Terlepas dari semua hal tersebut, H₂ sangat berpotensi apabila dikembangkan karena tidak mengeluarkan CO₂, SO_x dan hanya sejumlah kecil NO_x. Dalam riset yang dilakukan oleh (Al-Enazi et al., 2021)(Bicer & Dincer, 2017) saat ini ada dua teknik umum yang dipergunakan untuk menghasilkan hidrogen yaitu melalui reformasi uap metana dan elektrolisis air. Proses elektrolisis air menjadi hal yang menarik perhatian dan telah banyak teknologi yang dikembangkan untuk memisahkan air menjadi hidrogen dan oksigen. Studi terbaru menyatakan bahwa hidrogen yang diproduksi dapat menghasilkan emisi CO₂ 10 kali lebih sedikit dibandingkan penggunaan HFO. Selain itu hidrogen yang dipergunakan sebagai bahan bakar campuran dengan HFO

dengan perbandingan prosentase 50: 50 ternyata dapat mengurangi emisi CO₂ hingga 43% per ton kilometer.

d. Ammonia (NH₃)

Ammonia (NH₃), berbeda dengan hidrogen pemanfaatan amonia dalam bidang perkapalan masih belum dilakukan, tahap penelitian dan pengembangan berhasil dilakukan pada moda darat. Seperti halnya hidrogen amonia dapat digunakan sebagai dual fuel dengan HFO ataupun dipergunakan secara primer sebagai bahan bakar utama. Menurut (Bicer & Dincer, 2017) ketika amonia digunakan sebagai dual fuel dapat menghasilkan pengurangan 27% CO₂ per ton kilometer. Pengembangan produksi amonia pada dual fuel dengan prosentase 50:50 terhadap HFO dapat mengurangi 34,5% per ton kilometer. Hal ini tentu menjadi solusi yang relatif menjanjikan sebagai upaya mitigasi perubahan iklim. Secara karakteristik amonia dalam bentuk cair memungkinkan penyimpanan yang lebih baik, dapat disimpan pada suhu -33,4^oC sehingga lebih mudah dipertahankan dibanding hidrogen. Meskipun secara kerapatan massa tidak begitu jauh memiliki perbedaan dengan hidrogen cair, perbedaan temperatur dan tekanan yang dibutuhkan dapat menghemat modal lebih baik. Produksi amonia berkembang pesat di dunia dengan banyak memanfaatkan energi hijau seperti angin, air ataupun tenaga surya. Karena amonia memang telah komersil terlebih dahulu sebagai pupuk yang diperdagangkan di seluruh dunia. Amonia dihasilkan dengan metode umum Haber – Bosch untuk mengubah hidrogen dan nitrogen menggunakan suhu tinggi dan katalis.

e. Sel bahan bakar / fuel cell

Sel bahan bakar/fuel cell secara prinsip melakukan proses perubahan secara langsung energi elektrokimia, dimana perubahan energi kimia dari senyawa menjadi tenaga listrik tanpa melalui proses

pembakaran. beberapa unsur dan senyawa memiliki kemampuan untuk menjadi sel bahan bakar seperti hidrogen yang diproduksi melalui reformasi uap metana, gasifikasi biomassa, maupun elektrolisis air. Menurut (DNV GL - Maritime, 2019) teknologi yang paling menjanjikan adalah sel bahan bakar Proton Exchange Membran (PEMFC) yang berfungsi dengan hidrogen, PEMFC suhu tinggi dan sel bahan bakar oksida padat/solid oxide fuel cell (SOFC). Beberapa hal yang tercatat sebagai bentuk kelemahan fuel cell antara lain PEMFC cenderung berbiaya tinggi dan membutuhkan ruang lebih begitu pula SOFC. Selain itu PEMFC cenderung sensitif dengan pengotor sedangkan SOFC cenderung rentan terhadap keamanan karena beroperasi pada suhu 800-1000°C. Menurut (van Biert et al., 2016) Efisiensi ketercapaian bahan bakar diperkirakan 50-60% untuk PEMFC dan 60% untuk SOFC

f. Electric / hybrid propulsion,

Penggunaan sistem kelistrikan pada transportasi perkapalan menjadi satu pilihan yang tepat pada mitigasi perubahan iklim karena nyaris tanpa emisi karbon, meskipun produksi di hulu memerlukan perhatian juga. Catu daya dapat berasal dari baterai, fly wheel, dan kapasitor super. Meskipun motor listrik diasumsikan lebih murah dibandingkan dengan motor konvensional akan tetapi perlu diperhatikan biaya baterai per unit energi dan akomodasi kapal menjadikannya pilihan yang mahal. Permasalahan yang dihadapi dalam perkembangan kelistrikan ini adalah terkait pengisian baterai dan manajemen energi yang tidak lebih menguntungkan dibandingkan hidrogen, amonia dan biofuel. Dalam sebuah uji coba yang dilakukan pada kapal feri hibrida didapatkan penghematan bahan bakar hingga 35%, bahkan menurut (DNV GL - Maritime, 2019) hibridisasi pada kapal dapat memberikan penghematan bahan bakar 10-40% dengan pengembalian modal paling rendah satu tahun. Pada transportasi darat dilaporkan tercatat pengurangan emisi CO₂

sebesar 95% dan penurunan biaya operasional 80%. Biaya teknologi pembuatan baterai terus turun dan hal ini menjadi sinyal yang menarik, dan menunjukkan bahwa teknologi tersebut dapat menjadi pilihan yang layak bagi transportasi termasuk perkapalan.

g. Wind power/energi angin

Wind power/energi angin, teknologi pemanfaatan energi angin sebenarnya merupakan cikal bakal dan awal perkembangan teknologi penggerak perkapalan di masa awal sejarahnya yang kemudian digantikan oleh intervensi bahan bakar fosil HFO-MDO. Seiring dengan isu lingkungan yang muncul dan perkembangan sumber energi alternatif untuk kapal maka teknologi tenaga angin juga mengalami perkembangan signifikan. Terdapat enam teknologi penggerak berbasis energi angin yaitu *soft sails* (layar lunak), *rigid sails-wing sails* (layar kaku), *hull sails* (layar lambung), *towing kites* (layang-layang penarik), *rotating cylinders* (silinder berputar), dan *wind turbines* (turbin angin). Studi yang dilakukan oleh beberapa periset (Bouman et al., 2017)(Rehmatulla et al., 2017)(Traut et al., 2014) menyatakan bahwa terjadi pengurangan CO₂ pada penggunaan teknologi propulsi angin, pengurangan emisi dinamis tergantung dari jenis layar, kecepatan dan kondisi pelayaran yang menunjang. Dari beberapa jenis teknologi layar tersebut dikatakan bahwa *towing kites* dan *rotating cylinder* memiliki tingkat kematangan teknologi dan pasar yang paling baik dibandingkan yang lainnya. Dalam hal biaya penginstalan sistem ini sangat bervariasi dimana kesulitan pemasangan, bahan baku, perakitan dan pemeliharaan menjadi komponen pembedanya.

h. Energi Matahari / Solar Energy

Energi Matahari/Solar Energy, merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan untuk penunjang kebutuhan daya on board. Kapasitas belum maksimal hingga saat ini

masih difungsikan sebagai tenaga penunjang saja. Seperti halnya dengan energi angin, potensi energi matahari tergantung pada kondisi meteorologi dimana wilayah yang berdekatan dengan zona katulistiwa tentunya memiliki potensi lebih besar untuk pengembangannya. Teknologi instalasi dari potovoltaik dapat dikolaborasi bersama instalasi energi angin yang dipasang mendatar di atas geladak atau dalam kondisi vertikal. Beberapa hal yang menjadi hambatan perkembangan energi matahari ini adalah bentuk instalasinya yang cukup memakan tempat, teknologinya mahal dan relatif rumit, meskipun begitu (Bouman et al., 2017) terdapat potensi pengurangan CO₂ sebesar 0,2–12%. Perlunya riset-riset yang dapat menyempurnakan penerapan teknologi potovoltaik ini hingga matang dan dapat terimplementasi sebagai sumber energi primer.

i. Tenaga nuklir

Tenaga nuklir, sistem propulsi nuklir sebenarnya telah digunakan sejak 1955 pada sebagian kapal militer dan kapal selam, selain itu sejumlah kecil kapal komersial telah menggunakannya sebagai pendorong pemecah es. Propulsi kapal nuklir memiliki banyak keuntungan dimana selam operasionalnya tidak mengeluarkan CO₂, NO_x, SO_x maupun emisi partikulat lainnya. Selain itu tenaga nuklir memungkinkan kapal berjalan lama tanpa mengisi bahan bakar. Akan tetapi dibalik semua kelebihan tentu terdapat kelemahan yaitu potensi resiko tinggi terhadap lingkungan karena paparan radioaktif. Termasuk diantaranya adalah penyimpanan nuklir bekas pakai. Penggunaan tenaga nuklir lebih banyak membutuhkan persiapan yang matang dan menyeluruh terhadap seluruh komponen yang terlibat.

Potensi, Pendorong dan Tantangan Masa Depan Penggunaan Bahan Bakar dan Sumber Energi Alternatif di Kapal

Pencapaian teknologi dan kontribusi bahan bakar alternative secara global saat ini telah menunjukkan kepada kita bahwasanya sebenarnya terdapat potensi yang besar dalam pengembangan teknologi ini untuk menunjang transportasi dan menjadi upaya mitigasi perubahan iklim dunia. Akan tetapi potensi ini memang tergantung dari sejumlah factor seperti ketersediaan bahan baku, dukungan investasi pada infrastruktur penunjang, dan sistem kebijakan yang mendukung. Potensi energi terbarukan pada bidang perkapalan membutuhkan sistem yang terintegrasi untuk mencapai perkembangan maksimal.

Apabila kita melihat pada perkembangan yang terus terjadi pada transportasi perkapalan dan kegiatan pengiriman melalui laut, maka kebutuhan akan sumber energi tentunya akan terus meningkat. Keterbatasan persediaan bahan bakar fosil, tingkat emisi yang semakin tinggi dan peraturan global yang semakin ketat mengikat menyebabkan pertumbuhan teknologi penyediaan bahan bakar alternative akan berkembang pesat. Konvensi Internasional untuk Pencegahan Pencemaran dari Kapal atau Marpol memberikan penetapan dan pengendalian terkait emisi belerang, tindakan teknis dan operasional terkait efisiensi energi, peraturan terkait EEDI dan SEEMP bagi semua kapal. Batasan-batasan secara ekonomi dan lingkungan yang mengikat inilah kemudian menjadi pendorong utama percepatan adopsi teknologi dan bahan bakar alternative di sector maritime terutama pelayaran dan perkapalan.

Sedangkan tantangan dan hambatan penerapan bahan bakar alternative di sector pelayaran juga tidak sedikit. Menurut Irena, 2015, apabila diklasifikasikan maka tantangan dapat dikategorikan menjadi 4 hal yaitu :

1. **Hambatan secara organisatoris**, hambatan ini lebih bersifat adanya perbedaan kebijakan dan peraturan pada masing – masing negara. Selain itu masih rendahnya insentif dan pembiayaan terkait riset dasar dan pengembangan.
2. **Hambatan secara karakteristik perilaku**, berkaitan dengan pengaruh hambatan nomer satu maka hambatan secara karakteristik perilaku ini condong kepada cara pandang pemilik usaha dalam resiko penggunaan teknologi baru pada operasional usaha mereka. Kekhawatiran terkait resiko, biaya adopsi teknologi maupun keberlangsungan operasional mengingat teknologi yang masih baru dan memiliki banyak keterbatasan.
3. **Hambatan dari pasar**, adanya dismotivasi para investor untuk ikut serta dalam pengembangan teknologi bahan bakar alternative, kesulitan para investor terutama setelah keruntuhan *shipping boom* di tahun 2006, dan belum adanya intervensi yang kuat dari masyarakat umum terkait adopsi teknologi ini.
4. **Hambatan non pasar**, adanya perbedaan kelas dan skala kapal, pasar dan jalur perdagangan yang dilayani dan kurangnya akses permodalan terkait adopsi teknologi baru tersebut pada kapal

Kesimpulan

Teknologi hijau bidang perkapalan secara umum menjadi satu terobosan yang dilakukan oleh sector maritime sebagai upaya daya dukung terhadap kelestarian lingkungan. Perkembangan implementasi energi terbarukan pada bidang perkapalan memiliki potensi yang besar untuk dilaksanakan. Setiap bahan bakar maupun sumber energi alternative memiliki karakteristik yang berbeda – beda, keunggulan dan keterbatasan yang bervariasi. Akan tetapi dengan peran serta semua pihak dan sinergi kolaborasi diperlukan agar tercapai integrasi sistem yang berkelanjutan dalam mendukung upaya mitigasi bencana perubahan iklim dunia.

References

- Al-Enazi, A., Okonkwo, E. C., Bicer, Y., & Al-Ansari, T. (2021). A review of cleaner alternative fuels for maritime transportation. In *Energy Reports* (Vol. 7). <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.03.036>
- Ambarita, H. (2017). Performance and emission characteristics of a small diesel engine run in dual-fuel (diesel-biogas) mode. *Case Studies in Thermal Engineering*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.06.003>
- Ariani, B., Ariana, I. M., & Fathallah, A. Z. M. (2020). Experimental investigation on natural gas injection to minimize abnormal combustion and methane slip in the diesel-natural gas dual fuel engine at low load. *International Review of Mechanical Engineering*, 14(9). <https://doi.org/10.15866/ireme.v14i9.19821>
- Bicer, Y., & Dincer, I. (2017). Comparative life cycle assessment of hydrogen, methanol and electric vehicles from well to wheel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(6). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.252>
- Bouman, E. A., Lindstad, E., Riialand, A. I., & Strømman, A. H. (2017). State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022>
- DNV GL - Maritime. (2019). Assessment of Selected Ternative Fuels and Technologies. *Imo*, 391(June).
- DNV GL says oil & gas industry sees hydrogen as key to decarbonisation. (2020). *Fuel Cells Bulletin*, 2020(6). [https://doi.org/10.1016/s1464-2859\(20\)30258-3](https://doi.org/10.1016/s1464-2859(20)30258-3)
- GreenShip's treatment technology: Environment and health as competitive items. (2001). *HSB International*, 50(8).
- International Maritime Organization. (2020). IMO 2020: consistent implementation of MARPOL Annex VI. *OMi*.
- Lindstad, E., & Riialand, A. (2020). LNG and cruise ships, an easy way to fulfil regulations-versus the need for reducing GHG emissions. *Sustainability (Switzerland)*, 12(5). <https://doi.org/>

10.3390/su12052080

- Rehmatulla, N., Calleya, J., & Smith, T. (2017). The implementation of technical energy efficiency and CO2 emission reduction measures in shipping. *Ocean Engineering*, *139*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.04.029>
- Traut, M., Gilbert, P., Walsh, C., Bows, A., Filippone, A., Stansby, P., & Wood, R. (2014). Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes. *Applied Energy*, *113*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.026>
- van Biert, L., Godjevac, M., Visser, K., & Aravind, P. V. (2016). A review of fuel cell systems for maritime applications. In *Journal of Power Sources* (Vol. 327). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.007>
- Wan, C., Zhang, D., Yan, X., & Yang, Z. (2018). A novel model for the quantitative evaluation of green port development – A case study of major ports in China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *61*.

ADVANCED RUDDER DAN PROPULTION SYSTEM

Dian Purnama Sari

Pusat Riset Teknologi Hidrodinamika-Badan Riset dan Inovasi
Nasional (BRIN)

Abstrak

Secara prinsip sistem propulsi dan kemudi memberi pengaruh yang signifikan terhadap gaya dan momen hidrodinamika kapal. Sistem propulsi dan kemudi yang dirancang dengan baik dapat menghemat konsumsi bahan bakar minyak. Pertimbangan-pertimbangan terhadap *environmental effects* (misalnya *low noise, vibrations* dan *emissions*) telah memberikan dampak pada rancangan perkembangan *unconventional propellers and rudders*. Empat jenis propulsor baru diperkenalkan, yang meliputi: *morphing composite propeller* (MCP), *Duct shaped water wheel without rotating blades*, *Rotor Stator Nozzle* (RSN) dan *cyclic pitch propeller* (CCPP). Dua jenis Rudder diusulkan untuk mengurangi konsumsi bahan bakar, emisi sekaligus kebisingan dan getaran, yaitu *Gate Rudder* dan *Rudder Bulb Fin System* (RBFS). Peningkatan efisiensi energi masih menjadi hal terpenting dalam mengurangi emisi CO₂. Akibatnya,

sejumlah besar perangkat penghematan energi (*Energy Saving Devices/ESD*) telah diusulkan.

Kata kunci: Environmental effect, unconventional, propellers, rudders.

Pendahuluan

Saat ini propulsi kapal bukan hanya tentang pergerakan kapal di dalam air, tapi juga termasuk menggunakan mode propulsi terbaik untuk memastikan standar keamanan yang lebih baik untuk ekosistem laut dan efisiensi biaya.

Komite *resistance and propulsion International Towing Tank Conference* pada *proceeding conference* (2017) menyampaikan ada beberapa jenis propulsor baru diperkenalkan, yang meliputi: *morphing composite propeller* (MCP) yang dilakukan oleh Fanling dkk (2017), MCP mempunyai daya dorong dan efisiensi propeller yang meningkat pada kondisi operasi di luar desain (*off-design*) seperti *crash-back* atau *rapid reversing*. Nicolay V dkk (2017) melakukan penelitian multi komponen RSN yang dipasang pada *AZIPOD* dengan *post swirl stators* (PSS) merupakan gabungan beberapa komponen yang akan memaksimalkan efisiensi dan daya dorong serta mencapai kinerja kavitasasi terbaik. Penelitian *collective and cyclic pitch propeller* (CCPP) pada aliran unsteady sebelum teknologi ini diaplikasikan sebagai sistem propulsi dan maneuvering pada *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV) dilakukan oleh Arno Dubois dkk (2017). Melalui kontrol pitch pada *blade* propeller, CCPP mampu menghasilkan propulsi dan manuver secara efektif dan efisien pada kecepatan tinggi dan rendah.

Rudder adalah salah satu pelengkap yang berkontribusi sangat signifikan terhadap hambatan dan manuver kapal. Kombinasi Propeller-rudder harus dipertimbangkan terhadap pengurangan gaya dorong (*thrust deduction*) dan perubahan efisiensi pendorong

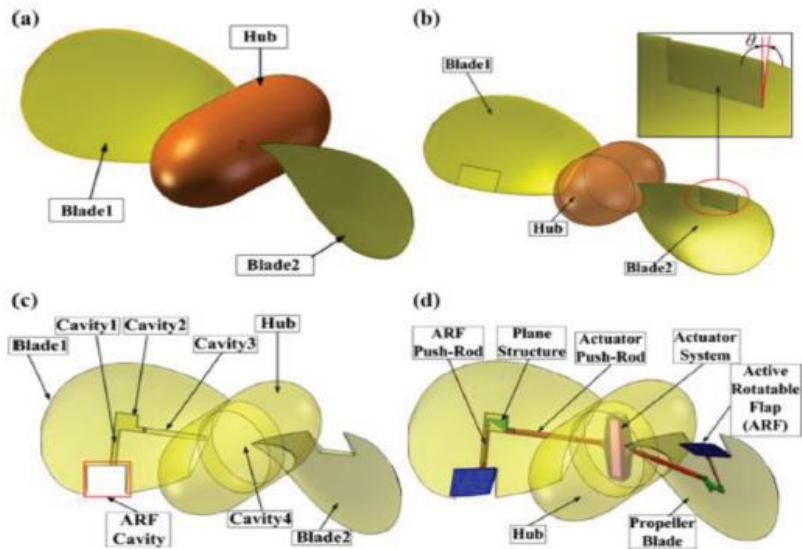
(*propulsive efficiency*). *Gate Rudder* diusulkan dengan dua kemudi kecil di samping propeller. Konsep *Gate Rudder* yang diusulkan dapat meningkatkan kemampuan manuver selama operasi di pelabuhan. *Gate Rudder* telah diterapkan untuk pertama kalinya pada kapal kontainer 2400 GT dan uji coba dilaut skala penuh berhasil dilakukan pada November 2017 di Jepang telah mengkonfirmasi kinerja superior dari gate rudder yang dilakukan oleh Sasaki N dan Atlar M (2018). Melanjutkan penelitian sebelumnya, Sasaki N dan Atlar M (2019) menyajikan metode prediksi daya untuk kapal yang dilengkapi dengan sistem *Gate Rudder*. *Gate rudder* untuk kapal baru sebagai cara untuk membantu mencapai kepatuhan terhadap Indeks Desain Efisiensi Energi (EEDI), yang diterapkan oleh Organisasi Maritim Internasional pada tahun 2011 untuk kapal baru.

Morphing Composite Propeller (MCP)

Smart materials meliputi material piezoelectric dan kompositnya, material magnetostrictive, Shape-Memory Alloy (SMA), Shape-Memory Polymers dan kompositnya (SMPs and SMPCs), Electroactive Polymers (EAP) merupakan revolusi design untuk sensor and actuator. Hal tersebut sebagai peluang untuk para peneliti dan praktisi untuk menggunakan smart material untuk aplikasi teknik.

Fanling Chen, dkk. (2017) melakukan studi tentang *morphing composite propeller*. Teknik rekonfigurasi geometri yang terintegrasi mampu meningkatkan efisiensi secara signifikan. *Conventional Propeller/CP* ditunjukkan pada Gambar. 1(a), terdiri dari tiga komponen yaitu 1 *hub* dan 2 *blade*. MCP dirancang dengan penambahan *Active Rotatable Flaps* (ARF) seperti pada Gambar. 1(b). Terdapat rongga pada *trailing edge* (TE) seperti pada Gambar 1(c), area rongga ARF adalah $0,5R-0,7R$ (R adalah radius blade

propeller) di sepanjang garis referensi sudu, dan lebarnya 25% dari lebar propeller. Desain MCP seperti pada Gambar 1(d) digerakkan oleh sistem *actuator piezo stack* untuk menyesuaikan sudut flap. Tabel 1. menampilkan sifat umum MCP. Perhitungan respon struktur ditampilkan pada Tabel 2.



Gambar 1. Skema MCP (a) Propeller konvensional (b) Penyederhanaan MCP (c) Rongga-rongga MCP (d) desain akhir
(Sumber: Fanling dkk, 2017)

Tabel 1. Sifat umum material MCP

Parameter	Notasi	Unit	Nilai
Young modulus	E_x	GPa	135
	E_y	GPa	15
	E_z	GPa	15
Shear Modulus	G_{xy}	GPa	5
	G_{yz}	GPa	2.9
	G_{xz}	GPa	5.3
Poisson's ratio	ν_{xy}	-	0.3
	ν_{yz}	-	0.02
	ν_{xz}	-	0.02

Parameter	Notasi	Unit	Nilai
Densitas	ρ	kg/m ³	1600
Ketebalan	t	mm	0.3

Sumber (Fanling dkk, 2017)

Tabel 2. Perbandingan dari 2 blade (blade berongga dan blade tanpa rongga)

Geometri	Displasemen	Tegangan/Stress (max)(Mpa)
Blade tanpa rongga	9.38. 10-2	8.63
Blade dengan rongga (sebelum)	9.66. 10-2	15.16
Blade dengan rongga (setelah)	9.55. 10-2	9.45

Sumber (Fanling dkk, 2017)

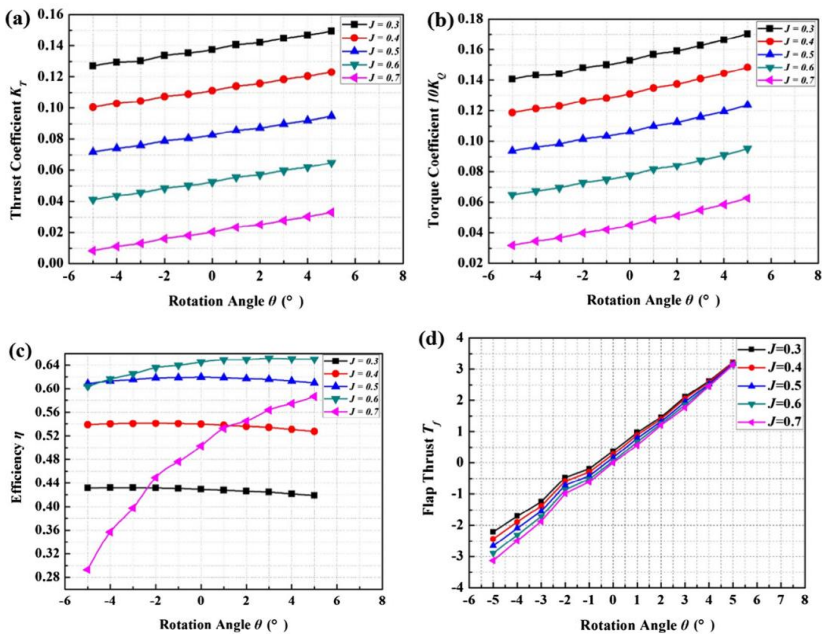
Analisa hidrodinamik pada berbagai *advance speed* dan sudut rotasi ARF, performa MCP dibandingkan dengan performa blade konvensional. Hasil akan dianalisa dengan metode yaitu: variabel bebas J , sedangkan θ tetap dan variabel bebas θ , sedangkan J tetap. Dimana T , Q , K_T , $10K_Q$, η akan bervariasi dengan θ mulai dari -5° hingga $+5^\circ$, dan J adalah parameter tetap.

Hasil analisa ditampilkan pada Gambar 2(a) dengan peningkatan sudut rotasi θ , K_T meningkat secara linier. Pada Gambar 2(b) $10K_Q$ meningkat secara linier dengan peningkatan sudut rotasi θ . Dengan peningkatan sudut rotasi θ , tren efisiensi MCP dapat dibagi menjadi tiga kondisi, seperti pada Gambar 2(c) yaitu:

- 1= Efisiensi menurun pada $J = 0,3$;
- 2= Efisiensi naik pada $J = 0,4$ dan turun pada $0,5$,
- 3= Efisiensi meningkat pada $J = 0,6$ dan $0,7$.

Sangat jelas bahwa situasi negatif tidak akan terjadi ketika tren kurva relatif landai tetapi pada satu keadaan $-J = 0,7$. Pada *advance*

coefficient, nilai negatif akan muncul ketika θ mencapai -6° atau lebih, yang sangat dekat dengan -5° . Kurva variasi gaya dorong ditunjukkan pada Gambar. 2 (d), T_f meningkat secara linier dengan variasi sudut rotasi θ di $AC J$ mulai dari 0,3 hingga 0,7. Namun, nilai T_f dari $AC J$ s yang berbeda cenderung sama, terutama ketika $\theta=4^\circ$ dan $\theta=5^\circ$. Fenomena ini menunjukkan bahwa T_f pada sudut rotasi $\theta=4$ dan $\theta=5$ kurang sensitif terhadap perubahan $AC J$ s.



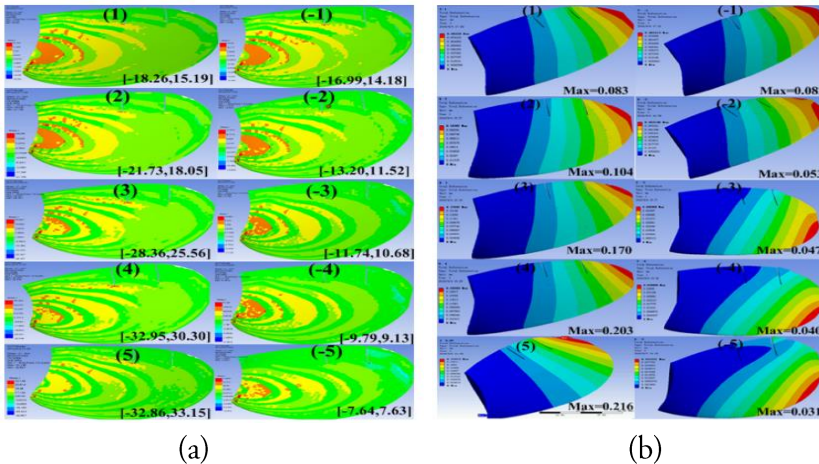
Gambar 2. Kurva analisa metode kedua (a) Kurva $K_T - \theta$ (b) Kurva $10K_Q - \theta$ (c) Kurva $\eta - \theta$ (d) Kurva $T_f - \theta$ (Sumber: Fanling dkk, 2017)

Bahan yang digunakan adalah serat karbon satu arah dan matriks epoxy. Analisa struktural untuk banyak konfigurasi laminasi percobaan dilakukan dan akhirnya dipilih konfigurasi setebal 11 mm [0/90/0/90/0]. Mengikuti beban kasus dipilih karena mewakili skenario kasus terburuk.

1. Untuk berbagai $AC J$ s pada sudut rotasi 5° , saat blade pada 5° akan memperoleh beban hidrodinamik tertinggi pada kondisi yang sama $AC J$;

2. Gaya dorong dan torsi tertinggi pada AC J = 1,08 pada berbagai sudut rotasi θ dari -5° hingga $+5^\circ$.

Analisa FE menunjukkan aspek deformasi dan tegangan, Gambar 3 menampilkan tegangan maksimum (baik nilai negatif maupun nilai positif) dari 7,64 MPa - 32,95 MPa untuk nilai negatif dan 7,63 MPa - 33,15 MPa untuk nilai positif dan displasemen maksimum dari 0,031 mm - 0,216 mm. Fenomena ini dapat dikaitkan dengan peningkatan hidrodinamika dengan sudut rotasi. Peningkatan hidrodinamika akan menghasilkan respon tegangan negatif dan positif yang lebih besar.

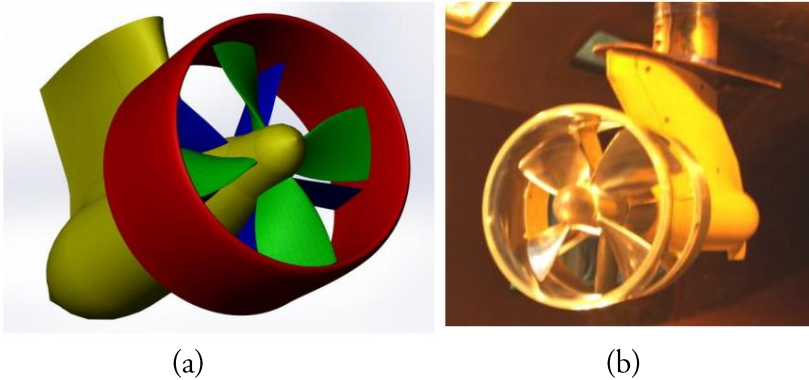


Gambar 3. Kontur deformasi sudut rotasi -5° - $+5^\circ$ (a) Distribusi tegangan sudut rotasi -5° - $+5^\circ$ (Sumber: Fanling dkk, 2017)

Rotor Stator Nozzle (RSN)

Nikolay V dkk (2017) mengusulkan desain multi komponen propulsor *Rotor Stator Nozzle* yang dipasang pada AZIPOD dengan *Post Swirl Stators (PSS)* seperti pada Gambar 4a, dengan baling-baling tunggal, nosel berbentuk cincin, hub simetris aksial dan bilah stator di hilir propeller, semua komponen dioptimalkan. Desain ini didasarkan pada studi yang dilakukan oleh *Krylov State Research Centre (KSRC)*, termasuk metode berbasis teori vortex untuk

verifikasi perhitungan *nozzle rotor* dan metode elemen batas, metode perhitungan desain *nozzle propeller* berdasarkan *direct optimization*, analisis efek bentuk *nozzle* terhadap kinerja propulsor serta metode desain *nozzle* dengan mempertimbangkan efek viskos. Semua studi ini memungkinkan untuk memulai pengembangan metode desain terintegrasi untuk *nozzle rotor*. Parameter utama propulsor ditampilkan pada Tabel 3, geometri awal dari rotor dan nozel adalah yang diterapkan pada nozel OST. Mode operasi propulsor akan tergantung pada gaya dorong propeller (*thrust*) dan gaya pada *post-swirl stator*, sehingga dapat bervariasi selama proses desain.



Gambar 4. Propulsor RSN tampilan unit yang dirancang (a) Uji kavitasi model propulsor RSN (b) (Sumber: Nikolay V dkk, 2017)

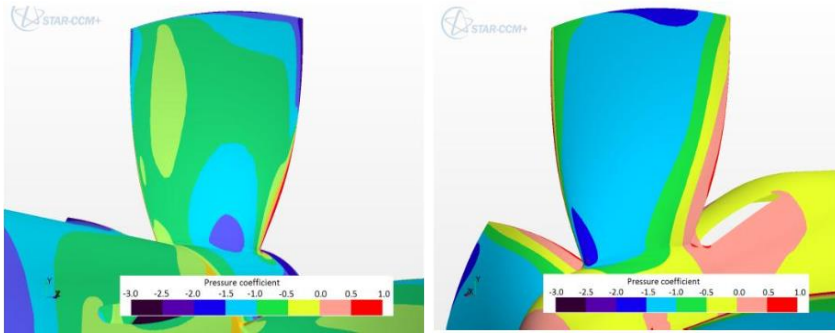
Tabel 3. Parameter RSN

Parameter		Nilai
Kondisi operasional	J	1.065
	Koefisien torsi KQ	0.065
Rotor	Rasio blade area A_c/A_o	0.55
	Jumlah blade Z	4
	Perpanjangan relative I/D	0.6
Nozzle	Letak rotor pada nozzle x_p/l	0.4
	Jumlah blade	5

(Sumber: Nikolay V dkk, 2017)

Langkah pertama adalah menentukan koefisien torsi K_Q , menentukan *advance ratio* J_s yang dihitung untuk laju aliran Q pada nosel di bagian disk propeller. Iterasi yang berurutan dalam optimasi koefisien torsi, koefisien dorong K_T yang menentukan laju aliran di *nozzle*. Optimasi rotor, selama optimasi parameter *rotor* dihitung dengan metode vortex. Optimasi *nozzle*, dimana permukaan *nozzle* dapat dibagi menjadi tiga bagian: permukaan luar, permukaan internal hulu baling-baling dan permukaan internal hilir propeller. Optimasi *nozzle* adalah $r(x)$ -berfungsi bentuk bagian tengah *nozzle* (x , panjang, r , radius *nozzle*), serta rasio ekspansi saluran masuk (rasio antara penampang saluran di saluran masuk *nozzle* dan di propeller disk), rasio ekspansi outlet (rasio antara penampang saluran di outlet *nozzle* dan di propeller disk) dan ekstensi *nozzle* relatif dalam kasus tertentu. Ketiga bagian nosel dioptimalkan secara bersamaan.

Simulasi CFD untuk mengetahui tekanan hidrodinamik dari rotor ditampilkan pada Gambar 5, yang menunjukkan bahwa distribusi tekanan di seluruh blade rotor, yang menegaskan bahwa blade dirancang dengan benar. Gambar 6 menampilkan hasil perhitungan CFD untuk propulsor skala penuh. Efisiensi propulsor yang dicapai sangat tinggi, yaitu 69% dalam kondisi uji model. Untuk propulsor skala penuh, perhitungan CFD menghasilkan efisiensi ~75%, dan perbedaan ini disebabkan oleh efek skala. Penyimpangan antara data perhitungan CFD dan hasil perhitungan verifikasi pada bollard pull ($J=0$) disebabkan oleh pemisahan aliran pada *blades stator*. Hal ini terjadi karena stator dirancang untuk operasi kecepatan tinggi, sehingga pada tarikan bollard pull berada pada sudut serang yang besar terhadap aliran.

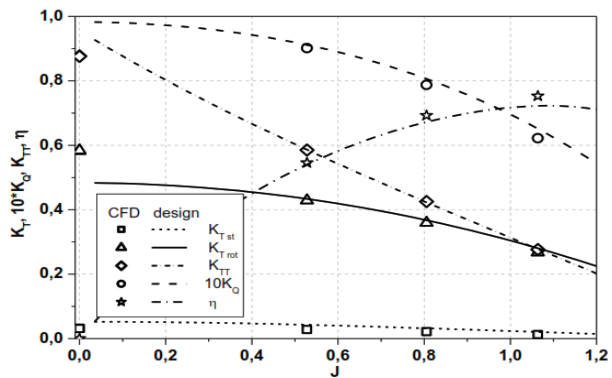


(a)

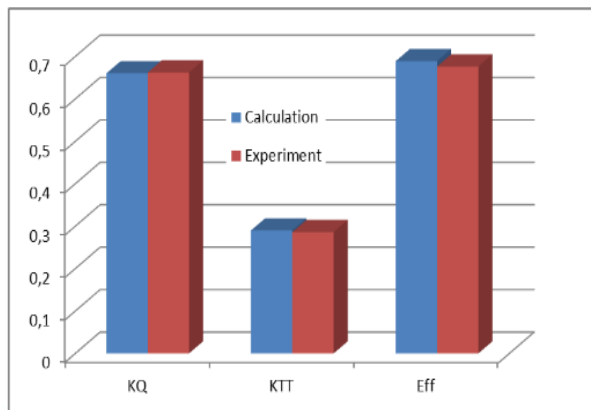
(b)

Gambar 5. Tekanan pada blade rotor sebagai fraksi dari depresurisasi maksimum

(a)



(b)



Gambar 6. Kurva kinerja propeller (perhitungan verifikasi vs CFD) data perhitungan (biru) vs hasil pengujian model (merah) (b) (Sumber, Nikolay V dkk, 2017)

Gaya dorong ditunjukkan sebagai $(\rho n^2 D^4)$, torsi ditunjukkan sebagai fraksi $(\rho n^2 D^5)$

Propulsor RSN ini untuk menjadi pendorong utama kapal pada kecepatan lebih dari 20 knot. Pengujian model sejenis propulsor ini telah dilakukan oleh KSRC untuk mengkonfirmasi akurasi dan efisiensi perhitungan desain, serta kinerja propulsor. Gambar 6b membandingkan penilaian desain parameter kinerjanya versus hasil pengujian model.

Collective And Cyclic Pitch Propeller (CCPP)

Propeller yang mampu terkontrol secara *collective dan cyclic* adalah evolusi dari propeller tradisional yang mempunyai *pitch* tetap (FPP). Terinspirasi dari kontrol flight helikopter, kemampuan *pitch cyclic* ditambahkan pada *pitch* kontrol yang telah ada untuk penggunaan secara luas propeler *pitch* terkendali (CPP). AUV berbentuk torpedo dilengkapi dengan kontrol *pitch* propeller yang mampu secara *collective* dan *cyclic* sangat efektif menghasilkan gerakan maneuver dalam tiga arah (*surge, pitch dan yaw*) secara efisien saat beroperasi untuk jarak jauh.

Parameter *pitch collective* mengontrol sudut *pitch* ketika berosilasi, dan parameter *pitch cyclic* mengatur besarnya osilasi *pitch*. Ilustrasi dari gerakan *pitch blade* pada azimuth *cycle* ditampilkan pada Gambar 7. Dengan menggabungkan kedua parameter *pitch cyclic* tidak hanya besarnya osilasi yang dikendalikan, tetapi fase profil *pitch* diatur dengan baik. Fase profil *pitch* adalah parameter utama untuk mengendalikan orientasi gerakan maneuver. Parameter *pitch cyclic* memiliki indeks 'U/D' (Atas / Bawah) dan 'R/L' (Kanan / Kiri) karena asumsi saat ini tentang hubungan langsung antara profil *pitch* yang diterapkan dan hasil orientasi gaya maneuver/gerak AUV. Tabel 3 dan 5 menghubungkan tanda parameter yang diterapkan dengan

asumsi arah gaya manuver dan gerakan AUV yang dihasilkan. Asumsi ini memerlukan penyelidikan dan evaluasi lebih lanjut.

Tabel 4. Asumsi orientasi gaya manuver

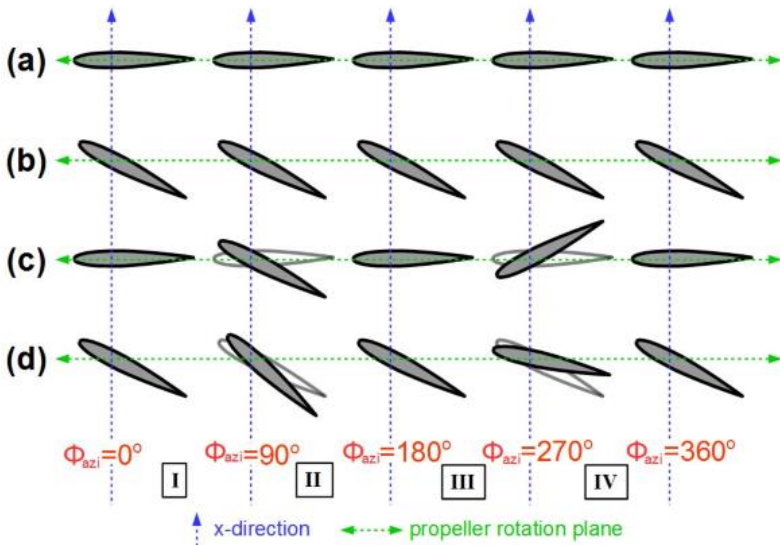
II U/D _{cycl}	II R/L _{cycl}		
	-	0	+
-	IV	z-axis(+)	III
0	y-axis(+)	awal	y-axis(-)
+	I	z-axis(-)	II

(Sumber: Arno Dubois dkk, 2017)

Tabel 5. Asumsi gerakan AUV

II U/D _{cycl}	II R/L _{cycl}		
	-	0	+
-	atas-kiri	atas	atas-kanan
0	kiri	lurus	kanan
+	bawah-kiri	bawah	bawah-kanan

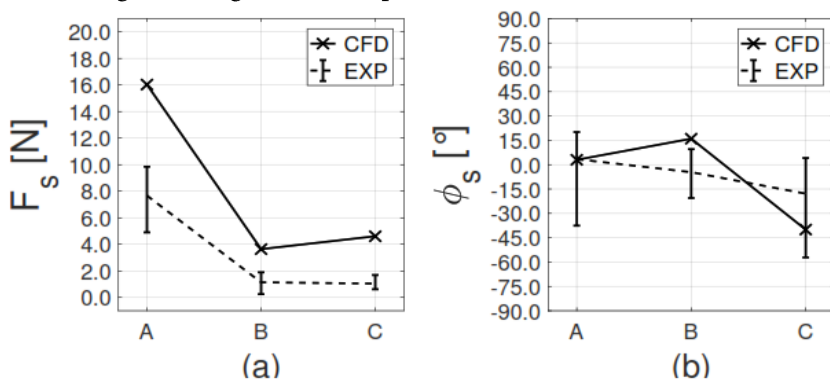
(Sumber: Arno Dubois dkk, 2017)



Gambar 7. Evolusi *pitch* posisi azimuth: (a) tidak ada *pitch*, (b) hanya *collective*, (c) hanya *cyclic* (d) *collective* dan *cyclic* (Sumber: Arno Dubois dkk, 2017)

Studi ini mengevaluasi empat amplitudo *pitch cyclic* pada kondisi operasi tunggal $\Pi_{cycl} = 0.0, 5.0, 10.0, \text{ dan } 20.0$ [°], dengan $\Pi_{col} = 0.0$ [°] dan $U = 0.0$ [m/s] pada $n = 400$ [rpm]. *Pitch cyclic* nol sebagai acuan evaluasi pengaruh amplitudo *pitch cyclic* pada gaya yang dihasilkan. Hasil eksperimen untuk validasi didapatkan dari uji Towing Tank di *Australian Maritime College* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6.

Hasil validasi pada Gambar 8a gaya manuver eksperimen dan numerik mempunyai perbedaan yang signifikan pada kondisi A. Namun, tren yang sama pada ketiga kondisi dan besaran gaya pada kondisi B dan C hampir sama yaitu sekitar 25% dari besaran gaya kondisi A. Gambar 24b menampilkan orientasi manuver yang dinyatakan sebagai azimuth arah vektor gaya, Perbandingan hasil eksperimen dan numerik menunjukkan perbedaan tren. Simulasi kondisi B tampaknya berorientasi pada arah yang berlawanan dibandingkan dengan arah eksperimen.



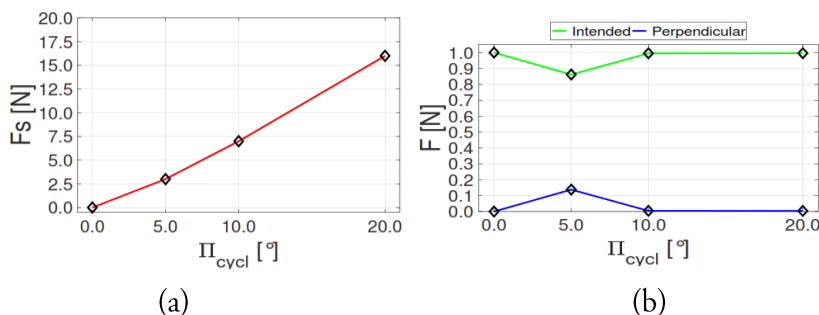
Gambar 8. Hasil studi validasi (a) gaya manuver (newton) (b) orientasi gaya manuver (Sumber: Arno Dubois dkk, 2017)

Tabel 6. Validasi parameter studi kasus;

	U (m/s)	n(rpm)	Π_{coll} (°)	Π_{cycl} (°)
Kondisi A	0.0	400	0	20
Kondisi B	1.2	300	0	10
Kondisi C	1.2	300	15	10

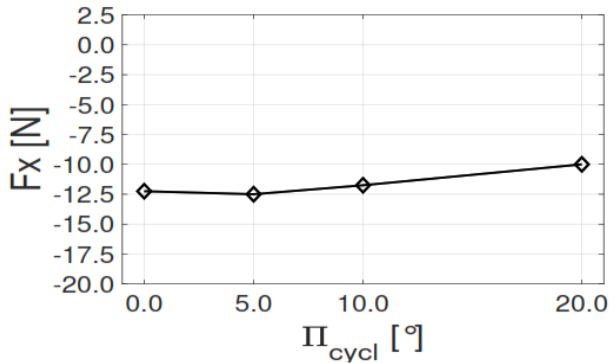
(Sumber: Arno Dubois dkk, 2017)

Gambar 9a menunjukkan gaya manuver sebagai fungsi dari amplitudo *pitch cyclic*. Ada hubungan linier antara amplitudo *pitch cyclic* dan besarnya gaya manuver yang dihasilkan. Gaya manuver efektif yaitu ketepatan gaya manuver dalam arah yang diinginkan dalam pengendalian AUV. Pergeseran gaya dari orientasi yang dimaksudkan cenderung terjadi dalam kondisi tertentu. Gambar 9b menampilkan kontribusi gaya manuver yang diinginkan dan gaya tegak lurus terhadap gaya manuver total. Kontribusi dari gaya yang diinginkan dan gaya tegak lurus dapat dianggap singularitas. Pada siklus $\Pi_{\text{cycl}} = 5$ [°], komponen tegak lurus secara signifikan mengurangi efektivitas gaya manuver. Peningkatan amplitudo *pitch cyclic* mengurangi kontribusi komponen gaya tegak lurus yang tidak diinginkan menjadi hampir nol.



Gambar 9. (a) Besaran Gaya Manuver; (b) Orientasi gaya manuver (Sumber: Arno Dubois dkk, 2017)

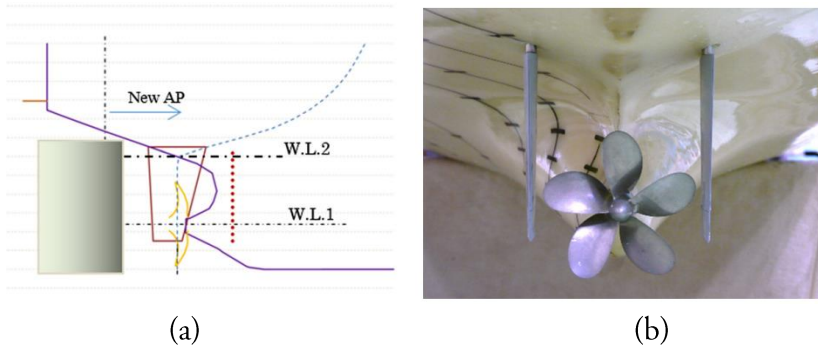
Gambar 10 menunjukkan bahwa ada faktor lain yang mempengaruhi timbulnya gaya dorong. Karena penelitian ini dilakukan pada *pitch cyclic* nol, asal-usul perilaku tidak terkait dengan *pitch* tetapi dapat dikaitkan dengan sudut *rake blade*. Hasil menunjukkan bahwa dalam kondisi saat ini, sudut *pitch collective* harus bisa mengatasi efek *rake blade* dan memastikan tidak ada gaya dorong yang dihasilkan.



Gambar 10. Gaya dorong (Sumber: Arno Dubois dkk, 2017)

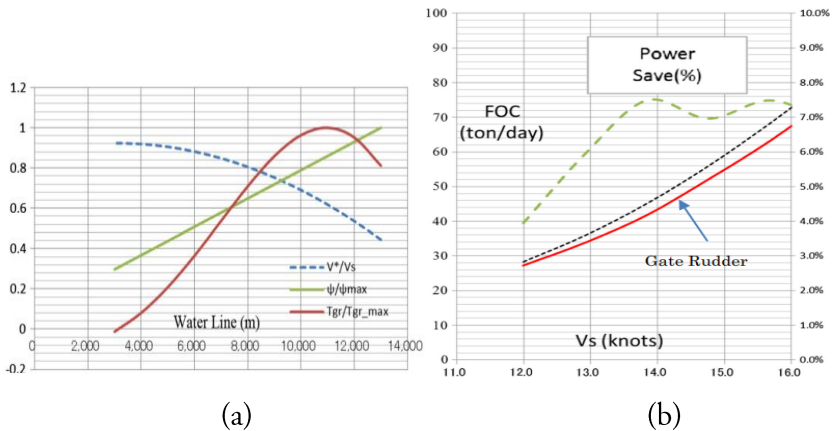
Gate Rudder

Gambar 11a menunjukkan tampak samping desain kapal dengan *Gate Rudder*, konfigurasi kemudi yang berfungsi sebagai sayap yang efisien. Untuk menyelidiki mekanisme penghematan daya *Gate Rudder*, dilakukan pengukuran tiga komponen gaya kemudi (momen) dengan CFD dan kemudian dibandingkan dengan eksperimen. Informasi tentang kecepatan normal, sudut aliran horizontal dan daya dorong kemudi yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 12a.



Gambar 11. (a) Desain kemudi tampak samping (b) Model uji gate rudder (tampak belakang) (Sumber Sasaki N dan Atlar M, 2018)

Pengujian model *Gate Rudder* dilakukan di towing tank NMRI dengan model kapal *bulk carrier* yang panjangnya 6 m pada Gambar 11b. Hasil pengujian kurva daya ditampilkan pada Gambar 12b. Karena kurva daya menunjukkan perbedaan 7-8%, sangat jelas bahwa sistem kemudi *Gate Rudder* memiliki karakteristik yang berbeda dari sistem kemudi konvensional. Untuk menyelidiki alasan penurunan daya 7-8% ini, gaya dan momen kemudi diukur untuk kapal yang dilengkapi dengan *Gate Rudder*.



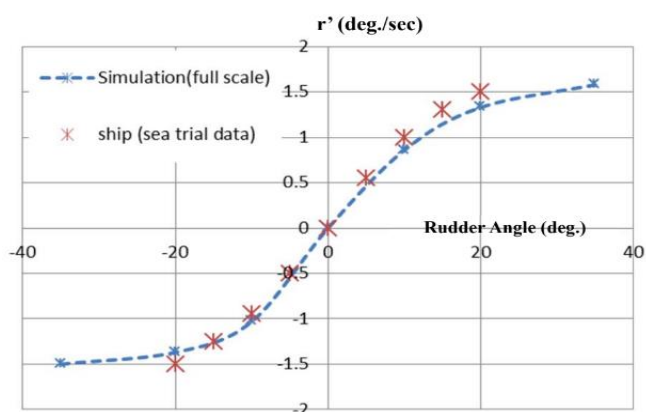
Gambar 12. Daya dorong kemudi non-dimensional span-wise (Tgr/Tgr_{max}) (a) penghematan daya dengan *Gate Rudder* (b) (Sumber N dan Atlar M, 2018)

Sasaki N dan Atlar M (2019) membuat prosedur powering baru untuk kapal dengan sistem gate rudder dengan dua koreksi pada *drag rudder* dan *lift rudder*. Koreksi pada data uji model kapal meminimalkan perbedaan antara uji model dan hasil uji laut. Uji coba dilaut Seto-uchi Jepang, uji spiral dilakukan pada 14 November 2017 hasilnya ditunjukkan pada Gambar 13b. Gambar 14 menampilkan hasil uji kecepatan kapal A (Flap Rudder) dan kapal B (gate rudder) dilakukan pada tanggal 27 Juli 2016 dan 16 November 2017.

(a)

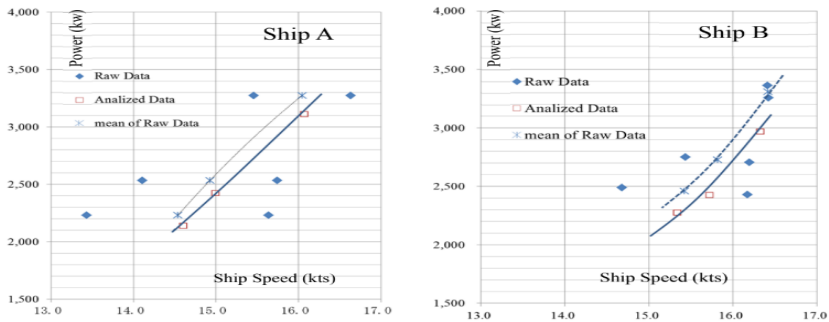


(b)



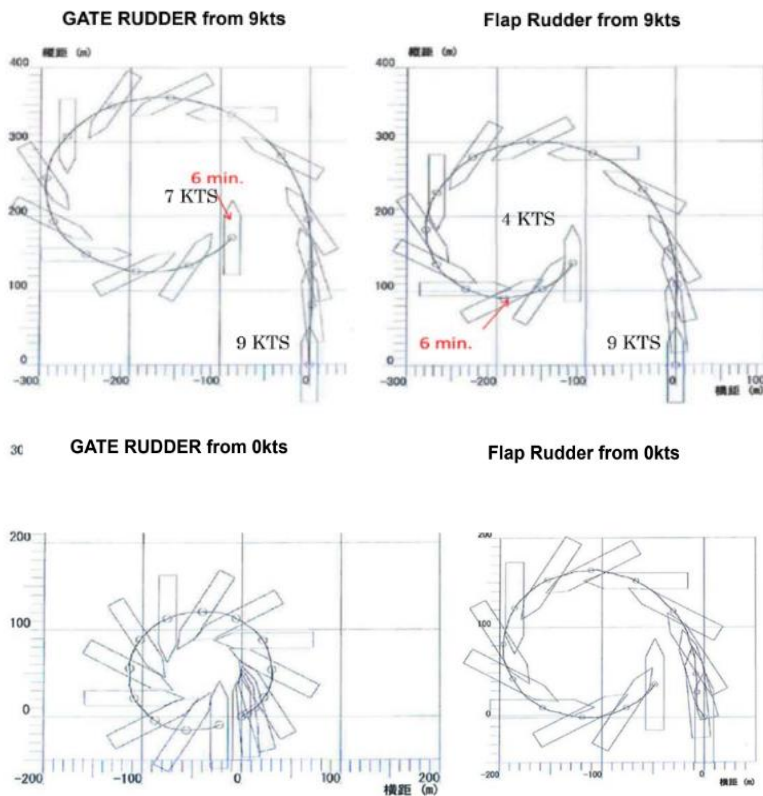
Gambar 13. Flap Rudder Kapal A (kiri) dan gate rudder Kapal B (kanan) (a) Hasil test spiral (*Sumber, Sasaki N dan Atlar M (2019)*)

Gerakan manuver pada kecepatan rendah dari uji coba laut pada kedua kapal ditampilkan pada Gambar 15, kapal dengan *gate rudder* menunjukkan gerakan melingkar yang lebih cepat daripada kapal dengan *flap rudder*. Distribusi beban pada bilah kemudi sudut 0° (kiri) dan 25° (kanan) ditampilkan pada Gambar 16, warna biru dan merah menunjukkan kekuatan hisap dan kekuatan tekanan. Gaya ke arah dalam (garis tengah kapal) dapat dilihat ketika sudut kemudi sama dengan nol.

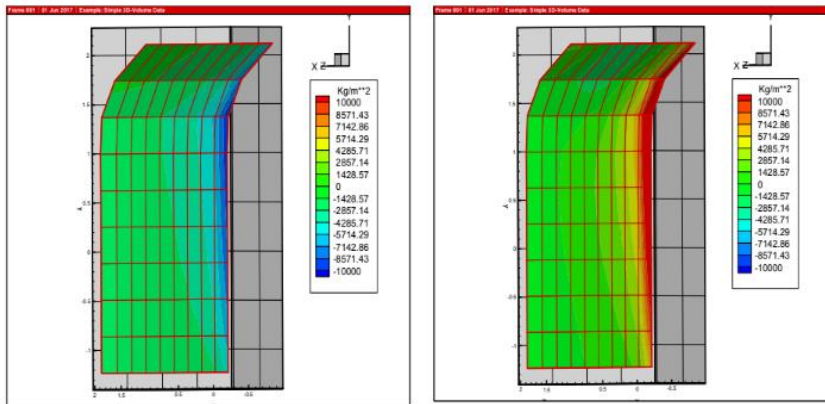


Gambar 14. Hasil uji kecepatan Kapal A (Flap Rudder) dan Kapal B (gate rudder) (Sumber, Sasaki N dan Atlar M (2019))

60



Gambar 15. Tes Lingkaran Skala Penuh untuk Kapal A dan B (Flap Rudder/gate rudder) (Sumber, Sasaki N dan Atlar M (2019))

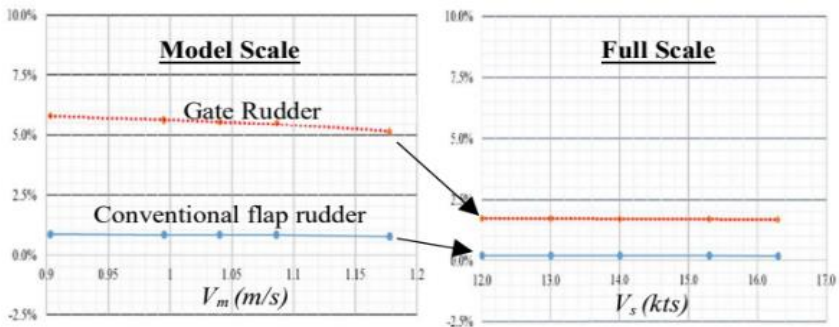


Gambar 16. Distribusi beban pada permukaan (Sumber, Sasaki N dan Atlar M (2019))

Penelitian dilanjutkan dengan mengeksplorasi efek skala dari drag rudder dengan menggunakan data milik kapal Shigenobu yang digerakkan oleh sistem *Gate Rudder*. Gambar 17 dan Tabel 8 menunjukkan hasil uji resistance Gate Rudder dan rudder konvensional sebagai perbandingan.

	Sakura	Shigenobu
LOA	111.4	
B	17.8	
D	5.24	
Mesin utama	3309kW x 220rpm	
Kemudi	Flap Rudder	Gatr Rudder
Pengiriman	Agustus 2016	Desember 2017

Tabel 7. Parameter kapal (Sumber, Sasaki N dan Atlar M (2019))



Gambar 17. Hambatan kemudi pada model dan fullscale

(Sumber, Sasaki N dan Atlar M (2019))

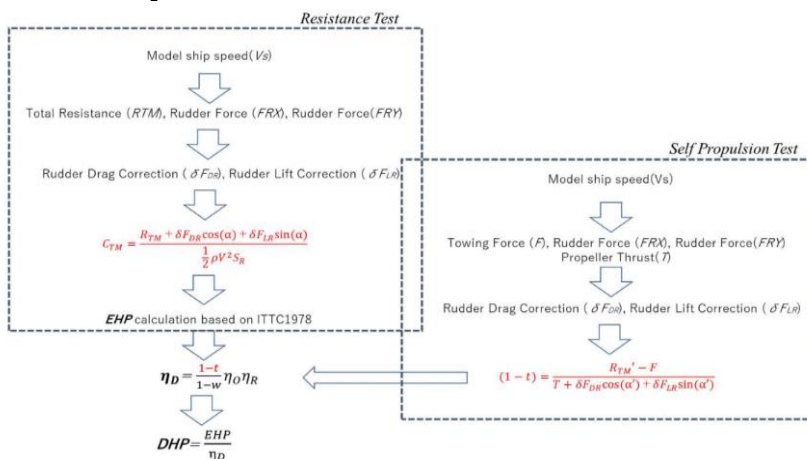
Tabel 8. Hambatan model dan fullscale

	Model		Fullscale	
	Flap Rudder	Gate Rudder	Flap	Gate
S_R	100%	157%	100%	157%
V_X (model)	0.40	0.98	0.40	1.00
C_F (model)	0.00944	0.00700	0.00281	0.0026
C_{RD} (model)	0.0095	0.0405	0.0080	0.0068
% pada	0.8	5.3	0.2	1.7

(Sumber, Sasaki N dan Atlar M (2019))

Komponen hambatan dari Gate Rudder adalah 3,6% (5,3% - 1,7%) dari hambatan kapal. sementara itu hanya 0,6% (0,8%-0,2%) untuk kasus kemudi konvensional, perbedaannya adalah 6 kali lipat yang disebabkan perbedaan kecepatan aliran di sekitar bilah kemudi pada setiap kondisi uji towing tank. *Drag rudder* pada *Gate Rudder* tidak dapat diukur secara langsung selama uji resistance, karena bilah-bilah dari Gate Rudder menghasilkan gaya angkat dan karenanya mengkompensasi drag rudder sementara kemudi konvensional hanyalah sumber drag yang berkontribusi pada hambatan kapal.

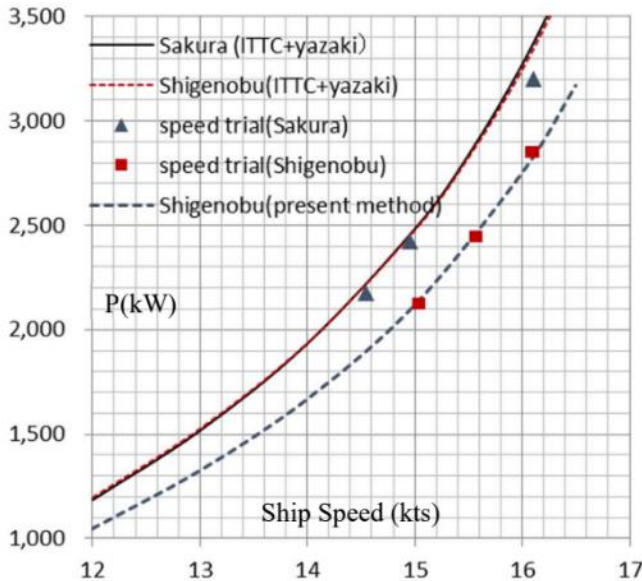
62



Gambar 18. Modifikasi prosedur powering untuk kapal dengan Sistem Propulsi Gate Rudder (Sumber, Sasaki N dan Atlar M (2019))

Horse power efektif dapat dihitung berdasarkan total resistance dengan memperhitungkan koefisien *drag rudder* dan koefisien *lift rudder* yang dikoreksi. Gambar 1`8 menunjukkan diagram alir dari powering baru yang diusulkan untuk *Gate Rudder* dengan memperhitungkan efek skala pada *drag* dan *lift* karakteristik gate rudder.

Gambar 19 menunjukkan perbandingan data untuk dua sister ship, salah satunya dilengkapi dengan sistem Gate Rudder (Shigenobu) sedangkan yang lain dengan kemudi konvensional (Sakura). Prediksi untuk Shigenobu, yang didasarkan pada metode yang diusulkan sangat sesuai dengan data terukur yang membenarkan koreksi efek skala yang diterapkan pada karakteristik *drag* and *lift* Gate Rudder



Gambar 19. Pengaruh koreksi drag/lift pada prediksi kurva daya dan hasil sea trial (Sumber, Sasaki N dan Atlar M (2019))

Kesimpulan

Pertimbangan-pertimbangan terhadap *environmental effects* (misalnya *low noise, vibrations* dan *emissions*) telah memberikan dampak pada rancangan perkembangan *unconventional propellers*

and rudders. Kinerja MCP meningkat efisiensi sebesar 1,1% sekaligus meningkatkan katahanan struktur. Desain propulsor RSN menghasilkan efisiensi propulsor yaitu 69%, dengan perhitungan CFD dan data uji model Untuk propulsor skala penuh, perhitungan CFD menghasilkan efisiensi ~75%, dan perbedaan ini disebabkan oleh faktor skala. Fungsi utama CCPP adalah membangkitkan gaya manuver pada kecepatan rendah dan bahkan nol. Hasil eksperimen untuk validasi numerik mempunyai perbedaan yang signifikan salah satu kondisi, namun, tren yang sama pada ketiga kondisi dan besaran gaya pada kondisi dua kondisi yang lain hampir sama yaitu sekitar 25% dari besaran gaya kondisi yang lain. Sistem propulsi inovatif *Gate Rudder* pada uji coba kapal kontainer 110m mengkonfirmasi kinerja superior dengan penghematan energi yaitu 14% dibandingkan kapal yang sejenis (*sister ship*) yang dilengkapi dengan konvensional (flap), serta memiliki karakteristik kinerja manuver yang unggul. Penghematan energi yang diprediksi adalah 8-10% dari studi uji model dan studi numerik, selisihnya masih sangat besar dan hal ini harus diselidiki dengan penelitian lebih lanjut. Metode baru dan lebih praktis untuk prediksi daya untuk kapal yang dilengkapi dengan sistem *Gate Rudder*. Efek skala dari *Gate Rudder* relatif besar dibandingkan dengan kemudi konvensional dan perbedaan antara skala model dan skala penuh pada komponen drag dari *Gate Rudder* adalah 3,6% (5,3% -1,7%) dari hambatan kapal. Sementara itu hanya 0,6% (0,8%-0,2%) untuk kasus kemudi konvensional.

References

Arno Dubois, Zhi Q Leong, Hung D Nguyen, Jonathan R Binns. (2017). Development of a Numerical Model for the Hydrodynamic Performance Analysis of a Collective and Cyclic Pitch Propeller. *The Fifth Int Symp on Mar Prop*, 203-210.

- Fanlong Chen, Liwu Liu, Xin Lan, Qinyu Li, Jinsong Leng and Yanju Liu. (2017). The Study on the Morphing Composite Propeller for Marine Vehicle. Part I : Design and Numerical Analysis. *Comp Struc* 168, 746-757.
- ITTC. (2017). Propulsion Committee. *Proceeding of 28th conference*, 1, 72-79.
- Nikolay V, Marinich, Aleksey Yu, Yakovlev, Nikolay A. Ovchinnikov, and Tomi Veikonheimo. (2017). Multicomponent Design of Rotor-Stator-Nozzle (RSN) Propulsor on Azipods. *7th Int Conf on Comp Meth in Mar Eng, MARINE* , 496-507.
- Sasaki, N. , Kuribayashi, S. , Atlar, M. (2018). Gate Rudder. *3rd Int Symp Arc and Mar (INT-NAM)*,
- Sasaki, N., et.al. (2017). Measurement and Calculation of Gate Rudder Performance. *5th Int Conf on Adv Model Meas Tech for the Mar Indy (AMT)*.
- T-Q Truong, Y Toda. (2019). The CFD Study of Rudder-Bulb-Fin System in Changing Cambered Foil and AOA Applied to KVLCC2 Tanker. *11th Int Work on Ship and Mari Hydro*.
- W N Htay, T Q Truong, Y Toda. (2020). A CFD based Comparison Study of Conventional Rudder and Rudder with Bulb-Fins System of KVLCC2 in Waves. *Proc of the Thirtieth Int Oce and Pol Eng Conf*. 3377-3384.

WELDING PROSES PADA INDUSTRI GALANGAN KAPAL

Mochamad Zaed Yuliadi
Universitas Muhammadiyah Surabaya

Abstrak

Pengelasan mempunyai peranan yang sangat penting di industri perkapalan, pengelasan pada kapal harus memenuhi persyaratan-dan sesuai dengan peraturan klasifikasi. Hal ini karena kapal selain mendapat gaya-gaya tekan hidrostatis karena terapung di atas air, kapal juga mendapatkan gaya tarik, tekan, tekuk, puntir, dan bahkan gabungannya selama berlayar. Dari aspek kelemahan dan keunggulan masing-masing proses las, maka yang dipilih adalah yang memberikan keunggulan misalnya pengelasan yang cepat dan tentunya tidak meninggalkan aspek kualitas yang memenuhi standar. Proses pengelasan biasa yang umum dipakai pada konstruksi kapal, adalah jenis las busur listrik antara lain Shielded Metal Arc Welding (SMAW-111), Gas Metal Arc Welding (GMAW), Flux Cored Arc Welding (FCAW-136), Gas Tungsten Arc Welding (GTAW-141) dan Submerged Arc Welding (SAW-121). Namun demikian terdapat proses las yang lain yang ramah lingkungan yaitu Friction Stir Welding (FSW). Proses las tersebut tanpa menggunakan busur listrik maupun konsumabel las sehingga

tidak menghasilkan asap, dan percikan las. sehingga bisa dikatan proses las menggunakan prinsip teknologi hijau. Prinsip kerja dan nama-nama bagian peralatan masing-masing proses las, berikut dasar pertimbangan dalam memilih salah satu proses las yang tepat diilustrasikan dalam karya tulis ini. Dalam memilih macam proses las harus dapat meningkatkan produktifitas pekerjaan pengelasan namun tetap dijaga berkualitas yang memeuhi standard

Kata kunci : kapal, las busur listrik, produktifitas

Pendahuluan

Proses pengelasan yang umum dipakai pada konstruksi industri berat seperti konstruksi kapal, adalah las busur listrik SMAW-111, SAW-121, GTAW-141, GMAW-135, dan FCAW-136. Dalam melaksanakan pengelasan untuk konstruksi kapal ataupun bangunan lepas pantai harus sesuai dengan persyaratan dari Badan Klasifikasi Kapal misalnya di Indonesia adalah Biro Klasifikasi Indonesia. (BKI, Part 1, Vol.VI, 2021). Hal tersebut di atas diperlukan untuk menyakinkan kelayakan, kekuatan dan keselamatan konstruksi berat tersebut akibat gaya-gaya yang membebani konstruksi. Untuk memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan baik oleh pelanggan/pemilik atau badan standarisasi, maka teknik - teknik dan prosedur pengelasan pada konstruksi kapal harus mengikuti aturan – aturan yang dipersyaratkan.

Seperti diketahui bahwa volume pekerjaan pengelasan pada konstruksi kapal, maka dari itu diperlukan pemahaman tentang prinsip kerja, serta aspek kelemahan dan keunggulan dari masing-masing proses las. Dengan demikian akan dapat dipilih sekaligus ditentukan proses las yang dapat meingkatkan produktifitas pekerjaan pengelasan. pada akhirnya kapal dapat diselesaikan dan diserahkan tepat waktu, dengan hemat anggaran biaya serta kualitas yang memenuhi standard.

Hal-hal yang dipertimbangkan dalam pemilihan proses las: yang sesuai dan tepat adalah

1. Bentuk konstruksi (sederhana, atau kompleks)
2. Ukuran konstruksi (besar, kecil)
3. Ketebalan pelat (tebal atau tipis)
4. Posisi pengelasan (datar, vertikal, atau di atas kepala/overhead)
5. Tempat pekerjaan (di dalam bengkel atau di luar udara terbuka)

Sebagai gambaran awal untuk memilih proses las pada pekerjaan pengelasan yang dilakukan di udara terbuka, lebih detail lagi di sekitar pantai yang mana hembusan angin sangat kencang, maka secara cepat dapat dipilih proses las yang tahan terhadap angin yaitu SMAW-111, SAW-121, dan FCAW-136. Sebaliknya proses las yang sensitif terhadap hembusan angin adalah GMAW-135. Proses las ini beresiko dan cenderung menghasilkan cacat pengelasan berlubang (*porosity*).

Cacat las dapat disebabkan oleh salah satunya adalah kesalahan dalam memilih proses las, Cacat las harus diperbaiki (*repair*) yang mana memerlukan selain biaya yang tidak sedikit, juga yang sangat penting adalah menambah waktu untuk penyelesaian kapal. Hal ini dapat mengakibatkan penyerahan kapal dapat terlambat dari waktu yang ditentukan. Pada akhirnya berpotensi terjadinya denda yang tidak sedikit. Dengan memilih sekaligus menentukan proses pengelasan yang tepat maka dapat dihasilkan pengelasan yang optimal dan dapat meningkatkan produktivitas pekerjaan yang pada akhirnya dapat menghemat biaya sekaligus terhindar dari denda karena keterlambatan penyerahan kapal.

Macam-Macam Las Busur Listrik

Dalam memberikan gambaran tentang istilah atau terminology proses pengelasan, berikut dibawah ini adalah sebutan macam-macam proses pengelasan dan angka referensi yang ditunjukkan oleh

International Organisation for Standardization (ISO) dan juga yang disampaikan oleh American Welding Society (AWS)

Tabel 1. Kode standard las busur listrik

ISO 4063	EROPA (EN ISO 4063)	AMERIKA (AWS A3.0M/A3.0)	PROSES LAS
111	MMAW		Manual Metal Arc Welding
		SMAW	Shielded Metal Arc Welding
114	FCAW		Flux Cored Wire Metal Arc Welding
		FCAW	Flux Cored Wire Welding
121	SAW		Submerged Arc Welding
		SAW	Submerged Arc Welding
131	MIG		Metal Inert Gas Welding
		GMAW	Gas Metal Arc Welding
135	MAG		Metal Active Gas Welding
		GMAW	Gas Metal Arc Welding
136	FCAW		Flux Cored Wire Metal-Arc Welding with Active Gas Shield
		FCAW	Flux Cored Wire Welding
137	FCAW		Flux Cored Wire Metal-Arc Welding with Inert Gas Shield
		FCAW-S	Flux Cored Wire Welding
141	TIG		Tungsten Inert Gas welding
		GTAW	Gas Tungsten Arc Welding

Telah disebutkan tentang macam-macam proses las pada paragraf sebelumnya, berikut ini diilustrasikan masing-masing proses las busur listrik yang umum diaplikasikan untuk penyambungan konstruksi kapal

Shielded Metal Arc Welding (SMAW) - 111

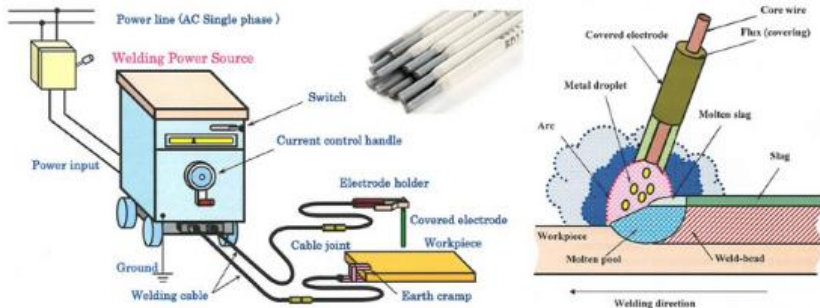
Prinsip kerja Las SMAW adalah logam induk atau benda kerja dileburkan dengan energi panas yang dihasilkan oleh busur listrik. Sedangkan busur listrik tersebut terjadi bila ujung elektroda

didekatkan pada benda kerjanya. Elektoda terdiri dari kawat pejal dan dibungkus oleh selaput yang dinamakan fluks. Energi panas dari ujung elektrode sekaligus meleburkan fluks sehingga menghasilkan gas yang berfungsi melindungi logam las cair. Selama proses pendinginan fluks yang ikut melebur berubah menjadi terak yang melindungi logam las dari kontaminasi udara luar,

Nama bagian utama peralatan las SMAW

Seperti yang digambarkan di bawah ini, nama bagian peralatan las SMAW adalah:

1. Mesin Las (Power Source)
2. Kabel Las (Welding cable)
3. Stang Las (Electrode holder)
4. Kawat las (Covered Electrode)
5. Klem (Earth clamp)



Gambar 1. Peralatan las SMAW

Keunggulann dan kelemahan las SMAW

Keunggulan

1. Murah
2. Peralatan sederhana, mudah dioperasikan
3. Dapat dipakai untuk pengelasan pelat tebal
4. Peralatan portabel
5. Dapat menjangkau di ruangan sempit
6. Paling unggul untuk posisi pengelasan di atas kepala (Overhead-4G/PE)

Kelemahan

1. Lambat, diperlukan waktu untuk sering mengganti setiap elektrode yg habis, juga diperlukan waktu dan tenaga untuk membersihkan terak
2. Jenis elektrode hidrogen rendah perlu penyimpanan khusus yaitu harus dipanaskan di dalam oven sebelum dipergunakan
3. Mengakibatkan sampah sisa elektrode yang nggak habis terpakai

Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) - 141

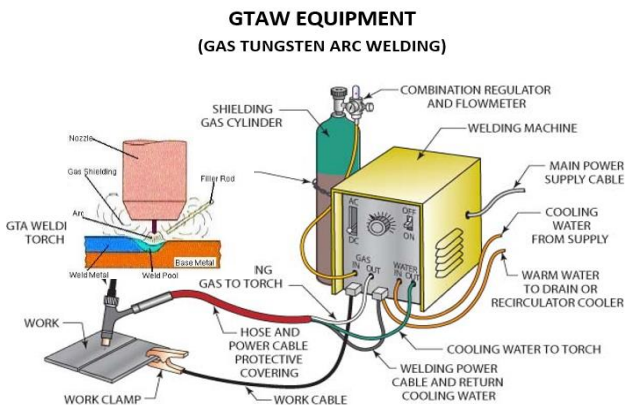
Prinsip kerja GTAW-141 adalah sebuah proses pengelasan busur listrik yang menggunakan elektroda tak terumpan atau tidak ikut mencair yaitu tungsten elektrode. Tungsten ini hanya berfungsi sebagai penghasil busur listrik saat didekatkan sentuhan dengan benda kerja, sedangkan untuk logam pengisi adalah logam las berbentuk kawat pejal (filler rod).

72

Nama bagian utama peralatan las GTAW

1. Mesin Las (Welding Machine).
2. Welding Torch.
3. Tabung Gas (Shielding Gas Cylinder).
4. Tungsten Elektrode.

Regulator Tabung Gas. (Combination Regulator and Flowmeter)



Gambar 2. Peralatan las GTAW

Keunggulan

1. Kualitas baik
2. Tidak ada spatter. slag
3. Dapat menggunakan atau tanpa kawat las pengisi
4. Memungkinkan mengatur root pass yang baik
5. Dapat dimekanisasikan untuk percepatan pengelasan
6. Hampir semua metal dpt disambung

Kelemahan

1. Deposition rate rendah (lambat)
2. Untuk pelat tebal (>10mm) kurang ekonomis
3. Tidak bagus pada daerah terbuka (angin kencang)
4. Pengaturan variabel las lebih rumit

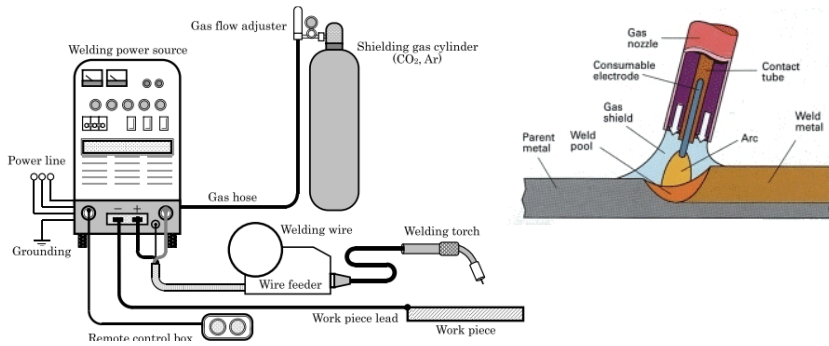
Gas Metal Arc Welding (GMAW) – 135

GMAW-135 adalah proses las menggunakan kawat las pejal (solid wire electrode) yang secara mekanik diumpangkan. Busur las yang terbentuk di jaga antara elektroda dan benda kerja. Hal ini GMAW dikategorikan proses las semi-otomatis. Gas pelindung akan melindungi busur listrik dan kawah las dari udara. GMAW dengan diklasifikasikan menjadi 2 yaitu yang mana tergantung dari jenis gas pelindungnya. GMAW dengan pelindung gas Argon disebut pengelasan Metal Inert Gas (MIG), sedangkan GMAW dengan pelindung gas aktif CO₂ atau campuran dengan gas Argon, pengelasannya disebut Metal Active Gas (MAG) Kawat las digunakan sebagai elektroda dan akan mencair pada saat yang bersamaan dengan busur menyala. Kawat elektroda yang mencair akan bercampur di dalam kawah las untuk membentuk deposit logam las.

Nama bagian utama peralatan las GMAW

1. Mesin Las (Welding Power Source)
2. Welding Torch.
3. Tabung Gas. (Shielding Gas Cylinder)

4. Regulator Tabung Gas. (Gas Flowmeter)
5. Kawat las pejal (solid wire)
6. Pengumpan kawat las (wire feder)



Gambar 3. Peralatan las GMAW

Keunggulan

1. Deposition rate tinggi
2. Kecepatan pengelasan tinggi
3. Pengumpanan solid wire menerus tanpa banyak start & stop
4. Pembersihan slag minim

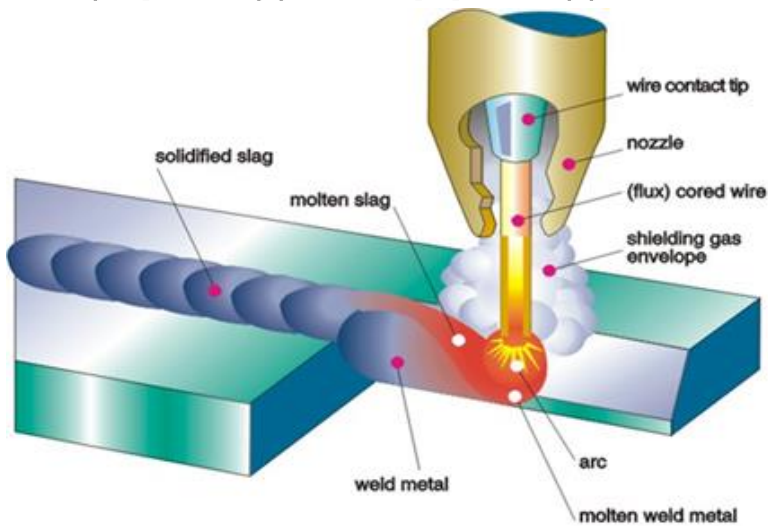
Kelemahan

1. Peralatan lebih kompleks
2. Sulit menjangkau posisi sempit dan sulit
3. Busur las harus terlindung dari hembusan angin
4. Penggunaan terbatas pada indoor
5. Outdoor, busur las harus dilindungi dgn protective shield

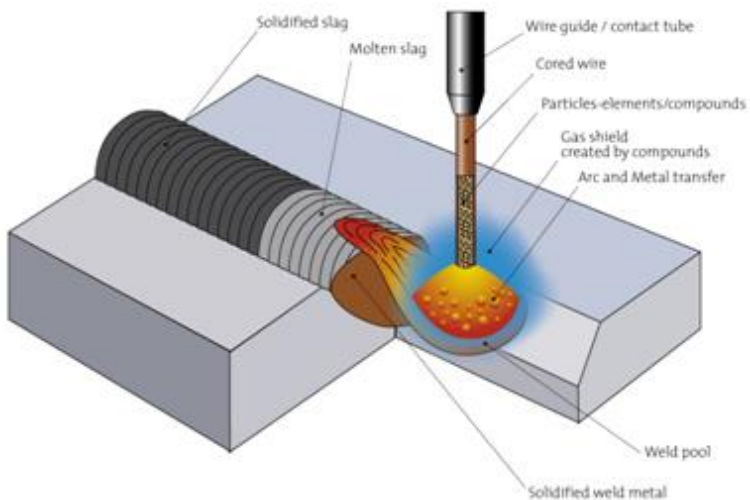
Flux Cored Arc Welding (FCAW)-136

Pada prinsipnya proses las FCAW-136 mirip dengan proses las GMAW yang sudah didiskusikan pada bab sebelumnya. Yang membedakan adalah jenis kawat lasnya, GMAW adalah solid wire, sedangkan FCAW adalah flux cored wire. Gas pelindung FCAW dihasilkan dari fluks yang ada di dalam inti kawat las (self shielded). Namun pada umumnya FCAW juga menggunakan gas pelindung

tambahan yaitu gas CO₂. Di bawah ini adalah gambar Flux Cored Wire dengan pelindung gas dan tanpa pelindung gas



Gambar 4a. Flux Cored Wire dengan gas pelindung



Gambar 4b. Flux Cored Wire tanpa gas pelindung (Seld Shielded)
Keunggulan

1. Keuntungan secara metalurgi, bahwa logam las dapat ditingkatkan sifat-sifatnya dengan fluks yang mengandung elemen-elemen paduan

2. Gas pelindung dihasilkan dari pembakaran fluks, menjadikan tahan terhadap hembusan angin
3. Terak yang terbentuk dapat menurunkan kecepatan pendinginan logam las
4. Angka tingkat meleburnya elektroda (deposition rate) lebih tinggi dari proses las SMAW maupun GTAW
5. Kecepatan pengelasan tinggi
6. Pengumpanan solid wire menerus tanpa banyak start & stop
7. Produktivitas pengelasan tinggi

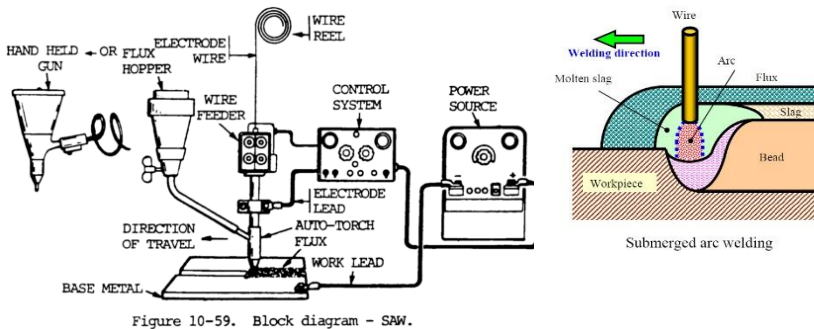
Kelemahan

1. Peratalan lebih kompleks
2. Lebih mahal
3. Sulit menjangkau posisi sempit dan sulit
4. Penggunaan terbatas pada indoor
5. Diperlukan waktu dan tenaga untuk membersihkan terak

76

Submerged Arc Welding (SAW) - 121

Prinsip kerja proses las SAW adalah busur las yang terjadi dilindungi oleh fluks berbentuk butiran pasir. Sebagian fluks, karena panasnya busur las, ikut meleleh yang berfungsi melindungi hasil pengelasan dari pengaruh udara luar sampai logam las pada suhu ruangan. Begitu juga halnya, fluks yang ikut meleleh akan menjadi terak. Nama bagian utama peralatan las SAW



Gambar 5. Diagram SAW

Keunggulan

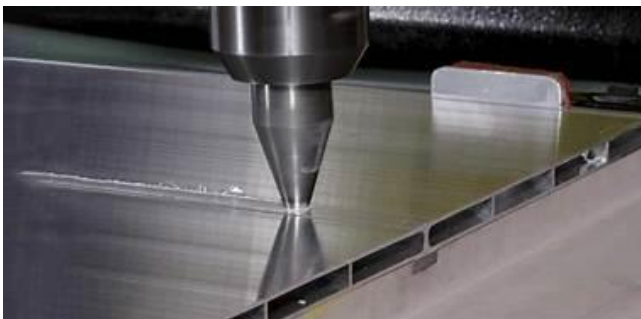
1. Deposition rate paling tinggi
2. Kualitas baik
3. Tidak ada asap
4. Kecepatan pengelasan tinggi
5. Produktivitas pengelasan tinggi

Kelemahan

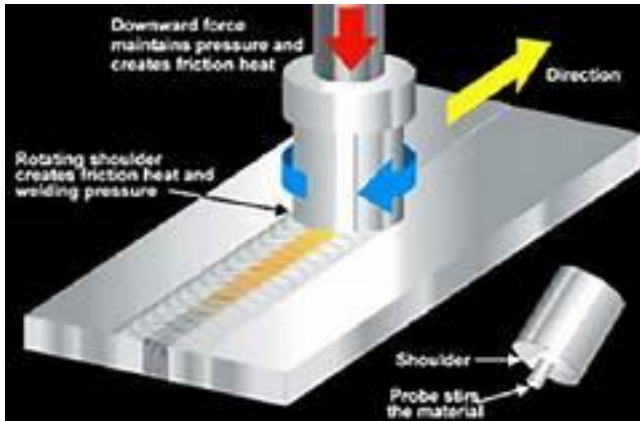
1. Peralatan lebih besar dan tidak protabel
2. Lebih mahal
3. Sulit menjangkau posisi sempit
4. Terbatas pada umumnya posisi datar

Friction Stir Welding (FSW)

Friction Stir Welding (FSW) adalah proses pengelasan yang paling ramah lingkungan diantara proses pengelasan lain yang sudah diilustrasikan pada bab-bab sebelumnya. Hal ini dikarenakan proses penyambungannya tanpa menggunakan kawat las pengisi, fluks dan gas pelindung yang dapat menghasilkan asap yang berbahaya. Friction stir welding adalah nama untuk proses penyambungan material, tanpa melelehkan bahan benda kerja tersebut melalui penggunaan tool yang diputar. Panas dihasilkan dari gesekan antara tool yang diputar dan material benda kerja tersebut. Hal ini menyebabkan pelunakan benda kerja di sekitar tool dan terjadi pencampuran mekanis dari benda kerja.



Gambar 6a Friction Strir Welding



Gambar 6b. Tool Friction Strir Welding

Keunggulan

1. Distorsi rendah
2. Kualitas baik
3. Tidak memerlukan konsumabel
4. Aman dan bersih
5. Tidak ada asap
6. Tidak ada percikan las

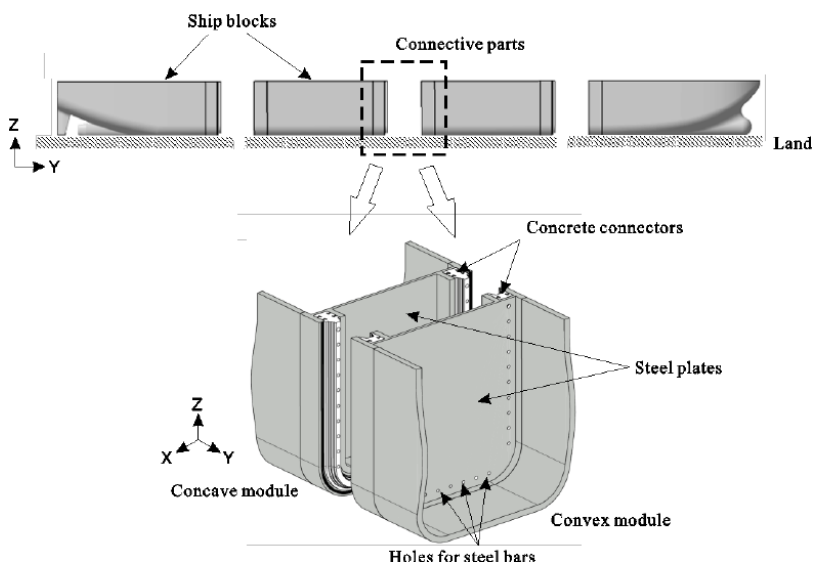
Kelemahan

1. Toleransi gap harus presisi
2. Terjadi lubang diujung pengelasan
3. Peralatan mahal

Proses Pembangunan Kapal Dan Pengelasan

Sarana dan prasarana/ fasilitas galangan kapal dapat mempengaruhi metode pembangunan kapal baru. Metode pembangunan yang dipilih tentunya yang mempunyai keuntungan-keuntungan sehingga pembangunan kapal baru dapat dipermudah dan dipercepat, produktivitas dapat ditingkatkan namun tetap menjaga kualitas yang memenuhi standard. Metode yang umum dipilih adalah metode pembangunan dengan sistim blok. Hal ini memungkinkan pekerjaan blok-blok kapal dapat dikerjakan secara

pararel diberbagai lokasi kerja. Tentunya waktu yang diperlukan untuk assembly blok jauh lebih singkat. Setelah selesai diperiksa dan dinyatakan sesuai standard oleh surveyor baik dari klasifikasi maupun dari owner maka selanjutnya blok-blok tersebut diangkat dan diangkut menuju lokasi dok untuk dilakukan penyambungan blok.



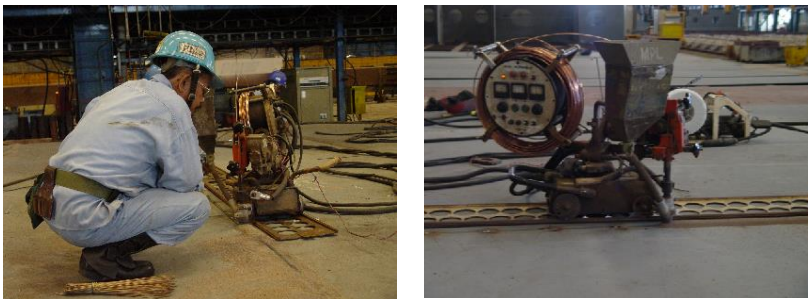
Gambar 7. Pembangunan Lambung Kapal Sistem Blok

Ditinjau dari aspek pengelasan, pembangunan lambung kapal dengan sistem blok mempunyai beberapa keuntungan, diantaranya adalah:

- a. Waktu pembangunan dapat lebih cepat dan angka produktivitas meningkat. Hal ini sangat memungkinkan menggunakan proses las otomatis
- b. Kualitas pengelasan dapat dijaga karena pengelasan dilakukan pada posisi datar dan lurus
- c. Pengawasan terhadap pembangunan kapal khususnya inspeksi las menjadi lebih mudah dilakukan
- d. Aspek keselamatan dapat terjaga, karena para juru las maupun operator las bekerja di tempat yang lebih terang, tidak panas dan

nyaman. Berikuiy juga dapat meminimalkan pekerjaan penge-
lasan di ketinggian dan juga ruang sempit

Dengan memperhatikan sifat proses pembangunan sistem blok
berikut juga mempertimbangkan keunggulan dan kelemahan
masing-masing proses las maka pekerjaan pengelasan pada tahap sub
assembly khususnya pengelasan pelat lambung dan geladak maka
proses las yang dipilih adalah SAW dengan posisi datar. Hal ini
ditentukan karena untuk pengelasan pelat tebal dan posisi datar
adalah keunggulan dari proses las tersebut.



Gambar 8. Pengelasan SAW pada pelat geladak kapal

Penggabungan blok-blok (erection joint) dilakukan dengan
menggunakan proses las FCAW- Hal ini dipilih melalui pertimbang-
an bahwa proses las tersebut mempunyai keunggulan pengelasan
menerus, semi otomatis, deposition rate tinggi, dan yang tidak kalah
pentingnya adalah toleran terhadap hembusan angin.

Proses las yang umum dipakai di galangan kapal adalah,
pengelasan busur listrik SMAW, GTAW, GMAW, FCAW, dan
SAW. Masing-masing mempunyai karakteristik baik keunggulan
dan kelemahannya. Strategi untuk memilih dan menentiuakan
macamnya, banyak hal yang harus dipertimbangkan antara lain
geometri konstruksi (sederhana, atau kompleks), dimensi konstruksi
(besar, kecil), ketebalan pelat (tebal atau tipis), posisi pengelasan
(datar, vertikal, atau di atas kepala/overhead), lokasi pekerjaan (di
dalam bengkel atau di luar udara terbuka). Untuk pekerjaan

pengelasan pelat tebal, lurus dan posisi datar misalnya pengelasan lambung dan geladak kapal maka SAW adalah yang paling unggul dibandingkan dengan proses las lainnya. Sedangkan untuk pekerjaan berlokasi di udara terbuka (dock) misalnya pengelasan penyambungan blok kapal maka pertimbangan untuk memilih dan menentukan proses las yang dipakai adalah dengan mempertimbangkan proses las yang toleran terhadap hembusan angin untuk itu dipilih adalah dapat menggunakan SAW, FCAW, atau kombinasi keduanya. Namun untuk posisi datar SAW jauh lebih unggul dibandingkan FCAW.

Kesimpulan

Dengan mengaplikasikan metode pembangunan kapal sistem blok dan sekaligus mengoptimalkan proses las SAW dan FCAW di atas maka pekerjaan pengelasan konstruksi kapal dapat diselesaikan dengan cepat, efisien dan produktivitas meningkat. Kedua proses las tersebut diatas menggunakan kawat las yang terumpan secara menerus, sehingga tidak menimbulkan sampah potongan-potongan kawat las yang tidak terpakai. Proses las SAW mempunyai karakteristik busur las terendam di dalam fluks, sehingga tidak menimbulkan sinar ultra violet maupun infra red yang membahayakan kulit maupun mata. Berikut juga pengelasan SAW tidak menimbulkan asap las yang berbahaya bagi pernafasan sekaligus tidak menambah polusi udara,

References

- Kampuh Welding Indonesia (2020). Teknik Pengelasan Kapal, Alat Berat dan Bangun Baja.
- American Petroleum Institute (API RP 577 3RD ED (2020) Welding Processes, Inspection, and Metallurgy; Third Edition)

The Japan Welding engineering Society (2008), Advanced Welding and Joining Technologies, Chapte 1 Welding Processes and Equipment, First Edition
Biro Klasifikasi Indonesia (2021)
Rules For Classification And Construction-Part 1 Seagoing Ships
Volume VI Rules for welding
International Organization for Standardisation (ISO 4063: 2015)
Welding and allied processes — Nomenclature of processes and reference numbers
American Welding Society (AWS: A3.0M/A3.0:2020) Standard
Welding Terms and Definition; Including Terms For Adhesive Bonding, Brazing, Soldering, Thermal Cutting, and Thermal Spraying

SISTEM DISTRIBUSI DC UNTUK KELISTRIKAN HIBRIDA DAN OPTIMALISASI KONSUMSI BAHAN BAKAR DI KAPAL

Indra Ranu Kusuma

Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi
Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Abstrak

Bab ini fokus kepada kelistrikan hibrida dengan menggunakan sistem distribusi DC dan optimalisasi konsumsi bahan bakar diesel engine penggerak generator di kapal. Simulasi aliran beban dilakukan dengan menghitung perhitungan beban listrik berdasarkan operasi kapal. Kemudian, optimasi terhadap konsumsi bahan bakar dari *diesel engine* dilakukan dengan menggunakan Particle Swarm Optimization (PSO). Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem distribusi arus searah telah berhasil diterapkan pada Kapal trimaran bertenaga hybrid. Dalam kondisi berlayar, kebutuhan daya nyata keseluruhan adalah 20.201 MW, daya reaktif adalah 7.757 Mvar dan konsumsi bahan bakar total sebesar 3.495,123 Kg/jam. Pada kondisi manuver, kebutuhan daya aktual sebesar 21.251 MW, daya reaktif sebesar 8,16 Mvar dan konsumsi bahan bakar total sebesar 36.572,224 kg/jam. Pada kondisi bongkar muat, kebutuhan daya aktual pada kondisi operasi ini adalah 0,616 MW dan daya reaktif sebesar 0,292 Mvar. Pada kondisi masuk pelabuhan, daya yang

dibutuhkan sebesar 12,906 MW untuk daya nyata dan 4,699 MW untuk daya reaktif dan konsumsi bahan bakar total sebesar 21.109 kg/jam. Hasil menunjukkan bahwa konsep sistem distribusi arus searah telah berhasil dikembangkan untuk menggabungkan generator diesel dengan energi terbarukan laut untuk memastikan bahwa daya yang didistribusikan tetap memadai dan optimum dalam konsumsi bahan bakar selama operasi.

Kata kunci: Sistem Distribusi DC, Sistem Kelistrikan Hibrida di Kapal, Particle swarm optimization, Kapal Trimaran.

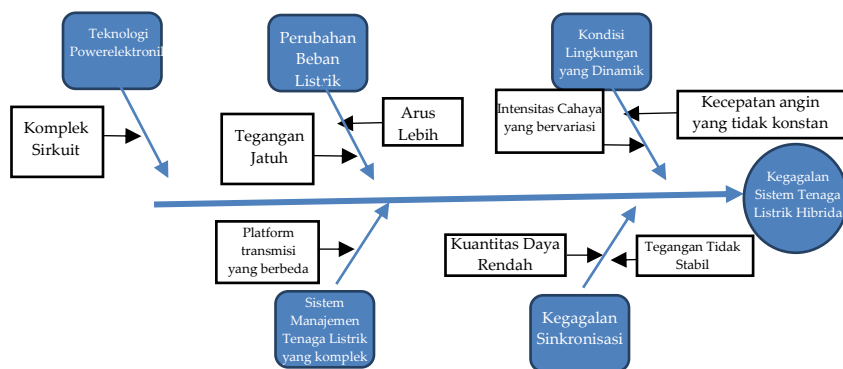
Pendahuluan

Pengembangan kapal ramah lingkungan sangat diperlukan dalam menghadapi masalah terhadap pemanasan global (Geertsma et al., 2017). Salah satu faktor dari kapal ramah lingkungan adalah memiliki sistem kelistrikan kapal yang mempunyai konsumsi bahan bakar optimal dan emisi yang sesuai syarat International Maritime Organization (IMO) dari diesel penggerak generator (IMO MARPOL Annex VI, 2013).

Strategi manajemen daya di kapal menjadi fokus utama dalam mengurangi polusi yang dihasilkan kapal. Salah satu strategi dalam mengurangi polusi ini dengan pengembangan sistem kelistrikan hibrida di kapal (Geertsma et al., 2017). Penerapan sistem kelistrikan hibrida di kapal mempunyai peranan penting terhadap penanganan masalah lingkungan di laut. Sistem kelistrikan hibrida merupakan konsep penggunaan dua atau lebih jenis sumber energi yang berbeda seperti diesel generator dengan baterai, diesel generator, baterai dan energi terbarukan seperti turbin angin atau sel surya. Sistem pembangkit listrik hibrida menawarkan beberapa keuntungan yaitu meminimalkan biaya operasi dan emisi (Liu et al., 2017).

Akan tetapi, penggunaan energi terbarukan memiliki kompleksitas yang tinggi dan menciptakan ketidakstabilan kelistrikan (Lan et

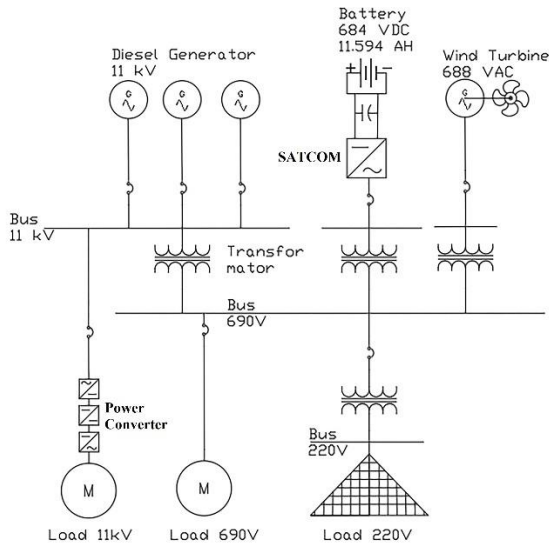
al., 2016; Muljadi & McKenna, 2001). Hal ini dikarenakan energi terbarukan memiliki sifat bergantung pada keadaan alam. Kecepatan dan arah angin tidak konstan sepanjang waktu dan juga kuat sinar matahari bervariasi sepanjang hari dan pergeseran garis edarnya yang selalu berganti tiap tahun. Hal ini menyebabkan tegangan tidak akan konstan dan dapat mempengaruhi kualitas daya. Selain stabilitas tegangan, kualitas daya listrik hibrida juga mengalami tantangan seperti tingkat kompleksitas yang tinggi dalam mensinkronkan dua sumber energi seperti diesel generator yang menghasilkan sumber arus AC dengan baterai atau sel surya yang menghasilkan DC. Tegangan yang berfluktuasi menyebabkan sinkronisasi tidak mudah di capai. Gambar 1.1 menunjukkan beberapa kelemahan pada sistem kelistrikan hibrida.



Gambar 1. Kelemahan Sistem Tenaga Listrik Hibrida (Kusuma et al., 2021)

Untuk mengatasi masalah dalam sistem kelistrikan hibrida, penggunaan perangkat elektronika daya dan teknologi pengendalian diterapkan. Konsep yang sudah terbukti di dunia marine adalah konsep FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*) seperti UPFC (*Unified power flow controller*), IPC (*Interphase power controller*), SVC (*Static VAR compensator*), STATCOM (*Static compensator*) (Bhowmick, 2016).

Konsep FACTS seperti di tunjukkan pada gambar 1.2 adalah sistem kendali yang digunakan untuk menjaga stabilitas dan meningkatkan kualitas daya. Perangkat FACTS terhubung pada terminal output dari inverter sebelum ke beban. Perangkat FACTS ini membantu dalam mengurangi terjadinya harmonisasi dalam bentuk gelombang sehingga meningkatkan kualitas daya (Bhowmick, 2016). STATCOM digunakan sebagai perangkat kompensasi statik yang bersinkronisasi secara paralel untuk mengurangi kompensasi daya reaktif, memperbaiki kondisi sistem agar stabil dan juga menjaga stabilitas transien. Alat ini digunakan baik untuk kompensasi daya aktif dan aktif. Sistem transmisi dengan konsep FACTS diatas memerlukan penempatan seperti switchgears dan transformer yang besar. Sehingga, penghematan ruangan dan pengaturan peletakkan menjadi lebih sulit di kapal.

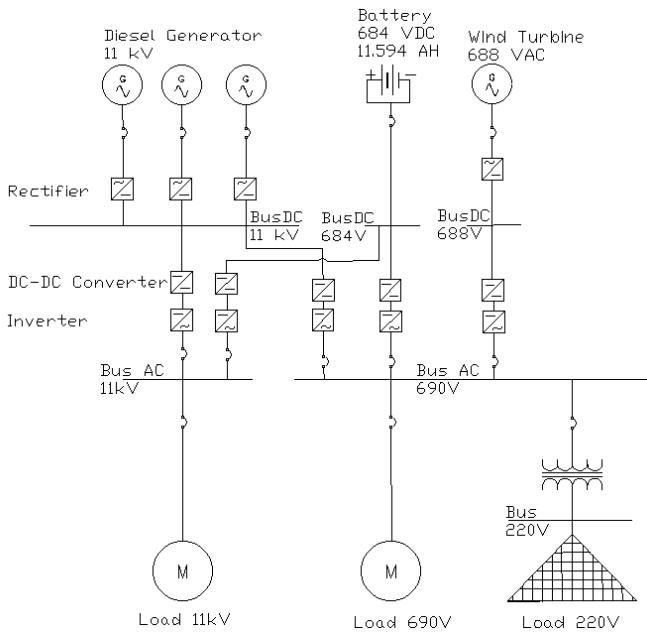


Gambar 2. Jaringan Listrik Hibrida dengan Konsep FACTS

Namun pada perkembangannya, sistem distribusi listrik AC memiliki beberapa kekurangan. Diantaranya, metode yang terlalu kompleks dalam proses sinkronisasi generator, adanya losses akibat arus reaktif, dan adanya batasan frekuensi yang mengharuskan

generator beroperasi dalam kondisi kecepatan konstan. Sehingga penghematan bahan bakar pada 2 studi kasus yaitu adalah pembagian beban seimbang dan pembagian beban dengan metode optimasi. Hasilnya dengan kasus pembagian beban menggunakan metode optimasi pada sistem distribusi AC hanya mampu melakukan penghematan 0-4 kg/hari pada mode operasi berlayar (Capasso et al., 2016). Pada beberapa penelitian yang dilakukan, secara keseluruhan menggunakan studi kasus berupa kapal dengan penggerak elektrik yang memiliki mode operasional dynamic positioning (Hansen et al., 2001). Dikarenakan pada kapal tersebut beban generator akan sangat bervariasi bergantung dengan beban motor propulsi yang diakibatkan oleh variasi kecepatan servis kapal. Sedangkan pada kapal berpengerak mekanis, operasional generator hanya digunakan untuk menyuplai beban selain kebutuhan propulsi. Sehingga variasi beban bergantung pada variasi penggunaan komponen yang mengkonsumsi daya listrik di kapal seperti pompa, kompresor dan peralatan lainnya. Dengan variasi beban yang lebih beragam, pada kapal penggerak elektrik sangat cocok untuk mengoptimalkan operasional dari diesel generator. Sedangkan pada kapal berpengerak propulsi mekanis yang tidak memiliki variasi beban terlalu signifikan dianggap metode pembagian beban secara merata merupakan sebuah pilihan yang mudah (Baldi et al., 2014; Hansen et al., 2001).

Sistem distribusi tenaga listrik arus DC ditunjukkan pada gambar 1.3. Tegangan AC dari diesel generator akan diubah menjadi tegangan DC oleh rectifier (penyearah). Setelah itu, tenaga listrik di kendalikan tegangannya melalui DC-DC Converter untuk menjaga kestabilan tegangan. Kemudian tenaga listrik di transmisikan ke masing masing beban listrik dengan menggunakan arus DC. Sebelum masuk ke masing masing beban, arus DC akan diubah menjadi arus AC oleh inverter (Zahedi & Norum, 2013).



Gambar 3. Jaringan Listrik Hibrida dengan Konsep Distribusi DC

Sejak satu dekade terakhir, sistem distribusi listrik DC dianggap memiliki keunggulan dalam segi penghematan bahan bakar, efisiensi tempat dikarenakan tidak adanya komponen trafo, dan lebih rendah emisi (Alafnan et al., 2018; Castellan et al., 2018). Selain itu perkembangan sistem distribusi listrik DC juga didukung dengan penemuan teknologi di bidang elektronika daya yang memudahkan kendali sistem, perkembangan teknologi penyimpanan energi, serta pengembangan sumber daya energi terbarukan yang berupa solar panel dan fuel cell yang menghasilkan output tegangan DC (Castellan et al., 2018, 2014).

Distribusi arus searah (DC) menjadi suatu hal yang tidak boleh diabaikan ketika mengevaluasi masa depan propulsi listrik. DC memungkinkan penggunaan mesin kecepatan variabel, yang dapat meningkatkan efisiensi. Gambar 4 menunjukkan konsumsi bahan bakar spesifik untuk mesin kecepatan variabel. Perhatikan bahwa kecepatan optimal mesin bervariasi dengan daya. Keuntungan lain dari DC termasuk koneksi sederhana dari sumber daya DC, tidak

ada batasan frekuensi pada generator (atau jaringan listrik), dan tidak ada daya reaktif. Namun, ada beberapa tantangan mengingat kasus penggunaan daya tinggi dan korsleting. Banyak sistem kombinasi baru (atau yang disebut konsep hibrida) akan segera tersedia di mana yang terbaik dari beberapa sistem digabungkan, seperti listrik diesel dan baterai, AC dan DC, dan diesel-listrik dan mekanik. Bahkan sistem yang lebih kompleks akan dikembangkan daripada yang tersedia saat ini. Kebutuhan untuk verifikasi yang lebih baik, dukungan keputusan, dan sistem kontrol otonom akan meningkat (Capasso et al., 2016; Mastromauro et al., 2018; Oriti & Cuzner, 2006).

Berdasarkan latar belakang diatas, chapter 4 menjelaskan tentang konsep sistem distribusi tenaga listrik menggunakan arus DC dan optimalisasinya menggunakan simulasi perangkat lunak dan algoritma AI. Chapter 4 disusun dalam beberapa sub bab yaitu pendahuluan berisi tentang latar belakang dan perkembangan teknologi kapal ramah lingkungan di tinjau dari sistem kelistrikan, dilanjutkan pada sub chapter berikutnya menjelaskan konsep sistem kelistrikan hibrida kapal penumpang barang bertipe trimaran dengan sistem distribusi DC. Sub chapter ini menjelaskan tentang perhitungan kebutuhan listrik di kapal dilanjutkan dengan pemilihan generator untuk memenuhi persyaratan biro klasifikasi. Pada sub chapter setelahnya menerangkan topologi sistem distribusi DC bertipe radial dan tipe zonal. Konsep dua tipe distribusi DC di tampilkan dalam bentuk oneline diagram dan di simulasikan untuk mengetahui kecukupan daya pada sistem distribusi DC. Sekaligus, sub chapter ini menjelaskan aliran daya pada tipe radial maupun tipe zonal di sistem distribusi DC. Kemudian sub chapter selanjutnya dijelaskan tentang optimasi sistem distribusi listrik arus searah pada sistem kelistrikan kapal hibrida. Optimasi dengan metode PSO (Particle Swarm Optimization) dijelaskan untuk mencari setiap

individu (*feasible solution*) yang direpresentasikan sebagai partikel dan representasi dari kandidat solusi. Dan pada sub chapter terakhir dijelaskan tentang teknologi elektronika daya sistem distribusi DC yaitu penerapan converter buck dan boost di sistem distribusi DC. Chapter 4 ini akan ditutup dengan kesimpulan yang telah dijelaskan mulai sub chapter awal hingga terakhir.

Konsep Sistem Kelistrikan Kapal Penumpang Barang Bertipe Trimaran

Objek studi yang digunakan dalam bab ini merupakan sebuah kapal penumpang barang dengan tipe katamaran yang memiliki nama MV. Aida. Kapal ini direncanakan dapat memuat penumpang dan barang dengan total kapasitas muatan sebesar 620 Ton. Tipe kapal merupakan kapal penumpang roll on - roll off atau disingkat Ro-Ro. Kapal direncanakan memiliki radius pelayan 261 mil laut dengan kecepatan dinas 34 knot atau 17.49 m/s. Penentuan ukuran utama dasar ini diambil dari ukuran utama kapal trimaran pembanding. Kapal pembanding dipilih berdasarkan permintaan dari pemilik kapal seperti payload dan kecepatan dinas kapal, seperti table 1. Condor Liberation merupakan High Speed Passanger Ferry (Trimaran) dan masuk dalam kategori Fast Ferry Trimaran.

90



Gambar 4. Kapal trimaran pembanding (Condor Liberation)
(<https://www.shippingtandy.com/features/condor-liberation/>)

Tabel 1. Permintaan Pemilik Kapal.

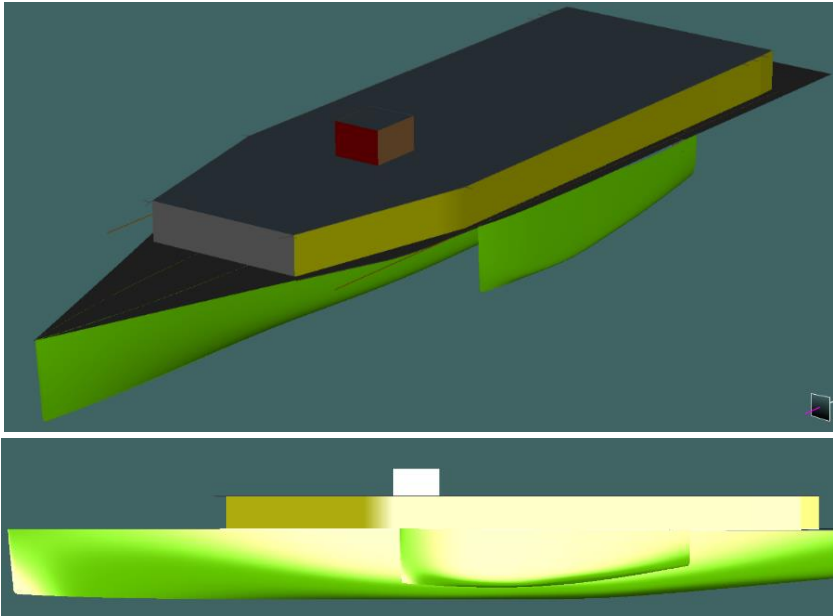
NO.	DATA DESAIN	KETERANGAN			
1	Jenis Kapal	Penumpang Barang			
2	Jenis Muatan	Penumpang dan Barang			
3	Kapasitas Penumpang dan Crew	1165	orang		
4	Kapasitas Kendaraan	245	Kendaraan (188 truk dan 137 mobil)		
5	Payload	620	Ton		
6	Kecepatan Dinas	34	Knot	17.49	m/s
7	Daerah Pelayaran	Pelayaran Indonesia			
8	Radius Pelayaran				
	Rute	Radius Pelayaran	Satuan	Waktu Tempuh	Satuan
	Kalianget - Kangean	96	Mil Laut	6.00	jam
	Kangean - Sapeken	40	Mil Laut	2.50	jam
	Sapeken - Masalembu	125	Mil Laut	7.81	jam
	Total	261	Mil Laut	16.31	jam
9	Bunkering Port	Kalianget			
10	Klasifikasi yang Dipakai	Biro Klasifikasi Indonesia			

Berdasarkan permintaan pemilik kapal, penentuan ukuran utama kapal dilakukan dengan menentukan kapal pembanding. Setelah itu, ukuran utama kapal dikonversikan dengan batasan ratio ukuran utama hasil penelitian dari University College Studies (UCL). Sesuai batasan ratio ukuran utama hasil penelitian UCL trimaran studies, ukuran utama kapal trimaran didapatkan 64 variasi ukuran. Setelah itu, Optimasi ukuran utama kapal trimaran dilakukan harus memenuhi persyaratan koreksi displacement, persyaratan koreksi trim kapal, persyaratan stabilitas kapal, dan persyaratan freeboard. Setelah optimasi ukuran utama kapal trimaran dilakukan perhitungan kebutuhan listrik peralatan kapal trimaran.

Hasil optimasi dari 64 variasi ukuran utama kapal maka ukuran utama kapal trimaran yang didapatkan sesuai yang ditampilkan pada table 2. Objek studi yang digunakan dalam bab ini merupakan sebuah kapal penumpang barang dengan tipe trimaran yang memiliki nama MV. Aida. Kapal ini memiliki spesifikasi panjang, lebar dan sarat air sebesar 124.49 m, 32.525 m, dan 4.057 m. Serta memiliki kecepatan dinas sebesar 34 knot. Kapal MV. Aida juga memiliki displasmen sebesar 2,310 ton dengan material lambung dari aluminium. tampilan 3D dari model kapal penumpang trimaran ditunjukkan pada gambar 5.

Tabel 2. Optimasi Ukuran Kapal Trimaran

No	Measurement	Units	Value		
			Side Hull	Main Hull	Trimaran
1	Displacement	tonne	91,6456	2127,2403	2310,531
2	Volume Displacement	m ³	89,4103	2075,3564	2254,177
3	Lwl	m	37,969	124,490	124,490
4	B	m	2,150	8,114	32,525
5	T	m	4,057	2,150	4,057
6	H	m	10,141	8,235	10,141
7	Vs	knot	34		
		m/s	17,4896		
8	Material	ALUMINIUM			
9	Resistance	1097,6 kN			
10	BHP	19310,827 kW			



Gambar 5. 3D View Kapal Penumpang Trimaran

Perhitungan Beban Listrik Kapal Trimaran

Kapasitas daya listrik di kapal harus memenuhi kebutuhan listrik yang dibutuhkan dan beban maksimum yang terjadi dalam waktu singkat. Berdasarkan peraturan Biro Klasifikasi Indonesia, ditetapkan bahwa daya yang dihasilkan dari unit pembangkit listrik yang dibutuhkan untuk pelayanan serta pengoperasian kapal di laut adalah sekitar 15% lebih tinggi dari kebutuhan daya listrik kapal yang telah diperhitungkan.

Pemilihan pembangkit ditentukan berdasarkan hasil perhitungan beban listrik pada kondisi operasional kapal. Peralatan kelistrikan Kapal Penumpang Trimaran dikelompokkan menjadi 3 kategori utama, yaitu peralatan mesin, peralatan lambung, dan peralatan listrik. Dimana bagian mesin terbagi menjadi 5 bagian yang terdiri dari electrical propulsion, water jet system, auxiliary engine service, general service, cargo service. Kemudian bagian lambung kapal dibagi menjadi 2 bagian yang terdiri dari mesin refrigerasi & ventilasi

dan deck. Selanjutnya bagian kelistrikan dibagi menjadi 2 bagian yang terdiri dari peralatan navigasi dan komunikasi radio serta lampu penerangan. Pengelompokan peralatan listrik berdasarkan aktivitas kapal diatas bertujuan untuk mempermudah dalam penentuan load factor dari masing-masing peralatan, karena tidak semua peralatan listrik di kapal dioperasikan secara terus menerus. Jadi, dalam perhitungan penentuan pembangkit listrik memiliki beberapa pandangan untuk menentukan kondisi operasional kapal seperti berlayar, bermanuver, bongkar muat, dan di pelabuhan.

Tabel 3 menunjukkan bahwa hasil perhitungan beban listrik yang menunjukkan jumlah total daya yang dibutuhkan dan faktor beban pada generator utama. Pada tabel 4 terlihat bahwa daya listrik yang dibutuhkan pada beberapa kondisi operasi kapal. Pada kondisi berlayar total daya yang dibutuhkan adalah 20518,69 kW, kondisi manuver membutuhkan listrik sebesar 28500 kW. Dan pada saat kapal memasuki pelabuhan dan dalam proses bongkar muat, masing-masing membutuhkan energi listrik sebesar 13.112,96 kW dan 542,17 kW.

Tabel 3. Total Kebutuhan Listrik tiap kondisi operasi

No.	Kondisi Operasi		Berlayar (kW)	Manuver (kW)	Bongkar Muat (kW)	Memasuki Pelabuhan (kW)
1	Machinery Part	:CL	20.225,9	21296,2	253,2	12865,7
		: IT	244,0	257,4	202	132,4
2	Hull Part	:CL	66,73	66,7	120,4	120,4
		: IT	53,68	53,7	0,0	0,0
3	Electrical Part	CL	47,4	47,4	47,4	47,4
		: IT	0,0	0,0	0,0	0,0
4	Sub Total Load	:CL	20340,07	21410,38	420,99	13033,49
	Power (D)	: IT	298	311,05	201,97	132,45
5	Diversity Factor		178,63	186,63	121,18	79,47
6	Total Electric Load		20518,69	21597,02	542,17	13.112,96

Penentuan Kapasitas Generator Utama

Pemilihan genset utama dilakukan dengan memilih 4 (empat) jenis genset dengan kapasitas 5000 kW, 5700 kW, 7030 kW dan 8200 kW. Kondisi pelayaran dijadikan acuan dalam pemilihan generator karena pada kondisi tersebut kapal beroperasi dalam waktu yang cukup lama dibandingkan dengan kondisi operasional lainnya. Pada kondisi ini generator yang memiliki kapasitas 5000 kW memiliki load factor 1,05 dengan 4 generator yang tersedia. Dan selanjutnya genset yang memiliki kapasitas daya 5700 kW memiliki load factor sebesar 0,9 dengan jumlah genset yang tersedia juga ada 4 buah. Sedangkan genset yang memiliki kapasitas daya 7030 kW memiliki load factor 0,73 dengan 4 genset yang tersedia. Akhirnya, generator dengan kapasitas 8200 kW memiliki faktor beban 0,63 dengan 4 generator yang tersedia.

Tabel 4. Pemilihan Kapasitas Generator

No	Daya (kW)	Jumlah	Faktor Beban Generator					
			Belayar	Jml	Manuver	Jml		
1	5000	5	20518,69	=1,03	4	21597,02	=0,88	5
			5000×4			5000×5		
			Bongkar Muat		Jml	Memasuki Pelabuhan		Jml
			542,17	=0,11	1	13.112,96	=0,87	3
5000×1	5000×3							
2	5700	5	Belayar	Jml	Manuver		Jml	
			20518,69	=0,90	4	21597,02	=0,76	5
			5700×4			5700×4		
			Bongkar Muat		Jml	Memasuki Pelabuhan		Jml
542,17	=0,1	1	13.112,96	=0,77	3			
5700×1			5700×3					
3	7030	4	Belayar	Jml	Manuver		Jml	
			20518,69	=0,73	4	21597,02	=0,77	4
			7030×4			7030×4		
			Bongkar Muat		Jml	Memasuki Pelabuhan		Jml
542,17	=0,07	1	13.112,96	=0,62	3			
7030×1			7030×2					

4	8200	4	Berlayar		Jml	Manuver		Jml
			20518,69	=0,63	4	21597,02	=0,66	4
			8200 x 4			8200 x 4		
			Bongkar Muat		Jml	Memasuki Pelabuhan		Jml
			542,17	=0,07	1	13.112,96	=0,53	3
			8200 x 1			8200 x 4		

Dari daftar generator pada tabel 4 terlihat bahwa faktor beban generator dengan angka 0.86 tidak ditemukan. Dengan jumlah genset yang sama diperoleh 4 (empat) genset untuk load factor di atas 0,86, yaitu genset dengan kapasitas 5700 kW memiliki load factor 0,90 dan genset dengan kapasitas 5.000 kW memiliki load factor 1,03. Sedangkan load actor dibawah 0,86 yaitu generator dengan kapasitas 7030 kW memiliki load factor 0,73 dan generator dengan kapasitas 8200 kW memiliki load factor 0,63. Dalam pengoperasian kapal untuk bermanuver, beban generator diperoleh lebih tinggi dengan kondisi operasi saat berlayar yaitu selisih faktor beban 0,03 sampai 0,05 dengan total empat generator.

Pada kondisi masuk pelabuhan, kebutuhan listrik minimal yang harus tersedia adalah 13.112,96 kW. Untuk memenuhi persyaratan kelas, dalam kondisi operasi ini generator yang tersedia adalah generator dengan daya 5000 kW, harus disediakan 3 generator dengan faktor beban 0,87. Untuk generator dengan daya 5700 kW, 7030 kW dan 8200 kW, harus ada 3 generator dengan faktor beban masing-masing 0,77, 0,62 dan 0,53. Untuk operasi kapal dalam kondisi bongkar muat, total daya yang dibutuhkan adalah 542,17 kW. Jika daya minimum disuplai oleh 1 generator pada setiap kapasitas. Faktor beban generator antara 0,07 sampai 0,11. Dengan melihat fakta di atas, dipilihlah genset dengan kapasitas daya 5.700 kW. Dasar pemilihan genset adalah pada kondisi layar, genset dengan kapasitas 5700 kW memiliki load factor 0,90 meskipun persyaratan kelas mensyaratkan load factor maksimum 0,86. Untuk

memenuhi persyaratan kelas, kekurangan daya akan dipenuhi dengan menambahkan baterai 1.500 kW

Penentuan Pembangkit Listrik Hibrida

Penggunaan empat generator dengan daya 5700 kW tidak memenuhi persyaratan kelas bahwa daya yang harus tersedia di kapal adalah 15% lebih dari kebutuhan daya total dalam kondisi operasi. Oleh karena itu, kapal penumpang trimaran direncanakan menggunakan listrik hybrid dengan menggabungkan daya yang dihasilkan generator dengan baterai. Penggunaan empat generator dengan daya 5700 kW tidak memenuhi persyaratan kelas bahwa daya yang harus tersedia di kapal adalah 15% lebih dari kebutuhan daya total dalam kondisi operasi. Untuk memenuhi persyaratan klasifikasi, diperlukan daya tambahan sebesar 1000 kW. Oleh karena itu, kapal penumpang trimaran direncanakan menggunakan listrik hybrid dengan menggabungkan daya yang dihasilkan oleh generator dengan baterai.

Prosedur dalam menghitung Ampere Hour baterai yang dibutuhkan adalah dengan menentukan besaran energi (Watt hour) kemudian menentukan ampere hour. Besarnya energi yang dibutuhkan dihitung dari kebutuhan daya sebesar 1500 kW dikalikan dengan waktu pemakaian baterai, seperti terlihat pada persamaan 1.

$$AH_{required} = \frac{Watt \cdot Hour}{Voltage} \quad (1)$$

Besarnya baterai ditentukan dengan membagi Ampere Hour yang dibutuhkan dengan Ampere Hour baterai, seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.

$$Total \ Battery = \frac{AH_{required}}{AH_{Battery}} \quad (2)$$

Penerapan tenaga listrik hibrida antara generator diesel dan baterai dalam kondisi berlayar memenuhi persyaratan kelas dimana terdapat daya 15 persen lebih besar jika dibandingkan dengan kebutuhan daya total selama kondisi berlayar, seperti yang

ditunjukkan pada tabel 5. Dalam kondisi berlayar, 4 set generator diesel digunakan dengan kapasitas daya masing-masing 5700 kW dan baterai sebanyak 3 set dengan tegangan 690 VDC dengan Ampere hour 3550 AH. Tenaga listrik hybrid ini hanya digunakan pada saat kondisi berlayar sedangkan dalam kondisi manuver dan kondisi di pelabuhan pembangkit listrik sepenuhnya diesel generator. Untuk manuver digunakan 5 set genset dengan load factor 0,76, sedangkan di pelabuhan digunakan 3 set genset dengan load factor 0,77. Dan pada kondisi operasi bongkar muat, suplai listrik dilakukan seluruhnya oleh dua buah baterai dengan tegangan 690 VDC dengan ampere hour sebesar 3550 AH.

Tabel 5. Pemilihan Sistem Pembangkit Hibrida

Operasi Kapal	Pembangkit Listrik Bertenaga Hibrida						
Berlayar	Generator			Faktor Beban			
	PM	kW	Set	19518,69			0,86
	1500	5700	4	5700 x 4			
	Battery			Power Required 1.500 kW			
	Tegangan	AH	Set	Waktu	Wh	Volt	Ah
690	3550	3	8	8.000.00 0	690	11.595 5	
Manuvering	Generator			Faktor Beban			
	RPM	kW	Set	21597,02			0,76
	1500	5700	5	5700 x 5			
Bongkar Muat	Battery			Baterai 542,2 kW			
	Tegangan	AH	Set	Waktu	Wh	Volt	Ah
	690	3550	2	8	4.337.39 6,7	690	6.286
Memasuki Pelabuhan	Generator			Faktor Beban			
	RPM	kW	Set	13112,96			0,77
	1500	5700	3	5700,00 x 3			

Spesifikasi baterai yang dipilih ditunjukkan oleh tabel 6. Baterai mempunyai kapasitas sebesar 450 AH dengan tegangan sebesar 36 Volt. Power yang dibutuhkan selama kondisi berlayar adalah 1000 kW pada tegangan 690 V dengan waktu selama 8 jam beroperasi. Untuk itu jumlah baterai yang dibutuhkan adalah 494 baterai untuk kondisi operasi berlayar selama 8 jam operasi. Dan untuk kondisi

bongkar muat membutuhkan 38 baterai untuk 1 jam operasi. Berat total baterai adalah sebesar 221 Ton. Untuk berat tempat baterai, diambil estimasi 10 % dari berat total baterai yaitu sebesar 22 Ton. Sehingga berat total baterai beserta raknya adalah sebesar 243 Ton.

Tabel 6. Spesifikasi Baterai

TROJAN DEEP CYCLE - 36 VOLT		
Type	18DC-500ML	
Capacity Minutes @75 A	272	Minute
Capacity 20 Hr rate	450	AH
Length	895	mm
Witdh	486	mm
Height	425	mm
Weight	447	kg

Optimalisasi Sistem Distribusi DC Kapal Trimaran

Particle Swarm Optimization (PSO) merupakan salah satu dari metode *swarm intelligence* untuk memecahkan suatu permasalahan optimasi. Dimana metode ini merupakan sebuah metode yang berbasis *search algorithm* dimana setiap individu direpresentasikan sebagai partikel dan representasi dari kandidat solusi. Setiap partikel pada PSO bergerak menuju area yang dicari dengan kecepatan yang beradaptasi dan berubah secara dinamis dengan pengalaman yang didapat ketika melakukan pergerakan dan juga pengalaman pergerakan dari partikel lain. Pada PSO setiap partikel akan bersaing dengan ketat untuk meningkatkan kualitas diri dengan meniru sifat partikel yang sukses. Selanjutnya, setiap partikel akan memiliki memori yang mampu mengingat posisi terbaik di setiap area yang telah dilewati. Posisi yang memiliki nilai terbaik disebut “pbest” dan partikel yang terbaik pada populasi disebut “gbest”. Prosedur dalam proses pencarian dirangkum dalam beberapa langkah berikut:

1. Posisi awal dari pbest dan gbest berbeda. Namun, dengan arah berbeda diantara pbest dan gbest, semua partikel secara bertahap akan mendekati optimum global.
2. Modifikasi dari posisi partikel dilakukan secara kontinyu dan metode ini dapat diterapkan dalam masalah kontinyu. Namun, metode ini juga bisa diterapkan dalam masalah diskrit menggunakan grid untuk posisi XY dan kecepatannya.
3. Tidak ada ketidakpastian dalam prosedur pencarian meskipun jika permasalahan kontinyu atau diskrit semua variable diselesaikan dengan sumbu dan grid kontinyu untuk posisi XY dan kecepatannya. Metode ini dapat diaplikasikan pada masalah optimasi untuk campuran integer non-linier dengan variabel diskrit.
4. Konsep diatas merupakan penjelasan untuk sumbu XY (ruang 2 dimensi). Namun, metode ini juga dapat diaplikasikan dengan mudah pada sebuah ruang n-dimensi.

Modifikasi kecepatan dan posisi pada setiap partikel dapat dihitung menggunakan kecepatan saat ini dan jarak dari pbest_{j,g} ke gbest_g yang dapat dilihat pada persamaan 3 berikut:

$v_{j,g}^{(t+1)} = w \times v_{j,g}^{(t)} + c1 \times r1 \times (pbest_{j,g} - x_{j,g}^{(t)}) + c2 \times r2 \times (gbest_g - x_{j,g}^{(t)})$	(3)
--	-----

$x_{j,g}^{(t+1)} = x_{j,g}^{(t)} + v_{j,g}^{(t+1)}, \text{ dengan } j = 1, 2, \dots, n \text{ dan } g = 1, 2, \dots, m$	(4)
---	-----

Dimana:

n = jumlah partikel

m = jumlah dari komponen pada vector v_j dan x_j

t = jumlah iterasi atau generasi

$v_{j,g}^{(t)}$ = merupakan komponen g ke- m dari kecepatan partikel j pada iterasi t

$$v_g^{min} \leq v_{j,g}^{(t)} \leq v_g^{max} \quad (5)$$

w = faktor inersia

$c1, c2$ = faktor kognitif dan percepatan social

$r1, r2$ = nilai random yang disebar secara merata pada rentang (0,1)

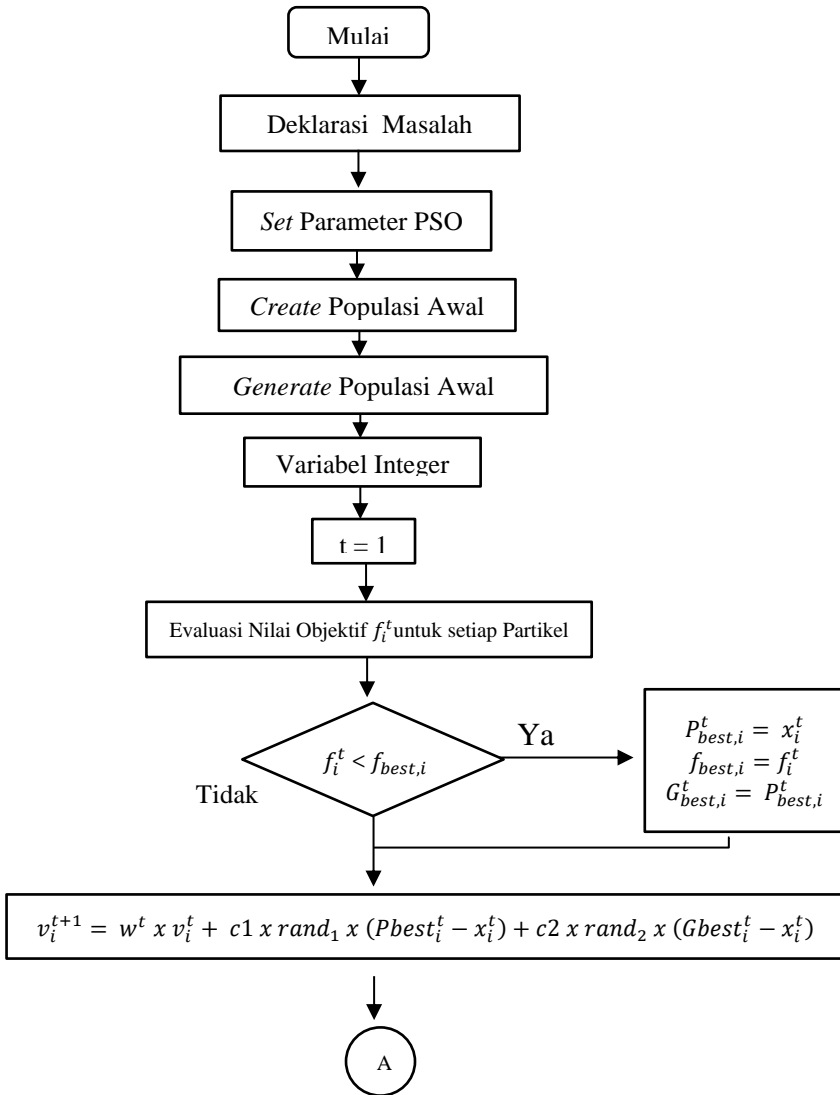
$x_{j,g}^{(t)}$ = komponen g ke- m dari posisi partikel j pada iterasi t

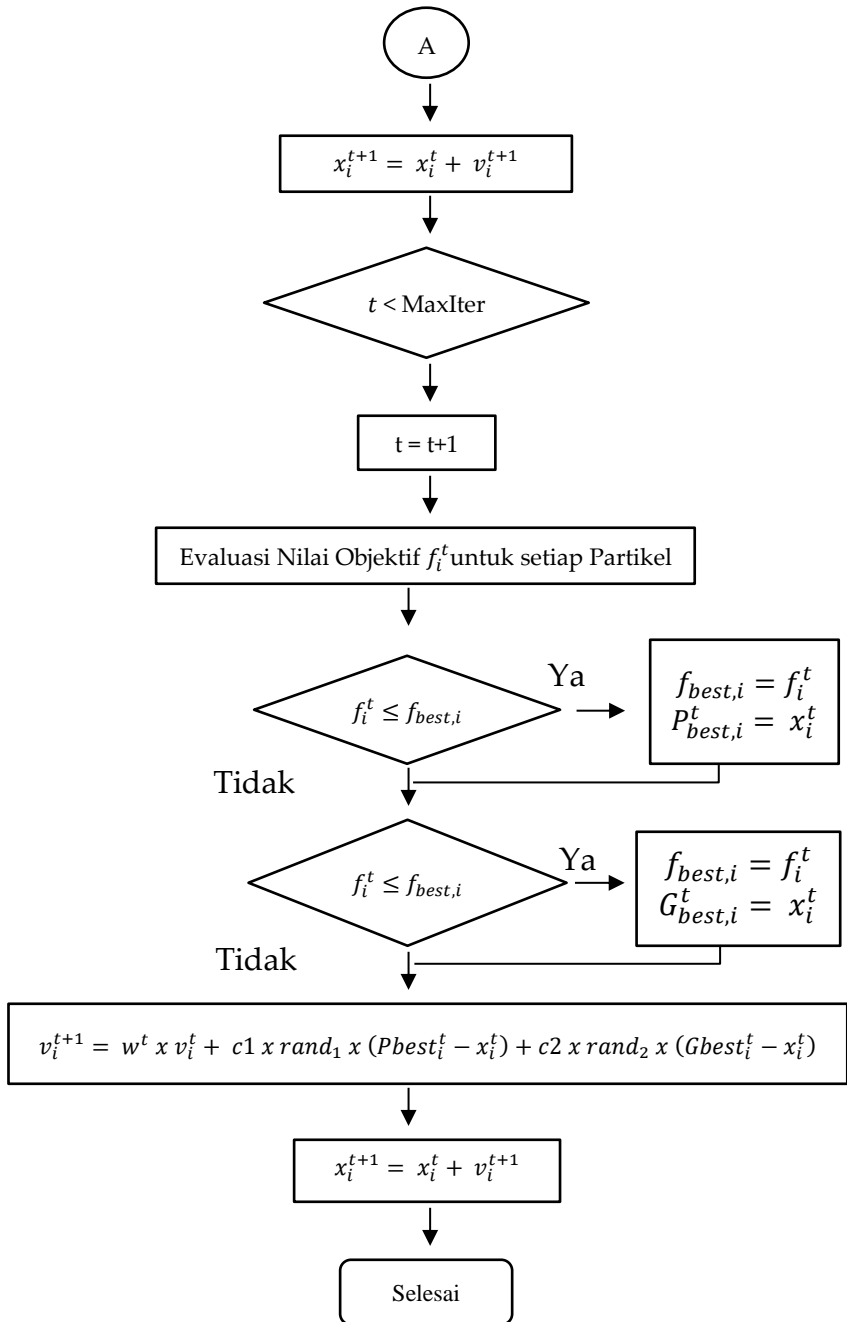
$pbest_j$ = pbest dari partikel j

$gbest$ = gbest dari semua kelompok

Dimana j ke- n merupakan partikel yang direpresentasikan dengan sebuah vektor d -dimensional ($x_j = x_{j,1}, x_{j,2}, x_{j,3}, \dots, x_{j,d}$) dan laju dari perubahan posisi (kecepatan) dinotasikan dengan vektor d -dimensional yang lain ($v_j = v_{j,1}, v_{j,2}, v_{j,3}, \dots, v_{j,d}$). Posisi terbaik sebelumnya dari partikel j ke- n direpresentasikan sebagai ($pbest_j = pbest_{j,1}, pbest_{j,2}, pbest_{j,3}, \dots, pbest_{j,d}$). Dan nilai terbaik dari seluruh partikel pada proses *swarm* direpresentasikan dengan $gbest_g$. Dalam PSO, setiap partikel berpindah pada area pencarian dengan kecepatan yang dipengaruhi oleh solusi terbaik partikel itu sendiri dan solusi terbaik dari grup pada proses sebelumnya. Kecepatan selalu berubah atau *update* pada PSO terdiri dari 3 bagian, diantaranya: momentum, kognitif dan sosial. Keseimbangan antara 3 bagian ini ditentukan oleh performa dari algoritma PSO. Parameter $c1$ dan $c2$ menentukan tarikan relatif dari pbest dan gbest sedangkan parameter $r1$ dan $r2$ membantu secara stokastik variasi tarikan. Sedangkan untuk jumlah iterasi ditentukan saat proses komputasi.

Penyusunan algoritma memudahkan dalam pembuatan bahasa pemrograman. Pada tahapan ini akan digunakan algoritma metode *Partial Swarm Optimization* (PSO) dalam studi penjadwalan generator. Secara umum tahapan optimasi penjadwalan generator menggunakan metode PSO dapat dilihat pada gambar 6.





Gambar 6. Alur optimasi penjadwalan generator menggunakan metode PSO (Hossain et al., 2019)

Dalam proses optimisasi menggunakan metode PSO dibutuhkan sebuah fungsi objektif dan juga constrain selama proses iterasi berlangsung. Fungsi objektif dirumuskan untuk meminimalkan konsumsi bahan bakar menurut persamaan

(6).

$$f = \min \left(\sum_{k=1}^N FC_k \right) \quad (6)$$

Selain itu constrain yang digunakan dalam optimisasi FOC ditentukan dari jumlah beban setiap generator aktif (P_k) harus sama dengan total beban kelistrikan yang dibutuhkan di setiap mode operasi (P_L), P_k juga harus tidak boleh melebihi batas maksimal kapasitas generator Wartsila 12V34DF, dan nilai P_L sesuai dengan nilai total beban kelistrikan pada setiap mode operasi FTS sesuai dengan (7), (8), dan (9) secara berurutan.

104

$P_L = \sum_{i=1}^N P_k$	(7)
$P_k \leq 6000 \text{ kW}$	(8)
$P_L = \begin{cases} 20,519 \text{ kW} \\ 21,598 \text{ kW} \\ 543 \text{ kW} \\ 13,113 \text{ kW} \end{cases}$	(9)

Sedangkan untuk FC dirumuskan sebagai total nilai FOC setiap unit generator aktif sesuai rumus

(10).

$$FC = \left[\sum_{k=1}^N SFOC(P_k) \times P_k \right] \quad (10)$$

Fungsi SFOC didapatkan dari proses pemodelan karakteristik generator Wartsila 12V34DF dengan menempatkan data SFOC dan persentase beban generator pada mode operasi putaran konstan dan variable. Sehingga SFOC terdiri dari dua jenis yaitu fungsi SFOC

pada putaran konstan untuk mewakili AC distribution system dan fungsi SFOC pada mode putaran variable untuk mewakili DC distribution system sesuai pada (11).

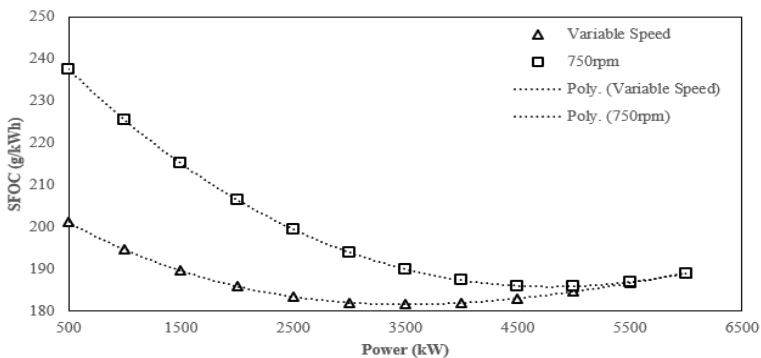
$$SFOC = \begin{cases} SFOC_{AC} \\ SFOC_{DC} \end{cases} \quad (11)$$

Fungsi $SFOC_{AC}$ maupun $SFOC_{DC}$ didapatkan dari plot data yang didapatkan dari Wartsila 12V34DF project guide. Seperti yang dapat dilihat pada Table 7.

Tabel 7. Data SFOC dengan persen beban dari Wartsila 12V34DF

Load Percentage	SFOC (g/kWh)	
	Constant Speed	Variable Speed
100%	189	189
85%	186	185
75%	186	183
50%	194	182

Dari data yang ada pada Table 7, dilakukan plot ke fungsi matematika dengan metode polinomial orde 3 menggunakan Curve Fitting Toolbox (CFT) pada MATLAB. Hasilnya dapat dilihat pada gambar 7 dan gambar 8.



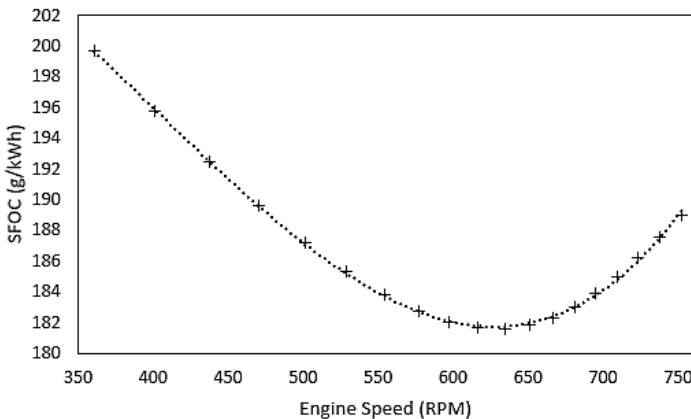
Gambar 7. Grafik fungsi SFOC dengan daya mesin (kW) pada mode operasi kecepatan konstan 750 rpm dan variable

Persamaan matematika untuk fungsi $SFOC_{AC}$ dan $SFOC_{DC}$ terhadap engine power juga bisa didapatkan dari hasil pemodelan

data. Secara berurutan persamaan matematika dari kedua fungsi $SFOC_{AC}$ dan $SFOC_{DC}$ dapat dilihat pada persamaan 12 dan 13.

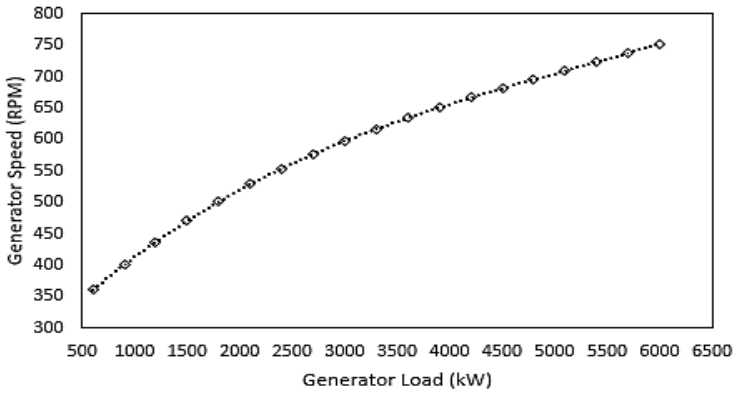
$SFOC_{AC}(x) = -1.058 \times 10^{-10}x^3 + 3.873 \times 10^{-06}x^2 - 0.2896 \times 10^{-1}x + 2.516 \times 10^2$	(12)
$SFOC_{DC}(x) = -1.764 \times 10^{-10}x^3 + 3.492 \times 10^{-06}x^2 - 0.1798 \times 10^{-1}x + 2.093 \times 10^2$	(13)

Dari fungsi $SFOC_{DC}$ dapat juga dapat diketahui hubungan antara putaran (rpm) dengan nilai SFOC. Dengan data grafik hubungan antara putaran mesin (rpm) terhadap daya output mesin setiap silinder (kW/cyl) dari project guide Wartsila 1234DF. Maka bisa dihubungkan kedua data tersebut menjadi sebuah grafik hubungan antara SFOC terhadap putaran mesin (rpm) seperti yang terlihat pada gambar 8 dan persamaan matematika dari fungsi tersebut sesuai dengan persamaan 14 sedangkan grafik fungsi putaran mesin (rpm) terhadap beban mesin diesel generator (kW) dapat dilihat pada gambar 8 dan persamaannya sesuai dengan persamaan 12.



Gambar 8. Grafik fungsi SFOC berdasarkan kecepatan putar *engine* (RPM) pada mode operasi

$$SFOC_{DC}(x) = 6.0213 \times 10^{-07}x^3 - 7.2186 \times 10^{-04}x^2 + 1.9438 \times 10^{-1}x + 1.9521 \times 10^2 \quad (14)$$



Gambar 9. Grafik fungsi kecepatan putar *engine* (RPM) berdasarkan beban *engine* (kW) operasi kecepatan

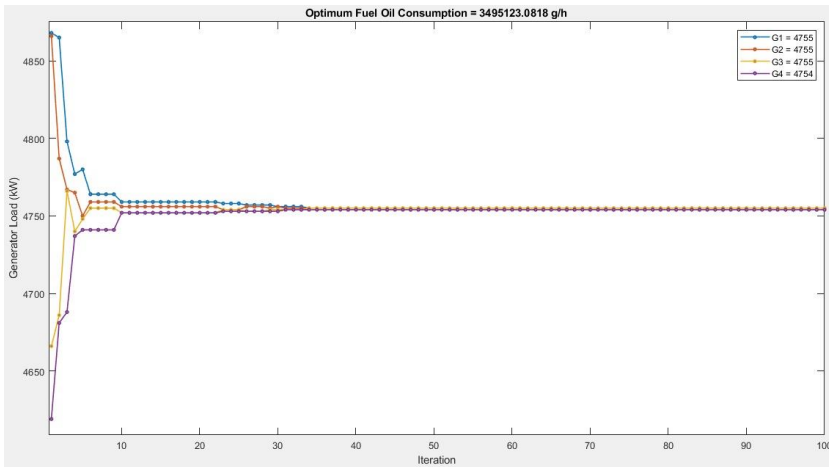
$$RPM(kW) = 1.5642 \times 10^{-09}x^3 - 2.3750 \times 10^{-05}x^2 + 1.6683 \times 10^{-1}x + 2.6880 \times 10^2 \quad (15)$$

Untuk mendapatkan hasil penghematan yang maksimal dari FOC maka digunakan metode optimisasi dengan menggunakan PSO. Sebuah algoritma PSO basic dilakukan pada penelitian ini dengan parameter yang dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Parameter PSO

Parameter	Value
Maximum Iteration	150
Population	100
c_1	2
c_2	2
w	0.8
w_{min}	0.4
w_{max}	0.9

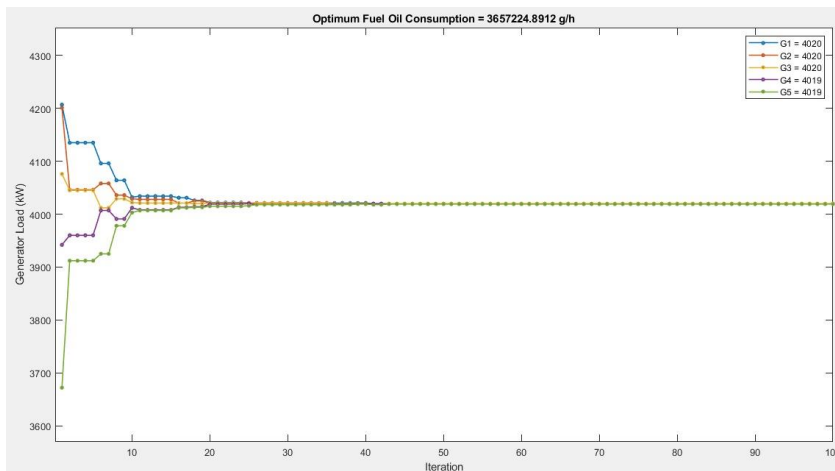
Optimalisasi penjadwalan generator menggunakan metode PSO dilakukan iterasi dengan 5 dan 4 generator pada mode berlayar dan manuvering (Chauhan et al., 2015). Kondisi ini berbeda dengan studi kasus III yang hanya dilakukan pada mode operasi manuvering untuk iterasi menggunakan 5 dan 4 generator. Hal ini dikarenakan pada sistem LVDC yang direpresentasikan dengan generator yang dioperasikan pada putaran variabel sehingga memiliki nilai *load factor* optimal pada rentang 0.5 – 0.68. Sedangkan untuk memenuhi regulasi dari *class society* maka dilakukan juga iterasi optimalisasi dengan menggunakan 4 buah generator pada saat kondisi berlayar. Hasilnya untuk beban pada masing-masing generator pada kasus ini dengan rata-rata sebesar 4755 kW. Nilai *load factor* pada masing-masing generator sebesar 0.855. Secara jelas hasil iterasi optimalisasi penjadwalan generator saat mode operasi berlayar dengan 4 buah generator dengan konsumsi bahan bakar total sebesar 3.495,123 Ton/jam. dapat dilihat pada gambar 10.



Gambar 10. Hasil optimalisasi PSO untuk mode berlayar dengan menggunakan 4 generator dengan baterai

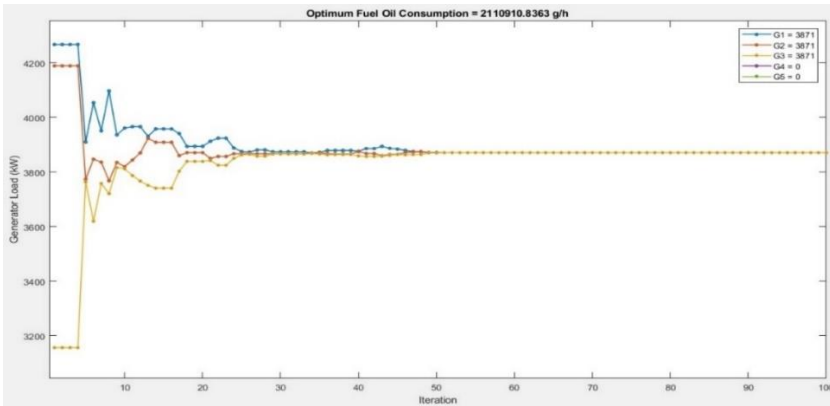
Optimalisasi saat mode operasi manuvering dengan 5 buah generator memberikan beban pada masing-masing generator dengan rata-rata sebesar 4020 kW. Kondisi ini memberikan nilai *load factor*

sebesar 0.72 dengan optimum konsumsi bahan bakar total sebesar 36.572,224 kg/jam. Operasional 5 buah generator pada saat kondisi manuvering dilakukan untuk memenuhi aturan *class society* sehingga memberikan beban yang berbeda pada masing-masing generator.



Gambar 11. Hasil optimasi PSO untuk mode manuver dengan menggunakan 5 generator tanpa baterai

Kondisi operasi *at port* dengan total beban kelistrikan sebesar 13113 kW akan disuplai dengan optimal dengan 3 buah generator dengan masing-masing beban generator sebesar 3871 kW. Kondisi ini memberikan nilai *load factor* pada masing-masing generator sebesar 0.5463. Hal ini sesuai dengan rentang *load factor* optimal pada sistem LVDC. Secara jelas hasil iterasi optimalisasi penjadwalan generator saat mode operasi *at port* pada gambar 11.



Gambar 12. Hasil optimasi PSO untuk mode memasuki pelabuhan dengan menggunakan 3 generator tanpa baterai

Kesimpulan

Penerapan sistem distribusi DC untuk kapal trimaran tenaga hybrid telah berhasil diterapkan. Penggunaan sumber energi listrik hybrid yaitu generator diesel dan baterai telah disimulasikan dengan baik. Simulasi daya menunjukkan bahwa baterai memberikan kontribusi daya yang penting dalam kondisi berlayar. Tambahan daya ini telah meningkatkan kinerja faktor beban generator diesel dari 90% tanpa baterai menjadi 86% dengan baterai. Pada simulasi aliran daya diketahui bahwa pada kondisi berlayar kebutuhan daya nyata keseluruhan sebesar 20.638 MW dan daya reaktif sebesar 7.971 Mvar. Ketersediaan daya listrik yang memadai dan memenuhi persyaratan kelas dalam kondisi berlayar yaitu daya disuplai oleh 4 (empat) generator diesel dan baterai diesel 17750 AH. Pada kondisi manuver, kebutuhan daya aktual sebesar 21.722 MW dan daya reaktif sebesar 8.389 Mvar. Ketersediaan tenaga listrik disuplai oleh 5 (lima) genset diesel. Dan pada kondisi bongkar muat, kebutuhan daya aktual pada kondisi operasi ini adalah sebesar 0,638 MW dan daya reaktif sebesar 0,31 Mvar. Kebutuhan listrik pada kondisi bongkar muat ini akan dipasok oleh baterai berkapasitas daya 1,5

MW. Untuk kondisi masuk pelabuhan (at port), daya yang dibutuhkan sebesar 13.119 MW untuk daya nyata dan 5.078 MW untuk daya reaktif. Setelah menetapkan kapasitas sumber energi listrik di setiap mode operasi, optimalisasi konsumsi bahan bakar untuk penggerak generator dengan metode PSO. Pada saat kondisi berlayar, konsumsi bahan bakar total sebesar 3.495,123 Kg/jam, dan beban pada masing-masing generator sebesar 4755 kW. Dan pada kondisi manuvering dengan 5 buah generator dengan beban pada masing-masing generator dengan rata-rata sebesar 4020 kW dengan optimum konsumsi bahan bakar total sebesar 36.572,224 kg/jam. Pada kondisi bongkar muat, sumber energi listrik dikawal di suplai oleh baterai sehingga konsumsi bahan bakar adalah nol. Selanjutnya, Kondisi operasi memasuki pelabuhan dengan total beban kelistrikan sebesar 13113 kW disuplai 3 buah generator dengan masing-masing beban generator sebesar 3871 kW dengan optimum konsumsi bahan bakar total sebesar 21.109 kg/jam.

Ucapan Terima Kasih

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Dennis Chaniago Ramadhan dan Laboratorium Listrik Kapal dan Otomasi Kelautan, Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia atas dukungannya terhadap penulisan *book chapter* ini.

References

- Alafnan, H., Zhang, M., Yuan, W., Zhu, J., Li, J., Elshiekh, M., & Li, X. (2018). Stability Improvement of DC Power Systems in an All-Electric Ship Using Hybrid SMES/Battery. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28(3), 1–6. <https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2794472>
- Baldi, F., Johnson, H., Gabriellii, C., & Andersson, K. (2014). Energy Analysis of Ship Energy Systems – The Case of a

Chemical Tanker. *Energy Procedia*, 61, 1732–1735.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.200>

Bhowmick, S. (2016). *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*. CRC/Taylor & Francis.

Capasso, A., Lamedica, R., Lauria, S., Ruvio, A., Tironi, E., & Corti, M. (2016). Voltage quality studies in electric power systems: An AC/DC network for a shipboard application. *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2016.7555410>

Castellan, S., Menis, R., Tassarolo, A., Luise, F., & Mazzuca, T. (2018). A review of power electronics equipment for all-electric ship MVDC power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 96, 306–323. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.09.040>

Castellan, S., Menis, R., Tassarolo, A., & Sulligoi, G. (2014). Power electronics for all-electric ships with MVDC power distribution system: An overview. *2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/EVER.2014.6844068>

Chauhan, P. J., Rao, K. S., Panda, S. K., Wilson, G., Liu, X., & Gupta, A. K. (2015). Fuel efficiency improvement by optimal scheduling of diesel generators using PSO in offshore support vessel with DC power system architecture. *2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2015.7380963>

Geertsma, R. D., Negenborn, R. R., Visser, K., & Hopman, J. J. (2017). Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. *Applied Energy*, 194, 30–54. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.060>

Hansen, J. F., ♦dnanes, A. K., & Fossen, T. I. (2001). Mathematical Modelling of Diesel-Electric Propulsion Systems for Marine Vessels. *Mathematical and Computer*

- Modelling of Dynamical Systems*, 7(3), 323–355.
<https://doi.org/10.1076/mcmd.7.3.323.3641>
- Hossain, M. A., Pota, H. R., Squartini, S., & Abdou, A. F. (2019). Modified PSO algorithm for real-time energy management in grid-connected microgrids. *Renewable Energy*, 136, 746–757. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.005>
- IMO MARPOL Annex VI. (2013). *IMO MARPOL Annex VI and NTC 2008 with guidelines for implementation*. International Maritime Organization.
- Kusuma, I. R., Zaman, M. B., & Semin. (2021). Implementation of Buck-Boost Converter on Direct Current Distribution Systems for Hybrid Powered Trimaran Ship. *Praise Worthy Prize*, 16(3).
- Lan, H., Bai, Y., Wen, S., Yu, D., Hong, Y.-Y., Dai, J., & Cheng, P. (2016). Modeling and Stability Analysis of Hybrid PV/Diesel/ESS in Ship Power System. *Inventions*, 1(1), 5. <https://doi.org/10.3390/inventions1010005>
- Liu, Y., Qin, W., Han, X., & Wang, P. (2017). *Modelling of large-scale wind/solar hybrid system and influence analysis on power system transient voltage stability*. 477–482. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2017.8282892>
- Mastromauro, R. A., Bongini, L., Bosich, D., & Sulligoi, G. (2018). Power-Electronics-Based Power Distribution System of a MVDC Ship: AC/DC Interface Converters and Control System. *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607789>
- Muljadi, E., & McKenna, H. E. (2001). *Power quality issues in a hybrid power system*. 2, 773–781. <https://doi.org/10.1109/IAS.2001.955532>
- Oriti, G., & Cuzner, R. (2006). Ship Propulsion AC/DC Conversion System Modeling and Design. *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First*

IAS Annual Meeting, 2, 569–575. <https://doi.org/10.1109/IAS.2006.256584>

Zahedi, B., & Norum, L. E. (2013). *Modelling and simulation of hybrid electric ships with DC distribution systems*. 1–10. <https://doi.org/10.1109/EPE.2013.6631762>

PENGGUNAAN DUAL FUEL (DFE) DI KAPAL

Frengki Mohamad Felayati

Program Studi Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik dan
Ilmu Kelautan, Universitas Hang Tuah.

Abstrak

Kapal diproyeksikan menggunakan energi bersih atau energi baru dan terbarukan di masa depan. Sayangnya, penggunaan energi bersih tersebut membutuhkan waktu bertahap dalam realisasinya. Penggunaan *dual-fuel engine* (DFE) atau mesin utama berbahan bakar ganda di kapal merupakan salah satu tahap menuju kapal emisi rendah atau tanpa emisi (*zero emission*). Perkembangan teknologi DFE cukup pesat dalam beberapa tahun terakhir. Hingga saat ini, teknologi DFE terus berkembang untuk meningkatkan efisiensi dan optimalisasi emisi gas buang. Selain itu, pemilihan bahan bakar untuk DFE merupakan faktor penting yang berkaitan dengan ketersediaan, fasilitas infrastruktur, keselamatan, serta kinerja dan emisi gas buang mesin. Kombinasi bahan bakar yang umum digunakan yaitu minyak diesel dengan gas alam dari Liquid *Natural Gas* (LNG) dan *Compressed Natural Gas* (CNG). Disamping itu, terdapat berbagai kombinasi bahan bakar alternatif lainnya yang

dapat diaplikasikan pada DFE. Kombinasi bahan bakar tersebut digunakan untuk memperbaiki emisi gas buang mesin dibandingkan dengan mesin berbahan bakar diesel sepenuhnya. Penggunaan DFE di kapal dibahas di tulisan ini dengan tujuan untuk memberikan wawasan aplikasi penurunan emisi gas buang menggunakan DFE di kapal sebagai penggerak utama. Perkembangan teknologi, proses pembakaran, dan aplikasi penggunaan DFE untuk kapal rendah emisi dibahas dengan ringkas di tulisan ini.

Kata kunci : Bahan bakar, *dual-fuel*, emisi, kapal, *zero emissions*.

Pendahuluan

Kapal sebagai alat transportasi laut ditargetkan dapat beroperasi dengan emisi rendah. Diketahui bahwa kapal merupakan penyumbang emisi gas rumah kaca (*green house gas emission*) yang signifikan (Sharafian, Blomerus, & Mérida, 2019). Kapal umumnya menggunakan mesin berbahan bakar minyak diesel karena beberapa keuntungan, utamanya karena harga bahan bakar yang murah dengan daya yang tinggi (Zheng, Wang, Zhao, Wang, & Huang, 2019). Selain itu, beban muatan yang cukup besar untuk skala kapal kargo atau tanker menyebabkan konsumsi bahan bakar cukup besar sehingga berdampak terhadap besarnya konsentrasi emisi gas buang yang perlu dioptimalkan. Oleh sebab itu, diperlukan progres pengurangan emisi gas buang kapal yang signifikan sehingga dapat berkontribusi terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca secara global. Salah satu solusi pengurangan emisi gas buang kapal yaitu dengan menggunakan DFE (F M Felayati, Cahyono, Prayogi, & Winarno, 2022).

Penggunaan DFE di kapal dapat memberikan signifikansi progres terhadap penurunan emisi gas buang sehingga dapat menjadi kapal ramah lingkungan (Gambar 1). Probabilitas pengurangan emisi gas buang kapal secara drastis dalam rentang waktu yang

singkat cukup kecil. Mengingat, investasi yang dibutuhkan untuk pembangunan kapal dengan emisi rendah masih belum realistis. Misalnya, penggunaan penggerak utama kapal sepenuhnya menggunakan energi listrik. Dalam prakteknya, penggunaan energi listrik sebagai energi penggerak kapal untuk kapal masih dalam tahap riset (Inal, Charpentier, & Deniz, 2022). DFE yang masih berupa mesin motor bakar dalam (*internal combustion engine* atau ICE) memiliki rekam jejak pengembangan riset yang cukup dewasa (F M Felayati, Semin, Cahyono, Prayogi, & Winarno, 2022). Sehingga, penggunaan DFE untuk kapal sudah dalam tahap sangat mungkin diaplikasikan. Selain itu, berbagai manufaktur mesin kapal sudah memproduksi DFE (Mavrellos & Theotokatos, 2018). Sehingga, DFE layak dipertimbangkan digunakan untuk penggerak utama kapal baru saat ini.



Gambar 1. Konsep kapal ramah lingkungan dengan menggunakan DFE.

Emisi gas buang mesin di kapal cukup mendapat perhatian oleh komunitas global. IMO (*International Maritime Organization*) sebagai organisasi maritim dunia telah membuat regulasi yang ketat untuk menurunkan emisi di kapal (Ammar, 2019). Beberapa jenis emisi gas buang kapal yang diperhatikan diantaranya yaitu seperti SO_x (Sulfur Oksida), PM (*Particulate Matter*), NO_x (Nitrogen Oksida), CO (Karbon Monoksida), CO₂ (Karbon Dioksida), dan

HC (Hidrokarbon). Emisi gas SO_x dan PM sudah dalam tahap tereliminasi dengan memilih bahan bakar diesel yang rendah kandungan sulfur (Sharafian et al., 2019). Selain itu, emisi CO dan CO₂ bergantung pada proses pembakaran mesin yang dapat dioptimalkan dalam berbagai cara (Ahmed, Zhou, Zhu, & Feng, 2018). Pengurangan emisi NO_x juga dapat dilakukan dengan menambahkan alat *scrubber* atau *Exhaust Gas Recirculation* (EGR) pada mesin (J. Yang et al., 2021). Terlebih lagi, emisi HC dapat dikurangi dengan cara mengoptimalkan proses pembakaran mesin (Carlucci, Laforgia, Saracino, & Toto, 2011). Berbagai jenis emisi gas buang tersebut telah dioptimalisasikan dalam berbagai solusi oleh manufaktur mesin dan periset.

Proses pembakaran DFE menggunakan dua bahan bakar sekaligus secara bersamaan di ruang bakar. Bahan bakar yang digunakan memiliki dua karakteristik yang berbeda yaitu bahan bakar dengan karakteristik reaktifitas tinggi dan reaktifitas rendah (García Valladolid, Tunestål, Monsalve-Serrano, García, & Hyvönen, 2017). DFE umumnya berupa mesin dengan sistem pemantik kompresi (*compressed ignition engine*). Pada dasarnya, mesin tersebut menggunakan bahan bakar dengan *cetane number* yang tinggi seperti minyak diesel agar dapat terbakar dengan sistem kompresi piston. Dalam kasus ini, bahan bakar minyak diesel dikategorikan sebagai bahan bakar dengan reaktifitas tinggi. Namun, pada DFE digunakan bahan bakar lain dengan reaktifitas rendah dengan tujuan untuk mengurangi emisi gas buang berdasarkan pada pemilihan jenis bahan bakar. Oleh sebab itu, bahan bakar dengan reaktifitas tinggi digunakan untuk mengakomodasi bahan bakar reaktifitas rendah agar bisa terbakar.

Jika DFE diaplikasikan di kapal sebagai penggerak utama maka ada beberapa keuntungan yang dapat diperoleh. Seperti yang diketahui, ICE dengan sistem kompresi dapat menghasilkan daya

yang tinggi, sedangkan daya penggerak utama yang tinggi dibutuhkan untuk alat transportasi angkut berat seperti kapal. Selain itu, substitusi bahan bakar baru dengan karakteristik yang berbeda dengan minyak diesel dapat mengakomodasi kekurangan minyak diesel sebagai bahan bakar utama. Bahan bakar baru tersebut dapat digunakan untuk mengeliminasi beberapa jenis emisi gas buang seperti emisi gas SO_x dan PM yang identik dengan hasil pembakaran minyak diesel (Mavrelou & Theotokatos, 2018). Disamping itu, pemilihan bahan bakar baru tersebut dapat juga merekayasa penghematan konsumsi bahan bakar sehingga dapat mengurangi biaya operasional utama pada kapal (Semin, Felayati, Cahyono, & Zaman, 2019). Dari beberapa alasan tersebut, DFE dapat dipertimbangkan digunakan untuk kapal sebagai mesin penggerak utama.

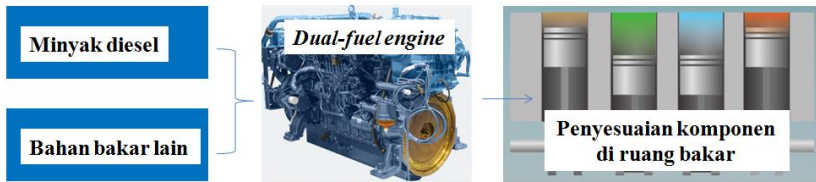
Oleh sebab itu, tulisan ini membahas penggunaan DFE di kapal sebagai penggerak utama. Beberapa hal penting yang berkaitan dengan DFE dan aplikasinya di kapal dibahas secara ringkas. Sub pembahasan pertama yaitu mengenai perkembangan pada teknologi DFE hingga saat ini. Setelah itu, sub pembahasan kedua mengenai proses pembakaran pada DFE. Aplikasi penggunaan DFE di kapal dibahas pada sub pembahasan ketiga dari sisi teknis, bahan bakar yang digunakan, dan hal lainnya.

Perkembangan Teknologi DFE

Sebuah pengembangan teknologi dikaitkan dengan isu yang menarik. Dalam hal ini, pengembangan teknologi DFE kebanyakan dikaitkan dengan isu lingkungan dan efisiensi (Balcombe et al., 2021). Dari sisi isu lingkungan, DFE dikembangkan berdasarkan emisi gas buang yang dihasilkan. Dari sisi efisiensi, pengembangan DFE didasarkan pada optimasi kinerja mesin. Keduanya pun dapat dijadikan alasan utama untuk pengembangan DFE. Hal tersebut tergantung dari objek pengembangan DFE seperti dari sisi teknis,

investasi, ataupun non-teknis lainnya. Namun, pada bagian ini dijelaskan pengembangan DFE dari sisi teknis yaitu berkaitan dengan teknologi proses pembakaran.

Cara kerja DFE sederhananya cukup dengan mengkombinasikan dua jenis bahan bakar yang berbeda, namun ada banyak penyesuaian terhadap mesin agar layak dan siap digunakan (Gambar 2). Tentunya kesiapan tersebut dikembangkan untuk hasil manufaktur mesin yang baik. Dalam proses pembakaran ada beberapa sisi teknis teknologi yang dikembangkan hingga saat ini, diantaranya yaitu komponen di ruang bakar dan strategi injeksi bahan bakar (Frengki Mohamad Felayati, Semin, Cahyono, Bakar, & Birouk, 2021; Wu, Rutland, & Han, 2017). Kedua sisi teknis yang dikembangkan tersebut juga dikombinasikan untuk mendapatkan hasil yang optimal. Hasil akhir yang diharapkan yaitu mesin dapat digunakan dengan siap tanpa adanya hal kritis yang mengganggu saat beroperasi.



Gambar 2. Pengaturan komponen ruang bakar DFE menyesuaikan kombinasi bahan bakar.

Terdapat beberapa komponen DFE di ruang bakar diantaranya yaitu *cylinder liner*, *piston*, *cylinder head*, katup, dan injektor. *Cylinder liner*, *cylinder head*, dan katup di ruang bakar merupakan objek statis yang jarang dilakukan penyesuaian terhadap proses pembakaran. Meskipun demikian, dari kinerja komponen katup terdapat banyak penelitian yang berkaitan dengan pengaturan bukaan katup seperti *miller timing* ataupun modifikasi geometri katup (Jahanbakhshi, Karami-Boozhani, Yousefi, & Ooi, 2021). Pengembangan tersebut digunakan untuk mengatur aliran massa dan pola aliran udara di

ruang bakar. Hal tersebut penting diteliti pada pengembangan DFE sebab perlu penyesuaian rasio udara dan bahan bakar yang mempengaruhi kinerja mesin. Selain itu, komponen *piston* juga sering dikembangkan untuk mengoptimalkan kinerja DFE seperti memodifikasi geometri *piston crown* atau mengatur rasio kompresi ruang bakar (Wu et al., 2017). Berbagai dampak dihasilkan dari modifikasi geometri rasio kompresi ruang bakar terhadap emisi gas buang dan kinerja mesin.

Komponen yang paling mempengaruhi proses pembakaran yaitu injektor bahan bakar. Pada pengembangan DFE, injektor bahan bakar minyak diesel disesuaikan baik dari segi geometrinya ataupun strategi injeksinya (Yaliwal et al., 2016). Komponen dan strategi injeksi injektor sulit dipisahkan dalam pengembangannya. Strategi injeksi pada injektor bahan bakar tentu membutuhkan penyesuaian komponen. Terdapat beberapa strategi injeksi yang hingga saat ini disesuaikan seperti jumlah dan ukuran lubang injektor, arah lubang injektor, dan arah injektor itu sendiri. Bahkan penyesuaian juga dilakukan dengan inovasi jenis injektor yang dapat menginjeksikan dua jenis bahan bakar sekaligus untuk injeksi langsung ke ruang bakar (X. Yang, Wang, Dong, Wei, & Zhou, 2022).

Proses Pembakaran Pada DFE

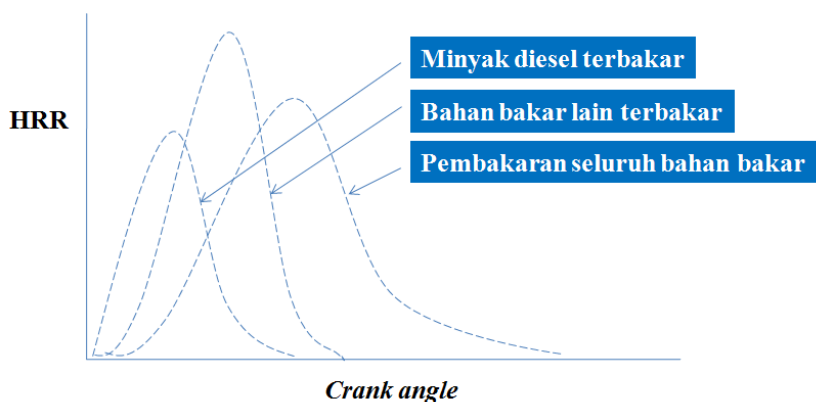
Pembakaran pada DFE merupakan faktor utama yang menyebabkan DFE berkembang hingga saat ini. Proses pembakaran DFE memiliki karakteristik yang berbeda dengan proses pembakaran mesin motor bakar dalam berbahan bakar minyak diesel saja. Pada bagian ini, proses pembakaran DFE dijelaskan ringkas dan dibandingkan dengan proses pembakaran ICE sepenuhnya berbahan bakar minyak diesel. Karakteristik proses pembakaran DFE pada beban rendah dan tinggi juga disinggung.

Di dalam ruang bakar DFE terdapat dua jenis bahan bakar yang berbeda, salah satunya yaitu bahan bakar minyak diesel. Oleh sebab itu, hal tersebut sudah menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan terhadap proses pembakarannya karena karakteristik kedua bahan bakar tersebut berbeda. Misalnya kombinasi bahan bakar minyak diesel dengan bahan bakar gas alam. Karakteristik bahan bakar gas alam sudah cukup berbeda dibandingkan dengan bahan bakar minyak diesel. Adanya bahan bakar minyak diesel pada DFE digunakan untuk membantu bahan bakar lainnya terbakar (Cheenkachorn, Poompipatpong, & Ho, 2013). Minyak diesel memiliki nilai setana sedangkan gas alam memiliki nilai oktan. Artinya, bahan bakar gas alam tidak memiliki kemampuan untuk terbakar sendiri dengan kompresi tinggi seperti bahan bakar diesel.

Kombinasi bahan bakar DFE berdasarkan pada besarnya energi bahan bakar yang dibutuhkan. Misalnya, pada kasus DFE dengan bahan bakar minyak diesel dan gas alam. Bahan bakar gas alam disubstitusikan berdasarkan prosentase energi yang dibutuhkan sepenuhnya (Wang, Fu, et al., 2021). Rumus 1 menunjukkan bahwa substitusi bahan bakar selain minyak diesel diatur berdasarkan pada prosentase energi bahan bakar. Dimana perhitungannya tergantung pada aliran massa bahan bakar minyak diesel (\dot{m}_D) dan bahan bakar lain (\dot{m}_{BL}) yang dikonversi menjadi energi berdasarkan *lower heating value* (LHV). Tentunya, besarnya prosentase substitusi bahan bakar didasarkan pada target capaian efisiensi, kinerja, dan emisi gas buang. Ketiga karakteristik tersebut menjadi pertimbangan umum dalam berbagai riset untuk menentukan substitusi bahan bakar yang optimal untuk proses pembakaran DFE (Wei & Geng, 2016).

$$\text{Substitusi bahan bakar} = \frac{\dot{m}_{BL}LHV_{BL}}{\dot{m}_DLHV_D + \dot{m}_{BL}LHV_{BL}} \times 100\% \quad (1)$$

Proses pembakaran DFE di ruang bakar dibagi dalam beberapa tahapan proses pembakaran (Wei & Geng, 2016). Bahan bakar diesel terbakar terlebih dahulu (*diesel ignition*) dan membakar jenis bahan bakar lain di sekitarnya (*other fuel ignition*). Setelah itu, bahan bakar lain tersebut terbakar pada zona pembakaran yang dapat dijangkau (*flame diffusion*). Secara sederhana proses pembakaran diilustrasikan pada Gambar 3 yang menunjukkan *heat release rate* (HRR) atau laju pelepasan panas pada proses pembakaran DFE pada setiap sudut putaran. Proses pembakaran DFE memiliki satu tahap lebih kompleks dibandingkan dengan proses pembakaran bahan bakar minyak diesel sepenuhnya (Karim, 2015).



Gambar 3. Proses pembakaran DFE di ruang bakar berdasarkan HRR dibandingkan dengan sudut putaran (*crank angle*).

Dua kondisi pembakaran DFE menjadi perhatian riset dalam beberapa tahun terakhir yaitu pada beban rendah dan beban tinggi. Pada beban rendah, perhatian utamanya yaitu hasil pembakaran yang berdampak pada efisiensi termal mesin (Park, Shim, & Bae, 2019). Pada beban tinggi, perhatiannya yaitu pada fenomena *knocking* (Mavrellos & Theotokatos, 2018). Tentunya, hal tersebut tidak mengurangi kelebihan utama DFE yang berkontribusi cukup signifikan mengurangi emisi gas buang seperti SO_x, PM, dan NO_x

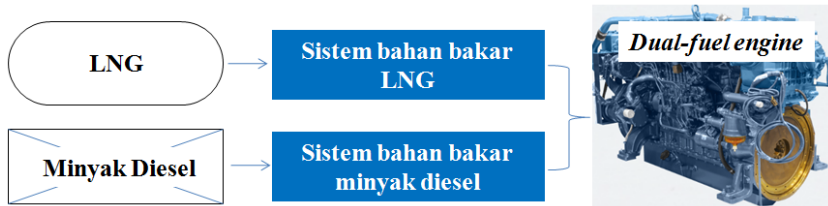
(kombinasi minyak diesel dengan gas alam) (Wang et al., 2016). Emisi SO_x dan PM tereliminasi dengan mengganti sebagian besar energi bahan bakar minyak diesel dengan bahan bakar gas alam. Sedangkan, emisi NO_x tereliminasi dengan proses pembakaran dengan suhu lebih rendah pada DFE dibandingkan ICE berbahan bakar minyak diesel sepenuhnya (Shi, Xiao, Li, Lou, & Deng, 2017).

Kapal Emisi Rendah Dengan DFE

Alat transportasi memberikan kontribusi cukup signifikan terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca dari gas buang mesin. Di kapal, mesin penggerak utama menghasilkan emisi gas buang tersebut karena umumnya menggunakan mesin berbahan bakar minyak diesel. Ukuran tonase kapal yang cenderung besar membutuhkan daya mesin penggerak utama yang besar pula. Oleh sebab itu, emisi gas buang yang dihasilkan pun cukup signifikan berkontribusi terhadap lingkungan. DFE mengkombinasikan bahan bakar minyak diesel dengan bahan bakar lainnya sehingga memiliki karakteristik pembakaran yang dapat berdampak positif terhadap emisi gas buang. Pada bagian ini, aplikasi atau penggunaan DFE pada kapal dibahas singkat dari sisi bahan bakar, teknis, dan regulasinya.

Seperti yang dijelaskan sebelumnya, DFE menggunakan dua jenis bahan bakar yang berbeda karakteristiknya untuk dapat menghasilkan emisi gas buang yang lebih rendah dengan daya yang optimal. Namun, jenis bahan bakar untuk DFE tidak terbatas, hanya saja salah satunya menggunakan bahan bakar yang dapat mudah terbakar dengan kompresi tinggi yaitu minyak diesel. Jenis bahan bakar selain minyak diesel merupakan bahan bakar yang energinya dominan namun dapat memberikan kontribusi yang dapat memperbaiki konsentrasi emisi gas buang dan kinerja mesin. Berbagai jenis bahan bakar sering digunakan untuk DFE dalam

pengembangannya. Beberapa diantaranya yaitu bahan bakar gas alam (CNG dan LNG), *Liquid Petroleum Gas* (LPG), dan methanol (Karim, 2015).



Gambar 4. Sistem permesinan sederhana kapal dengan DFE.

Bahan bakar gas alam (CNG dan LNG) merupakan bahan bakar yang paling umum digunakan pada DFE (Mavrellos & Theotokatos, 2018). Mengingat, ketersediaan gas alam masih cukup besar seperti di Indonesia (Butarbutar, Saut Gurning, & Semin, 2022). Selain itu, terdapat beberapa keuntungan yang dapat dipertimbangkan dari penggunaan bahan bakar gas alam. Keuntungan tersebut bisa dari segi karakteristik pembakaran ataupun dari sisi operasional. Pembakaran gas alam pada DFE pada dasarnya yaitu dengan komposisi bahan bakar mayoritas berupa metana. Pembakaran metana dan minyak diesel pada DFE dapat menghasilkan emisi NO_x yang cukup signifikan rendah (Liu, Guo, Guo, & Wang, 2021). Selain itu, kinerja yang dihasilkan DFE juga cukup baik seperti pada ICE berbahan bakar diesel sepenuhnya (Wang, Zhang, et al., 2021).

Hingga saat ini telah ada dan beroperasi kapal yang menggunakan bahan bakar minyak diesel dan LNG. Artinya, DFE dalam aplikasinya di kapal sudah pada tahapan siap pakai. Berbagai manufaktur mesin utama kapal juga telah menawarkan DFE dalam berbagai pilihan rentang daya. Tentunya instalasi permesinan kapal dengan DFE sedikit berbeda dengan instalasi permesinan kapal dengan mesin berbahan bakar minyak diesel sepenuhnya, terutama pada bagian sistem bahan bakar (Son & Kim, 2020). Jika

menggunakan DFE tentu perlu menyediakan ruang muat bahan bakar LNG dan sistemnya. Bahan bakar LNG memerlukan perlakuan khusus yang harus dijaga suhunya hingga -160°C . Selain itu, perlu ada sistem tambahan yang dapat mendukung perlakuan khusus pada LNG tersebut hingga dapat digunakan pada DFE.

Penggunaan bahan bakar lainnya selain LNG tentu memerlukan desain sistem khusus. Pemilihan bahan bakar selain minyak diesel untuk DFE ditentukan berdasarkan banyak faktor, seperti ruang muat, ketersediaan bahan bakar, ketersediaan mesin, dan nilai investasi (Butarbutar et al., 2022). Terdapat banyak pertimbangan teknis dan non-teknis yang perlu diperhatikan. Di sisi lain, perlu diperhatikan bahwa penggunaan DFE di kapal perlu menyesuaikan regulasi klasifikasi seperti Biro Klasifikasi Indonesia (BKI), *Lloyd Register* (LR), *Berau Veritas* (BV), atau klasifikasi lainnya yang dipilih. Hal tersebut tentunya untuk menjamin keselamatan kapal setelah selesai dibangun. Penggunaan DFE di kapal sudah cukup siap diaplikasikan jika regulasi telah memaksa untuk menurunkan emisi, terutama untuk kebutuhan domestik di Indonesia.

Kesimpulan

Pada bagian ini dijelaskan penggunaan DFE sebagai mesin utama penggerak kapal. Beberapa hal yang perlu diketahui dalam penggunaan DFE untuk kapal telah dijelaskan yaitu perkembangan teknologi DFE, proses pembakaran DFE, dan penggunaan DFE di kapal. Dari beberapa pembahasan tersebut diperoleh kesimpulan bahwa DFE telah siap diimplementasikan pada kapal sebagai penggerak utama. Teknologi DFE sudah cukup dewasa dan sudah dikomersialkan. Proses pembakarannya dapat memberikan kontribusi terhadap penurunan emisi gas buang yang merugikan pada lingkungan. Oleh sebab itu, DFE sudah layak digunakan di

kapal untuk memberikan progres penurunan emisi gas buang yang merugikan, terutama yang umum digunakan menggunakan bahan bakar diesel dan gas alam. Terlebih lagi, agar dapat bisa diaplikasikan perlu adanya ketersediaan bahan bakar dan memenuhi regulasi yang ada.

Referensi

- Ahmed, S. A., Zhou, S., Zhu, Y., & Feng, Y. (2018). Performance and Emission Characteristics Analysis of Dual Fuel Compression Ignition Engine Using Natural Gas and Diesel. *International Journal of Thermodynamics*, 21(1), 16–25. <https://doi.org/10.5541/ijot.316300>
- Ammar, N. R. (2019). An environmental and economic analysis of methanol fuel for a cellular container ship. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 69, 66–76. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2019.02.001>
- Balcombe, P., Staffell, I., Kerdan, I. G., Speirs, J. F., Brandon, N. P., & Hawkes, A. D. (2021). How can LNG-fuelled ships meet decarbonisation targets? An environmental and economic analysis. *Energy*, 227, 120462. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.120462>
- Butarbutar, R., Saut Gurning, R. O., & Semin. (2022). LNG as marine fuel within Indonesia shipping sector, a literature review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 972(1), 012076. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/972/1/012076>
- Carlucci, A. P., Laforgia, D., Saracino, R., & Toto, G. (2011). Combustion and Emissions Control in Diesel–Methane Dual Fuel Engines: The Effects of Methane Supply Method Combined with Variable In-Cylinder Charge Bulk Motion. *Energy Conversion and Management*, 52(8–9), 3004–3017. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2011.04.012>
- Cheenkachorn, K., Poompipatpong, C., & Ho, C. G. (2013). Performance and Emissions of A Heavy-Duty Diesel Engine Fuelled with Diesel and LNG (Liquid Natural Gas). *Energy*, 53,

- 52–57. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.027>
- Felayati, F M, Cahyono, B., Prayogi, U., & Winarno, A. (2022). Future perspective of the ship alternative fuels in Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 972, p. 12024). IOP Publishing.
- Felayati, F M, Semin, Cahyono, B., Prayogi, U., & Winarno, A. (2022). Future perspective of the ship alternative fuels in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 972(1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/972/1/012024>
- Felayati, Frengki Mohamad, Semin, Cahyono, B., Bakar, R. A., & Birouk, M. (2021). Performance and emissions of natural gas/diesel dual-fuel engine at low load conditions: Effect of natural gas split injection strategy. *Fuel*, 300, 121012. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121012>
- García Valladolid, P., Tunestål, P., Monsalve-Serrano, J., García, A., & Hyvönen, J. (2017). Impact of Diesel Pilot Distribution on The Ignition Process of A Dual Fuel Medium Speed Marine Engine. *Energy Conversion and Management*, 149, 192–205. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.023>
- Inal, O. B., Charpentier, J. F., & Deniz, C. (2022). Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111965. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111965>
- Jahanbakhshi, A., Karami-Boozhani, S., Yousefi, M., & Ooi, J. B. (2021). Performance of bioethanol and diesel fuel by thermodynamic simulation of the miller cycle in the diesel engine. *Results in Engineering*, 12, 100279. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2021.100279>
- Karim, G. A. (2015). *Dual-fuel diesel engines*. CRC Press.
- Liu, J., Guo, Q., Guo, J., & Wang, F. (2021). Optimization of a diesel/natural gas dual fuel engine under different diesel substitution ratios. *Fuel*, 305, 121522. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121522>
- Mavrelou, C., & Theotokatos, G. (2018). Numerical Investigation

- of A Premixed Combustion Large Marine Two-Stroke Dual Fuel Engine for Optimising Engine Settings Via Parametric Runs. *Energy Conversion and Management*, 160, 48–59. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2017.12.097>
- Park, H., Shim, E., & Bae, C. (2019). Expansion of Low-Load Operating Range By Mixture Stratification in A Natural Gas-Diesel Dual-Fuel Premixed Charge Compression Ignition Engine. *Energy Conversion and Management*, 194, 186–198. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2019.04.085>
- Semin, Felayati, F. M., Cahyono, B., & Zaman, M. B. (2019). Improvement Approaches for the Combustion Process of Recent Diesel Natural Gas Dual Fuel Engines – A Technical Review. *International Review of Mechanical Engineering*, 13(March), 198–202. <https://doi.org/10.15866/ireme.v13i3.15751>
- Sharafian, A., Blomerus, P., & Mérida, W. (2019). Natural gas as a ship fuel: Assessment of greenhouse gas and air pollutant reduction potential. *Energy Policy*, 131, 332–346. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2019.05.015>
- Shi, L., Xiao, W., Li, M., Lou, L., & Deng, K. (2017). Research on The Effects of Injection Strategy on LTC Combustion Based on Two-Stage Fuel Injection. *Energy*, 121, 21–31. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.12.128>
- Son, H., & Kim, J. K. (2020). Energy-efficient process design and optimization of dual-expansion systems for BOG (Boil-off gas) Re-liquefaction process in LNG-fueled ship. *Energy*, 203. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.117823>
- Wang, Z., Fu, X., Wang, D., Xu, Y., Du, G., & You, J. (2021). A multilevel study on the influence of natural gas substitution rate on combustion mode and cyclic variation in a diesel/natural gas dual fuel engine. *Fuel*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120499>
- Wang, Z., Zhang, F., Xia, Y., Wang, D., Xu, Y., & Du, G. (2021). Combustion phase of a diesel/natural gas dual fuel engine under various pilot diesel injection timings. *Fuel*, 289.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119869>

- Wang, Z., Zhao, Z., Wang, D., Tan, M., Han, Y., Liu, Z., & Dou, H. (2016). Impact of Pilot Diesel Ignition Mode on Combustion and Emissions Characteristics of A Diesel/Natural Gas Dual Fuel Heavy-Duty Engine. *Fuel*, *167*, 248–256. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2015.11.077>
- Wei, L., & Geng, P. (2016). A Review on Natural Gas/Diesel Dual Fuel Combustion, Emissions and Performance. *Fuel Processing Technology*, *142*, 264–278. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2015.09.018>
- Wu, Z., Rutland, C. J., & Han, Z. (2017). Numerical Optimization of Natural Gas and Diesel Dual-Fuel Combustion for A Heavy-Duty Engine Operated at A Medium Load. *International Journal of Engine Research*, *19*(6), 682–696. <https://doi.org/10.1177/1468087417729255>
- Yaliwal, V. S., Banapurmath, N. R., Gireesh, N. M., Hosmath, R. S., Donateo, T., & Tewari, P. G. (2016). Effect of Nozzle and Combustion Chamber Geometry on The Performance of A Diesel Engine Operated on Dual Fuel Mode Using Renewable Fuels. *Renewable Energy*, *93*, 483–501. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.020>
- Yang, J., Tang, T., Jiang, Y., Karavalakis, G., Durbin, T. D., Wayne Miller, J., ... Johnson, K. C. (2021). Controlling emissions from an ocean-going container vessel with a wet scrubber system. *Fuel*, *304*, 121323. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2021.121323>
- Yang, X., Wang, X., Dong, Q., Wei, D., & Zhou, T. (2022). A measurement method for the dual fuel coupling injection characteristics of the high-pressure natural gas and diesel co-direct injection engine. *Measurement*, *193*, 110891. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2022.110891>
- Zheng, J., Wang, J., Zhao, Z., Wang, D., & Huang, Z. (2019). Effect of Equivalence Ratio on Combustion and Emissions of A Dual-Fuel Natural Gas Engine Ignited with Diesel. *Applied Thermal Engineering*, *146*, 738–751. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.10.045>

EXHAUST GAS RECIRCULATION

Dori Yuvenda^{1,2,*}, Wagino¹, Randi Purnama Putra^{1,2},
Ahmad Arif^{1,2}, Toto Sugiarto¹

¹⁾ Jurusan Teknik Otomotif, Fakultas Teknik, Universitas Negeri
Padang, Padang, Indonesia

Email: doriyuvenda@ft.unp.ac.id

²⁾ centre for energy and power electronics research, Universitas
Negeri Padang, Padang, Indonesia

131

Abstrak

Mesin diesel memiliki daya dan efisiensi termal yang tinggi dari mesin bensin, dikarenakan mesin diesel memiliki perbandingan kompresi yang tinggi sehingga tekanan kompresi yang dihasilkan pada langkah kompresi lebih besar maka menghasilkan daya ledakan yang besar. Namun, mesin diesel memiliki permasalahan terkait emisi gas buang yang dihasilkan pada proses pembakaran, dimana kadar emisi cukup tinggi terutama pada emisi nitrogen oksida (NO_x) dan asap (*soot*). Teknologi *exhaust gas recirculation* (EGR) terbukti menurunkan emisi NO_x secara signifikan, tetapi emisi asap terjadi peningkatan konsentrasinya. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengontrol peningkatan emisi asap yang dihasilkan oleh mesin diesel dengan menggunakan metode sistem injeksi pemasukan EGR

ke dalam silinder. Metode pengembalian sisa gas buang dilakukan dengan model injeksi ke dalam saluran masuk yang dikontrol menggunakan perangkat elektronik sehingga pemasukan gas buang dapat dikondisikan sesuai dengan diagram pembukaan katup yang dinamakan dengan *Exhaust Gas Recirculation Injection Control Systems* (EGRICS). Sistem EGR yang digunakan adalah *cold EGR* dimana sebelum gas sisa pembakaran dikembalikan ke dalam silinder terlebih dahulu didinginkan menggunakan *cooler*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan menggunakan metode teknik injeksi (*EGRICS*) melalui *mapping* durasi injeksi 15 ms maka peningkatan emisi asap tidak terlalu signifikan pada sehingga ini dapat menurunkan kadar NO_x yang dihasilkan pada mesin diesel.

Kata kunci: mesin diesel, EGRICS, nitrogen oksida, asap

Pendahuluan

132

Penggunaan mesin diesel pada berbagai sektor seperti industri, pertanian dan transportasi (darat dan laut) tergolong banyak. Hal ini dikarenakan mesin diesel memiliki keunggulan yaitu daya mesin yang lebih besar, efisiensi yang tinggi, harga bahan bakar yang lebih murah, dan perawatan mesin yang mudah (Ganesan 2007; Heywood 1988). Namun disamping keunggulan, mesin diesel memiliki kelemahan yang berkaitan dengan emisi gas buang yang berbahaya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Emisi gas buang yang dimaksud adalah *nitrogen oxide* (NO_x) dan asap (*smoke*). Emisi NO_x pada mesin diesel lebih banyak dihasilkan dari gas emisi yang lain seperti karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon (HC). Hal ini disebabkan mesin diesel memiliki temperatur pembakaran yang tinggi, sehingga Nitrogen (N_2) dengan mudah beroksidasi dengan Oksigen (O_2) membentuk NO_x . Heywood (Heywood 1988) menjelaskan bahwa emisi NO_x lebih banyak diproduksi pada temperatur tinggi terutama pada mesin diesel. Salah satu upaya yang dilakukan untuk

menurunkan emisi NO_x pada mesin diesel adalah *exhaust gas recirculation* (EGR)(Agarwal, Singh, and Agarwal 2011; Ganesan 2007; Hussain et al. 2012). EGR adalah metode untuk mengembalikan sebagian gas sisa pembakaran ke silinder untuk di bakar kembali melalui saluran masuk (*intake manifold*) dengan tujuan untuk mengurangi jumlah kuantitas nitrogen oksida (NO_x).

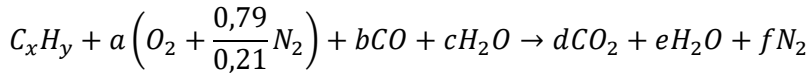
Pengaruh dari mensirkulasikan gas buang ke ruang bakar kemudian dicampur dengan udara segar yang baru masuk ke *intake manifold* dapat menurunkan temperatur maksimum (Hussain et al. 2012) dan tekanan di daerah *flame* (proses *polytropic*) sehingga dapat mengurangi reaksi pembentukan NO_x. Ini disebabkan beberapa faktor di antaranya adalah (Ramly 2012) yaitu:

- a. Nilai Kapasitas panas (C_p) pada gas buang yang diresirkulasikan lebih tinggi dari nilai C_p udara segar yang baru masuk ke *intake manifold*, hal ini menurunkan tekanan dan temperatur pada saat langkah kompresi yang menyebabkan kecepatan pembakaran (*flame speed*) berkurang yang berpengaruh pada penurunan puncak tekanan maksimal dan panas yang di lepaskan (*heat release rate*) pada saat proses pembakaran.
- b. Penurunan dari jumlah partikel nitrogen (N₂) dan oksigen (O₂) yang masuk ke dalam silinder dikarenakan sebagian udara murni yang masuk ke dalam silinder mesin sudah digantikan oleh gas buang yang masuk sehingga jumlah reaksi antara nitrogen dan oksigen dapat dikurangi pada proses pembakaran.
- c. Penurunan kecepatan pembakaran disebabkan oleh meningkatnya temperatur udara yang masuk.

Jadi proses mensirkulasikan gas buang merupakan salah satu alternatif yang tepat untuk menurunkan partikel NO_x secara signifikan pada mesin dengan proses pembakaran tekanan konstan. Meskipun demikian pemanfaatan EGR yang berlebihan akan menyebabkan tingginya asap (*smoke*) sehingga butuh kontrol aliran

massa EGR (*mass flow rate*) yang tepat dari gas buang agar sesuai dengan kondisi mesin.

Adapun raksi kimia yang terjadi ketika gas sisa pembakaran dikembalikan ke dalam silinder dapat diformulasikan sebagai berikut (Gerianto, Ariana, and Umam 2009):



Metode EGR terbukti menurunkan emisi NO_x dari mesin diesel berdasarkan penelitian sebelumnya (Agarwal et al. 2011; Hountalas, Mavropoulos, and Binder 2008; Kumar et al. 2018; Mohiuddin et al. 2021; Rajesh Kumar et al. 2016) dengan jumlah volume gas sisa pembakaran maksimal 30%. Penambahan jumlah volume sisa pembakaran yang terlalu banyak berpengaruh juga terhadap penurunan daya mesin dan efisiensi termal mesin disel (Agarwal et al. 2011; Hountalas et al. 2008; Hussain et al. 2012).

Studi ini melakukan pengembangan pada EGR dengan menggunakan metode pemasukan model injeksi menggunakan sistem pengontrolan elektronik yang disitilahkan dengan *exhaust gas recirculation injection control system* (EGRICS). Tujuan dari metode ini adalah mengontrol penggunaan volume dari gas buang yang di masukan ke dalam silinder agar tidak terlalu banyak dan mengatur waktu penginjeksian dari gas buang sesuai dengan pembukaan katup masuk pada langkah hisap sehingga gas sisa pembakaran yang dikembalikan ke dalam silinder dapat dikontrol sesuai dengan langkah kerja mesin. Teknologi EGR terbukti menurunkan emisi NO_x tetapi pada sisi lain dapat meningkatkan emisi asap dengan penggunaan gas buang yang terlalu banyak sehingga perlu dilakukan pengontrolan volume gas buang yang masuk ke silinder secara elektronik

Exhaust Gas Recirculation (EGR)

EGR adalah suatu metode untuk mengembalikan sebagian gas sisa pembakaran ke ruang bakar untuk di bakar kembali melalui saluran masuk (*intake manifold*) dengan tujuan untuk mengurangi jumlah kuantitas nitrogen oksida (NO_x). Ikatan NO_x sangat cepat bereaksi pada temperatur maksimum dan tekanan tinggi. Total laju massa aliran dari EGR yang masuk ke dalam silinder dapat di hitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Ganesan 2003) :

$$\% EGR = \frac{\dot{m}_{EGR}}{\dot{m}_{cylinder}} \times 100\%$$

Keterangan

% EGR = persentase *mole* EGRICS

\dot{m}_{EGR} = *mass flow rate* yang diresirkulasikan

$\dot{m}_{cylinder}$ = Total *mass flow rate* di dalam silinder

A. Jenis sistem EGR

Berdasarkan temperatur kerja dari sistem maka EGR dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu

135

a. *Hot EGR*

Sisa gas buang kendaraan yang dimasukkan/diresirkulasikan kembali ke dalam silinder melalui saluran masuk (*intake manifold*) tanpa diiberikan pendinginan terlebih dahulu. Dengan demikian gas sisa buang tersebut masih dalam kondisi panas sehingga panas gas tersebut akan mempengaruhi temperatur udara segar dari lingkungan yang masuk ke saluran masuk mesin.

b. *Cold EGR*

Sisa gas buang kendaraan yang dimasukan/diresirkulasikan kembali ke dalam silinder melalui saluran masuk (*intake manifold*) diberikan pendinginan terlebih dahulu menggunakan *Cooler*. Pendinginan ini hanya maksimal sampai dengan temperatur lingkungan. Tujuan didinginkan adalah untuk mempertahankan

temperatur udara masuk sehingga dapat memperbanyak volume udara ke dalam silinder.

B. *Exhaust Gas Recirculation (EGR) Model Injection Systems*

Studi ini melakukan pengembangan sistem EGR pada metode/cara pemasukan gas buang ke dalam silinder. Selama ini teknologi yang digunakan untuk pemasukan gas buang ke dalam silinder menggunakan sistem katup (*valve*) yang bekerja berdasarkan hisapan dari langkah hisap. Penelitian ini mengembangkan sistem pemasukan EGR dengan menggunakan sistem injeksi yang diistilahkan dengan *Exhaust Gas Recirculation Injection Control System* (EGRICS). EGRICS adalah sebuah metode pemasukan gas buang ke dalam silinder dengan model injeksi yang di atur oleh modul perangkat kontrol elektronik (ECU) agar gas buang yang di manfaatkan dapat terkontrol sesuai dengan kondisi mesin. Keunggulan dari sistem EGRICS ini adalah volume dari gas buang yang dimanfaatkan/digunakan dapat dikondisikan sesuai dengan putaran mesin.

Prinsipnya sistem kontrol EGRICS sama seperti dengan sistem kontrol elektronik bahan bakar injeksi pada mesin diesel tipe *common rail*, dimana sistem kontrol elektronik ini dilengkapi dengan tiga komponen utama yaitu

- a. Sensor ini berfungsi untuk mendeteksi kecepatan putaran mesin dan mendeteksi pergerakan dari langkah piston. Sensor ini dilengkapi dengan sebuah magnet yang bertujuan untuk menghasilkan sinyal berupa tegangan yang terbangkit akibat pemutusan fluks magnet oleh roda gigi yang terpasang pada *fly wheel* yang digunakan sebagai referensi untuk penentuan top satu. Sensor yang digunakan adalah *pulser*.
- b. Prosesor berfungsi sebagai pengolah data kemudian memerintahkan aktuator untuk bekerja, yang bertindak sebagai prosesor adalah *electronic control unit* (ECU).

c. Aktuator adalah bagian komponen yang menerima perintah ECU kemudian menjalankan perintah tersebut sesuai dengan data yang diterimanya. Bagian aktuator dari sistem ini adalah injektor. Injektor berfungsi untuk menginjeksikan gas EGRICS dari tabung penampung ke *intake manifold* dengan volume gas yang diinjeksikan sesuai dengan kebutuhan mesin.

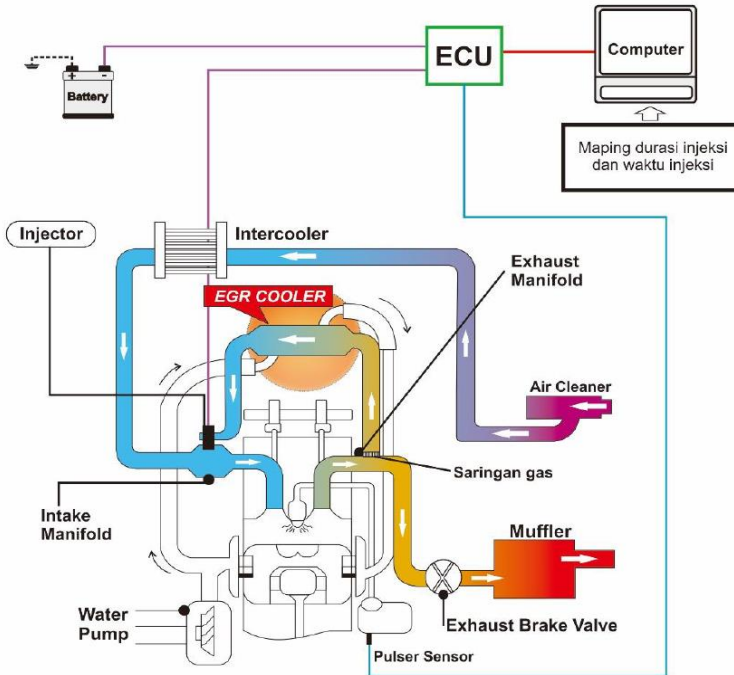
Selain komponen kontrol elektronik, sistem EGRICS juga dilengkapi dengan komponen mekanik yaitu:

- a. Saringan EGR berfungsi sebagai penyaring kotoran yang ada pada gas buang agar tidak terjadi penyumbatan pada injektor.
- b. *Intercooler/EGR cooler* berfungsi sebagai pendingin gas buang yang masuk ke dalam silinder mesin agar temperatur udara yang masuk ke dalam silinder tidak terlalu panas.
- c. Selang injektor berfungsi sebagai penyalur gas buang ke *fitting* injektor yang terpasang pada saluran masuk

Adapun prinsip kerja dari sistem EGRICS adalah memanfaatkan tegangan yang di bangkitkan pada pulser (N_e). Pada saat roda gila (*fly wheel*) berputar maka tonjolan (*pick up*) pada *fly wheel* akan bersentuhan dengan sensor pulser sehingga sinyal tegangan dibangkitkan dan memberikan informasi ke pada ECU. Kemudian ECU akan memproses data yang telah diperoleh dari pulser kemudian memerintahkan injektor untuk bekerja dengan cara mengaktifkan medan magnet yang ada pada injektor sehingga mengakibatkan injektor menginjeksikan gas EGR yang sudah tersedia pada *injector rail*. Semakin tinggi putaran maka semakin cepat sinyal yang terbangkitkan pada sensor pulser dan memberikan informasi lebih cepat ke ECU sehingga injektor lebih cepat menginjeksikan gas EGR ke silinder.

Jenis EGRICS yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis *Cold EGR* yang dilengkapi dengan *cooler* (pendingin) seperti yang ditunjukkan Gambar 1. Tujuan dari pemasangan *cooler*

adalah sebagai pendingin gas buang yang diresirkulasikan kembali ke silinder, supaya panas gas buang tidak merusak sistem injeksi seperti selang dan *rail injector*. Pada sistem EGRICS juga dipasang filter sebelum gas buang masuk ke *cooler*, dapat dilihat pada Gambar 1. Tujuannya adalah supaya kotoran sisa pembakaran tidak masuk ke dalam silinder bersamaan dengan gas buang yang diinjeksikan ke silinder melalui saluran masuk (*intake manifold*). Rangkaian sistem dan komponen-komponen dari sistem EGRICS yang digunakan pada mesin diesel di penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1 sebagai berikut:



Gambar 1. Rangkaian dan Komponen sistem EGRICS pada Mesin Diesel Tipe *Cold EGR*.

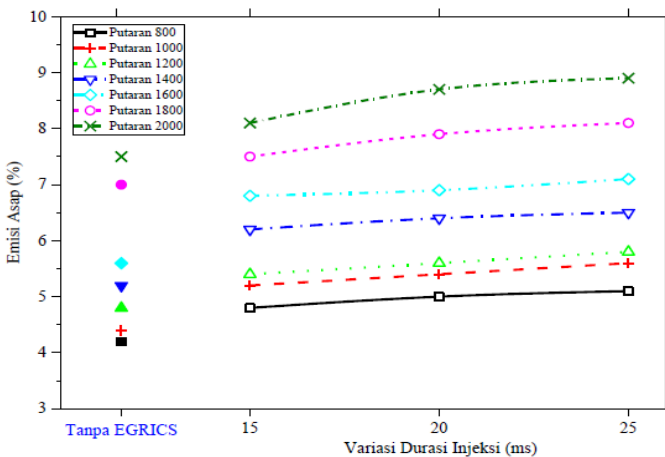
Adapun keuntungan dari sistem EGRICS yang dilakukan pada studi ini adalah sebagai berikut:

- a. Pemasukan gas buang dapat dikontrol sesuai dengan kebutuhan mesin sehingga dapat menurunkan emisi gas buang NO_x secara

signifikan dan juga dapat memperkecil terjadinya peningkatan emisi asap (*soot*) yang berlebihan pada mesin diesel.

- b. Merupakan sebuah inovasi baru dalam pengembangan teknologi EGR sehingga teknologi ini dapat di aplikasikan pada mesin diesel yang sudah memiliki sistem kontrol elektronik (*common rail*).

Studi ini lebih memfokuskan pada penggunaan jumlah volume dari gas sisa buang yang dikembalikan ke silinder agar dapat menimalisir peningkatan emisi asap. Dimana teknik EGR mampu menurunkan emisi NO_x tetapi disisi lain terjadi peningkatan emisi asap (Abdelaal and Hegab 2012; Agarwal et al. 2011; Banapurmath, Basavarajappa, and Tewari 2012; Mohiuddin et al. 2021; Peng et al. 2008; Venkatesan, Nallusamy, and Nagapandiselvi 2021; Venu, Subramani, and Raju 2019). Volume dari gas buang yang diresirkulasikan ke silinder dikontrol menggunakan ECU dengan melakukan pengaturan atapun mapping pada durasi injeksi pada injektor. Setelah dilakukan mapping durasi dan waktu injeksi pada ECU pada putaran mesin yang berbeda diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.



Gambar 2. Pengaruh mapping durasi injeksi pada ECU terhadap emisi asap (*soot*) pada putaran mesin berbeda pada EGRICS

Gambar 2 menjelaskan pengaruh memvariasikan durasi injeksi pada ECU selama 15 ms, 20 ms dan 25 ms dan putaran mesin selama 800 rpm sampai 2000 rpm dengan interval 200 rpm pada sistem EGRICS tipe *cold* terhadap emisi asap mesin diesel. Sebagai pembandingan atau pengontrol, juga dilakukan pengujian emisi asap tanpa menggunakan sistem *Cold* EGRICS dengan variasi putaran mesin (rpm) yang sama. Emisi asap tanpa EGRICS terlihat lebih rendah dari menggunakan EGRICS di semua variasi durasi injeksi dan putaran mesin. Hal ini disebabkan jumlah udara murni yang lebih banyak (100%) tanpa menggunakan EGRICS sehingga jumlah konsentrasi oksigen lebih banyak sehingga pembakaran lebih sempurna, dengan demikian produksi partikel/jelaga menjadi lebih rendah.

Grafik 2 menunjukkan bahwa penggunaan EGRICS sangat mempengaruhi tingkat emisi asap mesin diesel. Semakin tinggi durasi injeksi dari EGRICS maka semakin tinggi juga emisi asap, begitu pula dengan putaran mesin (rpm) yang berbanding lurus juga terhadap durasi injeksi dari EGRICS. Kenaikan emisi asap ini disebabkan karena jumlah udara yang masuk ke dalam silinder melalui intake *manifold* berkurang sehingga konsentrasi O_2 menurun, dengan demikian pembakaran menjadi tidak tuntas dan produksi emisi partikel meningkat (Khandal, Banapurmath, and Gaitonde 2017; Kumar et al. 2018; Peng et al. 2008; Rajesh kumar and Saravanan 2015) dan juga ketika gas buang di kembalikan ke silinder sehingga tidak hanya molekul O_2 dan N_2 saja tetapi juga bercampur dengan gas hasil dari sisa pembakaran lainnya seperti SO , NO_x dan CO . Akibat pencampuran dari berbagai gas buang tersebut sehingga pembakaran di dalam ruang bakar menjadi tidak sempurna sehingga menyebabkan gas buang/jelaga yang terbentuk tinggi dan meningkatkan emisi asap mesin diesel (Agarwal et al. 2011; Hussain et al. 2012; Venkatesan et al. 2021).

Grafik 2 di atas juga menjelaskan nilai emisi asap terbesar terjadi pada durasi injeksi 25 ms EGRICS tipe *cold* dengan putaran mesin 2000 rpm dan emisi asap terendah pada durasi injeksi sebesar 15 ms dengan putaran mesin 800 rpm. Hal ini disebabkan semakin lama durasi injeksi dan semakin tinggi putaran mesinnya maka kebutuhan bahan bakarnya meningkat dan suplai udara untuk pembakaran semakin besar pula, sedangkan dengan menambah durasi injeksi maka jumlah volume gas buang (EGR) yang masuk ke silinder melalui saluran masuk juga akan bertambah banyak. Dengan demikian jumlah udara yang masuk menjadi berkurang sehingga konsentrasi dari oksigen (O_2) juga ikut menurun (Agarwal et al. 2011; Hussain et al. 2012), sehingga kualitas pencampuran antara bahan bakar dan udara menjadi tidak sempurna akibatnya pembakaran menjadi tidak tuntas dan produksi partikel/jelaga menjadi tinggi. Penurunan konsentrasi dari oksigen (O_2) karena sebagian digantikan oleh gas buang yang dikembalikan ke silinder menyebabkan pembakaran yang tidak sempurna sehingga meningkatkan emisi asap (Hussain et al. 2012).

Namun demikian, jika dibandingkan dengan beberapa penelitian sebelumnya (Gerianto et al. 2009; Septiyanto et al. 2017) yang menggunakan sistem *hot* EGR yang dapat menaikkan emisi asap yang sangat signifikan, maka pada penelitian ini menggunakan sistem EGRICS tipe *cold* hanya mengalami sedikit kenaikan emisi asap dengan rata-rata kenaikan sebesar 18,5%. Hal ini disebabkan karena pada EGRICS tipe *cold*, sebelum gas buang diinjeksikan kembali ke *intake manifold* terlebih dahulu didinginkan menggunakan *cooler* dengan pendingin aliran udara, sehingga mengurangi temperatur gas buang yang masuk ke *intake manifold*.

Apabila dilihat dari proses pembentukan asap (*soot*) dan emisi NO_x , kedua polutan ini saling bertolak belakang dalam proses terbentuknya. Emisi asap terbentuk ketika bahan bakar tidak

mampu tercampur dengan baik dengan oksigen sehingga reaksi pembakaran tidak sempurna, dalam kondisi seperti ini temperatur pembakaran tidak terlalu tinggi sehingga NO_x tidak banyak terbentuk. Oleh karena itu, maka dapat juga disimpulkan bahwa dengan rata-rata kenaikan *smoke opacity* 18,5 % menyebabkan emisi NO_x yang terbentuk juga kecil sehingga memperkecil terjadinya pencemaran udara dan lingkungan.

Dengan demikian metode EGRICS mampu mengontrol penginjeksian gas buang ke dalam silinder sesuai dengan putaran mesin sehingga peningkatan dari emisi asap yang tinggi dapat diminimalisir dan emisi NO_x yang dihasilkan juga dapat ditekan secara signifikan.

Kesimpulan

Teknologi EGR mampu menurunkan emisi nitrogen oksida (NO_x) namun emisi asap terjadi peningkatan konsentrasinya. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dengan melakukan pengaturan/*mapping* durasi injeksi pada sistem EGRICS tipe *cold EGR* yang optimal adalah sebesar 15 ms karena menghasilkan emisi asap paling rendah pada setiap putaran mesin. Teknik EGRICS mampu menekan peningkatan emisi asap sehingga dengan kata lain juga dapat menekan emisi NO_x . Penggunaan EGRICS jenis *cold* juga lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan EGR jenis *hot*, hal ini ditandai dengan kenaikan emisi asap menggunakan EGRICS jenis *cold* lebih rendah dari pada EGR jenis *hot* yaitu sebesar 18,5% sehingga dapat menurunkan emisi NO_x yang terbentuk pada gas buang mesin diesel. Kemudian cara pemasangan model injeksi menggunakan sistem kontrol ECU lebih baik jika dibandingkan dengan cara pemasangan EGR secara konvensional (katup vakum), hal ini terbukti dengan peningkatan asap yang relatif rendah dan disesuaikan dengan putaran mesin.

References

- Abdelaal, M. M., and A. H. Hegab. 2012. "Combustion and Emission Characteristics of a Natural Gas-Fueled Diesel Engine with EGR." *Energy Conversion and Management* 64:301–12. doi: 10.1016/j.enconman.2012.05.021.
- Agarwal, Deepak, Shrawan Kumar Singh, and Avinash Kumar Agarwal. 2011. "Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Performance, Emissions, Deposits and Durability of a Constant Speed Compression Ignition Engine." *Applied Energy* 88(8):2900–2907. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.066>.
- Banapurmath, N. R., Y. H. Basavarajappa, and P. G. Tewari. 2012. "Effect of Mixing Chamber Venturi, Injection Timing, Compression Ratio and EGR on the Performance of Dual-Fuel Engine Operated with HOME and CNG." *International Journal of Sustainable Engineering* 5(3):265–79. doi: 10.1080/19397038.2011.603847.
- Ganesan, V. 2003. *Internal Combustion Engines*. Second edi. New Delhi: Tata McGraw-Hill Pub.
- Ganesan, V. 2007. *IC Engines*. Third edit. New Delhi: Tata McGraw-Hill Pub.
- Gerianto, Indrajaya, I. Made Ariana, and Khairul Umam. 2009. "Optimalisasi Rasio Exhaust Recirculation (EGR) Pada Berbagai Pembebanan Motor Diesel Dengan Pemodelan Simulasi." Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Heywood, John B. 1988. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Vol. 21.
- Hountalas, D. T., G. C. Mavropoulos, and K. B. Binder. 2008. "Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) Temperature for Various EGR Rates on Heavy Duty DI Diesel Engine Performance and Emissions." *Energy* 33(2):272–83. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.07.002>.
- Hussain, Jaffar, K. Palaniradja, Alagumurthi Natarajan, and R. Manimaran. 2012. "Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Performance and Emission Characteristics of a Three

Cylinder Direct Injection Compression Ignition Engine.” *Alexandria Engineering Journal* 51:241–247. doi: 10.1016/j.aej.2012.09.004.

Khandal, S. V, N. R. Banapurmath, and V. N. Gaitonde. 2017. “Effect of Exhaust Gas Recirculation, Fuel Injection Pressure and Injection Timing on the Performance of Common Rail Direct Injection Engine Powered with Honge Biodiesel (BHO).” *Energy* 139:828–41. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.035>.

Kumar, A. Nares., K. Brahma Raju, P. Srinivas Kishore, and K. Narayana. 2018. “Some Experimental Studies on Effect of Exhaust-Gas Recirculation on Performance and Emission Characteristics of a Compression-Ignition Engine Fuelled with Diesel and Lemon-Peel Oil Blends.” *Materials Today: Proceedings* 5(2, Part 1):6138–48. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.220>.

Mohiuddin, Khawar, Heesun Kwon, Minhoo Choi, and Sungwook Park. 2021. “Effect of Engine Compression Ratio, Injection Timing, and Exhaust Gas Recirculation on Gaseous and Particle Number Emissions in a Light-Duty Diesel Engine.” *Fuel* 294:120547. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120547>.

Peng, Haiyong, Yi Cui, Lei Shi, and Kangyao Deng. 2008. “Effects of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Combustion and Emissions during Cold Start of Direct Injection (DI) Diesel Engine.” *Energy* 33(3):471–79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.10.014>.

Rajesh kumar, B., and S. Saravanan. 2015. “Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Performance and Emissions of a Constant Speed DI Diesel Engine Fueled with Pentanol/Diesel Blends.” *Fuel* 160:217–26. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.07.089>.

Rajesh Kumar, B., S. Saravanan, D. Rana, and A. Nagendran. 2016. “Combined Effect of Injection Timing and Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Performance and Emissions of a DI

- Diesel Engine Fuelled with next-Generation Advanced Biofuel – Diesel Blends Using Response Surface Methodology.” *Energy Conversion and Management* 123:470–86. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.064>.
- Ramly, Syahmi Bin Ahmad. 2012. “Design of Exhaust Gas Recirculation System (EGR) for Diesel Engine.” Universiti Malaysia Pahang.
- Septiyanto, Angga, Sonika Maulana, Agus Nugroho, Angga Septiyanto, Sonika Maulana, and Agus Nugroho. 2017. “Pengaruh Exhaust Gas Recirculation (EGR) Terhadap Performa Dan Mmisi Jelaga Mesin Diesel Direct Injection.” *Sainteknologi: Jurnal Sains Dan Teknologi* 15(2):129–36.
- Venkatesan, V., N. Nallusamy, and P. Nagapandiselvi. 2021. “Performance and Emission Analysis on the Effect of Exhaust Gas Recirculation in a Tractor Diesel Engine Using Pine Oil and Soapnut Oil Methyl Ester.” *Fuel* 290:120077. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120077>.
- Venu, Harish, Lingesan Subramani, and V. Dhana Raju. 2019. “Emission Reduction in a DI Diesel Engine Using Exhaust Gas Recirculation (EGR) of Palm Biodiesel Blended with TiO₂ Nano Additives.” *Renewable Energy* 140:245–63. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.078>.

PERKEMBANGAN PENERAPAN MATERIAL SANDWICH UNTUK STRUKTUR KAPAL: REGULASI, DESAIN DAN APLIKASI

Tuswan, Ocid Mursid, Hartono Yudo,
Wilma Amiruddin, Sarjito Jokosisworo

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas
Diponegoro, Semarang, Indonesia

Abstrak

Peneliti akhir-akhir ini mengalami peningkatan minat untuk mempelajari material ringan sebagai solusi alternatif konstruksi kapal. Namun demikian, terdapat keterbatasan referensi mengenai pembahasan perkembangan aplikasi material ringan saat ini, khususnya pada struktur kapal. Tujuan artikel ini adalah untuk menawarkan gambaran terkini dan memberikan argumentasi kritis mengenai desain dan persyaratan aplikasi sandwich pada konstruksi kapal. Pembahasan diskusi mencakup beberapa topik, termasuk aturan/standar pengembangan material yang dikeluarkan oleh badan klasifikasi, berbagai jenis sandwich dengan area aplikasi struktur yang berbeda, dan tinjauan umum penilaian kekuatan struktur dan dari aplikasi sandwich di berbagai lokasi struktur kapal. Beberapa skenario potensial untuk konstruksi sandwich pada kapal juga diusulkan. Hasil menunjukkan bahwa material sandwich memiliki potensi untuk membantu peningkatan aspek penghematan berat.

Aplikasi material sandwich di industri kapal saat ini masih mengandalkan solusi tradisional, yaitu material sandwich komposit dan sandwich baja dengan pengaku searah. Penggunaan struktur sandwich telah terbukti bermanfaat bagi industri kapal; namun penggunaannya saat ini belum mencapai potensi penuhnya karena pengetahuan yang terbatas dalam desain dan aplikasinya. Oleh karena itu, pembaharuan pedoman dan peraturan sangat penting untuk mendorong penerapan struktur sandwich yang lebih luas dan inovatif pada konstruksi kapal.

Kata kunci: sandwich, struktur kapal, material ringan, sustainabilitas

Pendahuluan

Kapal sebagai moda transportasi laut memainkan peran penting dalam kegiatan ekonomi dengan mengangkut penumpang atau komoditas perdagangan. Penggunaan material ringan untuk konstruksi kapal merupakan pilihan penting untuk meningkatkan daya saing dengan moda transportasi lainnya. Struktur yang ringan dirancang terutama untuk digunakan dalam berbagai bidang teknik aplikasi, terutama sektor pembuatan kapal. Tujuan dari desain struktur dan optimalisasi dalam industri galangan kapal adalah untuk meningkatkan kapasitas angkut/ *payload* muatan kapal. Dengan meminimalkan massa struktur, meskipun penggunaannya terlihat memiliki keuntungan yang cukup besar dalam mengurangi bobot kapal. Kekuatan, stabilitas struktur, dan kajian reduksi beratnya menjadi perhatian penting. Penelitian menunjukkan daripada memperkecil ketebalan material, pemilihan material ringan lebih utama untuk digunakan. Dalam penerapan material ringan pada kapal, penghematan berat harus cukup besar untuk mengoreksi kesulitan teknis, praktis, dan keuangan yang tidak terduga selama pembuatan dan manufaktur material sandwich dan menjamin

penggunaan panel sandwich yang tepat oleh pemilik kapal, badan klasifikasi, dan manajemen galangan kapal.

Pelat sandwich adalah salah satu jenis material ringan yang akan ditinjau dalam penelitian ini. Pelat sandwich yang diteliti terdiri dari dua bagian: pelat muka (*face plate*) dan material inti (*core material*). Lapisan *faceplate* terdiri dari bahan dengan kekuatan dan kekakuan tinggi, sedangkan lapisan inti terbuat dari bahan dengan kekuatan, kekakuan, dan densitas yang rendah (Borsellino dkk. 2004). Kombinasi dari lapisan-lapisan ini akan menghasilkan rasio kekuatan terhadap berat yang lebih tinggi, yang penting untuk bangunan yang digunakan di sektor pelayaran (Ismail dkk., 2020). Saat ini, lebih dari 35.000 m² panel sandwich digunakan di industri maritim dan konstruksi. Menggunakan pendekatan overlay, telah ditemukan aplikasi yang signifikan pada reparasi kapal (misalnya pintu rampa dan geladak kapal Ro-Ro) (S.Core, 2013). Namun, sejauh ini, aplikasi sandwich ringan terbatas pada kapal angkatan laut dan komponen non-struktural di kapal komersial. Dalam kebanyakan kasus, desain struktural dan optimasi dengan memodifikasi dimensi struktural saat ini atau membangun material ringan alternatif, dengan rasio kekuatan terhadap berat menjadi parameter optimasi utama.

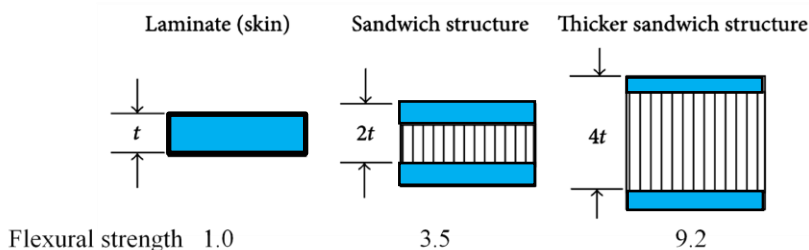
Material sandwich sering digunakan pada industri pembuatan kapal dengan metodologi dan aturan desain yang andal dan efisien. Berbagai proyek yang didanai Komisi Eropa telah mencapai tujuan itu dan memberikan kontribusi besar untuk meningkatkan pengembangan riset termasuk proyek S.Core (2013) memberikan panduan praktik yang lengkap untuk material sandwich dalam aplikasi kelautan. Studi saat ini bertujuan untuk memberikan gambaran tentang elemen utama dan masalah yang dihadapi struktur sandwich yang digunakan dalam aplikasi pembuatan kapal, mengevaluasi keadaan seni saat ini, dan menyoroti topik penting

untuk dikembangkan. Aplikasi sandwich dengan berbagai jenis material dan lokasi anggota struktur akan dibahas. Selain itu, penilaian struktur dan pengurangan berat mengenai respon struktur akibat beban yang diterapkan akan ditinjau.

Teori Dasar Sandwich

Sandwich material adalah salah satu tipe material ringan yang tersusun dari dua material kulit (*faceplates*) yang dipisahkan oleh material inti (*core material*) ditengahnya. Sandwich bisa diasumsikan sebagai I-beam dimana beban yang diterima akan ditransfer dari material kulit satu ke material kulit yang lainnya melalui transfer geser pada material intinya (Birman & Kardomateas, 2018). Sandwich memiliki rasio kekakuan terhadap berat yang tinggi, membuatnya sesuai untuk desain ringan dan ketahanan tekuk yang baik dibandingkan dengan struktur pelat konvensional. Pemisahan antara pelat luar dengan pelat inti dapat meningkatkan modulus dari potongan melintang yang mana hanya membutuhkan peningkatan berat yang relatif kecil (Momcilovic & Motok, 2009). Gambar 1 mengilustrasikan perbandingan kekuatan dan berat antara pelat sandwich dengan pelat konvensional. Dalam masalah praktis, pelat sandwich juga menawarkan manfaat potensial lainnya, termasuk kemungkinan integrasi fungsional, penghematan ruang, dan konstruksi modular. Keuntungan lain dari penerapan pelat sandwich termasuk proses fabrikasi yang mudah, struktur sederhana (mengurangi pengaku), mengurangi inisiasi retak dan kelelahan, biaya konstruksi dan operasional yang lebih rendah, dan ketahanan korosi yang lebih baik (S.Core, 2013). Namun, karena banyak aplikasi praktis yang masih belum terjawab, manfaat prospektif ini tidak memadai untuk memastikan implementasi yang luas dikarenakan desain yang rumit karena kombinasi dan konfigurasi struktur yang berbeda, kesulitan dalam menggabungkan sistem,

kurangnya prosedur standar untuk pengujian, inspeksi, keselamatan, dan perbaikan untuk semua aplikasi pada kapal, proses sertifikasi yang berpotensi panjang, dan kurangnya informasi ilmiah tentang merancang sandwich (S.Core, 2013).



Gambar 1. *Sandwich effect* (Sumber: Krzyhak dkk., 2016)

Di dalam industri kelautan, penerapan material sandwich dapat dilakukan dengan berbagai strategi. Material sandwich diklasifikasikan menjadi beberapa jenis material sandwich yang bisa diterapkan. Contoh ilustrasi perbandingan sistem konstruksi konvensional dan sistem konstruksi sandwich ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Perbandingan konstruksi antara model konvensional dan konstruksi *sandwich* (Sumber: Palomba dkk., 2021).

Standarisasi Material Sandwich Pada Bangunan Laut

Ketiga tipe material sandwich yang signifikan digunakan untuk aplikasi kapal adalah sandwich all-metal, hybrid, dan komposit. Setiap jenis sandwich memiliki standar yang ditetapkan dalam tahap

pengembangan material sandwich untuk memenuhi standarisasi kriteria sifat material dan kekuatan material sandwich. Standar ini biasanya dikeluarkan oleh badan klasifikasi dengan tujuan untuk memastikan standar keamanan dan kualitas yang tinggi. Konsep dasar dari semua peraturan untuk struktur sandwich laut adalah untuk menjamin kesetaraannya dengan pelat tunggal atau baja yang dikakukan. Kriteria kekuatan khusus dan pendekatan penilaian ditentukan oleh aturan Classification Societies untuk memperhitungkan respons yang berbeda dari konstruksi sandwich dari struktur tradisional.

Secara umum, karakterisasi, sertifikasi, dan penilaian untuk konstruksi sandwich laut mencakup tiga tingkatan: bahan dan bagian penyusunnya, panel sandwich, dan detail struktural. Ringkasan masalah utama, standar dan kriteria dalam berbagai tingkat desain dan karakterisasi struktur sandwich sesuai dengan aturan dan peraturan yang ada dilaporkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Rangkuman badan klasifikasi internasional yang mengatur regulasi sandwich untuk aplikasi struktur laut.

Level evaluasi	Type	Badan Klasifikasi
Material	Skin: Metal (steel, aluminum)	DNV GL (1-3), LR (4,5)
	Composite laminate	DNV GL (6,7), LR (5,8), RINA (9), BV (10)
	Elastomers:	DNV GL (1), LR (4)
	End-grain balsa, PVC foam, polyurethane foam, honeycomb, etc.	DNV GL (6,7), LR (5), RINA (9), BV (10)
Sandwich structure	Metal-based	DNV GL (1), LR (4), RINA (9)
	Composite	DNV GL (6), LR (5,8), BV (10)
Structural detail	Metal-based	DNV GL (1), LR (5), RINA (8)
	Composite	DNV GL (6), LR (8), BV (10)

Keterangan :

1. DNV GL, Steel Sandwich Panel Construction, 2016.
2. DNV GL, Rules for Classification – Ships – Part 3 Hull – Chapter 3 Structural Design Principles, 2017.
3. DNV GL, Rules For Classification – Ships – Part 2 Materials and welding – Chapter 2 Metallic materials, 2019.
4. Lloyd’s Register, Rules for the Application of Sandwich Panel Construction to Ship Structure, 2020.
5. Lloyd’s Register, Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials, 2020.
6. DNV GL, Rules For Classification – High Speed and Light Craft – Part 3 Structures, Equipment – Chapter 4 Hull Structural Design, Fibre Composite and Sandwich Constructions, 2016.
7. DNV GL, Rules For Classification – Ships – Part 2 Materials and Welding – Chapter 3 Non-Metallic Materials, 2015.
8. Lloyd’s Register, Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft, 2011.
9. RINA, Rules for the Classification of Fast Patrol Vessels – Part B: Hull and Stability, 2007.
10. Bureau Veritas, Hull in Composite Materials and Plywood, Material Approval, Design Principles, Construction and Survey, 2018.

Tabel 1 memperjelas bahwa beberapa masalah desain dan pengujian yang relevan masih belum tercakup oleh aturan dan pedoman biro klasifikasi, yang terutama berfokus pada teknologi, bahan sandwich, dan prosedur yang sudah mapan. Akibatnya, riset eksploitatif struktur sandwich dan penerapan solusi alternatif dan inovatif (misalnya struktur kisi, solusi bio-inspired, bahan berkelanjutan, dll.) tidak dapat berkembang. Salah satu masalah utama menyangkut koneksi antara bagian sandwich dan sandwich ke komponen lapisan tunggal baja, yang kompleksitasnya perlu

dikembangkan lebih luas lagi oleh badan standarisasi aturan desain dan prosedur verifikasi. Aspek samping lain yang harus dipertimbangkan dalam kemungkinan revisi prosedur dan pedoman desain yang ada pada saat ini adalah masalah lingkungan, biaya yang terkait dengan pemeliharaan dan pembuangan atau tujuan penghematan berat (Palomba dkk., 2021).

Tipe dan Aplikasi Material Sandwich untuk Bangunan Laut

Berbagai macam kapal cocok untuk dibuat menggunakan panel sandwich (pleasure, kapal balap, kapal angkatan laut, dll). Dalam pelaksanaan praktis, penerapan material sandwich dapat dilakukan pada skema pembangunan baru atau perbaikan kapal. Beberapa aplikasi kelautan terbaru dan kreatif untuk masing-masing dari tiga kategori sandwich akan dibahas, dengan tujuan menyarankan penggunaan sandwich tingkat lanjut dan mempromosikan penggunaannya di sektor maritim. Pertama, sandwich semua logam memiliki pelat muka dan bahan inti yang terbuat dari logam seperti baja dan aluminium. Material inti umumnya menggunakan beberapa konfigurasi, seperti uni-directional, multi-directional, honeycomb, dll. Bahan inti disambung menggunakan beberapa metode seperti pengelasan, riveting dan ikatan perekat. Pada tipe ini penerapannya tidak mengurangi bobot keseluruhan secara signifikan, tetapi proses pembuatannya memiliki tingkat akurasi yang relatif tinggi (S.Core, 2013). Mueller dan Volpone (2009) telah menyelidiki kelayakan pembuatan pelat muka baja-panel sandwich inti aluminium menggunakan laser campuran dan teknologi pengelasan gesekan aduk. Penemuan signifikan dari konstruksi sandwich hibrid semua-logam terkait dengan komponen baja dan aluminium. Kortenoeven dkk (2008) telah mempelajari kemungkinan aplikasi pada superstruktur kapal pengerukan dengan struktur sandwich baja inti-I yang berbeda. Dapat ditemukan bahwa

penghematan berat struktural hanya signifikan untuk kapal besar, tetapi biaya produksi turun hingga 50%. Panel sarang lebah menggabungkan bobot rendah dengan kekakuan yang luar biasa dan kompresi yang sangat baik (Paik dkk., 1999) dan penyerapan energi (Hazizan & Cantwell, 2003). Selain itu, sarang lebah baja dapat digunakan sebagai elemen struktural, semi struktural, dan dekoratif kapal besar, seperti kapal angkatan laut dan kapal pesiar (Bitzer, 1997).

Tipe kedua adalah sandwich hybrid dengan campuran bahan logam dan non-logam. Bahan luar terbuat dari logam, dan bahan inti terbuat dari bahan non-logam seperti elastomer, busa, dll.). Keuntungan dari jenis sandwich ini dapat meningkatkan kekuatan lokal struktur, insulasi panas yang baik, dan meningkatkan kelayakan tabrakan. Dari segi berat struktur, material ini tidak memberikan kontribusi yang besar dalam mereduksi berat struktur (S.Core, 2013). Sandwich hibrida umumnya digunakan dalam industri perahu balap, seperti lambung AC75 Luna Rossa berdasarkan struktur sandwich sarang lebah aluminium CFRP (AC75 Luna Rossa, 2020). Grafton dan Weitzenbock (2011) menganalisis aplikasi sandwich hybrid yang terdiri dari inti beton terbungkus dalam dua menghadap baja (SCS) di dek kapal Ro-Ro dan dek FPSO. Keuntungan utama menggunakan SCS di dek Ro-Ro termasuk penghilangan pengaku dan gelagar tertentu, pengurangan kedalaman dek, peningkatan penyerapan energi, pengurangan waktu pengelasan, dan perawatan yang lebih sederhana.

Sandwich komposit adalah jenis sandwich yang paling populer di mana komponennya terbuat dari komponen non-logam. Kelebihan dari tipe ini adalah kesesuaiannya untuk digunakan pada konstruksi ringan, umur panjangnya, dan ketahanannya terhadap korosi dan tegangan lelah struktural. Namun, beberapa kekurangannya antara lain biaya bahan baku yang mahal, desain dan metode validasi yang rumit, serta sulitnya mendaur ulang bahan (AC75 Luna

Rossa, 2020). Sandwich komposit, terutama untuk keperluan militer dan kapal pesiar, memainkan peran penting dalam bangunan lambung kapal. Komponen sandwich dari inti busa PVC dan muka geladak GFR dari kapal pesiar telah dibahas dalam Di Bella dkk. (2018) Untuk keperluan militer, Angkatan Laut Swedia telah membangun korvet panjang Kelas Visby dengan inti busa PVC dan serat karbon yang disempurnakan (Zenkert, 2005). Selain itu, konstruksi bagian atas kapal perang besar pertama Fayette Frigate Angkatan Laut Prancis, menggunakan ide sandwich komposit (Mouritz dkk. 2001; Grabovac dkk. 1993). Panel sandwich fregat dibangun dengan GRP dan kayu balsa inti dan dihubungkan ke pelat muka baja. Baru-baru ini, Marinir AS mendorong penggunaan yang lebih luas dari struktur sandwich komposit Penghancur Kelas Zumwalt di mana sandwich CFRP untuk rumah geladak digunakan (Job, 2015) dan busa sintetis digunakan pada sambungan kunci (Gupta dkk., 2014).



Gambar 3. Ruang sandwich board dibuat dari steel sandwich panel
(Sumber: Kortenoeven dkk., 2008).



Gambar 4. Deckhouse kapal Zumwalt class destroyer selama proses konstruksi (Sumber: <https://newsroom.huntingtoningalls.com>).



Gambar 5. AC75 Luna Rossa terbuat dari CFRP-aluminum honeycomb sandwich panels (Sumber: <https://www.giornaledellavela.com>).

Pengujian Material *Sandwich* Tipe Hybrid untuk Konstruksi Kapal

Dalam tahapan pengembangan material sandwich, khususnya tipe hybrid sandwich, yang pertama harus dilakukan adalah pemenuhan standarisasi kriteria material inti sandwich. Beberapa badan klasifikasi kapal yang mengatur regulasi pengembangan material sandwich jenis ini adalah Lloyd's Register (2015) dan DNV-GL (2016). Tabel 2 menjelaskan standar uji dan syarat kelayakan dalam pengembangan material inti sandwich.

Tabel 2. Kriteria standar sandwich material

Kriteria standar	Aturan	Kriteria
Densitas	ISO 845	$\geq 1000 \text{ kg/m}^3$ at RT
Kekerasan	DIN 53505	Shore D ≥ 65 at RT
Kekuatan tarik	ASTM D638	$\geq 20 \text{ MPa}$ at RT
Perpanjangan saat putus		$\geq 5 \text{ MPa}$ at $+80^\circ\text{C}$
		Min. 20% at RT
Modulus geser	ASTM C273	$G \geq 312-2.4T$ ($^\circ\text{C}$)
Kekuatan tekan	ASTM D695	$\geq 5 \text{ MPa}$ at $+80^\circ\text{C}$
Keterangan : RT = Suhu ruangan pada $^\circ\text{C}$		

Sumber: *Lloyd's Register, 2015; DNV-GL, 2016*

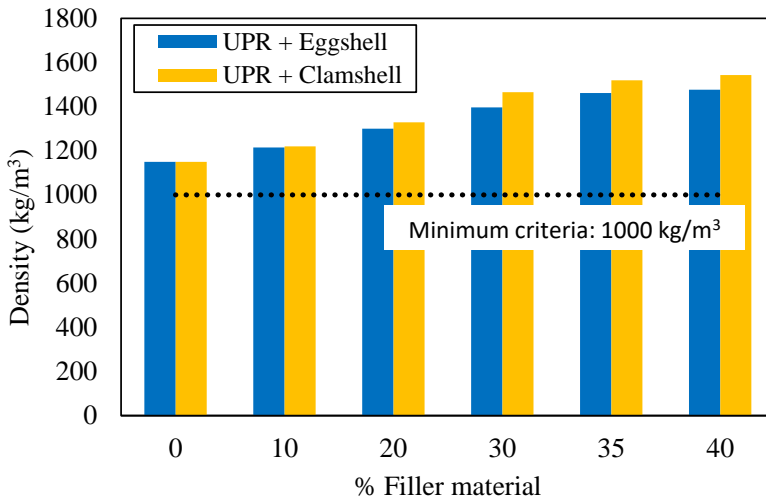
Beberapa penelitian telah banyak dilakukan dengan menggunakan bahan baku yang tersedia di Indonesia dengan fokus penelitian untuk mengembangkan material inti sandwich. Utomo dkk. (2015) melakukan pengembangan sandwich dengan material penyusun multiplek panel dan polyurethane foam. Hasil menunjukkan bahwa material tersebut masih belum memenuhi standar kriteria dari Lloyd's Register (2015). Utomo dkk. (2016) melakukan studi pengembangan material inti dari material polyurethane foam, polyresin, dan syntetic resin. Hasil menunjukkan bahwa komposisi terbaik adalah syntetic resin dengan komposisi 50% resin, 50% talc

dan 0,3% catalyst. Selain itu, Zubaydi dkk. (2017) mengembangkan material sandwich dengan material inti berupa syntetic resin dan talc untuk mengkaji besar tegangan. Hasilnya adalah material sandwich dengan komposisi 60% resin dan 40% talc memiliki karakteristik yang paling baik.

Thermoset seperti syntetic resin, epoxy yang dapat curing pada suhu ruangan sebagai salah satu alternatif yang lebih murah dibandingkan polyurethane. Pengembangan core material sandwich dari campuran syntetic resin dan epoxy dengan menggunakan filler dari material limbah ramah lingkungan juga diteliti oleh Mula dkk. (2017) dengan menggunakan limbah cangkang telur, Yudiyono dkk. (2017) menggunakan abu sekam, Purwoko dkk. (2017) menggunakan kayu sengon dan Abdullah dkk. (2017) menggunakan cangkang kerang. Kemudian uji buckling pada pelat sandwich dengan penyusun syntetic resin dan talc juga diteliti oleh Arianto dkk. (2019). Hasil menunjukkan bahwa core material dengan komposisi material limbah tertentu dapat meningkatkan kekuatan core sandwich dan memenuhi kriteria standar yang diterapkan. Dalam penelitian ini, material sandwich yang dikembangkan terdiri dari material kulit dari baja dan material inti dari campuran unsaturated polyester resin (UPR) dan material limbah ramah lingkungan. Isu lingkungan yang sedang berkembang saat ini menuntut para peneliti untuk mengembangkan material yang berasal dari bahan yang tidak digunakan lagi/ green material yang terdapat melimpah di lingkungan dan dapat terbarukan seperti cangkang kerang dan cangkang telur. Pada penelitian sebelumnya (Abdullah dkk., 2018; Mula dkk., 2018) mengembangkan material inti campuran cangkang telur dan cangkang kerang dengan melakukan beberapa uji sesuai dengan standar Lloyd's Register (2015) yaitu densitas, uji kekerasan, uji tarik, uji kompresi, uji tekuk dll. Material inti divariasikan

berdasarkan presentase jumlah filler material yaitu 10%, 20%, 30%, 35% dan 40% dari berat total material inti.

Dari data perbandingan densitas, pengukuran menunjukkan untuk persentase serbuk kerang dan cangkang telur semua variasi memenuhi standar Lloyd's Register (2015) sebesar 1000 kg/m^3 . Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa semakin bertambahnya persentase berat serbuk kerang dan cangkang telur menyebabkan nilai densitas dari core sandwich panel meningkat pula. Data juga menunjukkan bahwa densitas material inti dari cangkang kerang memiliki densitas yang lebih tinggi.

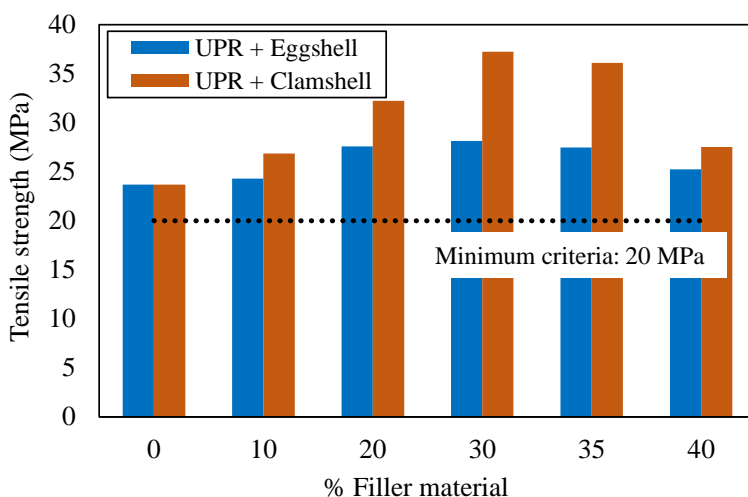


Gambar 6. Data densitas material inti pada tiap variasi

(Sumber: Abdullah dkk., 2018; Mula dkk., 2018).

Berdasarkan nilai pengujian tarik, nilai kekuatan tarik material inti mengalami kenaikan dengan bertambahnya persentase jumlah filler serbuk cangkang kerang dan cangkang telur. Dilihat dari kriteria kelayakan kekuatan tarik sebesar 20 MPa sesuai standar Lloyd's Register (2015), nilai kekuatan tarik pada semua variasi memenuhi kriteria. Dilihat dari data pada Gambar 7, nilai kekuatan tarik mengalami kenaikan sampai presentase filler 30%, kemudian nilai kekuatan tarik pada presentase jumlah filler melebihi 30%

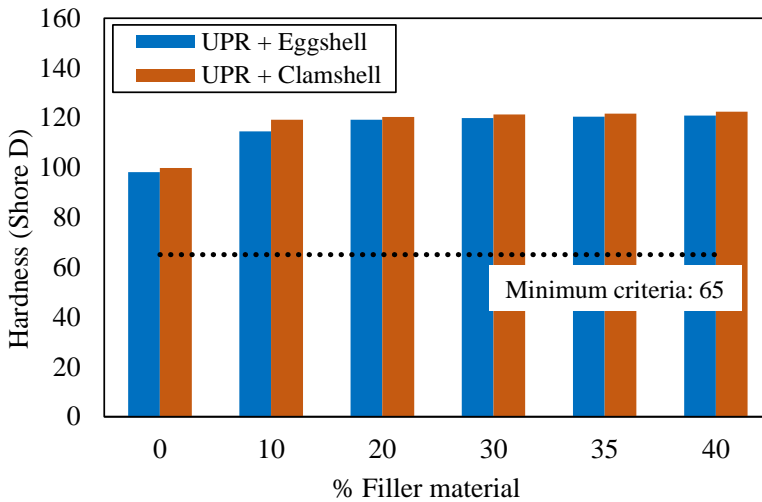
mengalami penurunan. Kondisi ini terjadi karena serbuk cangkang kerang dan cangkang telur telah mencapai titik maksimum dan akan terjadi aglomerasi dari filler untuk membentuk partikel yang lebih besar dan membuat kekuatan menjadi lebih rendah dari sebelumnya. Dilihat dari perbandingan tipe material, dapat disimpulkan bahwa material inti dengan komposisi UPR dan cangkang kerang memiliki properties material yang lebih baik.



Gambar 7. Nilai kekuatan tarik pada tiap tiap variasi
(Sumber: Abdullah dkk., 2018; Mula dkk., 2018)

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui tingkat kekerasan atau ketahanan terhadap identasi dari pada material inti yang dikembangkan. Hasil dari pengujian yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 8 dimana penambahan filler serbuk cangkang kerang dan cangkang telur masing masing berkontribusi terhadap kenaikan nilai kekerasan material inti. Semua variasi komposisi material yang diuji memenuhi syarat kekerasan minimum Lloyd's Register (2015) yaitu 65 Shore D. Riset perkembangan material core sandwich telah banyak dilakukan namun penelitian mengenai penerapannya pada struktur kapal masih sangat terbatas. Maka dari

itu, diperlukan studi lanjutan untuk mengkaji penerapan material sandwich pada variasi struktur dan tipe material yang berbeda.



Gambar 8. Nilai kekerasan pada tiap tiap variasi material inti
(Sumber: Abdullah dkk., 2018; Mula dkk., 2018).

Aplikasi Material Sandwich Terhadap Performa Struktur

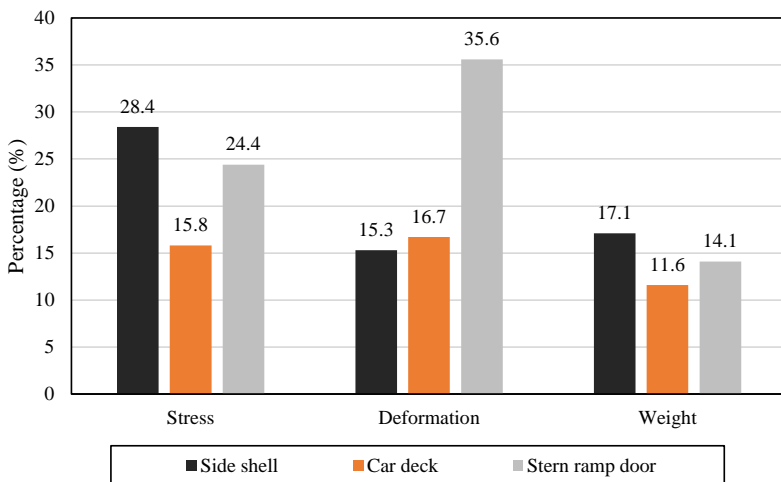
Penerapan material sandwich pada struktur kapal memerlukan perhitungan rasio kekuatan untuk memastikan struktur yang dikembangkan memiliki kekuatan ekuivalen, sebagaimana diatur oleh Lloyd's Register (2015). Pengembangan penelitian di bidang praktis dan ilmiah menunjukkan bahwa aplikasi material sandwich dapat ditinjau berdasarkan lokasi dan komponen struktur yang berbeda. Penilaian struktur akibat beban statis dan dinamis pada berbagai lokasi struktur akan dibahas. Penelitian rintisan mengenai aplikasi material sandwich dilakukan pada kapal tanker pada double bottom, side shell, main deck, dan longitudinal bulkhead. Hasilnya menunjukkan penurunan berat secara umum sebesar 2,8% dan mengurangi beban kerja dalam proses produksi sebesar 20% karena menghilangkan penggunaan penegar (Brooking & Kennedy, 2004). Selanjutnya, Ismail dkk. (2020a) dan Ismail dkk. (2020b)

menyelidiki penerapan sandwich tipe hybrid berdasarkan komponen baja/ poliuretan di lambung dan geladak kapal tanker dengan memvariasikan jarak penegar. Hasil yang menjanjikan memungkinkan pengurangan tegangan dan pengurangan berat struktur. Pengurangan tegangan yang cukup baik berada pada kisaran 20,8 – 27,9% dan berat struktur berada pada kisaran antara 4,2 – 8,8% (Ismail dkk., 2021). Penerapan panel sandwich dapat mengurangi kebutuhan penegar sehingga dapat diperoleh pengurangan bobot dan payload (Momcilovic & Motok, 2009) seperti terlihat pada Gambar 9.

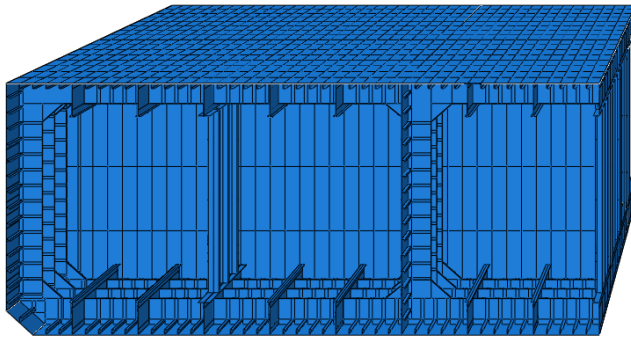
Sebuah studi ekstensif dengan menggunakan berbagai jenis material dan lokasi struktur menghasilkan perspektif yang berbeda. Pengkajian struktur akibat beban statis dan dinamis di geladak kendaraan kapal Ferry Ro-Ro diselidiki secara komprehensif (Tuswan dkk., 2020a; 2022). Dapat ditemukan aplikasi sandwich dengan jenis material yang berbeda, konfigurasi penegar, dan jenis beban memberikan kontribusi pengurangan tegangan sekitar 14,6 - 15,8%, dan penghematan berat berada pada kisaran 8,87% - 11,6%. Selanjutnya, penyelidikan dilanjutkan dengan menerapkan di lokasi struktur yang berbeda pada kapal yang sama. Dapat ditemukan bahwa penerapan panel sandwich pada lambung kapal samping menunjukkan hasil yang menjanjikan dengan pengurangan stres hingga 28,4% dan penghematan berat sekitar 17,1% (Tuswan dkk., 2019). Kemudian, penilaian struktur secara statis dan dinamis akibat aplikasi sandwich pada pintu rampa diselidiki (Tuswan 2000b; 2020c). Penilaian struktur panel sandwich lambung juga telah dikembangkan secara numerik dan eksperimental (Ariesta dkk., 2021a; 2021b).

Studi pendahuluan menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam hal kekuatan struktur dan penghematan berat. Penerapannya berkontribusi pada peningkatan rasio kekuatan terhadap berat

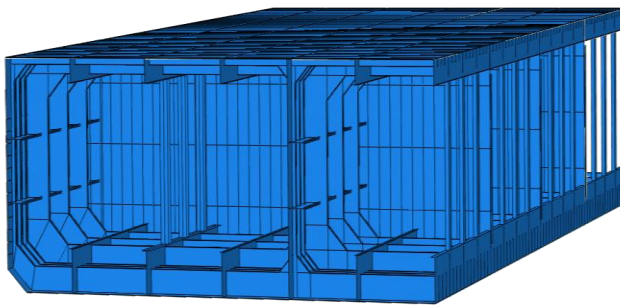
sekitar 20,75%. Hasil perbandingan model konstruksi konvensional dan konstruksi sandwich yang diusulkan dapat dilihat pada Gambar 10. Dari literatur di atas, dipelajari beberapa skenario parameter, antara lain jenis material inti sandwich, jenis pembebanan, konfigurasi ketebalan, dan variasi jumlah penegar pada kekuatan kapal. Penerapan panel sandwich pada struktur kapal dari aspek teknis menunjukkan peningkatan rasio kekuatan terhadap berat struktur yang bervariasi tergantung pada jenis lokasi struktur, konfigurasi modifikasi, dan jenis material sandwich. Penerapan pelat sandwich ke kapal memungkinkan pengurangan bracing yang melekat pada struktur. Penyederhanaan struktur memungkinkan bobot struktur dapat dikurangi tanpa mengurangi aspek kekuatan struktur. Penyederhanaan struktur dapat mempermudah proses manufaktur karena berkurangnya volume pekerjaan pengelasan. Pengurangan berat struktur ini diharapkan dapat meningkatkan kapasitas muat sehingga dapat meningkatkan pengoperasian moda transportasi laut.



Gambar 9. Prospek penerapan sandwich ditinjau dari pengurangan tegangan, deformasi, dan berat (*Sumber: Tuswan dkk., 2022*).



(a) Model konstruksi konvensional



(b) Model konstruksi sandwich

Gambar 10. Prospek penerapan sandwich ditinjau dari pengurangan tegangan, deformasi, dan berat (*Sumber: Tuswan dkk., 2022*).

Kesimpulan

Gambaran umum aplikasi material sandwich pada struktur kapal dan penilaian kondisi struktur karena terhadap parameter konfigurasi telah disajikan. Struktur sandwich yang digunakan pada aplikasi kapal memiliki kemampuan untuk membantu meningkatkan berbagai faktor, termasuk reduksi berat dan uji optimasi untuk mendapatkan rasio kekuatan terhadap berat yang optimal. Selain itu, karena aplikasi struktur sandwich yang ada di industri kapal sebagian besar bergantung pada proses tradisional, penggunaan bahan terbarukan dan teknologi ramah lingkungan perlu dikembangkan. Singkatnya, struktur sandwich telah terbukti membantu perkem-

bangun sektor maritim; namun demikian risetnya belum maksimal karena kurangnya pemahaman dan pengetahuan dari segi desain dan implementasinya. Untuk mendorong penggunaan yang lebih besar dari material sandwich dalam proyek maritim, peraturan dan regulasi yang diperbarui oleh badan klasifikasi harus terus dilakukan.

References

- Abdullah, K. (2018). *Pengembangan dan Uji Dinamis Sandwich Panel Berbahan Core Material Limbah Cangkang Kerang pada Konstruksi Kapal*. (Magister thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
- AC75 Luna Rossa, the new flying monohull for the 36th America's Cup presented by Prada.
- Arianto, P.Y., Zubaydi, A., Piscesa, B., Tuswan. (2019). Experimental and numerical bending analysis of steel/resin-talk sandwich material. *IPTEK The Journal for Technology and Science*, 30(3), 123-128.
- Ariesta R.C., Zubaydi, A., Ismail, A., Al-Syachri, M.Z. (2021a). Identification of damage in a Ship Hull Sandwich Plate by Natural Frequency. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1034, 012012.
- Ariesta R.C., Zubaydi, A., Ismail, A., Tuswan, T. (2021b). Damaged Evaluation for Sandwich Material on Side Plate Hull using Experiment Modal Analysis. *Material Today: Proceedings*, 47(10), 2310-2314.
- Birman, V., & Kardomateas, G. A. (2018). Review of current trends in research and applications of sandwich structures. *Composites Part B: Engineering*, 142, 221-240.
- Bitzer, T., *Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing* (Applications and Testing, 1st ed. Springer, Dordrecht, 1997).
- Borsellino, C., Calabrese, L., & Valenza, A. (2004). Experimental and numerical evaluation of sandwich composite structures. *Composites Science and Technology*, 64(10-11), 1709-1715.

- Brooking, M., Kennedy, S. (2004). *The performance, safety and production benefits of SPS structures for double hull tankers*. Proceedings of the RINA Conference on Double Hull Tankers.
- Di Bella G., Galtieri, G., Borsellino, C. (2018). Three-point flexural properties of bonded reinforcement elements for pleasure craft decks. *Applied Composite Materials*, 25(1), 21–34.
- DNV-GL, (2016), Steel sandwich panel construction, Norway: DNVGL.
- Grafton, T. J., Weitzenbock, J. R. (2011). *Steel-concrete-steel sandwich structures in ship and offshore engineering, in Advance Marine Structure*. Proceedings of the 3rd International Conference on Marine Structures MARSTRUCT, 549–558.
- Gupta, N., Zeltmann, S.E., Shunmugasamy, V.C., Pinisetty, D. (2014). Applications of polymer matrix syntactic foams. *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society* 66(2), 245–254.
- Hazizan, A., Cantwell, W.J. (2003). The low *velocity* impact response of an aluminium honeycomb *sandwich* structure. *Composite Part B: Engineering*, 34(8), 679–687.
- Ismail, A., Zubaydi, A., Piscesa, B., & Ariesta, R. C. (2020). Vibration-based damage identification for ship sandwich plate using finite element method. *Open engineering*, 10(1), 744-752.
- Ismail, A., Zubaydi, A., Piscesa, B., Panangian, E., Ariesta, R.C., Tuswan. (2020a). A Strength Analysis of Conventional and Sandwich Plate Deck Using Finite Element Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1034, 012026.
- Ismail, A., Zubaydi, A., Piscesa, B., Panangian, E., Ariesta, R.C., Tuswan, (2020b). A Comparative Study of Conventional and Sandwich Plate Side-shell using Finite Element Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1034, 012027.
- Ismail, A., Zubaydi, A., Piscesa, B., Tuswan, T., Ariesta, R.C. (2021). Study of Sandwich Panel Application on Side Hull of Crude

Oil Tanker. *Journal of Applied Engineering Science*, 19(4):1090-1098.

Job, S. (2015). Why not composites in ships?. *Reinforced Plastics*, 59(2), 90–93.

Kortenoeven, J., Boon, B., & de Bruijn, A. (2008). Application of sandwich panels in design and building of dredging ships. *Journal of ship production*, 24(03), 125-134.

Krzyżak, A., Mazur, M., Gajewski, M., Drozd, K., Komorek, A., Przybyłek, P. (2016). Sandwich Structured Composites for Aeronautics: Methods of Manufacturing Affecting Some Mechanical Properties. *International Journal of Aerospace Engineering*, 1–10.

Llyod's Register (2015). *Provisional Rules for the Application of Sandwich Panel Construction to Ship Structure*.

Momčilović, N., & Motok, M. (2009). Estimation of ship lightweight reduction by means of application of sandwich plate system. *FME Transactions*, 37(3), 123-128.

Mouritz, A.P., Gellert, E., Burchill, P., Challis, K. (2001). Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. *Composite Structures*, 53(1), 21–24.

Mueller, S., Volpone, L.M. (2009). Friction stir welding of steel/aluminium sandwich panels. *Welding International*, 23(9), 699–705.

Mula, I. A. (2018). *Analisis Statis dan Dinamis Sandwich Panel Berbahan Core Material Limbah Cangkang Telur pada Konstruksi Pelat Datar Kapal*. (Magister Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).

Mula, I.A., Zubaydi, A., Budipriyanto, A. (2017). *Properties of Sandwich Panel Core from Eggshell Powder for Ship Structure*. Proceeding of International Conference on Marine Technology, 27-34.

Paik, J.K., Thayamballi, A.K., Kim, G.S. (1999). The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels. *Thin-Walled Structure*, 35(3), 205–231.

- Palomba, G., Epasto, G., Crupi, V. (2021). Lightweight sandwich structures for marine applications: a review. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1-26.
- Purwoko, M.S., Zubaydi, A., Budipriyanto, A. (2017). *Study on Wood Sawdust For Sandwich Core Material of Ship Structure*. Proceeding of International Conference on Marine Technology, 50-58.
- S. CORE. (2013). *Best Practice Guide for Sandwich Structures in Marine Applications*, 279.
- Tuswan, Abdullah, K., Zubaydi, A., Budipriyanto, A. (2019). Finite-element Analysis for Structural Strength Assessment of Marine Sandwich Material on Ship Side-shell Structure, *Material Today: Proceedings*, 13(1), 109–111.
- Tuswan, T., Zubaydi, A., Pisceca, B., Ismail, A., Ariesta, R.C., Prabowo, A.R. (2022). A Numerical Evaluation on Nonlinear Dynamic Response of Sandwich Plates with Partially Rectangular Skin/Core Debonding. *Curved Layered Structures*, 9(1), 25-39.
- Tuswan, Zubaydi, A., Pisceca B., Ismail, A., Ariesta, R.C., Ilham, M.F., Mualim, F.I. (2020c). Influence of Application of Sandwich Panel on Static and Dynamic Behaviour of Ferry Ro-ro Ramp Door. *Journal of Applied Engineering Science*, 19(1), 208-216.
- Tuswan, Zubaydi, A., Pisceca, B., Ismail, A., (2020a). Dynamic characteristic of partially debonded sandwich of ferry ro-ro's car deck: a numerical modeling. *Open Engineering*, 10, 424-433.
- Tuswan, Zubaydi, A., Pisceca, B., Ismail, A., Ilham, M.F. (2020b). Free vibration analysis of interfacial debonded sandwich of ferry ro-ro's stern ramp door. *Procedia Structure Integrity*, 27, 22-29.
- Tuswan, Zubaydi, A., Pisceca, B., Ismail, A., Sukma N.P.L. (2022). A Critical Review on Structural Testing and Assessment of Lightweight Sandwich Structure for Ship Structure Application. *AIP Conference Proceedings* (in press)

- Utomo, E., Baidowi, A., (2015). *Preliminary Study of Sandwich Panel Application In Ship Construction: Combination Of Plywood And Polyurethane Foam Material*. Proceeding of International Conference on Marine Technology, 33-38.
- Utomo, E., Zubaydi, A., Pratisna, P. (2016). *Study of Core Material Sandwich Panel In Ship Construction*. Proceeding of The 2nd International Seminar on Science and Technology, 9398.
- Yudiyono, Zubaydi A., Budipriyanto A. (2017). Tests On Sandwich Pelate Core Materials With Rice Husk Filler For Ship Deck Structure. *Proceeding of International Conference on Marine Technology*, 35-41.
- Zenkert, D., Shipsha, A., Bull, P., Hayman, B. (2005). Damage tolerance assessment of composite sandwich panels with localized damage. *Composites Science and Technology*, 65, (15–16), 2597–2611.
- Zubaydi, A., Budipriyanto, A., Iswidodo, W. (2017). *Sandwich Core Material Development for Ship Deck Structure*. Proceeding of Regional Conference in Civil Engineering (RCCE), The Third International Conference on Civil Engineering Research (ICCER), 86-91.

OPTIMALISASI RUTE PELAYARAN

Muhammad Al Hazman

Universitas Muhammadiyah Surabaya

Abstrak

Transportasi laut merupakan salah satu pilihan pengiriman barang jumlah yang besar dengan biaya relatif murah. Salah satu komponen yang paling dominan dalam operasional kapal adalah konsumsi bahan bakar yang dipengaruhi oleh kecepatan operasional kapal. Mengoperasikan kapal pada kecepatan dan rute yang optimal akan mengurangi konsumsi bahan bakar dan juga emisi gas buang pada kapal. Memilih rute yang optimal serta dengan kecepatan yang optimal maka konsumsi bahan bakar dan juga emisi gas buang pada kapal akan berkurang sehingga *eco green* dapat diterapkan pada dunia pelayaran. Selain emisi gas buang kapal dapat berkurang, biaya operasional yang dikeluarkan akan turun dan mendapatkan profit yang lebih tinggi. Dalam penulisan ini akan dijelaskan variable apa saja yang dibutuhkan untuk optimalisasi rute dan juga biaya. Ketika hal tersebut dapat dipenuhi maka terjadi pemilihan kecepatan optimal untuk masing-masing jarak pelayaran pada setiap rute pelayaran yang dapat menghasilkan konsumsi bahan bakar yang minim dari total konsumsi bahan bakar yang tersebut didapatkan serta CO₂ yang dihasilkan.

Kata kunci : Optimalisasi, Emisi gas buang, Kecepatan kapal

Pendahuluan

Indonesia merupakan negara kepulauan yang besar sehingga dibutuhkan transportasi yang memadai untuk mengangkut barang dalam jumlah besar dengan biaya yang murah salah satunya kapal. Dalam pelayarannya, kapal tidak selalu dapat menggunakan kecepatan dinas ini disebabkan pada didaerah perairan tertentu menetapkan aturan dimana kecepatan maksimum dari kapal tersebut. Perlu diketahui bahwa kontribusi transportasi laut menjadi semakin penting karena nilai biaya yang dikeluarkan adalah paling kecil bila dibandingkan dengan biaya transportasi darat maupun udara. Selain itu pengiriman melalui moda laut kapasitasnya jauh lebih besar dibanding dengan transportasi darat maupun udara. Efisiensi dalam proses transportasi laut dan distribusi menjadi salah satu hal yang penting karena proporsi biaya transportasi bisa mencapai 66% dari keseluruhan biaya logistik.

172

Dalam mengatur kecepatan perlu dipertimbangkannya mengenai konsumsi bahan bakar, dimana pada keadaan kecepatan dinas tidak selalu konsumsi bahan bakar dalam keadaan hemat sehingga perlu adanya optimalisasi yang mengatur mengenai kecepatan dan juga rute yang bisa jadi masukkan untuk digunakan dalam pelayaran.

Di Indonesia banyak pelabuhan yang manajemen waktu bongkar muat kapal kurang baik, sehingga banyak terjadi antrian kapal yang ingin melakukan bongkar muat. Sehingga kapal yang ingin masuk ke pelabuhan harus mengantri yang sangat lama. Pengaruh inilah yang menyebabkan perlunya dilakukan optimalisasi, selain masalah penghematan bahan bakar juga terdapat masalah emisi CO₂ yang dihasilkan dalam suatu operasi kapal. Di Luar negeri sudah diterapkannya mengenai pemberian denda karena CO₂ yang dihasilkan dari operasi kapal tersebut.

Simpel Hill Climbing

Terdapat dua jenis Hill Climbing yang sedikit berbeda, yakni *Simple Hill Climbing* (Hill Climbing sederhana) dan *Steepest-Ascent Hill Climbing* (Hill Climbing dengan memilih kemiringan yang paling tajam/curam). Simple hill climbing, awalnya *next state* akan ditentukan dengan membandingkan *current state* dengan satu successor. Proses perbandingan ini dimulai dari sebelah kiri. Apabila ditemukan penerus baru yang lebih baik dari kondisi saat itu *current state* maka penerusnya tersebut akan menjadi *next state*. Sedangkan pada *steepest ascent hill climbing* dalam menentukan *next state*, *current state* langsung dibandingkan dengan semua successor yang ada di dekatnya, sehingga *next state* yang diperoleh merupakan successor yang paling baik serta mendekati hasil optimasi yang diharapkan. Selain itu simple hill climbing urutan penggunaan operator sangat berpengaruh terhadap solusi, sedangkan pada *steepest ascent hill climbing* urutan penggunaan operator tidak berpengaruh terhadap solusi. Dari segi kelebihan simple hill climbing efisiensi dari segi memori sedangkan *steepest ascent hill climbing* memerlukan memori yang banyak dalam penyimpanannya.

Adapun algoritma simple hill climbing adalah sebagai berikut:

1. Evaluasi state awal jika sama dengan tujuan maka proses berhenti jika tidak maka lanjutkan proses dengan membuat state awal sebagai state sekarang.
2. Mengerjakan Langkah berikut sampai solusi ditemukan dan tidak ada lagi operator baru.

Traveling Salesman Problem dengan simple hill climbing. Ruang keadaan berisi semua kemungkinan lintasan, sementara operator digunakan untuk menukar posisi dealer-dealer yang bersebelahan. Fungsi heuristik yang digunakan adalah panjang lintasan yang terjadi. Operator yang akan digunakan adalah menukar urutan posisi 2 kota dalam 1 lintasan. Bila ada n kota, dan ingin

mencari kombinasi lintasan dengan menukar posisi urutan 2 kota, maka banyak lintasan yang mungkin di nyatakan dalam perumusan:

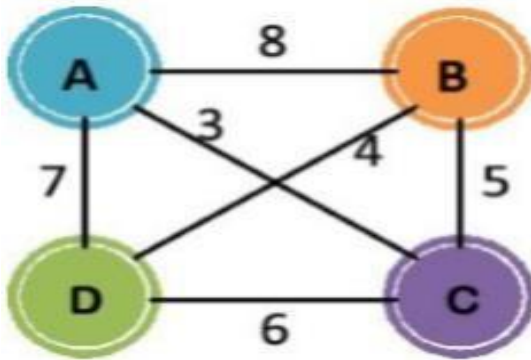
$$\frac{n!}{2!(n-2)!}$$

Misalkan dalam tersebut diterapkan pada 4 kota maka didapatkan 6 kombinasi dengan persamaan $\frac{4!}{2!(4-2)!}$

Keenam kombinasi ini akan kita pakai semuanya sebagai operator, yaitu:

1. Tukar1, 2 (menukar urutan posisi kota ke-1 dengan kota ke-2).
2. Tukar2, 3 (menukar urutan posisi kota ke-2 dengan kota ke-3).
3. Tukar3, 4 (menukar urutan posisi kota ke-3 dengan kota ke-4).
4. Tukar4, 1 (menukar urutan posisi kota ke-4 dengan kota ke-1).
5. Tukar2, 4 (menukar urutan posisi kota ke-2 dengan kota ke-4).
6. Tukar1, 3 (menukar urutan posisi kota ke-1 dengan kota ke-3).

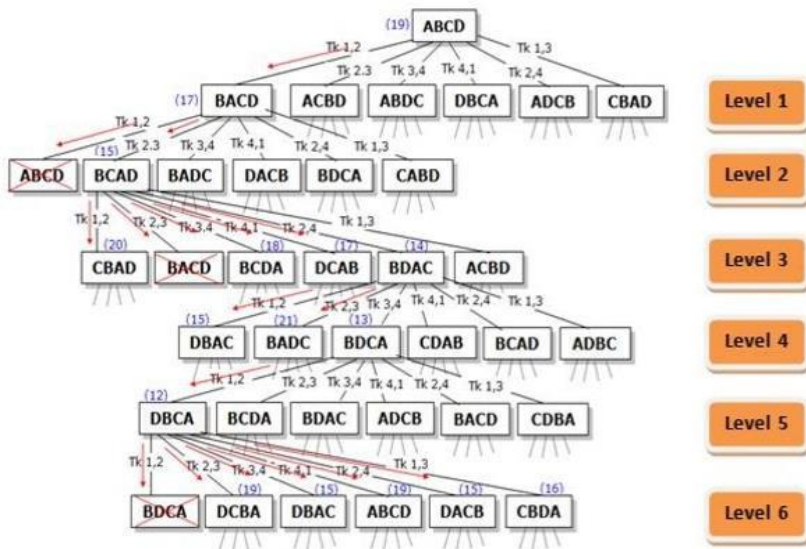
Dengan fungsi heuristik yang digunakan maka panjang lintasan yang diperoleh dalam Gambar 2.



Gambar 1. Panjang Lintasan

Sumber (Lim,2005)

Tahapan metode simple hill climbing 6 operator ditunjukkan pada gambar dibawah ini:



Sumber (Lim,2005)

Gambar 2. Tahapan Metode Simple Hill Climbing

Pada keadaan awal, lintasan terpilih adalah ABCD (=19). Pada level pertama, hill climbing akan mengunjungi BACD (=17) yang ternyata memiliki nilai heuristik lebih kecil dibandingkan dengan ABCD ($17 < 19$), sehingga BACD menjadi pilihan selanjutnya dengan operator terpakai Tukar 1,2. Pada level kedua, hill climbing akan mengunjungi ABCD. Karena operator Tukar 1,2 sudah digunakan oleh BACD, maka dipilih node yang lain yaitu BCAD (=15). Karena nilai heuristik BCAD lebih kecil dibanding dengan BACD ($15 < 17$), maka node BCAD akan menjadi pilihan selanjutnya dengan operator Tukar 2,3.

Pada Level ketiga, hill climbing akan mengunjungi CBAD (=20). Karena nilai heuristik CBAD lebih besar jika dibanding dengan BCAD ($20 > 17$), maka dipilih node lain. Pencarian menuju ke node BACD, karena operator Tukar 2,3 sudah pernah digunakan oleh BCAD, maka dipilih node lain. Kunjungan berikutnya ke node BCDA (=18). Nilai inipun masih lebih besar dari nilai heuristik BCAD, sehingga dipilih node lain. Node yang dikunjungi berikut-

nya adalah DCAB (=19). Nilai heuristik DCAB ternyata juga lebih besar dibanding dengan BCAD, sehingga pencarian dilanjutkan di node lainnya lagi, yaitu BDAC (=14). Nilai heuristik ini sudah lebih kecil dari pada nilai heuristik node BCAD ($14 < 15$), maka sekarang node ini yang akan diekplorasi.

Pada level keempat, pencarian pertama ditemukan node DBAC (=15) masih lebih besar dari BDAC, lanjut ke not sebelahnya BADC(=21), yang lebih besar juga. Nilai heuristik yang lebih kecil diperoleh pada node BDCA (=13). Sehingga node BDCA ini akan diekplorasi. Pada level kelima, Pencarian pertama sudah mendapatkan node dengan nilai heuristik yang lebih kecil, yaitu DBCA (=12). Sehingga node ini diekplorasi juga.

Pada level keenam, Dari hasil ekplorasi dengan pemakaian semua operator, ternyata sudah tidak ada node yang memiliki nilai heuristik yang lebih kecil dibanding dengan nilai heuristik DBCA, sehingga sebenarnya node DBCA (=12) inilah lintasan terpendek yang kita cari (SOLUSI

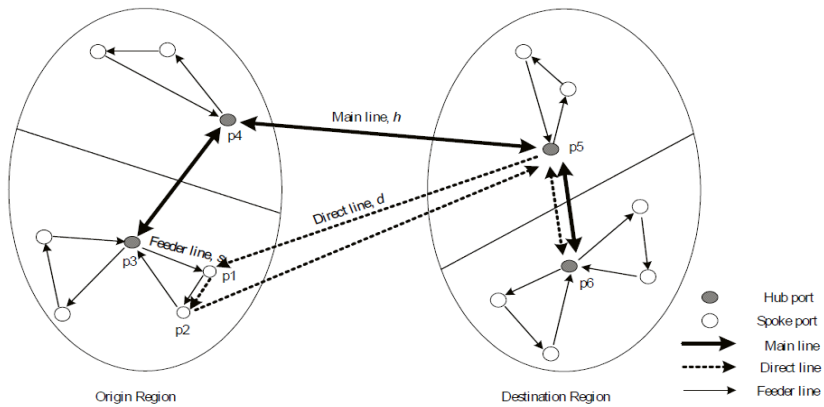
Konsep Perencanaan Jaringan

Secara sederhana, perencanaan jaringan adalah perencanaan pergerakan barang dari titik asal ke titik tujuan. Konsep perencanaan jaringan secara umum dapat dibedakan menjadi 2, yaitu *hub and spoke* dan *multiport calling*. Perencanaan jaringan digunakan untuk menentukan pola jaringan transportasi.

a. *Hub and Spoke*

Konsep jaringan ini adalah model jaringan transportasi laut dimana terjadi pengiriman barang antara dua wilayah yang terpisah oleh laut. Pada masing-masing wilayah, dipilih satu atau lebih pelabuhan sebagai *hub port* berdasarkan lokasi dan permintaan pengiriman barang. Muatan yang akan diangkut dikonsolidasikan di *hub port* dan kemudian diangkut dengan menggunakan kapal

berukuran lebih besar (*mother vessel*) yang memberikan layanan antar *hub port* di kedua wilayah tersebut. Untuk memberikan layanan dari *hub port* menuju ke pelabuhan kecil (*spoke port*) dan sebaliknya, menggunakan layanan kapal berukuran lebih kecil atau *feeder vessel* (Gambar 1)



Gambar 3 Konsep *Hub and Spoke Network*

Sumber: (Chaug-Ing Hsu, 2011)

b. Multiport Calling

Berbeda dengan konsep *hub and spoke network*, konsep ini tidak menggunakan kapal berukuran besar (*mother vessel*). Dalam konsep ini, kapal-kapal berukuran lebih kecil digunakan untuk mengangkut muatan dari pelabuhan asal ke pelabuhan tujuan secara langsung atau *direct*

Optimalisasi

Optimasi terbagi menjadi dua bagian, yaitu optimasi yang tak terbatas yang hanya dikalikan dengan fungsi objektif yang tak terbatas dan tidak memiliki pembatas, dan optimasi terbatas yang memiliki fungsi objektif yang terbatas atau persyaratan tertentu yang membuat masalah lebih rumit dan memerlukan algoritma yang berbeda untuk diselesaikan. Terdapat banyak teknik optimasi yang telah dikembangkan sampai saat ini, diantaranya adalah *linear*

programming, goal programming, integer programming, nonlinear programming, dan dynamic programming. Penggunaan teknik optimasi tersebut tergantung dari permasalahan yang akan diselesaikan. Pada penelitian ini menggunakan teknik optimasi *linear programming*.

a. Linear Programming (LP)

Linear Programming (LP) adalah salah satu cara untuk menyelesaikan persoalan pengalokasian sumber-sumber yang terbatas di antara beberapa aktivitas yang berbeda dengan cara terbaik yang mungkin dapat dilakukan sehingga diperoleh keuntungan yang maksimum atau biaya yang minimum (Amalia). Keputusan yang diambil dalam program tersebut diambil dengan memilih dari beberapa alternatif yang ada.

Suatu masalah LP merupakan suatu masalah optimasi yang berkaitan dengan meminimumkan atau memaksimalkan suatu fungsi linier yang dibatasi oleh konstrain-konstrain atau kendala-kendala yang berbentuk baik persamaan ataupun ketidaksamaan (Bazaraa). Hasil akhir dapat dikatakan optimal jika hasil tersebut dapat mencapai tujuan yang terbaik di antara seluruh alternatif *feasible*. Permasalahan LP dapat diformulasikan sebagai berikut.

$$\text{Minimize: } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (1)$$

Dengan batasan:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}X_j \geq b_i$$

$$X_j \geq 0 \quad \begin{matrix} i = 1,2,3, \dots m \\ j = 1,2,3, \dots n \end{matrix}$$

Keterangan:

- $c_1X_1 + c_2X_2 + \dots + c_nX_n$ adalah fungsi tujuan yang harus diminimumkan atau dimaksimalkan dan dinotasikan dengan Z
- Koefisien $c_1, c_2, \dots c_j$ adalah koefisien *cost* yang diketahui

- X_1, X_2, \dots, X_j adalah variabel keputusan yang harus dicari
- Pertidaksamaan $\sum_{j=1}^n a_{ij}X_j \geq b_i$ adalah konstrain ke- i
- Pertidaksamaan a_{ij} untuk
 - $i = 1, 2, \dots, m$
 - $j = 1, 2, \dots, n$ adalah parameter pembatas
- Konstrain $X_j \geq 0$ adalah konstrain non-negatif.

Selain model LP seperti yang diformulasikan di atas, terdapat pula bentuk lain dari model LP, yaitu:

- Fungsi tujuan bukan minimasi, melainkan maksimasi
- Beberapa konstrain fungsionalnya mempunyai bentuk ketidaksamaan dalam bentuk lebih kecil (\leq)
- Beberapa konstrain lainnya mempunyai beberapa bentuk persamaan
- Menghilangkan konstrain non-negatif untuk beberapa variabel keputusan

b. Transportation Problem

Permasalahan transportasi dikenal sebagai permasalahan yang dapat diformulasikan dan diselesaikan dengan *linear programming* berdasarkan struktur jaringan dari titik dan panah yang dihubungkan (Liu). Pada masalah transportasi mempertimbangkan m sebagai titik asal, dimana asal i mempunyai *supply* sebanyak s_i unit dengan item tertentu. Di samping itu, terdapat juga n sebagai titik tujuan, dimana tujuan j membutuhkan d_j unit dari item.

Dengan mengasumsikan bahwa $s_i, d_j > 0$, maka menghubungkan masing-masing titik (i, j) , dari asal i ke tujuan j , menimbulkan biaya per unit C_{ij} untuk transportasi sehingga permasalahan yang diselesaikan adalah untuk menentukan sebuah pola pengiriman yang feasible dari titik asal ke titik tujuan dengan total biaya transportasi paling minimum, dengan x_{ij} merupakan jumlah unit yang dikirimkan dari asal i ke tujuan j . Selanjutnya, dengan menggunakan

asumsi bahwa permasalahan adalah seimbang, maka *total supply* sama dengan *total demand*.

$$\sum_{i=1}^m S_i = \sum_{j=1}^n d_j$$

Jika *total supply* melebihi *total demand*, maka model tujuan dapat dibuat dengan demand $d_{n+1} = \sum_i s_i - \sum_j d_j$ dan $c_{i, n+1} = 0$ untuk $i = 1, \dots, m$. Dengan mengasumsikan bahwa *total supply* sama dengan *total demand*, maka model LP untuk masalah transportasi adalah sebagai berikut.

Minimize (2)

$$c_{11}x_{11} + \dots + c_{1n}x_{1n} + c_{21}x_{21} + \dots + c_{2n}x_{2n} + \dots + c_{m1}x_{m1} + \dots + c_{mn}x_{mn}$$

Subject to

$$x_{11} + \dots + x_{1n} = S_1$$

$$x_{21} + \dots + x_{2n} = S_2$$

$$x_{m1} + \dots + x_{mn} = S_m$$

$$x_{11} + x_{21} + \dots + x_{m1} = d_1$$

$$x_{1n} + x_{2n} + \dots + x_{mn} = d_n$$

$$x_{11}, \dots, x_{1n}, \dots, x_{21}, \dots, x_{2n}, \dots, x_{m1}, \dots, x_{mn}, \dots \geq 0$$

Berdasarkan asumsi bahwa *total supply* sama dengan *total demand*, maka masalah transportasi selalu mempunyai solusi yang *feasible* (Bazaraa).

Tinjauan Biaya Transportasi Laut

Teori biaya transportasi laut digunakan untuk menghitung besarnya biaya-biaya yang timbul akibat pengoperasian kapal desalinasi air laut. Pengoperasian kapal serta bangunan apung laut lainnya membutuhkan biaya yang biasa disebut dengan biaya berlayar kapal (*shipping cost*) (Stopford, 1997) (Wijnolst & Wergeland, 1997). Secara umum biaya tersebut meliputi biaya modal, biaya operasional, biaya pelayaran dan biaya bongkar muat. Biaya-biaya ini perlu diklasifikasikan dan dihitung agar dapat

memperkirakan tingkat kebutuhan pembiayaan kapal desalinasi air laut untuk kurun waktu tertentu (umur ekonomis kapal tersebut).

Terdapat empat kategori biaya dalam pengoperasian kapal yang harus direncanakan seminimal mungkin (Wijnolst & Wergeland, 1997) (Stopford, 1997), yaitu:

1. Biaya modal (*capital cost*)
2. Biaya operasional (*operational cost*)
3. Biaya pelayaran (*voyage cost*)
4. Biaya bongkar muat (*cargo handling cost*)

Sehingga, total biaya dapat dirumuskan: $TC = CC + OC + VC + CHC$

Dalam beberapa kasus perencanaan transportasi menggunakan kapal sewa (*charter ship*), biaya modal (*capital cost*) dan biaya operasional (*operational cost*) diwakili oleh biaya sewa (*charter hire*).

Sehingga, total biaya menjadi: $TC = TCH + VC + CHC$

A. Biaya Modal (*Capital Cost*)

Capital Cost yakni biaya Time Charter Hire per tahun bukan menggunakan nilai investasi dikarenakan pada kasus ini kapal di sewa dengan sistem *Time Charter*.

B. Biaya Pelayaran (*Voyage Cost*)

Biaya pelayaran adalah biaya-biaya variabel yang dikeluarkan kapal untuk kebutuhan selama pelayaran. Komponen biaya pelayaran adalah bahan bakar untuk mesin induk dan mesin bantu, biaya pelabuhan, biaya pandu dan tunda. Rumus untuk biaya pelayaran adalah: $VC = FC + PC$

Keterangan: $VC = \text{Voyage Cost}$

$PC = \text{Port Cost}$

$FC = \text{Fuel Cost}$

C. Port Cost

Pada saat kapal dipelabuhan, biaya-biaya yang dikeluarkan meliputi port dues dan service charges. Port dues adalah biaya yang dikenakan atas penggunaan fasilitas pelabuhan seperti dermaga,

tambahan, kolam pelabuhan, dan infrastruktur lainnya yang besarnya tergantung volume dan berat muatan, GRT dan NRT kapal. Service charge meliputi jasa yang dipakai kapal selama dipelabuhan, yaitu jasa pandu dan tunda, jasa labuh, dan jasa tambat.

D. Fuel Cost

Konsumsi bahan bakar kapal tergantung dari beberapa variabel seperti ukuran, bentuk dan kondisi lambung, pelayaran bermuatan atau ballast, kecepatan, cuaca, jenis dan kapasitas mesin induk dan motor bantu, jenis dan kualitas bahan bakar. Biaya bahan bakar tergantung pada konsumsi harian bahan bakar selama berlayar di laut dan di pelabuhan dan harga bahan bakar. Terdapat tiga jenis bahan bakar yang dipakai, yaitu HSD, MDO, dan MFO. Konsumsi bahan bakar dihitung dengan menggunakan rumus pendekatan yang diberikan oleh Parson (2003), yaitu:

$$WFO = SFR \times MCR \times \frac{Range}{Speed} \times Margin$$

Keterangan:

WFO = konsumsi bahan bakar/jam

SFR = *Specific Fuel Rate* (t/kWhr)

MCR = *Maximum Continuous Rating of Main Engine* (s) (kW)

Konsumsi bahan bakar secara spesifik didasarkan pada torsi motor bakar yang berbanding dengan aliran massa bahan bakar yang ditransfer ke motor bakar. Dari tiap beban daya yang dikeluarkan oleh motor bakar, terdapat perbedaan mengenai konsumsi bahan bakar. Pada titik daya tertentu konsumsi bahan bakar berada pada titik terendah pada grafik specific fuel oil consumption (SFOC). Biasanya satuan yang digunakan gram/bkWh atau gram/kWh. Nilai satuan tersebut umumnya diambil dari pengukuran test-bed, dengan menggunakan bahan bakar yang telah disuling, dan dalam kondisi yang terkendali dengan pengawasan standar pengujian. Ketika

menafsirkan secara signifikan dan kutipan nilai SFC, faktor angka harus dipertimbangkan.

1. Satuan SFC harus jelas. Pada saat SFC menggunakan satuan horsepower satuan metric yang mana lebih rendah jika menggunakan satuan horsepower british.
2. SFC akan terjadi perbedaan pada tiap luaran daya dan RPM, biasanya yang terendah antara 75% - 85% MRP dan 90% putaran.
3. Mesin tanpa menggunakan pompa tambahan mempunyai SFC lebih sedikit dibandingkan mesin yang menggunakan pompa tambahan.
4. Mesin dengan kecepatan rendah pada umumnya diuji dengan menggunakan bantalan tetap, tetapi tidak dibebani. BHP yang dihasilkan pada saat servis ketika secara langsung memutar propeller dan dengan pembebanan bantalan yaitu lebih rendah dari pada saat pengujian, dan SFC yang dihasilkan lebih tinggi.
5. Untuk menormalkan perbedaan SFC yang timbul akibat perbedaan nilai panas dari bahan bakar, maka SFC harus dikalikan dengan ratio nilai bahan bakar tertentu, pada umumnya nilai kalor yang digunakan adalah bahan bakar yang nilai kalornya rendah.
6. Untuk menentukan SFC dari suatu mesin yang mampu beroperasi dengan bahan bakar campuran atau berat, SFC harus dibagi dengan ratio nilai panas bahan bakar yang lebih berat dengan menggunakan bahan bakar tertentu.
7. Dalam menggunakan SFC untuk menentukan konsumsi bahan bakar, hubungan antara BHP dan daya yang diserap oleh beban menjadi pertimbangan. Khususnya pada bagian banyaknya kerugian yang dihasilkan oleh gear pada mesin.

Kesimpulan

Pengiriman melalui moda laut kapasitasnya jauh lebih besar dibanding dengan transportasi darat maupun udara. Efisiensi dalam proses transportasi laut dan distribusi menjadi salah satu hal yang penting karena proporsi biaya transportasi bisa mencapai 66% dari keseluruhan biaya logistik serta emisi gas buang dari kapal juga sangat besar. Oleh karena itu perlunya optimalisasi dalam pelayaran yaitu rute dan juga kecepatan pada kapal yang beroperasi agar biaya menjadi lebih murah dan emisi gas buang menjadi berkurang demi terciptanya ecogreen dalam dunia pelayaran.

References

- Lim, 2005. A simulated annealing and hill-climbing algorithm for the traveling tournament problem., *European Journal of Operational Research*, 1459–1478.
- Hsu, C. I., & Hsieh, Y. P. (2003). Direct Versus Hub and Spoke Routing on a Maritime. Taichung: National Chiao Tung University.
- Chou, M., MiaoSong, & Teo, C. P. (2003). Inventory Routing Problem in Sea Freight: Direct versus Transshipment Model. Singapore: National University of Singapore and The Logistics Institute.
- Rusthon, A., Croucher, P., & Baker, P. (2010). *The Handbook of Logistics & Distribution Management* (4th Ausg.). London: Kogan.
- Trozzi, C., & Vaccaro, R. (1998). Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions from Ships. *22nd CIMAC International Congress on Combustion Engines*. Copenhagen.

KONSEP DAUR ULANG KAPAL RAMAH LINGKUNGAN

Dian Prasetyawati

Universitas Muhammadiyah Surabaya

Abstrak

Dalam industri maritim, kapal menjadi salah satu titik fokus utama dari sebuah nilai ekonomi dan bisnis. Akan tetapi, kapal juga memiliki keterbatasan dari sisi usia dimana kapal-kapal berusia 25 tahun atau lebih rata-rata sudah harus dihentikan operasionalnya karena sudah tidak bernilai ekonomis untuk memenuhi permintaan transportasi laut. Selanjutnya kapal-kapal yang sudah tua dan rusak tersebut akan “dibuang” dengan terlebih dahulu dilakukan pembongkaran, penutuhan ataupun dilakukan daur ulang. Saat ini, proses daur ulang kapal yang dilakukan di beberapa negara masih dilakukan dengan cara-cara atau metode serta fasilitas yang masih bersifat manual dan tradisional sehingga belum bisa secara optimal menerapkan prosedur kerja yang aman bagi para pekerja dan belum maksimal dalam menerapkan konsep daur ulang yang ramah serta berwawasan terhadap lingkungan sekitar. Tulisan ini membahas tentang *life cycle* kapal, *shipbreaking* sebagai suatu industri, dan *green ship-recycling* sebagai sebuah isu tentang bagaimana seharusnya

penanganan limbah akibat aktifitas pembongkaran kapal. Konsep ini dimaksudkan untuk melindungi keselamatan manusia dan lingkungan dari potensi bahaya karena adanya zat-zat berbahaya yang masih tersisa di kapal dan juga risiko bahaya akibat prosedur kerja yang tidak aman.

Kata kunci: ekonomis, *green ship-recycling*, industri, *life cycle*, *shipbreaking*

Pendahuluan

Daur ulang kapal (yang juga dikenal sebagai penutuhan kapal, pembongkaran kapal, pemecahan kapal, atau perengkahan kapal) adalah merupakan jenis kegiatan pembuangan kapal yang melibatkan proses pemecahan kapal yang memungkinkan adanya aktifitas pengambilan material dari kapal terutama material baja untuk didaur ulang dan dibuat menjadi produk baru baik untuk sumber suku cadang yang dapat dijual untuk digunakan kembali, maupun untuk ekstraksi bahan mentah. Begitu juga perlengkapan dan peralatan lain diatas kapal yang dapat digunakan kembali selama masih layak pakai. Kapal-kapal modern memiliki umur sekitar 25 sampai 30 tahun sebelum akhirnya mengalami korosi dan kelelahan logam sehingga secara ekonomis tidak lagi bernilai untuk dioperasikan. Kapal-kapal yang sudah tua inilah yang selanjutnya harus dilakukan penutuhan dan didaur ulang.

Saat ini industri *Shipbreaking* sudah sangat berkembang terutama di beberapa negara. Diantara negara-negara tersebut India, Bangladesh, dan Pakistan adalah negara dengan penutuhan kapal terbesar di dunia. Sedangkan di Indonesia terdapat 3 daerah yang merupakan lokasi daur ulang kapal-kapal tua yaitu di daerah Bangkalan, Madura; Tanjung Uncam, Batam dan Cilincing, Jakarta Utara. Namun, kegiatan penutuhan yang dilakukan baik di India, Bangladesh, Pakistan, maupun di negara kita Indonesia mayoritas

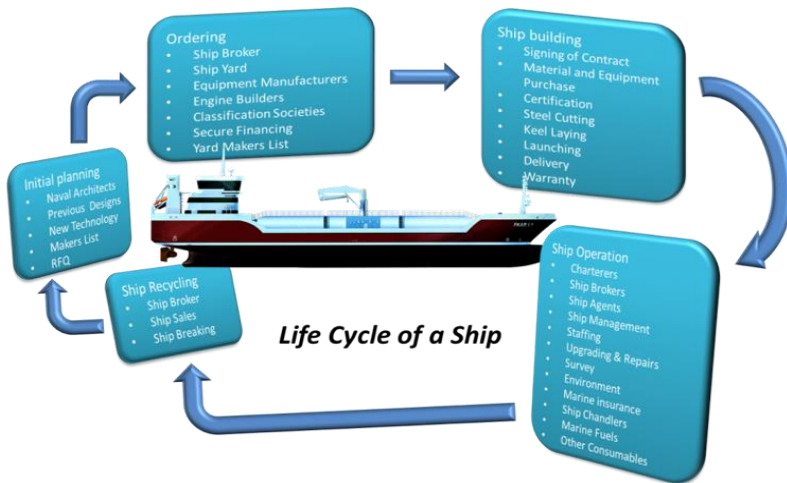
masih dilakukan dengan metode, fasilitas, dan teknologi yang belum memadai sehingga faktor keamanan, keselamatan manusia dan lingkungan belum menjadi prioritas utama sedangkan pekerjaan penutuhan merupakan kegiatan dengan potensi risiko yang sangat tinggi bagi para personel maupun bagi lingkungan sekitarnya dikarenakan kapal yang berada pada akhir masa operasionalnya akan dibawa ke garis pantai dimana pada kapal-kapal tua tersebut masih memungkinkan adanya sisa-sisa material maupun zat berbahaya yang terkandung di dalamnya misalnya logam berat, asbes, hidrokarbon, sisa bahan bakar, dan sisa muatan B3 (Bahan Beracun dan Berbahaya). Faktor tersebut yang menjadi fokus perhatian dunia terutama PBB (Perserikatan Bangsa-bangsa). Melalui IMO (*International Maritime Organization*) yang merupakan organisasi khusus bidang maritim, maka diadopsilah konvensi internasional baru terkait daur ulang kapal atau yang lebih dikenal dengan *Hongkong International Convention* yang merupakan kelanjutan dari *Basel Convention* yang sebelumnya sudah membahas tentang pembuangan limbah beracun. *The Hongkong International Convention for the Safe and Environmentally Sound Recycling of Ships* ini secara garis besar bertujuan mendorong dan memastikan bahwa proses daur ulang kapal dilakukan dengan aman, tidak menyebabkan potensi risiko yang membahayakan keselamatan manusia serta lingkungan sekitarnya. Dalam konvensi ini juga dibahas secara detail tentang berbagai rencana dan fasilitas yang harus disiapkan oleh tempat daur ulang termasuk didalamnya adalah identifikasi material berbahaya yang ada di kapal (*Inventory Hazardous Materials*).

”Life Cycle” Kapal

Kapal dagang modern adalah perangkat yang terbuat dari rangka baja, balok, dan pelat yang dilas yang dirancang untuk membawa kargo tertentu dengan aman melintasi lautan. Konstruksi dari

struktur ini dapat bervariasi tergantung pada signifikansi kecepatan, kapasitas kargo, penghematan bahan bakar, dan rute yang dituju oleh pemilik kapal. Mayoritas kapal komersial yang berlayar di laut didorong dengan mesin diesel dan desainnya telah banyak berubah dari hanya sekedar fungsi kecepatan menjadi ke ekonomis. Kenaikan biaya bahan bakar berkontribusi pada peningkatan desain kapal dengan menekankan pada penggerak yang ekonomis, mesin utama yang hemat bahan bakar, dan desain lambung yang lebih baik. Saat ini kapal dagang modern dibangun sesuai dengan peraturan yang lebih ketat.

Ada beberapa jenis kapal yang dan beberapa memiliki peran ganda atau armada pengangkut gabungan. Yang paling penting dalam perdagangan pelayaran internasional adalah kapal tanker, kapal pengangkut gabungan, kapal curah, kapal kontainer, kapal berpendingin, dan kapal penumpang. Umur ekonomis rata-rata sebuah kapal adalah sekitar dua puluh tahunan sampai 30 tahun. Tantangan besar bagi pemilik kapal adalah tentang bagaimana mereka dapat memastikan kelangsungan hidup kapalnya karena pada titik tertentu dalam kehidupan kapal, pemilik akan mencapai keputusan untuk menjual kapalnya untuk dilakukan penutuhan /daur ulang. Gambar berikut menunjukkan siklus suatu kapal mulai dari perencanaan awal, persiapan, proses pembangunan, *launching*, operasional, sampai kemudian setelah berakhir masa beroperasinya kapal akan dibongkar atau didaur ulang dan material hasil pembongkaran sebagian masih bisa digunakan kembali untuk membangun kapal berikutnya.



Gambar 1. Siklus hidup sebuah kapal (*sumber:shippipedia.com*)

Shipbreaking Sebagai Sebuah Industri

Sejak awal 1970 an industri perkapalan dihadapkan pada permasalahan terhadap sejumlah besar kapal-kapal tua yang mendekati akhir usia operasinya sebagai akibat adanya ledakan pembangunan kapal baru, perubahan aturan, serta semakin berkembangnya teknologi yang bisa diaplikasikan di kapal-kapal baru. Pada akhirnya pemilik kapal harus memutuskan untuk menjual dan membongkar kapal-kapal tua tersebut. Data tahun 2013 menunjukkan bahwa sekitar 29.052.000 ton kapal yang dilakukan penutuhan di dunia dimana 92% dari aktifitas tersebut dilakukan di Asia (Wikipedia, 2020). Hal ini menjadikan Asia sebagai tempat penutuhan kapal terbesar di dunia dengan pertimbangan bahwa tenaga kerja yang lebih murah dan aturan yang lebih longgar dibandingkan dengan negara-negara lain di benua Amerika dan Eropa. Industri penutuhan kapal memiliki potensi yang sangat besar jika dikembangkan menjadi industri skala nasional apalagi didukung dengan semakin meningkatnya minat industri perkapalan yang berkelanjutan. Industri maritim saat ini berada di bawah tekanan yang semakin meningkat dari berbagai pemangku kepentingan guna

memastikan bahwa kapal yang dilakukan daur ulang telah sesuai dengan prosedur yang mengutamakan kesehatan, keselamatan manusia dan ramah lingkungan.



Gambar 2. Pekerjaan pembongkaran kapal di Kalibaru, Jakarta Utara (Sumber: *benarnews.org*, 2020)

Dengan diadopsinya *International Hongkong Convention for the Safe and Environmentally Sounds Recycling Ships* sebagai salah satu isu utama dalam industri maritim internasional maka tren tuntutan bagi pemilik kapal, fasilitas/tempat daur ulang kapal dan pihak-pihak terkait, dalam beberapa tahun ke depan diperkirakan *shipbreaking* dan *ship recycling industry* akan semakin berkembang karena konvensi ini telah mengembangkan kesadaran internasional untuk meningkatkan standar dan teknologi daur ulang kapal dengan fokus utama pada meminimalkan risiko yang dihadapi para pekerja saat harus menghadapi aktifitas dan material yang berbahaya yang ada di kapal serta fokus pada isu-isu lain terkait penyelamatan lingkungan dari pencemaran akibat limbah sisa-sisa operasional kapal.

Isu “Green” dalam Daur Ulang Kapal

Meningkatnya sampah dan pengelolannya yang tidak tepat merupakan salah satu krisis yang dihadapi negara-negara di dunia

saat ini. Seperti industri lainnya, industri maritim pada umumnya dan industri perkapalan pada khususnya, merupakan salah satu penyumbang sampah dan pencemaran terbesar di dunia karena menghasilkan limbah dalam jumlah besar setiap hari. Kapal membuang ratusan ton sampah dari aktifitas operasional yang dilakukan sehari-hari. Demikian juga aktifitas pembuangan kapal setelah mencapai akhir masa pakainya (kapal-kapal usang) juga meninggalkan sejumlah besar limbah yang menimbulkan potensi bahaya bagi lingkungan. Saat ini isu daur ulang dan penggunaan kembali dari sebuah barang atau produk menjadi suatu kebutuhan yang penting, begitu juga kebutuhan terhadap mendaur ulang dan menggunakan kembali bagian-bagian dari kapal usang.

Green Ship Recycling merupakan proses mendaur ulang maupun menggunakan kembali bagian-bagian dari kapal dengan melakukan proses pengambilan material untuk diolah kembali menjadi material yang bernilai ekonomis yang dapat digunakan kembali, dimana pada proses tersebut harus memperhatikan kesehatan, keselamatan pekerja dan keselamatan lingkungan sekitarnya. Sedangkan yang dimaksud dengan *Ship Recycling Yard* adalah tempat/fasilitas daur ulang kapal yang secara resmi telah diberikan izin dari pihak yang berwenang tempat galangan tersebut berada (IMO, *Ship recycling Guideline*, 2003). Dalam aktifitas daur ulang tersebut dimana masih banyak terdapat material berbahaya dari kapal yang mungkin akan menimbulkan potensi risiko yang dihadapi oleh pekerja maupun potensi risiko bagi keselamatan lingkungan. Oleh karena itu, penilaian terhadap fungsi dari masing-masing material harus terlebih dahulu dilakukan. Dari penilaian tersebutlah nanti pada akhirnya yang akan menentukan metode pengelolaan lanjutan terhadap material dari kapal dimana metode pengelolaan lanjutan tersebut terbagi menjadi:

1. *Reuse* artinya material masih bisa digunakan kembali tanpa mengubah fungsi awalnya, tetapi perlu dilihat kondisinya untuk mengetahui *treatment* atau *maintanance* yang dibutuhkan.
2. *Recycle* artinya material bisa dipakai kembali dengan syarat terlebih dahulu harus dilakukan daur ulang menjadi produk lain.
3. *Disposal* artinya material harus dilakukan pembuangan karena dianggap sudah tidak memiliki nilai ekonomis lagi sehingga tidak bisa digunakan dalam bentuk apapun.

Adapun beberapa alasan yang membuat konsep daur ulang kapal “*green*” sangat populer dan penting adalah karena faktor-faktor berikut:

1. Mengisolasi bagian-bagian dan material di kapal yang berbahaya bagi pekerja, manusia di sekitarnya, dan kehidupan laut lainnya.
2. Melestarikan ekosistem laut dengan cara membuang limbah hasil kegiatan penutuhan kapal secara tepat
3. Menggunakan kembali bagian-bagian kapal untuk keperluan membuat kapal baru maupun industri lainnya sehingga akan dapat menghemat sumber daya
4. Membantu pemilik kapal mendapatkan manfaat dari proses aktifitas penutuhan dengan utilitas optimal dari bagian-bagian kapal

Untuk menjadi bagian dari proses daur ulang kapal secara “*green*”, menurut pedoman Organisasi Maritim Internasional (IMO), sebuah kapal harus memiliki dokumen tertentu, yang dikenal sebagai Paspur Hijau. Paspur Hijau berisi rincian semua bahan, terutama yang berbahaya bagi kesehatan, keselamatan manusia, dan lingkungan yang ada di kapal. Paspur hijau akan dikirimkan oleh galangan kapal selama konstruksi dan nantinya akan diperbarui dengan semua perubahan yang dilakukan pada kapal selama masa operasinya. Selain itu, fasilitas tempat daur ulang kapal diharuskan untuk memberikan “Rencana Daur Ulang Kapal” kepada otoritas terkait. Rencana

tersebut akan terdiri dari cara bagaimana setiap kapal tersebut akan didaur ulang, sesuai dengan rincian dan inventarisnya. Pada tabel 1 berikut diberikan contoh daftar material dan limbah berbahaya yang ditimbulkan sebagai akibat pembongkaran/penutuhan kapal

Tabel 1. Daftar limbah berbahaya yang ditimbulkan akibat penutuhan kapal

Cathodic Protection	Lebih dari 110.000 kg anoda dipasang di kapal awal. Anoda Al dan Zn keduanya digunakan. Kira-kira 65 000 kg (total) diasumsikan tetap ketika kapal tiba untuk <i>scrapping</i> . Anoda mengandung <i>In</i> , <i>Cd</i> , dan <i>Pb</i> dalam jumlah yang lebih kecil.
Batteries	Sekitar 200kg baterai telah diidentifikasi yang mengandung <i>Pb</i> , <i>Cd</i> , <i>Ni</i> , dan asam sulfat. Jumlah tersebut dianggap rendah dan mungkin hanya mewakili jumlah yang dibutuhkan dan baterai cadangan tambahan. Diasumsikan bahwa angka sebenarnya lebih dekat ke ganda
Coatings and Paints	Awalnya lebih dari 65.000 liter cat digunakan. Volume besar ini telah hilang karena operasi dan pemeliharaan. Namun, cat baru telah ditambahkan selama bertahun-tahun. Oleh karena itu, jumlah yang tersisa kemungkinan akan melebihi volume aslinya. Jumlah residu cat di kapal diasumsikan terbatas. Produk-produk ini kemungkinan besar akan dirawat dan digunakan secara lokal. Cat dan pelapis dapat mengandung senyawa kimia seperti Cl, Zn, Cu, PCB, dan Pb. Selain itu, seseorang harus berharap untuk menemukan TBT dalam jumlah yang cukup besar dalam cat anti-fouling.

Fire-fighting	Volume bubuk, CO ₂ dan busa telah diidentifikasi. Perangkat pemadam kebakaran yang bergerak lebih mungkin digunakan kembali. Sistem yang fix akan discrap karena menyebabkan penyebaran zat yang teridentifikasi. Ini tidak dianggap memiliki efek lingkungan lokal.
Refrigerants	Zat-zat yang terdapat dalam instalasi pendingin mengandung chlorodiflourmethane (R22) dan dichloroflourmethane (F12). Total volume sekitar 1000 liter.
Thermal Insulation	Asbes umumnya digunakan sebagai isolator termal di kapal ketika dibangun dan sekitar 7000 kg telah diidentifikasi. Angka tersebut telah diperiksa dengan kapal lain yang lebih kecil dan mewakili kapal 100.000 DWT ke atas.
Steel Structure	Sekitar 15% dari kapal DWT adalah baja. Cat dan pelapis menutupi sebagian besar baja, dan pemulihan (perhitungan ulang) akan menyebabkan pelepasan gas setelah proses pemotongan. Komponen yang dilepaskan mungkin termasuk dioksin dan lainnya.
Electrical Insulation	Sebanyak 50.000 m pemasangan kabel mungkin ada di kapal. Kabel kemungkinan besar dibakar secara lokal di pantai. Zat termasuk Cu dan PVC, pembakaran menyebabkan pelepasan dioksin dan furan terklorinasi. Komponen kelistrikan pada fitting lampu antara lain PCB dan Hg.
Oil Residues	Sisa minyak telah dikategorikan sebagai "bersih", atau sebagai limbah. Produk dalam kelompok pertama memiliki nilai pasar dan karenanya dapat diolah kembali. Kelompok terakhir mewakili produk

	minyak yang terkontaminasi atau produk yang tidak dapat dipulihkan. Kelompok utama diwakili oleh residu dari tangki kargo. Ini mungkin mengandung 1500-2000 m ³ campuran minyak, karat dan pasir/sedimen.
Preparations prior to Scrapping	Kapal biasanya diharuskan untuk berlayar ke tujuan scrapping. Ini mensyaratkan bahwa semua sistem secara umum harus dalam urutan operasional. Ini menghilangkan kemungkinan untuk menghilangkan zat dalam sistem sebelum pembongkaran. Toko seperti minyak, bahan kimia dan produk cat dapat dihilangkan. Selanjutnya, tangki dapat dikosongkan, dibersihkan dan diberi ventilasi sebelum pembongkaran.

(Sumber: MEPC 43/18/1, *Scrapping of Ships*, p. 10)

Kesimpulan

Dari analisis diatas dapat dipahami bahwa banyak faktor yang harus dipertimbangkan terkait dengan aktifitas penutuhan dan daur ulang. Tindakan segera harus dilakukan oleh pemerintah, pemilik kapal, tempat daur ulang, dan pihak-pihak terkait untuk mengatasi permasalahan kapal-kapal usang, daur ulang, dan penanganan sisa-sisa material di dalamnya. Penerapan *Hongkong International Convention* tentu saja adalah pilihan terbaik dalam hal aktifitas daur ulang dan pengelolaan limbah kapal yang merupakan aktifitas dengan potensi risiko tinggi terhadap kesehatan, keselamatan manusia dan ancaman bagi keselamatan lingkungan. Aturan-aturan dalam konvensi tersebut merupakan kerangka kerja yang telah tersusun dan berada di bawah naungan IMO yang memberikan perhatian penuh terkait masalah daur ulang kapal sebagai permasalahan internasional. Ketiadaan fasilitas dan teknologi yang memadai

merupakan hal yang harus menjadi perhatian dalam rangka penanganan daur ulang yang berkelanjutan dalam *Ship Recycling Industry* karena permasalahan keselamatan manusia dan dampak negatif terhadap lingkungan adalah suatu hal yang tidak bisa ditolerir.

Referensi

- Akriananta.W, Suastika. K (2017). Analisis Pengembangan Galangan Daur-Ulang Kapal Ramah Lingkungan Di Indonesia Menggunakan Metode ANP: Studi Kasus Galangan Daur-Ulang Kapal Di Kamal, Madura. *Jurnal Kelautan Nasional, Vol. 12, No 1, 33-4*
- Amalia, N. (2016). Analisis Teknis dan Ekonomis Pengembangan Industri Daur ulang Kapal Berwawasan Lingkungan (Ship Recycling Yard) di Pulau Madura. Surabaya.Skripsi. Fakultas Teknologi Kelautan: ITS.
- Eckhard, M. (2009). Ship Demolition Report and Market Analysis, Ballindamm, Hamburg
- Fariya, S. (2016), *Analisis Teknis Pengembangan Green Ship Recycling Yard di Indonesia*, Tesis, ITATS, Surabaya
- Guidelines for Safe and Environmentally Sound Ship Recycling, adopted by Resolution MEPC.210(63), IMO, 2012
- Guidelines for the Authorization of Ship Recycling Facilities, adopted by Resolution MEPC.211(63), IMO, 2012
- Guidelines for the Development of the Inventory of Hazardous Material, adopted by Resolution MEPC.269 (68), IMO, 2015
- Guidelines for the Development of the Ship Recycling Plan, adopted by Resolution MEPC.196(62), IMO, 2011
- Hasugian, S. (2010). *Studi Pengembangan Hazardous Material Pada Proses Ship Recycling Sesuai IMO Guidelines untuk Kapal Berbendera Indonesia*. Tesis. Fakultas Teknologi Kelautan: ITS.
- <http://hasaniqbaln.blogspot.com/2012/03/ship-recycling-convention-wujud.html>

- International Labour Organization. (2004), *Safety and Health in Shipbreaking*, ILO, Geneva
- Inventory of Hazardous Materials (IHM): a Brief Explanation (2021), ship-technology.com *Life Cycle of a Ship*, www.shippedia.com
- K.A., Hossain. (2017), *Ship Recycling Practice and Annual Reusable Material Output from Bangladesh Ship Recycling Industry*, Jurnal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications.
- K. P. Jain, J. F. J. Pruyn, J. J. Hopman (2013). Critical Analysis of the Hong Kong International Convention on Ship Recycling. World Academy of Science, Engineering and Technology. *International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Mining Engineering Vol:7 No:10, 683-691*
- Makbul, Amir. (2010), *Studi Tekno Ekonomi Pengembangan Ship Recycling Yard di Indonesia*, Tesis, ITS, Surabaya.
- M. Sarraf et.al, Shipbreaking and Recycling Industry in Bangladesh and Pakistan, Washington, D.C.: World Bank (2010)
- M. Stopford, *Maritime Economics*, London : Routledge, 2009, ch.5, p.178.
- N.Mikelis, *Hongkong Convention : the Origins of a Convention*, World Maritime University, Malmo, Sweden, 2012.
- Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 29. (2014). Pencegahan Pencemaran Lingkungan Maritim. Menteri Perhubungan, Jakarta.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 21. (2010). Perlindungan Lingkungan Maritim. Presiden Republik Indonesia, Jakarta.
- Peraturan Pemerintah Nomor 74 (2001), Pengelolaan Bahan Berbahaya dan Beracun, Jakarta. Recycling of ships, International Maritime Organization, imo.org
- Rolando D. Legaspi. (2000). *Ship Recycling: Analysis of the Shipbreaking Countries in Asia*, World Maritime University.
- What is Green Ship Recycling, www.marineinsight.com

WASTE HEAT RECOVERY SYSTEM

Sunarsih

Department of Marine Engineering, Institut Teknologi Sepuluh
Nopember

Abstrak

Supremasi mesin diesel sebagai penggerak utama berbagai jenis kapal diperkirakan masih akan bertahan beberapa dekade ke depan. Meskipun demikian, agenda terkini pembangunan maritim yang berorientasi pada pembangunan berkelanjutan menuntut penggunaan diesel lebih ramah lingkungan. Pendekatan global diperlukan untuk mengatasi 2.2% emisi global CO₂ dari pelayaran internasional dan meningkatkan efisiensi energi dan kontrol emisi yang efektif. *Energy Efficiency Design Index* (EEDI) merupakan regulasi IMO untuk mendukung implementasi langkah-langkah strategis dalam rangka pendekatan global tersebut. Salah satu teknologi yang belakangan pesat dikembangkan dan diaplikasikan adalah pemulihan kembali energi kapal yang terbuang dalam limbah panas gas buang mesin penggerak melalui sistem pemulihan limbah panas (*waste heat recovery system*). Bagian ini memberikan ulasan tentang *waste heat recovery system* di kapal, teknologi yang

dikembangkan dan aplikasi untuk layanan dasar dan juga pembangkit tenaga di kapal. Pemahaman sistem yang komprehensif memungkinkan identifikasi karakteristik, kelebihan dan kekurangan berbagai teknologi dan konfigurasi *waste heat recovery* yang ada untuk pengembangan lebih lanjut. Lebih jauh, uraian yang dipaparkan dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan bagi desainer, manajer dan owner terkait desain dan perencanaan serta aplikasi sistem yang optimal, hemat energi, biaya dan ramah lingkungan sesuai karakteristik dan kebutuhan operasional kapal.

Kata kunci: WHRS, efisiensi energi, *green shipping*, gas buang, *retrofit*

Pendahuluan

Volume perdagangan global yang terus meningkat menyebabkan pertumbuhan yang signifikan terhadap permintaan energi untuk transportasi barang. Dalam hal ini, armada laut merupakan pengangkut kargo yang paling banyak digunakan di mana mesin diesel adalah pilihan paling optimal untuk menggerakkan kapal karena berbagai alasan. Kurangnya sistem penggerak alternatif dengan tingkat energi, biaya dan efisiensi bahan bakar yang sama membuat supremasi mesin diesel diperkirakan tidak akan tergantikan dalam 100 tahun ke depan (A. T. Hoang, 2018b). Terlepas dari kontribusinya, transportasi laut telah terbukti meningkatkan masalah pemanasan global. Pada tahun 2007, tercatat kapal-kapal yang melakukan perdagangan internasional menyumbang sekitar 2,7% emisi CO₂. Pada tren saat ini, jumlahnya bisa dua atau tiga kali lebih tinggi dari level saat ini pada tahun 2050 (Crane *et al.*, 2001). Faktanya, pada tahun berikutnya Organisasi Maritim Internasional (IMO) memperkirakan total 1,120 juta ton CO₂ per tahun yang dihasilkan oleh armada dunia, menyiratkan 4,5% dari total emisi planet (T. A. Hoang & Van Le, 2017; A. T. Hoang,

2018a). Tak dapat dihindarkan lagi, kebutuhan terhadap efisiensi bahan bakar sangat dibutuhkan di lapangan (Jadhaio & Thombare, 2013; A. Hoang *et al.*, 2018).

Di antara solusi yang berguna untuk mengurangi emisi polutan dari mesin diesel adalah penggunaan biofuel atau energi terbarukan atau teknologi injeksi canggih (Bui, Nguyen, *et al.*, 2021). Namun, bahkan mesin diesel modern dengan efisiensi tinggi hanya sekitar 25-50% efisien dalam menggunakan energi panas pembakaran dari bahan bakar, sedangkan sisa 50-85% dari nilai kalor dibuang ke lingkungan sebagai limbah panas dengan sekitar 25-30% kehilangan energi berupa gas buang (Hou & Gao, 2012; Aboelwafa *et al.*, 2018; A. T. Hoang & Le, 2019b). Tidak hanya menjadi pemborosan energi, gas buang tersebut sangat berbahaya karena kandungan berbagai kontaminan. Menanggapi masalah tersebut, perkembangan terkini dalam industri mesin pembakaran dalam telah diarahkan untuk secara efisien memulihkan energi panas buangan melalui sistem pemulihan limbah panas (*waste heat recovery system*; WHRS). Sistem ini memanfaatkan sisa panas buangan untuk mengubah energi tersebut menjadi energi mekanik/listrik yang dapat digunakan kembali untuk kebutuhan penggerak dan penunjang tanpa tambahan biaya bahan bakar dan bebas emisi CO₂ (Singh & Pedersen, 2016). Dalam jangka panjang, WHRS diproyeksikan untuk meningkatkan efisiensi sistem penggerak secara keseluruhan dan penghematan energi, mengurangi pencemaran lingkungan sehingga dampak pemanasan global dan yang paling penting sebagai sumber penghematan biaya (Dong & Nguyen, 2019).

WHRS di Kapal

Limbah panas adalah bagian dari panas yang dihasilkan dari proses penyalaan bahan bakar yang dibuang ke lingkungan tanpa dimanfaatkan lebih lanjut (Harrington, 1992). Secara sederhana,

limbah tersebut merupakan energi dari pembakaran bahan bakar yang dilepaskan ke lingkungan melalui berbagai proses misal perpindahan panas yang terjadi selama operasi (A. T. Hoang & Le, 2019a). Di kapal, energi panas yang dihasilkan melalui pembakaran bahan bakar hanya sebagian digunakan untuk keperluan propulsi (Senary *et al.*, 2016) dan menyisakan sejumlah besar energi panas yang tidak terpakai (Cao, 2019) yang dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan pemanasan, pengeringan, menghasilkan listrik (Sundarraaj *et al.*, 2016; Saloux *et al.*, 2018) atau keperluan lain yang dapat mendukung operasi kapal.

Sumber dan aplikasi WHRS

Sebagian besar energi panas yang masuk ke mesin terbuang sebagai panas sensibel dan panas laten dalam gas buang dan sebagian kecil hilang melalui pendinginan *jacket water*, minyak pelumas (*lube oil*) dan udara masuk. Limbah panas dari mesin diesel yang dianggap berpotensi untuk pemulihan (*waste heat recovery*; WHR) adalah pembuangan (*exhaust*) mesin, *charge-air cooler* dan *jacket coolant* (Harrington, 1992). Di antara ketiganya, gas buang menjadi sumber utama limbah panas yang menyumbang sekitar setengah dari total limbah panas sistem yang mencakup sekitar 25% dari total energi bahan bakar yang disuplai ke dalam sistem (MAN Diesel & Turbo, 2014).

Berbeda dari mesin diesel empat langkah kecepatan tinggi (*four-stroke high speed diesel engines*) yang memiliki suhu gas buang beban penuh sekitar 1000 F, gas buang mesin diesel dua langkah kecepatan rendah (*two-long-stroke low speed diesel engines*) bersuhu hanya sekitar 500 F dengan bagian masukan energi panas menghilang ke limbah panas dalam jumlah yang diperkirakan dalam Tabel 1. Pada mesin yang lebih efisien, jumlah dan ketersediaan limbah panas cenderung semakin berkurang (Harrington, 1992), seperti suhu gas buang

setelah turbocharger yang mana hanya cukup untuk menghasilkan uap yang diperlukan untuk keperluan pemanasan kapal melalui boiler berbahan bakar gas buang standar dengan desain tabung asap (*smoke tube*) (MAN Diesel & Turbo, 2014).

Tabel 1. Fraksi masukan panas ke aliran limbah panas mesin diesel

	Kecepatan tinggi	Kecepatan rendah
ke <i>exhaust</i>	0.35	0.25
ke <i>jacket water</i>	0.15	0.07
ke <i>lube oil</i>	0.05	0.03
ke <i>aftercooler</i>	0.05	0.13

(Harrington, 1992)

Jumlah dan sumber limbah panas yang berbeda memungkinkan klasifikasi jenis dan alternatif pemanfaatannya menjadi tiga kelas utama yaitu rendah, sedang dan tinggi, tergantung pada suhu panas yang disuplai. Pemanfaatan di kapal dari ketiga jenis limbah panas tersebut umumnya digunakan sebagai penunjang sistem kapal dan berbagai layanan dasar lainnya. Teknik yang berbeda dari WHRS harus dipilih sesuai dengan karakteristik panas yang dihasilkan untuk kebutuhan harian di atas kapal (Harrington, 1992; Baldi & Gabrielli, 2015; Senary *et al.*, 2016).

Dalam hal pemanfaatan limbah panas, panas yang memiliki ketersediaan terbesar yaitu dari gas buang mesin penggerak utama dianggap sebagai pemanfaatan yang paling standar dan mudah disesuaikan penggunaannya. Sementara itu, penggunaan semua limbah panas yang ada dari gas buang, pendinginan udara pengisian, pendinginan air jaket, dan pendinginan minyak pelumas memungkinkan pemulihan energi panas dalam jumlah tertinggi. Meskipun pemanfaatan limbah panas di kapal dianggap lebih mudah karena mesin penggerak kapal umumnya berjalan pada kecepatan konstan untuk waktu yang lama selama periode berlayar sehingga laju aliran limbah panas yang dihasilkan cenderung lebih stabil, evaluasi yang

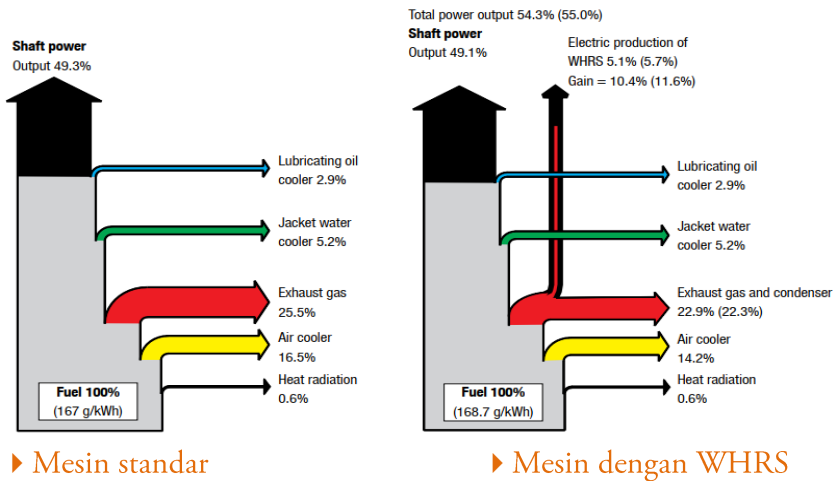
menyeluruh tetap harus dilakukan untuk memastikan jumlah panas yang tersedia dan kelangsungan WHRS.

Keuntungan WHRS

WHRs merupakan salah satu metode penghematan energi terbaik untuk mengupayakan penggunaan bahan bakar yang lebih efisien untuk perbaikan ekonomis dan lingkungan (Senary *et al.*, 2016). Secara umum, WHR di kapal mempunyai beberapa keuntungan sebagai berikut.

- Sebagai solusi ramah lingkungan untuk mengurangi konsumsi bahan bakar di kapal,
- Untuk mendapatkan kembali energi yang terbuang tanpa mempengaruhi aliran udara dalam mesin sehingga beban termal tetap konstan dan tidak ada perubahan dari segi keandalan mesin,
- Berkontribusi secara signifikan dalam penghematan biaya bahan bakar dan penurunan emisi CO₂, NO_x dan Sox gas buang secara keseluruhan, dan
- Sebagai upaya industri maritim dalam membantu memenuhi regulasi yang ditetapkan oleh IMO khususnya Tier III.

Secara teknis, manfaat WHRS telah dibuktikan oleh MAN Diesel & Turbo (2014) melalui evaluasi pemasangan instalasi pada mesin standar dua langkah 12S90ME-C9.2 seperti ditunjukkan dalam Gambar 1. Dapat dilihat bahwa pemanfaatan gas buang untuk pembangkit tenaga berhasil meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan meskipun terdapat sedikit penurunan efisiensi mesin utama jika dibandingkan dengan versi standar.

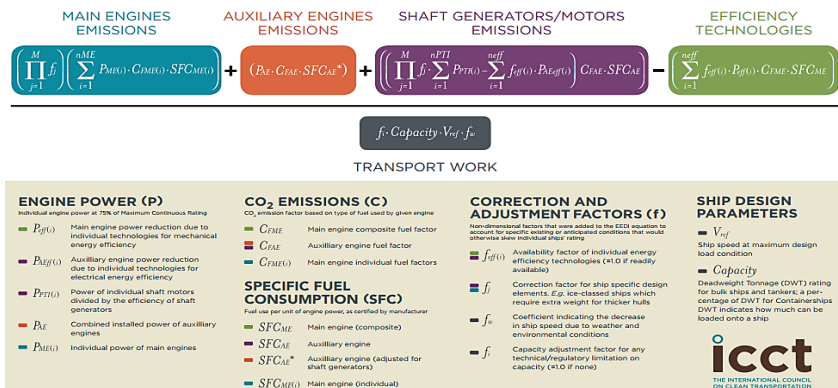


► Mesin standar

► Mesin dengan WHRS

Gambar 1. Diagram panas mesin 12S90ME-C9.2 dengan dan tanpa WHRS (MAN Diesel & Turbo, 2014)

Berdasarkan hasil analisa tersebut, pemasangan WHRS juga memungkinkan evaluasi efisiensi energi di kapal secara keseluruhan dengan menggunakan Indeks Desain Efisiensi Energi IMO (*Energy Efficiency Design Index, EEDI*). Rumusan EEDI seperti dijabarkan dalam Gambar 2 merupakan estimasi emisi CO₂ kapal per ton-mil kargo yang dimuat relatif terhadap rata-rata referensi pada kapal serupa. Dengan pemasangan WHRS, EEDI dapat diturunkan dengan mengurangi kadar emisi CO₂ sistem penggerak utama dan sistem terkait yang ada di kapal.



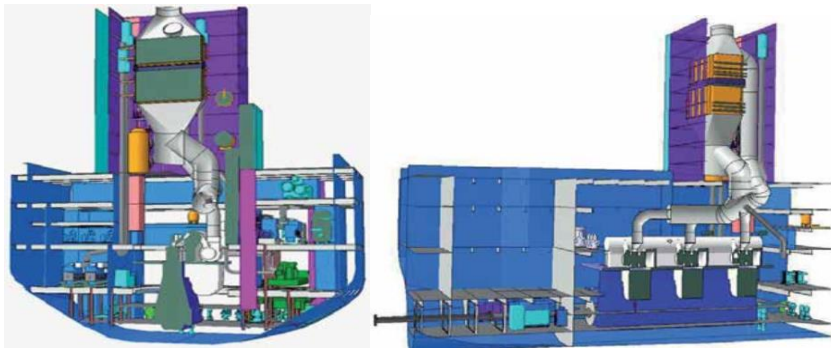
Gambar 2. Anatomi rumus EEDI kapal (ICCT, 2011)

Batasan desain dan perencanaan WHRS

Jumlah dan suhu limbah panas di kapal sangat bervariasi, tergantung pada keluaran mesin dan sistem terkait. Sebaliknya, kebutuhan panas untuk WHRS juga berbeda-beda, tergantung pada tujuan pemanfaatan dan sistem/teknologi yang digunakan. Pada umumnya, limbah panas dari gas buang mencukupi untuk semua atau sebagian besar layanan dasar kapal pada berbagai operasi. Jika WHR hanya mencukupi untuk memenuhi sebagian kebutuhan panas yang diperlukan layanan kapal atau ketersediaannya terganggu pada kondisi tertentu, maka penggunaan boiler berbahan bakar minyak untuk mencukupkan pasokan uap harus dipertimbangkan. Suhu dan tekanan uap yang dihasilkan terutama untuk pemanasan bahan bakar juga harus diperhatikan termasuk suhu keluaran boiler dengan dan tanpa pemasangan economizer (Harrington, 1992).

206

Solusi WHRS dalam berbagai konfigurasi tersedia untuk kapal dengan profil operasi yang berbeda. Dalam perancangan WHRS pembangkit tenaga di kapal, konfigurasi sistem yang tepat harus dipilih dengan memperhatikan aspek teknis dan operasional kapal. Beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan antara lain tenaga mesin, keperluan daya listrik, rasio beban mesin, ruang yang tersedia di ruang mesin, persyaratan emisi dan waktu pengembalian yang dapat diterima untuk solusi WHRS yang dipilih (MAN Diesel & Turbo, 2014). Untuk instalasi bangunan baru, ukuran sistem serta kerumitan perpipaan dan pemasangan kabel harus dipertimbangkan terutama oleh galangan kapal. Gambar 3 mengilustrasikan instalasi WHRS dalam kamar mesin kapal container.



► Penampang melintang

► Pandangan samping

Gambar 3. Susunan kamar mesin dan *engine casing* kapal kontainer dengan WHRS (MAN Diesel & Turbo, 2014)

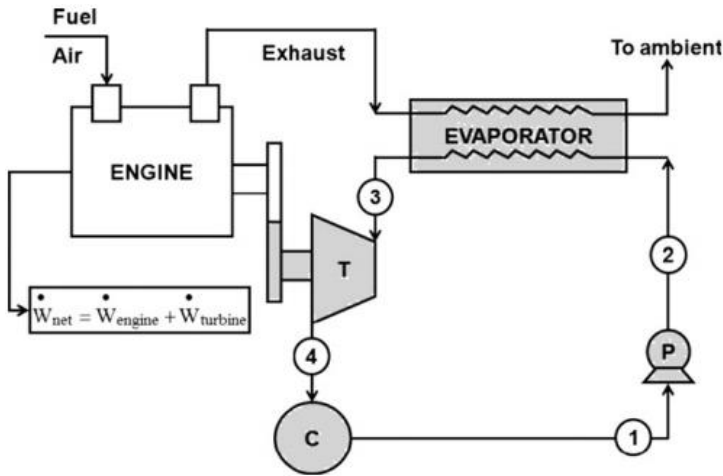
Seperti halnya sistem uap untuk layanan kapal, WHRS untuk pembangkit tenaga biasanya mampu mencukupi seluruh kebutuhan listrik kapal sehingga dapat dijalankan sebagai sistem mandiri. Meskipun demikian, WHRS pembangkit tenaga dapat digabungkan secara parallel dengan generator poros, motor poros atau genset. Sistem gabungan demikian memerlukan sistem manajemen daya (*power management system*; PMS) canggih yang mampu mengatur dan mengelola daya listrik dalam sistem dan terintegrasi dengan sistem kontrol mesin utama (MAN Diesel & Turbo, 2014).

Teknologi WHRS

Siklus Rankine

Siklus Rankine (*Rankine cycle*; RC) adalah siklus dasar termodinamika yang mengubah panas/kalor menjadi kerja. Dalam sistem RC, fluida kerja biasanya bersirkulasi dalam siklus tertutup melalui empat komponen utama yaitu turbin uap, kondensor, pompa sirkulasi dan evaporator seperti ditunjukkan dalam Gambar 4. Fluida kerja dari outlet kondensor dipompa ke evaporator (1-2). Panas dari limbah gas buang digunakan untuk memanaskan uap untuk generator turbo dimana energi ditransfer dari boiler ke turbin melalui uap bertekanan tinggi (3). Selanjutnya, tenaga yang

dihasilkan turbin uap disalurkan ke generator listrik atau kegunaan lainnya dan siklus diakhiri dengan uap dari outlet turbin dikondensasikan kembali menjadi cairan di kondensator (4).



Gambar 4. Konfigurasi dasar WHRS dengan RC (Shu *et al.*, 2013).

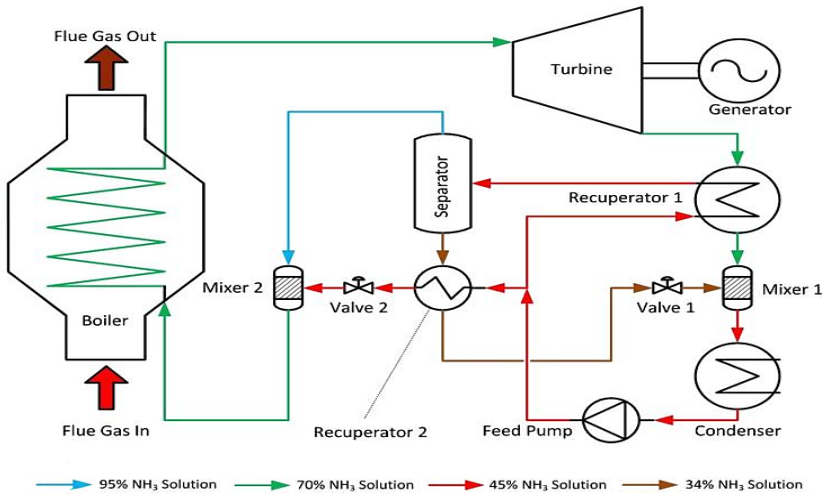
Penelitian terkini terkait WHRS RC berfokus pada upaya untuk mendapatkan konfigurasi dan fluida kerja yang tepat untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan limbah panas. Hasil simulasi dari T. Wang *et al.* (2011) and dan BMW Group (2009) menunjukkan bahwa air bekerja lebih baik untuk konfigurasi WHRS dengan sumber panas gas buang saja. Jika sumber panas suhu rendah digunakan sebagai tambahan, fluida kerja berbasis alkohol seperti etanol dinilai lebih menjanjikan. Oleh karena itu, analisis parametrik efisiensi sistem perlu dilakukan sebelum memilih konfigurasi dan fluida kerja yang akan digunakan berdasarkan sumber panas yang akan dimanfaatkan untuk mencapai efisiensi termal yang tinggi serta pemanfaatan sumber panas secara optimal (Shu *et al.*, 2013). Ke depan, penggunaan air sebagai fluida kerja utama sistem RC di kapal berpotensi untuk tergantikan karena sumber pemulihan energi dari limbah panas tidak terbatas pada gas buang saja.

Siklus Kalina

Siklus Kalina (*Kalina cycle*; KC) merupakan siklus energi termodinamika modifikasi dari RC yang bekerja lebih baik untuk beberapa aplikasi. KC menggunakan campuran amonia dan air sebagai cairan untuk beroperasi dalam kombinasi variabel dengan berbagai suhu didih dan kondensasi antara gelembung dan titik embun. Penggunaan yang paling menjanjikan dan peningkatan efisiensi yang signifikan dari sistem ini dilakukan pada sumber panas pada suhu rendah sehingga tepat untuk aplikasi pemulihan limbah panas (A. T. Hoang, 2018b). Untuk aplikasi di kapal pada rentang temperatur gas buang mesin diesel sebesar 200-400°C, WHRS dengan KC 20% hingga 40% lebih efisien dibandingkan RC. Siklus pemisahan KC dengan pemanasan ulang meningkatkan efisiensi sebesar 2% dibandingkan dengan siklus yang sama tanpa pemanasan ulang (Jouhara et al., 2018).

Keuntungan lain dari sistem KC adalah dapat beroperasi di bawah suhu beku dibandingkan dengan RC saat menggunakan air. Kombinasi air dan amonia mampu mengurangi suhu beku sehingga suhu kondensasi dapat dikurangi untuk mengakomodasi rute transportasi di wilayah Arktik. KC dapat menggunakan turbin uap aksial tradisional karena berat molekulnya kira-kira sama dengan 17 untuk amonia dan 18 untuk air. Dibandingkan dengan RC, sistem KC lebih kecil sehingga sesuai untuk aplikasi di kapal dengan ruang terbatas. Disamping itu, sistem KC lebih murah berkat turbin tekanan balik daripada kondensasi vakum sehingga mengurangi densitas cairan di outlet turbin. Dalam hal teknologi material, KC tidak memiliki persyaratan khusus dimana baja karbon sangat dapat diterima untuk aplikasi suhu rendah seperti WHR (Ogriseck, 2009). Gambar 5 menunjukkan konfigurasi dasar WHRS sistem KC dengan kolektor, separator, mixer dan katup kontrol aliran sebagai tambahan komponen standar sistem RC. Selama perebusan/

kondensasi, suhu variabel menghasilkan kecocokan termal yang lebih baik dengan sumber panas dan pendingin yang tepat selama perubahan fase. Hal ini berkontribusi untuk meningkatkan efisiensi termodinamika boiler dan menurunkan suhu minimum di kondensor. Dengan memvariasikan volume amonia, gelembung dan titik embun cairan juga dapat diubah agar sesuai dengan sumber dan suhu wastafel di boiler dan kondensor masing-masing (Y. Wang *et al.*, 2017).



Gambar 5. Konfigurasi dasar WHRS dengan sistem KC (Y. Wang *et al.*, 2017)

Untuk keamanan, penggunaan amonia dinilai aman dan tidak berbahaya baik secara ekologi maupun operasional. Karakteristik bau yang menyengat dapat dimanfaatkan untuk memicu alarm otomatis jika terdapat kebocoran dalam sistem. Penggunaan secara luas dalam industri membuktikan bahwa campuran air-amonia ramah lingkungan dan aman untuk aplikasi teknik (Pham *et al.*, 2020). Disamping itu juga, beberapa baja tahan karat juga tidak menimbulkan korosi dalam campuran air amonia. Dengan keunggulan luar biasa ini dan perkembangan teknologi terkini, adopsi siklus KC yang aman untuk WHRS kapal sangat menjanjikan dimana

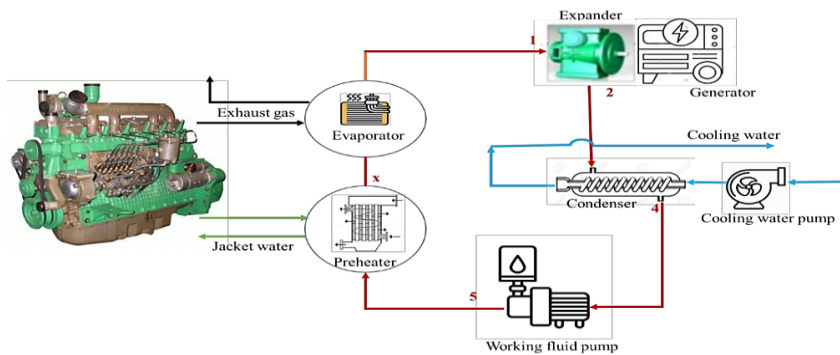
sistem ini sangat sesuai untuk aplikasi sumber limbah panas bersuhu rendah dengan efisiensi siklus yang lebih tinggi daripada RC dan siklus modifikasi lainnya yaitu Rankine Organik. Penerapan siklus KC merupakan solusi efektif untuk menghemat bahan bakar dan pada saat yang sama mengurangi emisi gas buang dengan lebih baik (Bui, Nguyen, *et al.*, 2021).

Siklus Rankine Organik

Siklus Rankine Organik (*Organic Rankine cycle*; ORC) merupakan modifikasi RC yang memanfaatkan sumber panas bersuhu sedang dengan menggunakan fluida kerja organik. Pada kisaran suhu rendah dan menengah, WHR tidak disarankan menggunakan cairan basah karena potensi terjadinya kondensasi dari kurangnya panas yang bisa memicu erosi bilah turbin (Turkan *et al.*, 2020). Alternatif aplikasi dapat berupa formulasi basah, isotropik dan cairan kering dimana fluida kerja yang optimal disesuaikan dengan sumber panas yang tersedia. Cairan isentropik (Hung *et al.*, 1997) atau campuran biner zeotropic (A. T. Hoang, 2019) juga dapat digunakan karena kombinasi termal dengan sumber panas dan performa sistem yang lebih baik untuk memulihkan limbah panas kategori ini.

Sistem ORC dapat diatur dalam berbagai konfigurasi untuk mencapai efisiensi optimal dan mengurangi kehilangan panas dari sumber yang dimanfaatkan (A. T. Hoang, 2018b; A. T. Hoang *et al.*, 2021). Efisiensi sistem terbaik dan keluaran daya tertinggi bisa dicapai dengan menggunakan fluida organik yang sesuai sebagai pengganti air/uap pada sistem RC dasar. Fluida organik yang digunakan dapat berupa gas hidorkarbon seperti n-pentana, toluene atau refrigeran seperti hidrokloro-fluorokarbon (HCFC) (Shu *et al.*, 2013; Hu *et al.*, 2020; Tontu *et al.*, 2020). Panas sedang mampu menguapkan fluida organik karena penguapan panas spesifiknya jauh lebih rendah daripada air. Secara umum, teknologi WHRS ORC saat ini mencapai efisiensi 8-12% untuk pemanfaatan limbah

panas bersuhu 95-260 °C (Ravi & Pachamuthu, 2020) dan bervariasi berdasarkan panas yang dimanfaatkan, fluida kerja dan konfigurasi sistem yang diaplikasikan (Bui, Nguyen, *et al.*, 2021). Bombarda *et al.* (2010) menyimpulkan bahwa adopsi siklus ORC lebih unggul daripada Kalina karena skema pembangkitnya yang lebih sederhana, penukar panas permukaan yang lebih kecil dan tekanan yang lebih rendah untuk mendapatkan daya listrik yang sama. Gambar 6 menunjukkan konfigurasi sistem WHRS ORC.



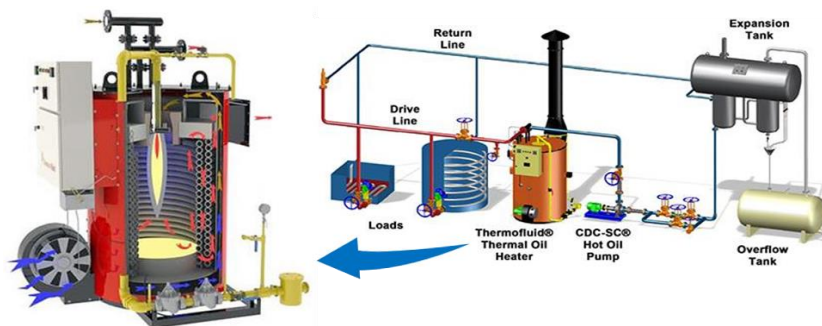
Gambar 6. ORC WHRS configuration (Bui, Le, *et al.*, 2021)

Sistem minyak termal

Minyak termal atau cairan perpindahan panas banyak digunakan untuk membawa energi panas dalam berbagai proses suhu tinggi seperti pemanasan, pengerjaan logam dan aplikasi pendinginan mesin. Dalam aplikasi tersebut, dimana suhu operasi cairan curah yang optimal antara 150°C dan 400°C, sistem minyak termal (*thermal oil system*) lebih aman dan lebih efisien digunakan daripada metode pemanasan uap, api langsung atau listrik. Dalam praktiknya, sistem ini juga lebih sederhana, lebih mudah dirancang dan lebih aman daripada sistem uap, asalkan aplikasi, perawatan dan cairan yang tepat sesuai dengan penggunaan (Michalski & Zeńczak, 2010; A. T. Hoang *et al.*, 2019).

Minyak termal dapat dikategorikan menjadi tiga kelompok utama yaitu sintesis, minyak panas dan kategori lain di luar keduanya

termasuk silikon. Minyak termal yang ada saat ini jauh lebih stabil dalam hal panas, tidak beracun dan dapat menghasilkan suhu yang lebih tinggi pada tekanan atmosfer daripada awal teknologinya diperkenalkan. Dalam perkembangannya, minyak termal banyak digunakan sebagai media dalam teknologi perpindahan panas karena kemampuannya untuk digunakan pada sistem non-tekanan (Elg *et al.*, 2016). Sebagai perbandingan, sistem bertekanan seperti sistem uap tunduk pada persyaratan undang-undang dan peraturan karena risiko yang melekat dari tekanan dan peningkatan biaya pemasangan dan persyaratan untuk pengujian asuransi berkala. Gambar 7 menunjukkan pemanas minyak termal dan konfigurasi tipikal sistem minyak termal untuk pemanasan kargo pada kapal tanker.



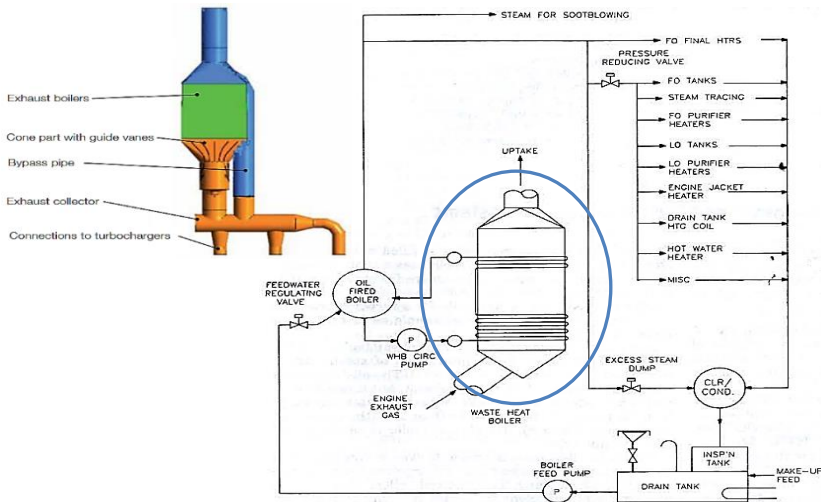
Gambar 7. Konfigurasi tipikal sistem minyak termal untuk pemanasan kargo kapal tanker (Bui, Nguyen, *et al.*, 2021)

Analisis sistem minyak termal dalam studi menunjukkan bahwa sistem ini bisa menjadi alternatif yang baik untuk sistem uap yang biasa digunakan di sebagian besar kapal. Sistem pemanas ini sesuai digunakan untuk kapal dengan ruang yang relatif sempit tetapi memerlukan proses pemanasan yang relatif tinggi karena sistem ini sangat solid. Namun demikian, penyesuaian sistem perpipaan untuk menangani kenaikan temperatur perlu dilakukan untuk menghindari kejutan panas (*shock*) yang dapat merusak instalasi perpipaan seperti terputusnya baut dan kerusakan pengelasan. Dengan batasan

ini, dibutuhkan waktu yang lama untuk mencapai suhu optimum 300°C (Gu *et al.*, 2004).

Whrs untuk Layanan Kapal

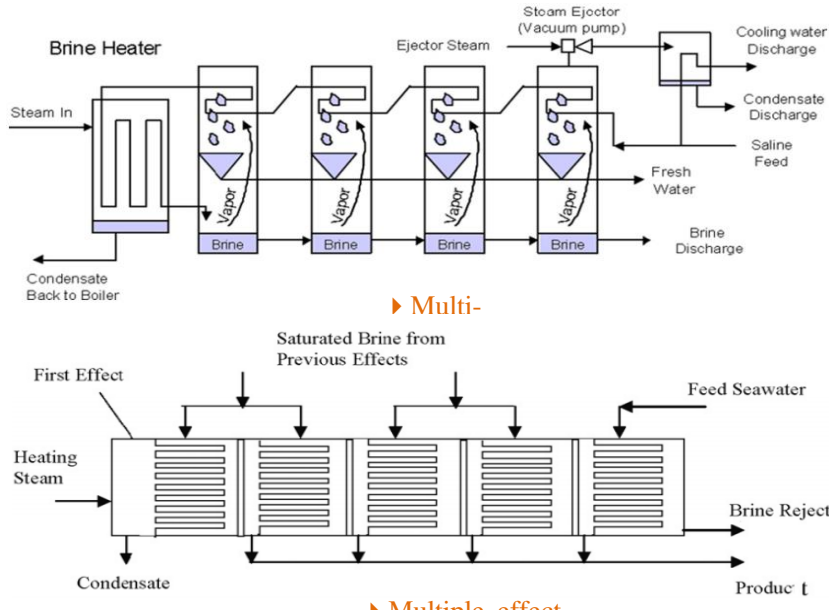
Pemanfaatan limbah panas untuk layanan dasar di kapal umumnya menggunakan sistem uap yang dapat diproduksi dari penukar panas (*waste heat boiler*) yang dipasang di saluran gas buang dengan sistem sederhana seperti ditunjukkan dalam Gambar 8.



Gambar 8. Sistem uap WHR sederhana dan sistem gas buang dengan boiler WHRS (Harrington, 1992; MAN Diesel & Turbo, 2014)

Uap panas dari gas buang bersuhu tinggi ini dipakai untuk pemanasan bahan bakar dan minyak pelumas serta layanan perhotelan/akomodasi. Uap berlebih dari WHR ini juga dapat digunakan untuk pemanasan kargo atau kebutuhan layanan kargo lainnya misal untuk pembersihan tangki pada kapal tanker. Panas yang diperoleh dari *main engine charge air cooler* seringkali dimanfaatkan untuk pemanasan awal *feedwater* boiler gas buang, pemanasan tangki bahan bakar, pemanas *lube oil purifier*, sistem pendingin absorpsi, pemanasan akomodasi atau untuk memproduksi air panas. Panas yang diperoleh dari *jacket water* mesin seringkali

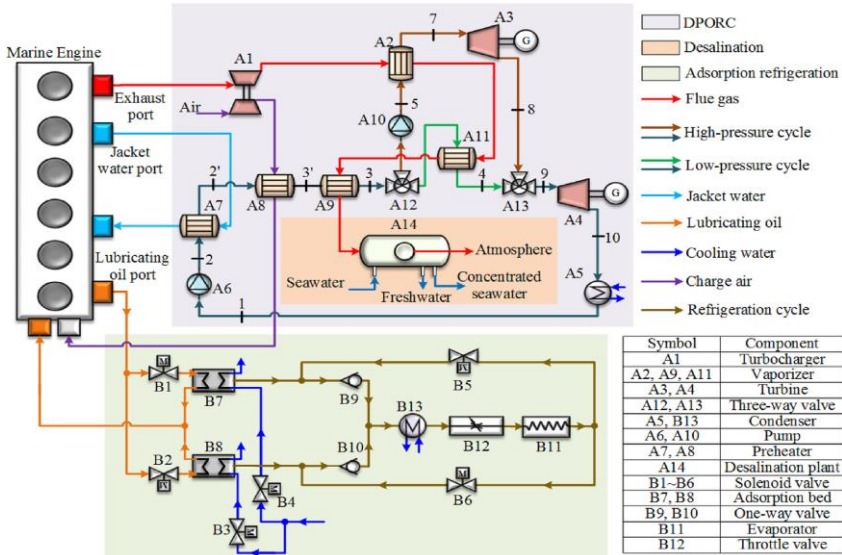
digunakan dalam proses produksi air tawar (Harrington, 1992). Gambar 9 menunjukkan desalinasi sistem distilasi termal dengan penyalan multi-tahap (*multi-stage flash; MSF*) dan distilasi efek ganda (*multiple effect distillation; MED*) yang dapat diterapkan dalam WHRS kapal.



Gambar 9. Sistem distilasi termal MSF (EVANS & Miller, 2002) dan MED (Shu *et al.*, 2013) untuk desalinasi dengan WHRS di kapal

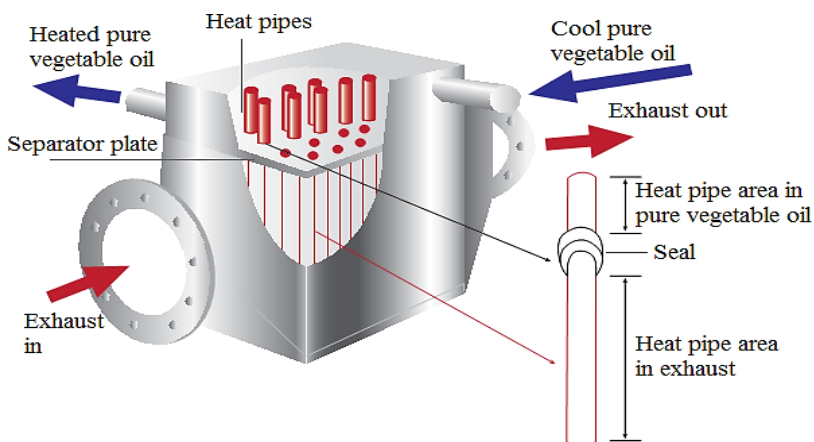
Untuk pemanfaatan terintegrasi dari beberapa sumber panas, WHR sistem pemakaian bertingkat (*cascade utilisation system*) seperti ditunjukkan dalam Gambar 10 dapat diaplikasikan. Sistem ini terdiri dari ORC tekanan ganda (*dual pressure Organic Rankine cycle; DPORC*), unit desalinasi dan pendingin adsorpsi regeneratif. Panas dari gas buang digunakan oleh sistem DPORC dan unit desalinasi secara berurutan sedangkan panas dari loop *charge air* dan *jacket water* digunakan untuk memanaskan fluida kerja sistem DPORC. Selanjutnya, panas dari loop minyak pelumas digunakan untuk memanaskan *bed* adsorpsi yang mendesorpsi refrigeran ke dalam siklus refrigerasi untuk memperoleh energi dingin. Investasi perala-

tan yang cukup signifikan karena kompleksitas sistem ini dapat dikompensasikan dengan aliran massa panas yang tinggi dari berbagai sumber yang dipulihkan.



Gambar 10. WHRS bertingkat untuk mesin diesel besar (Ouyang *et al.*, 2020)

Selain melalui sistem uap, panas gas buang juga dapat dimanfaatkan secara langsung dengan sistem pipa panas (*heat pipe*) seperti ditunjukkan dalam Gambar 11. Zat kerja cair berupa air, merkuri atau logam alkali (tergantung pada suhu keluaran sistem yang diperlukan) dapat digunakan sebagai pengisi ruang vakum pipa yang dari tabung logam yang disegel di kedua ujungnya (A. T. Hoang *et al.*, 2020). Sistem ini mudah diimplementasikan sebagai penukar panas dan sangat fleksibel dengan adanya kontrol termal yang efektif.



Gambar 11. Sistem pemanasan biofuel dengan panas gas buang (Dong & Nguyen, 2019)

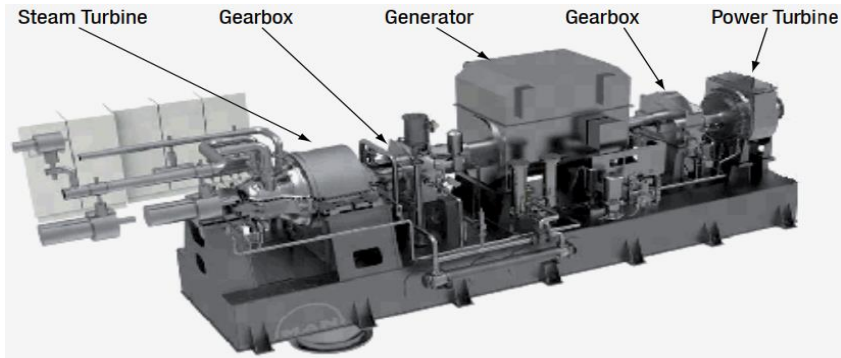
WHRS untuk Pembangkit Tenaga

Pemanfaatan kembali limbah panas kapal untuk pembangkit tenaga (*power generation*) dapat menekan biaya pemasangan dan biaya operasional kapal secara signifikan. Terlebih, adanya WHRS pembangkit tenaga yang dapat menghindarkan sama sekali pemasangan atau menekan keperluan kapasitas mesin bantu kapal (*auxiliary engine*) akan mengurangi emisi CO₂ kapal dan meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan berdasarkan formulasi EEDI IMO. Dengan mempertimbangkan keuntungan tersebut, WHRS pembangkit tenaga tetap disarankan meskipun hanya bisa memenuhi sebagian kebutuhan listrik kapal. Suplai tambahan dapat diperoleh dari boiler berbahan bakar minyak jika masih bisa diupayakan secara ekonomis (Harrington, 1992).

Komponen utama WHRS

Pada umumnya, WHRS dijalankan secara paralel dengan generator poros dan generator tambahan sebagai pembangkit tenaga untuk memenuhi kebutuhan daya listrik kapal yang tinggi (Benvenuto *et al.*, 2014). Komponen utama sistem seperti

ditunjukkan dalam Gambar 12 terdiri dari turbin uap, gearbox, generator pemulihan panas dan turbin daya.



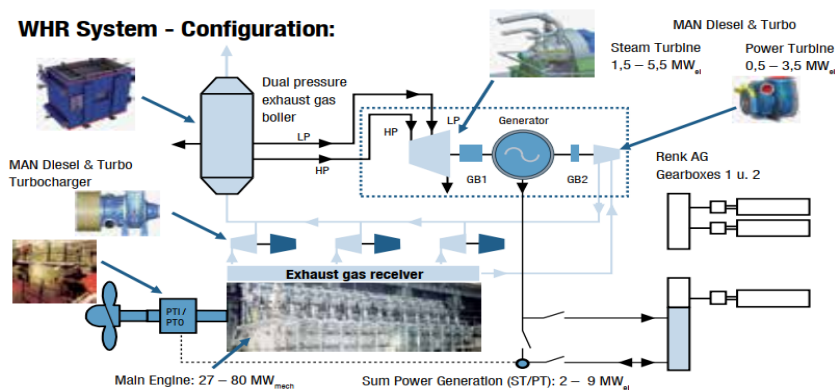
Gambar 12. Komponen utama WHRS (MAN Diesel & Turbo, 2014)

Generator uap pemulihan panas (*heat recovery steam generator*; HRSG) memiliki penukar panas yang memanfaatkan gas buang mesin utama untuk menghasilkan uap yang dapat diproduksi dalam beberapa tingkat tekanan untuk menaikkan efisiensi. Standar pemakaian di kapal adalah HRSG tekanan tunggal dan ganda. Turbin uap (*steam turbine*; ST) secara tidak langsung menggunakan gas buang dari mesin utama dengan memanfaatkan uap dari HRSG untuk menggerakkan turbin dan selanjutnya menggerakkan generator listrik melalui gearbox. Turbin ini difungsikan pada beban mesin di atas 35% MCR dimana pada beban mesin lebih rendah gas buang dapat dilewatkan (*by-pass*) HRSG. Berbeda dengan turbin uap, turbin daya (*power turbine*; PT) memanfaatkan gas buang mesin secara langsung untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan listrik sehingga karakteristik putarannya lebih tinggi. PT beroperasi pada 50-100% MCR mesin dengan *by-pass* gas buang pada beban mesin kurang dari 50% MCR. Dalam sistem, generator (G) diperlukan untuk mengubah daya putar turbin menjadi daya listrik dimana masing-masing turbin terhubung dengan gearbox yang berbeda sesuai karakteristik/kecepatan putarannya. Selain itu juga

diperlukan motor poros (*shaft motor*, SM) untuk menampung kelebihan daya listrik yang dihasilkan WHRS dan mengubahnya menjadi tenaga mekanik untuk menggerakkan propeller dengan modul *power take-in/power take-off* (PTI/PTO).

Konfigurasi WHRS

Berbagai komponen WHRS dapat disusun menjadi konfigurasi/arsitektur pembangkit tenaga yang berbeda yang nantinya dapat dipilih oleh desainer sesuai dengan profil operasi dan kebutuhan kapal. Gambar 13 menunjukkan konfigurasi dasar WHRS pembangkit tenaga MAN Diesel & Turbo dengan unit turbin uap dan turbin daya dimana tingkat pemulihan daya beberapa konfigurasi umum yang didefinisikan sebagai sistem *power turbine generator* (PTG), *steam turbine generator* (STG) dan *steam turbine-power turbine generator* (ST-PT) dirangkum dalam Tabel 2. Baik PTG maupun STG, keduanya dapat dipasang sebagai sistem mandiri ataupun parallel dengan pembangkit tenaga lainnya bergantung pada kebutuhan kapal.



Gambar 13. Konfigurasi dasar WHRS pembangkit tenaga (MAN Diesel & Turbo, 2014)

Tabel 2. Tingkat pemulihan daya berbagai konfigurasi WHRS pembangkit tenaga

Karakteristik	PTG	STG	ST-PT
Komponen	- Turbin daya - Gearbox - Generator	- Turbin uap - Gearbox - Generator (turbin uap tekanan tunggal/ganda)	- Turbin daya - Turbin uap - Gearbox - Generator (turbin uap tekanan tunggal/ganda)
Biaya pemasangan	± USD 2 mil	± USD 7 mil	± USD 10 mil
Biaya perawatan tahunan	± USD 10,000	± USD 20,000	± USD 30,000
Kisaran daya mesin	< 15,000 kW	<25,000 kW	> 25,000 kW
Tingkat pemulihan daya	3-5 %	4-8 %	8-11 %

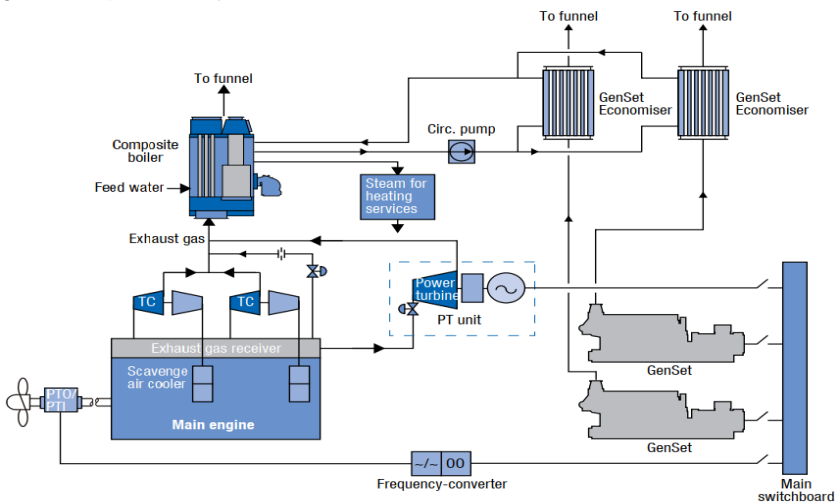
(MAN Diesel & Turbo, 2014)

Sistem PTG

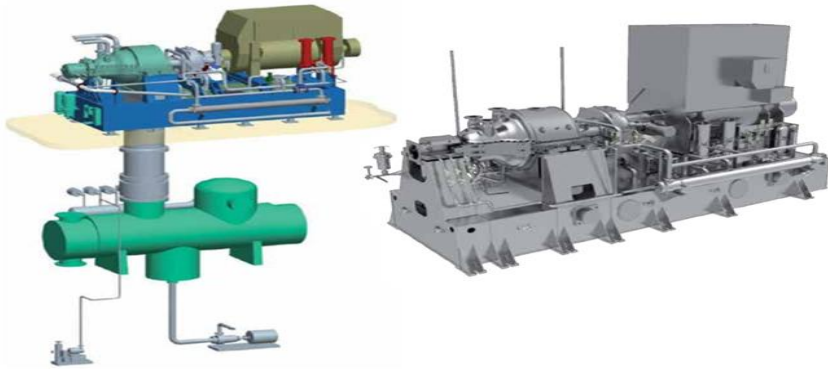
Sistem PTG merupakan konfigurasi WHRS yang paling sederhana dan murah dimana sistem hanya terdiri dari turbin daya (disebut juga sebagai turbin gas buang) yang dipasang di *by-pass* gas buang dan generator pembangkit tenaga seperti ditunjukkan dalam Gambar 14. Sebagian aliran *by-pass* gas buang lebih kurang 8-12% atau setara dengan pengurangan jumlah total gas buang sebesar 13% digunakan untuk menggerakkan turbin daya dimana jumlah ini berkaitan dengan penurunan efisiensi turbocharger. Dalam pemodelan dan simulasi, jumlah tersebut dianggap sebagai penambahan konsumsi bahan bakar (*specific fuel oil consumption*; SFOC) sebesar 1.2 % atau setara dengan 2 g/kWh. Daya yang dihasilkan oleh sistem PTG dapat mencapai 5% tergantung pada ukuran dan beban mesin utama serta kapasitas gas buang yang dipulihkan.

Sistem STG

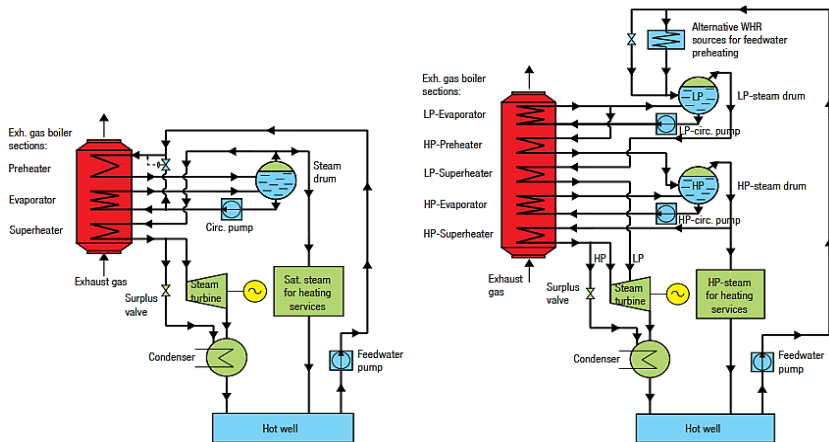
WHRS STG juga memanfaatkan *by-pass* gas buang dengan dasar peningkatan suhu sebelum masuk boiler. Sistem ini dapat diaplikasikan sebagai sistem mandiri dengan menggabungkan aliran *by-pass* gas buang dengan outlet gas buang dari turbocharger sehingga meningkatkan suhu gas buang sebelum inlet boiler. Suhu boiler yang lebih tinggi memungkinkan peningkatan produksi uap yang dapat diubah menjadi daya listrik oleh turbin uap (disebut juga sebagai *turbo generator*) dengan tingkat pemulihan yang lebih tinggi hingga 8%. Sama seperti instalasi WHRS PTG, turbin uap dan generator sistem STG juga dipasang pada *bedplate* yang sama seperti ditunjukkan dalam Gambar 15. Meskipun demikian, umumnya instalasi sistem STG lebih besar kompleks karena banyak komponen berbeda yang harus dihubungkan atau bahkan diperbesar ukurannya, bergantung pada pemilihan tekanan sistem tunggal atau ganda seperti disajikan dalam Gambar 16.



Gambar 14. Diagram proses konfigurasi WHRS PTG (MAN Diesel & Turbo, 2014)



Gambar 15. Generator turbin uap WHRS STG (MAN Diesel & Turbo, 2014)



► Tekanan tunggal

► Tekanan ganda

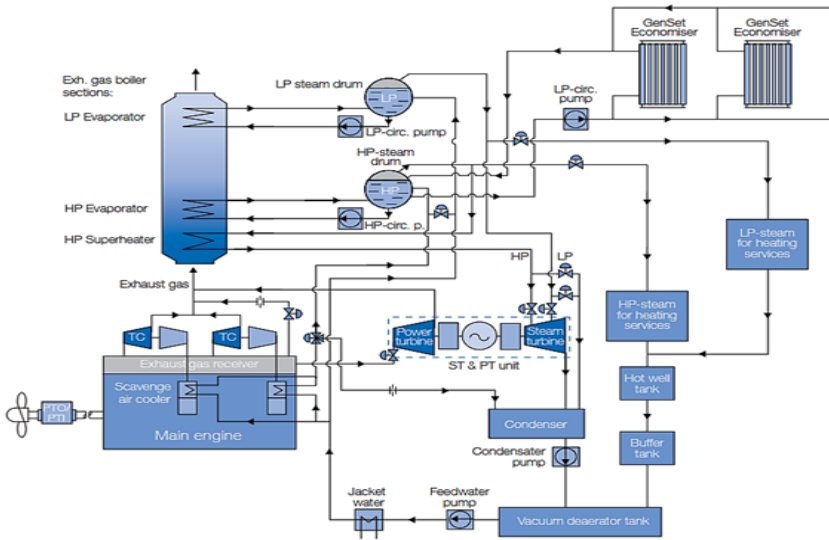
Gambar 16. Diagram proses sistem uap gas buang tekanan tunggal dan ganda (MAN Diesel & Turbo, 2014)

Seperti ditunjukkan dalam gambar, sistem uap gas buang tekanan tunggal lebih sederhana dengan hanya menggunakan panas gas buang dan ketel uap (*steam drum*) bersama untuk beberapa jenis layanan sehingga memungkinkan instalasi yang lebih *compact* dengan pengoperasian yang lebih mudah. Sebaliknya, instalasi sistem uap tekanan ganda lebih kompleks dengan beberapa sumber panas dan ketel uap yang berbeda untuk layanan tekanan rendah (*low pressure*; LP) dan tekanan tinggi (*high pressure*; HP). Meskipun

demikian, sistem uap tekanan ganda lebih sering digunakan karena efisiensi total sistem (boiler gas buang dan turbin uap) yang lebih baik.

Sistem ST-PT

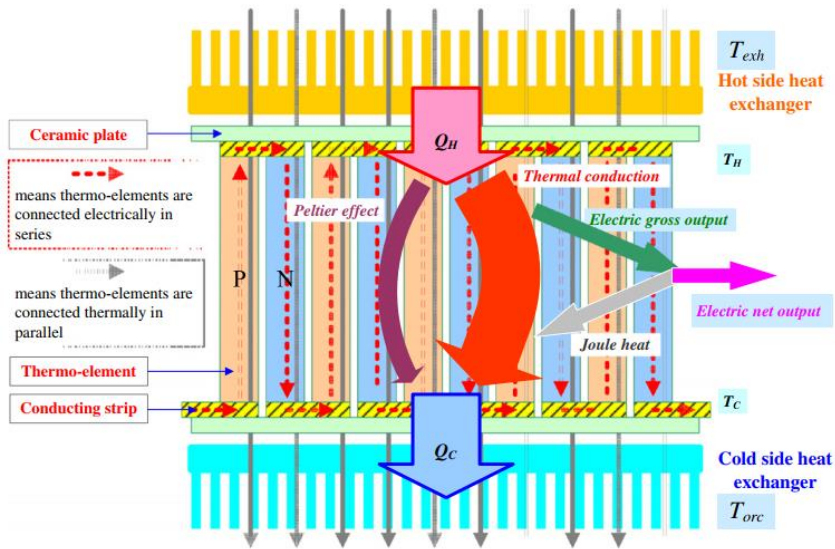
WHRS ST-PT merupakan konfigurasi gabungan yang memasang turbin daya dan turbin uap secara bersamaan seperti ditunjukkan dalam Gambar 12. Turbin uap dan turbin daya diletakkan pada satu *bedplate* yang sama dan dihubungkan ke generator listrik melalui gearbox.. Konfigurasi sistem ini memungkinkan produksi daya listrik yang tinggi dari total output kedua turbin dengan tingkat WHR sistem mencapai 11%. Nilai tersebut setara 2-3 kali lipat tingkat pemulihan sistem PTG dan STG jika dipasang secara independen dimana nilainya hanya berkisar antara 4-6%. Dengan kapasitas pemulihan daya yang besar, konfigurasi sistem ini sangat sesuai untuk kapal dengan kebutuhan daya besar seperti kapal kontainer, terutama yang berpendingin (*reefer container*) dan kapal pesiar yang membutuhkan beban lebih besar untuk layanan akomodasi/perhotelan. Daya pemulihan yang dihasilkan oleh sistem juga dipastikan dapat memenuhi seluruh kebutuhan kapal dalam hampir semua kondisi operasi sehingga mengurangi biaya operasional. Sebagai alternatif, dalam sistem dapat dipasang motor poros dan generator PTI/PTO seperti ditunjukkan Gambar 17. Pilihan ini memungkinkan penambahan daya listrik ke jaringan kapal jika diperlukan atau penguatan sistem penggerak dengan pasokan tenaga listrik ke PTI.



Gambar 17. Diagram proses konfigurasi WHRS ST-PT (MAN Diesel & Turbo, 2014)

Sistem TEG

Selain menggunakan sistem mekanik dengan turbin, WHRS pembangkit tenaga di kapal dapat berupa perangkat *solid-state* yang mengubah panas menjadi energi listrik secara langsung dengan sistem pembangkit termoelektrik (*thermoelectric generator*, TEG). Sistem TEG memanfaatkan bahan termoelektrik (TE) seperti PbTe dan CMO dimana proses perubahan energi terjadi karena munculnya tegangan listrik dalam material penghantar. Arus listrik yang muncul dipengaruhi oleh konsentrasi dan interaksi antar partikel. Gambar 18 menunjukkan diagram blok sistem TEG sederhana yang terdiri dari termokopel dengan elemen tipe-n (bahan dengan elektron berlebih) dan tipe-p (bahan dengan elektron defisit) yang dihubungkan secara seri dan termal secara paralel dimana panas dimasukkan di satu sisi dan ditolak dari sisi lain sehingga menghasilkan tegangan melintasi pasangan TE.



Gambar 18. Diagram blok WHRS TEG (Shu *et al.*, 2013)

Berbeda dengan sistem mesin panas konvensional, TEG tidak mengandung bagian yang bergerak dan sepenuhnya senyap. Memiliki efisiensi lebih rendah untuk beban besar, TEG dinilai lebih kompetitif untuk aplikasi lebih kecil/panas rendah karena lebih *compact*, sederhana dan dapat dijual untuk pasar kapal kecil seperti kapal penumpang atau untuk pembangkit gabungan listrik dan panas di rumah. Dalam kapasitas kecil, sistem dapat dengan mudah dirancang untuk beroperasi dengan Q_u sumber panas dan perbedaan suhu kecil.

Kesimpulan

Energi dalam bahan bakar kapal tidak sepenuhnya dikonversi menjadi tenaga penggerak karena ada sejumlah energi yang hilang dalam bentuk panas. Rugi panas terbesar dalam sistem penggerak kapal ada dalam gas buang yang merupakan produk akhir proses pembakaran bahan bakar. WHRS memungkinkan pemulihan energi panas dalam limbah gas buang dan sumber panas lain untuk dimanfaatkan kembali oleh kapal. Hal ini tentu saja merupakan bentuk

penghematan energi (*energy saving*) dan biaya (*cost saving*) operasional di kapal. Lebih jauh, penggunaan kembali gas buang dalam WHRS yang memungkinkan dicegahnya pelepasan emisi karbon dan polutan lain dalam gas buang ke lingkungan merupakan upaya penyelamatan lingkungan (*environmental saving*). Dengan demikian, jelas bahwa WHRS dapat memperbaiki operasional kapal dari segala aspek, teknis, ekonomis dan lingkungan. Tentunya, semakin banyak limbah panas yang dipulihkan, semakin besar peluang untuk meningkatkan kontribusi dan juga efisiensi total kapal. Berbagai teknologi dan konfigurasi WHRS yang ada memungkinkan pemilihan sistem yang terbaik sesuai dengan kondisi, kebutuhan dan profil operasi kapal sehingga dapat mengoptimalkan keuntungan pemasangan dalam berbagai aspek operasional.

References

- 226
- Aboelwafa, O., Fateen, S.-E. K., Soliman, A., & Ismail, I. M. (2018). A review on solar Rankine cycles: Working fluids, applications, and cycle modifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 868-885.
- Baldi, F., & Gabrieli, C. (2015). A feasibility analysis of waste heat recovery systems for marine applications. *Energy*, 80, 654-665. doi:10.1016/j.energy.2014.12.020
- Benvenuto, G., Campora, U., & Trucco, A. (2014). Comparison of ship plant layouts for power and propulsion systems with energy recovery. *Journal of Marine Engineering and Technology*, 13(3), 3-15. doi:10.1080/20464177.2014.11658117
- Bombarda, P., Invernizzi, C. M., & Pietra, C. (2010). Heat recovery from Diesel engines: A thermodynamic comparison between Kalina and ORC cycles. *Applied Thermal Engineering*, 30(2-3), 212-219.
- Bui, V. T., Le, T. H., Pham, V. V., & Nguyen, X. P. (2021). A study evaluating the ability to recover cooling water waste heat

- using organic Rankine cycle on marine engines. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 44(4), 19-25. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85103154561&partnerID=40&md5=cc53313dfc2f20f2b01f71ed250fc8d6>
- Bui, V. T., Nguyen, X. P., & Dong, T. M. H. (2021). A brief technical review of emerging waste heat recovery solutions for marine diesel engines. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 44(4), 9-18. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85102921078&partnerID=40&md5=259a2c3ed29950ca5bd332b0edd3ca96>
- Cao, D. T. (2019). A brief review of technology solutions on fuel injection system of diesel engine to increase the power and reduce environmental pollution. *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERC)*, 42(1), 1-9.
- Crane, D., Jackson, G., & Holloway, D. (2001). *Towards optimization of automotive waste heat recovery using thermoelectrics* (0148-7191). Retrieved from
- Dong, T. M. H., & Nguyen, X. P. (2019). Exhaust gas recovery from marine diesel engine in order to reduce the toxic emission and save energy: A mini review. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 42(5), 143-147. doi:10.26480/jmerd.05.2019.143.147
- Elg, M., Vanttola, J., Kuosa, M., Tammi, K., Salmi, W., Isomoisio, H., . . . Lahdelma, R. (2016). *Energy saving technologies and new analysis methods in cargo ship machinery design*. Paper presented at the CIMAC World Congress.
- EVANS, L., & Miller, J. E. (2002). *Sweeping gas membrane desalination using commercial hydrophobic hollow fiber membranes*. Retrieved from
- Gu, Z., Liu, H., & Li, Y. (2004). Thermal energy recovery of air conditioning system—heat recovery system calculation and phase change materials development. *Applied Thermal Engineering*, 24(17-18), 2511-2526.

- Harrington, R. L. (1992). *Marine Engineering*. Society of Naval Architects &.
- Hoang, A., Noor, M., & Pham, X. (2018). Comparative Analysis on Performance and Emission Characteristic of Diesel Engine Fueled with Heated Coconut Oil and Diesel Fuel. *International Journal of Automotive & Mechanical Engineering*, 15(1).
- Hoang, A. T. (2018a). A review on fuels used for marine diesel engines. *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERD)*, 41(4), 22-23.
- Hoang, A. T. (2018b). Waste heat recovery from diesel engines based on Organic Rankine Cycle. *Applied Energy*, 231, 138-166.
- Hoang, A. T. (2019). Experimental study on spray and emission characteristics of a diesel engine fueled with preheated bio-oils and diesel fuel. *Energy*, 171, 795-808.
- Hoang, A. T., & Le, A. T. (2019a). A core correlation of spray characteristics, deposit formation, and combustion of a high-speed diesel engine fueled with Jatropha oil and diesel fuel. *Fuel*, 244, 159-175.
- Hoang, A. T., & Le, A. T. (2019b). Trilateral correlation of spray characteristics, combustion parameters, and deposit formation in the injector hole of a diesel engine running on preheated Jatropha oil and fossil diesel fuel. *Biofuel Research Journal*, 6(1), 909.
- Hoang, A. T., Le, V. V., Pham, V. V., & Tham, B. C. (2019). An investigation of deposit formation in the injector, spray characteristics, and performance of a diesel engine fueled with preheated vegetable oil and diesel fuel. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 41(23), 2882-2894.
- Hoang, A. T., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2020). A review of the effect of biodiesel on the corrosion behavior of metals/alloys in diesel engines. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(23), 2923-2943.

- Hoang, T. A., & Van Le, V. (2017). The Performance of A Diesel Engine Fueled With Diesel Oil, Biodiesel and Preheated Coconut Oil. *International Journal of Renewable Energy Development*, 6(1).
- Hou, X.-J., & Gao, D.-L. (2012). Analysis of exhaust gas waste heat recovery and pollution processing for Z12V190 diesel engine. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(11), 1604-1611.
- Hu, X., Jiang, C., Fan, X. A., Feng, B., Liu, P., Zhang, Y., . . . Li, Y. (2020). Investigation on waste heat recovery of a nearly kilowatt class thermoelectric generation system mainly based on radiation heat transfer. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-10.
- Hung, T.-C., Shai, T., & Wang, S. K. (1997). A review of organic Rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat. *Energy*, 22(7), 661-667.
- ICCT. (2011). The Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships. *ICCT policy update number 15*.
- Jadhao, J., & Thombare, D. (2013). Review on exhaust gas heat recovery for IC engine. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2(12).
- MAN Diesel & Turbo. (2014). Waste Heat Recovery System (WHRS) for Reduction of Fuel Consumption, Emissions and EEDI.
- Michalski, R., & Zeńczak, W. (2010). The analysis of thermal-oil heating systems with exhaust gas heaters on motor ships. *Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie*, 33-40.
- Ogriseck, S. (2009). Integration of Kalina cycle in a combined heat and power plant, a case study. *Applied Thermal Engineering*, 29(14-15), 2843-2848.
- Ouyang, T., Huang, G., Su, Z., Xu, J., Zhou, F., & Chen, N. (2020). Design and optimisation of an advanced waste heat cascade utilisation system for a large marine diesel engine. *Journal of Cleaner Production*, 273. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123057

- Pham, V. V., Hoang, A. T., & Do, H. C. (2020). *Analysis and evaluation of database for the selection of propulsion systems for tankers*. Paper presented at the AIP Conference Proceedings.
- Ravi, R., & Pachamuthu, S. (2020). Experimental investigation on innovatory waste heat recovery system impacts on DIESEL engine exhaust emissions. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-24.
- Ringler, J., Seifert, M., Guyotot, V., & Hübner, W. (2009). Rankine cycle for waste heat recovery of IC engines. *SAE International Journal of Engines*, 2(1), 67-76.
- Saloux, E., Sorin, M., Nesreddine, H., & Teyssedou, A. (2018). Reconstruction procedure of the thermodynamic cycle of organic Rankine cycles (ORC) and selection of the most appropriate working fluid. *Applied Thermal Engineering*, 129, 628-635.
- Senary, K., Tawfik, A., Hegazy, E., & Ali, A. (2016). Development of a waste heat recovery system onboard LNG carrier to meet IMO regulations. *Alexandria Engineering Journal*, 55(3), 1951-1960. doi:10.1016/j.aej.2016.07.027
- Shu, G., Liang, Y., Wei, H., Tian, H., Zhao, J., & Liu, L. (2013). A review of waste heat recovery on two-stroke IC engine aboard ships. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 385-401.
- Singh, D. V., & Pedersen, E. (2016). A review of waste heat recovery technologies for maritime applications. *Energy Conversion and Management*, 111, 315-328.
- Sundarraaj, P., Roy, S. S., Taylor, R. A., & Maity, D. (2016). Performance analysis of a hybrid solar thermoelectric generator. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(20), 2977-2984.
- Tontu, M., Sahin, B., & Bilgili, M. (2020). An exergoeconomic-environmental analysis of an organic Rankine cycle system integrated with a 660 MW steam power plant in terms of waste heat power generation. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-22.

- Turkan, B., Etemoglu, A. B., & Can, M. (2020). Investigation of thermal architectures for flue-gas assisted organic rankine cycle systems: an assessment for thermodynamics and environmental performance indicators. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(4), 505-520.
- Wang, T., Zhang, Y., Peng, Z., & Shu, G. (2011). A review of researches on thermal exhaust heat recovery with Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2862-2871.
- Wang, Y., Tang, Q., Wang, M., & Feng, X. (2017). Thermodynamic performance comparison between ORC and Kalina cycles for multi-stream waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 143, 482-492.

TENTANG PENULIS

Rizky Chandra Ariesta



Email: chandraariesta97@gmail.com

Academic Assistant Departemen Teknik Perkapalan Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Lahir di Kediri pada 03 Desember 1996, menempuh pendidikan S1 dan mendapat-kan gelar sarjana pada tahun 2018 dari jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas

Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Melanjutkan studi pada Program Magister Teknik pada tahun 2019 dan diselesaikan dalam 3 semester pada tahun 2021 dengan predikat cumlaude. Tesis yang dikerjakan berjudul Identifikasi Kerusakan Material Sandwich pada Pelat Lambung Sisi menggunakan Neural Network. Saat ini, penulis melakukan beberapa kegiatan riset sesuai dengan bidang keilmuannya antara lain, ship vibration, ship dynamics, ship performance, dan eco friendly small craft, serta menghasilkan beberapa karya publikasi yang telah ditulis diantaranya adalah:

1. Identification of Damage Size Effect of Natural Frequency on Sandwich Material using Free Vibration Analysis, Nasemore, 2022

2. A numerical evaluation on nonlinear dynamic response of sandwich plates with partially rectangular skin/core debonding, Curved and Layered Structures, 2022
3. An Investigation into the Justification of the Service Speed of Ro-Ro Ferry with Block Coefficient 0.8 Based on the Resistance and Seakeeping Performance, ICSOT 2021
4. Damage evaluation of sandwich material on side plate hull using experimental modal analysis, Materials Today: Proceedings Elsevier, 2021
5. Book Chapter: Kajian Optimasi Penerapan Material Sandwich pada Konstruksi Kapal di Indonesia, Pusat Penelitian Sains dan Teknologi Kelautan-Kebumihan (STKK), DRPM-ITS, (In Press)

Dr. Betty Ariani, S.T., M.T

234

Email : betty.ariani@ft.um-surabaya.ac.id

Dosen Teknik Perkapalan- Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surabaya. Lahir di Jember pada 17 Desember 1979, menempuh pendidikan S1 dan mendapatkan gelar sarjana pada tahun 2005 dari jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan,



Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Melanjutkan studi pada Program Pascasarjana Teknologi Kelautan dan mendapatkan gelar magister teknik pada tahun 2010. Program Doktorat Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember diselesaikan dalam 7 semester pada tahun 2021 dengan predikat cumlaude. Tema disertasi adalah studi numerik dan eksperimental modifikasi geometri combustion chamber untuk mereduksi methane slip pada dual fuel engine. Kesibukannya saat ini adalah mengajar di prodi teknik perkapalan dan melakukan penelitian sesuai bidang

keahliannya terkait tema alternatif fuel for ship, green technology for green ship, emission control technology dan marine power plant. Beberapa karya publikasi yang pernah dilakukannya antara lain:

1. Numerical Investigation of the Effect of Biodiesel-Biogas Percentage on Performance Characters and Dual Fuel Engine Emissions as Green Technology on Ship, Jurnal Kapal Undip 19 (1) 2022: 14-19
2. Experimental Investigation on Natural Gas Injection to Minimize Abnormal combustion and Methane Slip in the Diesel – Natural Gas Dual Fuel Engine at low load. IREME Journal 2020
3. Effect of Natural Gas Injection Timing on Combustion Performance & Methane Slip Emission of Diesel – NG Dual Fuel Engine, an Experimental study, ICOME 2019, AIP Proceeding.
4. Investigation and Development Technology of Methane Emission Reduction on Exhaust Emitted from dual fuel Diesel Engine, MASTIC 2018. MSMI Proceeding

Dr. Dian Purnama Sari, S.T.,M.T



Email : dian010@brin.go.id

Perekayasa Ahli Madya-Pusat Riset Teknologi Hidrodinamika-Badan Riset Dan Inovasi Nasional. Sebagai Perekayasa Ahli Madya di Pusat Riset Teknologi Hidrodinamika (PRTH) yang merupakan organisasi Riset di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Rekam jejak riset dibidang hidrodinamika dilakukan sejak 1997-sekarang. Menjadi anggota organisasi internasional Institute of Marine Engineering, Science and Technology (IMarest). Beberapa publikasi terbaru (5 tahun terakhir) meliputi:

1. Dian Purnamasari, I Ketut Aria Pria Utama, Ketut Suastika. 2018. Benchmark Study of Ship Model Resistance Test. Applied

Mechanics and Materials, ISSN: 1662-7482, Vol. 874, pp 114-120, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.874.114, Trans Tech Publications, SwitzerlandOnline.

2. D. Purnamasari, I. K. A. P. Utama, and I. K. Suastika. 2020. Verification and Validation of a Resistance Model for Tanker 17.500 DWT. Journal of Marine Science and Technology, Vol. 28, No. 1, pp. 18-24. DOI:10.6119/JMST.202002_28(1).0003
3. Dian Purnamasari, I. K. A. P. Utama, I. K. Suastika, G. Thomas. 2021. Application of Kalman Filter to The Uncertainty of Model Resistance Data Obtained from Experiment. Journal of Engineering Science and Technology Vol. 15, No. 2 p1455 – 1465, School of Engineering, Taylor's University
4. Utama, IKAP, Purnamasari, D, Suastika, IK, Nurhadi, N, Thomas, G. (2021) Toward Improvement of Resistance Testing Reliability. Journal of Engineering and Technological Sciences, 5 (2).
5. D Purnamasari, F Maulana, E Suwarni. 2022. A Comparative of Component Resistance and Form Factor of Four Patrol Boat. IOP Conference Series: Earth and Environmental 972-012069

Dr.Ir.Mochamad Zaed Yuliadi,M.Sc

Email: m.zaed.yuliadi@ft.um-surabaya.ac.id

Dosen Teknik Perkapalan Universitas Muhammadiyah Surabaya. Lahir di Surabaya pada 27 Juli 1961, menempuh pendidikan S1 dan mendapatkan gelar sarjana pada tahun 1986 dari jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh



Nopember Surabaya. Memperoleh beasiswa Science and Technology Industrial Development (STAID) untuk melanjutkan studi pada Program Master di Brunel University of West London - United Kingdom, jurusan Welding Engineering dan mendapatkan gelar

Master of Science pada tahun 1994. Mendapatkan beasiswa lagi dari STAID untuk melanjutkan studi Program Doktoral di Newcastle Upon Tyne University - United Kingdom selesai tahun 2000. Tema disertasi adalah A study on the topology of ship plate distortion by neural network dan mendapat gelar Doctor of Philosophy. Kompetensi profesi adalah bidang pengelasan ber-sertifikat welding inspektor, welding engineer, berikut juga sebagai asesor pengelasan. Menjadi juri kompetisi ketrampilan pengelasan mulai tingkat nasional maupun internasional (Asean Skills Competition dan Worldskills Competition). Menjadi pembicara pada seminar-seminar baik nasional maupun internasional. Tahun 2021 sebagai pembicara pada Webinar The 8th Asian Welding Technology and Its Application Forum 2021 - Intelligent Welding and Surfacing & Additive Manufacturing Technology International Forum 2021. Aktif di organisasi profesi pengelasan baik tingkat nasional (Indonesian Welding Society) maupun internasional (Asian Welding Federation). Kesibukan saat ini adalah memberikan kuliah di prodi teknik perkapalan dan melakukan penelitian sesuai bidang keahliannya terkait tema pengelasan. Beberapa karya publikasi yang pernah dilakukannya antara lain:

1. Dissimilar material welding DSS (Duplex Stainless Steel) 2205 and HSS (High Strength Steel) Grade VL D36 Chemical Tanker, Journal Midship, Vol. 2, No. 1, April 2019,
2. Preparing welders of young generation through apprenticeship in PT PAL Indonesia. In conjunction with the cooperation with Shipbuilding Institute of Polytechnic Surabaya, International Forum on Vocational Education, Welding and Surfacing, 2014 Collection Papers, China, June 2014
3. A study on the prediction of ship plate distortion topology by neural network, Journal of Ship Production, Volume 15, 1999

Dr. Indra Ranu Kusuma, S.T.,M.T



Email : kusuma@its.ac.id

Dosen Teknik Sistem Perkapalan – FTK - Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Lahir pada tahun 1979 di Surabaya. Sejak 2003, Ia bekerja sebagai Dosen di Departemen Teknik Sistem Perkapalan FTK – ITS. Ia adalah asisten profesor di Institut Teknologi Sepuluh Nopember sejak 2010. Ia memperoleh gelar S.T (Sarjana Teknik) di Departemen Teknik Kelautan ITS pada Maret 2001. Kemudian ia mendapatkan gelar master di University of Sheffield UK pada September 2003. Ph.D. dari Fakultas Kelautan. Teknik, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Dia menerbitkan lebih dari 10 makalah dalam jurnal dan konferensi internasional untuk subjek listrik kelautan dan kontrol dan otomatisasi kapal. Minat penelitiannya saat ini meliputi analisis sistem tenaga kapal, kontrol dan simulasi, teknik kelautan, dll.. Tema disertasi adalah Pengembangan Jaringan Distribusi Listrik Dc Pada Kapal Bertenaga Listrik Hibrida Menggunakan Doubly Fed Induction Generator Untuk Meningkatkan Efisiensi Kelistrikan Dan Pengaruhnya Terhadap Konsumsi Dan Emisi Bahan Bakar. Beberapa karya publikasi yang pernah dilakukannya antara lain:

1. Implementation of Buck and Boost Converter on Direct Current Distribution Systems for Hybrid Powered Trimaran Ship, International Review of Electrical Engineering (IREE)
2. Designing Passive Harmonic Filter of Electric Propulsion System on Tanker Ship, International Journal of Marine Engineering Innovation and Research
3. Analysis of Electric Propulsion Performance on Submersible with Motor DC, Supply Power 10260AH at Voltage 115VDC,

International Journal of Marine Engineering Innovation and Research

4. Transient Stability Analysis of General Cargo Shipboard Power System, International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation (ICAMIMIA)
5. Transient Stability Analysis of Shipboard Hybrid Power Generation for Trimaran Ferry as the Inter - Island Cruise in Indonesia, Proceeding of Marine Safety and Maritime Installation (MSMI)
6. Design HMI (Human Machine Interface) for Process Control System of Main Diesel Engine Fuel System, Applied Mechanics and Materials
7. Design of Ship Model Dynamic Positioning System using PID-Based Microcontroller, Asia-Pacific Conference on Geoscience, Electronics and Remote Sensing Technology (AGERS)
8. Design model of linear generator on marine current power plant based on pneumatic system, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science

Dr. Frengki Mohamad Felayati, S.T.

Email: frengki@hangtuah.ac.id

Dosen Teknik Sistem Perkapalan-Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan-Universitas Hang Tuah. Lahir di Lumajang, 29 Juli 1993, saat ini dosen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan (FTIK), Universitas Hang Tuah (UHT). Sebelumnya telah lulus Sarjana (S.T) dengan predikat *cumlaude* di Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)



(2011-2015). Setelah itu, sempat menjadi *Marine Engineer* (2016-2017) di PT. Daya Radar Utama Shipyard (DRU), Jakarta. Di tahun 2017-2021 menyelesaikan pendidikan Doktor (Dr) tanpa gelar Magister berpredikat *cumlaude* dengan beasiswa Program Magister menuju Doktor untuk Sarjana Unggul (PMDSU) *Batch* 3 dari Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi, Indonesia. Pendidikan Doktor tersebut diselesaikan di Teknologi Kelautan, FTK, ITS dengan riset improvisasi *split injection* pada *dual-fuel engine* sebagai upaya untuk meningkatkan kinerja dan mengurangi emisi. Di sela pendidikan Doktor (2019-2020) sempat menjadi *Visiting Researcher* di *Faculty of Engineering, University of Manitoba, Canada*. Saat ini aktif melakukan kegiatan riset dengan tema *dual-fuel engine combustion and emissions, alternative fuels for ships, dan technology development towards zero emissions on ships*. Beberapa hasil riset yang telah dibuat hingga saat ini diantaranya yaitu:

1. *Future perspective of the ship alternative fuels in Indonesia, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022.*
2. *Performance and emissions of natural gas/diesel dual-fuel engine at low load conditions: Effect of natural gas split injection strategy, Fuel, 2021.*
3. *Methane Emissions Evaluation on Natural Gas/Diesel Dual-Fuel Engine during Scavenging Process, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021.*
4. *Numerical investigation of dual-fuel engine improvements using split injection natural gas coupled with diesel injection timings at low load condition, International Journal on Engineering Applications, 2021.*
5. *Investigation of the effect of natural gas injection timing on dual-fuel engine emissions using split injection strategies, International Review of Mechanical Engineering, 2019.*

Dr.Dori Yuvenda,S.Pd, M.T



Email: doriyuvenda@ft.unp.ac.id

Dosen Teknik Otomotif– Fakultas Teknik - Universitas Negeri Padang. Lahir di Bukittinggi pada 1 November 1988, menempuh pendidikan S1 dan mendapatkan gelar Sarjana pada tahun 2013 dari Jurusan Teknik Otomotif, Fakultas Teknik (FT), Universitas Negeri Padang. Melanjutkan studi pada Program Pascasarjana Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri (FTI), Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dan mendapatkan gelar Magister Teknik pada tahun 2015. Program Doktorat Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri-Rekayasa Sistem (FTI-RS), Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya diselesaikan dalam 6 semester pada tahun 2020 dengan predikat Cumlaude. Tema disertasi adalah Karakteristik Pembakaran dan Pembentukan Emisi Mesin Diesel Dual Fuel Biodiesel dan CNG. Kesibukannya saat ini adalah mengajar di Program Studi Teknik Otomotif dan Teknik Mesin, Universitas Negeri Padang dan melakukan penelitian sesuai bidang keahliannya terkait tema energy conversion, internal combustion engine, bioenergy dan biofuel. Beberapa karya publikasi yang telah dihasilkan antara lain:

1. Effect of pilot injection timing using crude palm oil biodiesel on combustion process on dual fuel engines with compressed natural gas as the main fuel. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2021.
2. The Concise latest report on the advantages and disadvantages of pure biodiesel (B100) on engine performance: Literature review and bibliometric analysis, *Indonesian Journal of Science and Technology*, 2021

3. Improved combustion performances and lowered emissions of CNG-diesel dual fuel engine under low load by optimizing CNG injection parameters. *Fuel*, 2020.
4. Optimization of injection pressure and injection timing on fuel sprays, engine performances and emissions on a developed DI 20c biodiesel engine prototype. *International Journal of Heat and Technology*, 2020
5. Optimization of pilot diesel injection timing on load variation dual fuel diesel-CNG engine on combustions and emissions characteristics. *International Review of Mechanical Engineering*, 2019.
6. Optimization of CNG injection duration on combustions and emissions characteristics on CNG-CPO biodiesel dual fuel engine with load variations. *AIP Conference Proceeding*, 2019.
7. Characterization of engine performance, combustion process and emission of diesel/CNG dual fuel engines with pilot injection timing variation at low load. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019

Dr. Tuswan, ST

Email : tuswan@lecturer.undip.ac.id

Dosen Teknik Perkapalan – Fakultas Teknik - Universitas Diponegoro. Lahir di Cilacap pada 10 Oktober 1993, me-nempuh pendidikan S1 dan mendapat-kan gelar sarjana pada tahun 2016 dari jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Melanjutkan studi magister dan doktoral di Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember melalui Program Magister Menuju Doktoral untuk Sarjana Unggul (PMDSU) dan



akhirnya meraih doktoral pada tahun 2021. Tema disertasi adalah pengembangan algoritma identifikasi kerusakan debonding pada struktur kapal berbahan sandwich. Kesibukannya saat ini adalah mengajar di prodi teknik perkapalan dan melakukan penelitian sesuai bidang keahliannya terkait tema material komposit, structural crashworthiness, dan aplikasi elemen hingga untuk struktur kapal.

Publikasi Ilmiah

1. Rizky Chandra Ariesta, Achmad Zubaydi, Abdi Ismail, Tuswan. 2021. Damaged Evaluation for Sandwich Material on Side Plate Hull using Experiment Modal Analysis. *Material Today Proceedings* 47(020051)
2. Muhayat, N.; Harjono, M.S.; Depari, Y.P.D.S.; Prabowo, A.R.; Triyono, T.; Putri, E.D.W.S.; Tuswan, T. 2022, Friction Stir Welded AA5052-H32 under Dissimilar Pin Profile and Preheat Temperature: Microstructural Observations and Mechanical Properties. *Metals*, 12, 4
3. Aditya Rio Prabowo, Tuswan, Dharu Feby Smaradhana, Ridwan. 2021, Deformation assessment of the unstiffened and stiffened plates subjected to material class and loading parameter. *Open Engineering*, vol. 11(1), 1034-1047.
4. Tuswan, Achmad Zubaydi, Bambang Pisceca, Abdi Ismail, Rizky Chandra Ariesta, Aditya Rio Prabowo, 2021, A Numerical Evaluation on Nonlinear Dynamic Response of Sandwich Plates with Partially Rectangular Skin/Core Debonding, Curved and Layered Structures, vol. 9(1), 25-39.
5. Muhammad Sabiqulhair Akbar, Aditya Rio Prabowo, Tuswan, Dominicus Danardono Dwi Prija Tjahjana. 2021. Analysis of plated-hull structure strength against hydrostatic and hydrodynamic loads: A case study of 600 TEUs container ships. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. vol. 30(1), 237-248.

6. Aditya Rio Prabowo, Tuswan, Arifin Nurcholis, and Anandito Adam Pratama, 2021, Structural Resistance of the Simplified Side Hull Models Accounting for Stiffener Design and Loading Type, *Mathematical Problems in Engineering*. vol. 2021, 6229498
7. Laksmana Widi Prasetya, Aditya Rio Prabowo, Tuswan, Ristiyanto Adiputra, 2021, Crashworthy examination of a new proposed impact attenuator design: Experimental testing and numerical analysis. *Modelling and Simulation in Engineering*. vol. 1, 1-20

MUHAMMAD AL HAZMAN



Email : alhazmann@gmail.com

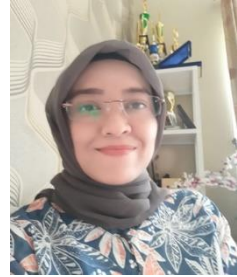
Dosen Teknik Perkapalan – Fakultas Teknik - Universitas Muhammadiyah Surabaya. Lahir di Surabaya 09 Agustus 1995, menempuh pendidikan S1 dan mendapatkan gelar sarjana pada tahun 2018 dari jurusan Teknik Transportasi Laut, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Melanjutkan studi pada Program Pascasarjana Teknologi Kelautan bidang keahlian Transportasi Kelautan dan mendapatkan gelar magister teknik pada tahun 2021. Karya publikasi yang pernah dilakukannya adalah “Dampak Penerapan Protokol Kesehatan Covid 19 Terhadap Kinerja di Pelabuhan Hub Internasional Tanjung Perak Surabaya. Badan Penelitian dan Pengembangan Perhubungan Kementerian Perhubungan Vol 23 No 1 (2021)”.

Dian Prasetyawati

Email: dheyano5@gmail.com,

dheyano5@ft.um-surabaya.ac.id

Dosen Teknik Perkapalan-Fakultas Teknik-Universitas Muhammadiyah Surabaya. Lahir di Kota Ponorogo, Jawa Timur pada tanggal 5 Oktober 1978, menempuh Pendidikan S1



kemudian mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada tahun 2002 dari Jurusan Teknik Sistem Perkapalan – Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Melanjutkan studi pada Program Pascasarjana pada Jurusan Teknik Industri dan mendapatkan gelar Magister Teknik pada tahun 2006. Kegiatan saat ini adalah mengajar di Program Studi Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surabaya. Melakukan kegiatan penelitian dengan fokus pada bidang Manajemen Keselamatan, Bisnis Perkapalan, Manajemen Risiko, Optimasi, dan *Green Ship-Recycling*. Beberapa karya publikasi yang pernah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Observation Study the Walking Speed and Distribution of Speed's Passengers as Basis for Passenger Evacuation Simulation
2. Studi Penilaian Ekonomis Sistem Instalasi Biogas pada Kapal Penumpang dengan Metode CBA (Cost Benefit Analysis)
3. Penerapan Voyage Account berdasarkan Noon Report Kapal
4. Analisa Kelayakan Sistem Instalasi Biogas sebagai Alternatif Pengolahan Limbah Sewage Kapal

