

## PENGEMBANGAN DAN VALIDASI INTERNAL KERANGKA PENGAWAKAN AMAN BERBASIS RISIKO UNTUK WING-IN-GROUND CRAFT

### *DEVELOPMENT AND INTERNAL VALIDATION OF A RISK-BASED SAFE-MANNING FRAMEWORK FOR WING-IN-GROUND CRAFT*

**Dedi Kurniawan<sup>1\*</sup>, Andi Fiardi<sup>2</sup>, Baihaqi<sup>2</sup>, Muhammad David<sup>1</sup>, Muhammad Yani<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Program Studi Sistem Kelistrikan Kapal, Politeknik Pelayaran Malahayati, Aceh Besar, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Permesinan Kapal, Politeknik Pelayaran Malahayati, Aceh Besar, Indonesia

\*email: [dedikurniawan@poltekpelaceh.ac.id](mailto:dedikurniawan@poltekpelaceh.ac.id)

#### ABSTRAK

Wing-in-ground craft (WIG) menggabungkan manuver di permukaan air dengan penerbangan aerodinamis pada ketinggian sangat rendah, sehingga kebutuhan awaknya tidak dapat diturunkan secara langsung dari standar kapal atau pesawat udara. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan memvalidasi secara internal suatu metode berbasis fungsi, risiko, beban kerja, dan kompetensi untuk menentukan jumlah awak operasional inti WIG. Sebanyak 36 sumber regulasi dan ilmiah dipetakan menjadi enam fungsi keselamatan kritis, enam fase misi, matriks kapasitas kompetensi peran, dan beban tugas spesifik fase. Komposisi peran berbentuk bilangan bulat disaring melalui enumerasi eksak, uji alokasi max-flow/min-cut, cadangan rekayasa 20%, batas utilisasi fase, dan uji kelangsungan setelah satu orang pada setiap peran dihilangkan. Empat skenario operasi kemudian dievaluasi menggunakan 10.000 simulasi stokastik jaringan tugas serta pembandingan yang dikurangi satu orang. Hasil menunjukkan komposisi robust sebanyak tiga awak untuk operasi Tipe A terbatas, empat awak untuk layanan penumpang Tipe A pesisir, lima awak untuk operasi Tipe B yang menuntut, dan enam awak untuk operasi Tipe C terpencil. Tim terpilih layak pada 100,00%, 100,00%, 100,00%, dan 99,99% percobaan, sedangkan tim yang dikurangi satu orang hanya mencapai 12,61%-70,57%. Fase transisi dan keadaan darurat menjadi sumber kegagalan dominan. Temuan menegaskan bahwa pengawakan WIG harus dibuktikan melalui cakupan fungsi simultan, kemampuan pengambilalihan yang berkualifikasi, pengelolaan gangguan teknis, dan ketahanan terhadap ketidakmampuan satu awak. Angka yang dihasilkan merupakan baseline rekayasa tervalidasi internal, bukan minimum hukum universal.

**Kata kunci:** Beban Kerja, Kompetensi Awak, Pengawakan Aman, Simulasi Jaringan Tugas, Wing-In-Ground Craft

#### ABSTRACT

*Wing-in-ground craft (WIG) combine water-surface manoeuvring with very-low-altitude aerodynamic flight; therefore, their crew requirements cannot be transferred directly from ship or aircraft standards. This study developed and internally validated a function-, risk-, workload-, and competence-based method for determining the core operational complement of WIG craft. Thirty-six regulatory and scientific sources were mapped into six safety-critical functions, six mission phases, a role-to-function competence-capacity matrix, and phase-specific task loads. Bounded integer role compositions were screened using exact enumeration, a max-flow/min-cut allocation test, a 20% engineering reserve, phase-utilisation limits, and survival checks after removing one person from each present role. Four operating scenarios were then evaluated through 10,000 stochastic task-network trials and one-person-reduced comparators. The robust complements were three crew for a restricted Type A operation, four for coastal Type A passenger service, five for a demanding Type B operation, and six for a remote Type C operation. The selected teams were mission-feasible in 100.00%, 100.00%, 100.00%, and 99.99% of trials, whereas the reduced teams achieved only 12.61%-70.57%. Transition and emergency phases dominated the failures. The findings show that WIG manning should be justified through concurrent function coverage, qualified takeover, technical-*

*fault management, and resilience to single-person incapacitation. The reported numbers are internally validated engineering baselines rather than universal statutory minima.*

**Keywords:** *Crew Competence, Mental Workload, Safe Manning, Task-Network Simulation, Wing-In-Ground Craft.*

## 1. Pendahuluan

*Wing-in-ground craft* (WIG) memperoleh gaya angkat aerodinamis dengan beroperasi sangat dekat terhadap permukaan air. Kedekatan sayap dengan permukaan mengurangi induced drag dan meningkatkan rasio angkat-hambat, sehingga WIG menawarkan rezim transportasi di antara kapal cepat dan pesawat udara. Akan tetapi, keuntungan tersebut diikuti oleh dinamika yang peka terhadap tinggi terbang, sudut serang, gelombang, hembusan angin, dan gerak membelok. Kajian stabilitas menunjukkan bahwa perilaku longitudinal dan lateral WIG berbeda dari pesawat konvensional, terutama pada ketinggian rendah dan permukaan bergelombang (Chun & Chang, 2002; de Divitiis, 2005; Aminzadeh & Khayatian, 2017; Wang et al., 2022; Xie et al., 2022).

Misi WIG dapat mencakup manuver pelabuhan, akselerasi di air, transisi menuju dukungan aerodinamis, jelajah sangat dekat permukaan, operasi sementara atau berkelanjutan di luar ground effect untuk Tipe B dan Tipe C, pendekatan, alighting, dan kembali ke mode displacement. Setiap rezim mengubah margin kendali, referensi visual, hukum navigasi, tuntutan sistem, dan pilihan darurat. Karena itu, jumlah awak yang mampu mengoperasikan kontrol pada kondisi jelajah normal belum tentu cukup ketika terjadi transisi, collision avoidance, reversion otomatisasi, gangguan propulsi, atau evakuasi penumpang (Rozhdestvensky, 2006; Jia et al., 2016; Karpuk, 2024).

Persoalan pengawakan terutama muncul ketika beberapa fungsi mencapai puncak secara simultan. Pada transisi dan pendekatan, kendali lintasan, lookout, navigasi, komunikasi radio, pemantauan sistem, dan kesiapan darurat dapat berlangsung dalam jendela waktu yang sama. Multiple-resource theory menjelaskan bahwa aktivitas yang menggunakan kanal visual, kognitif, auditori, atau psikomotor yang serupa akan saling mengganggu ketika dilakukan bersamaan (Wickens, 2002). Situational awareness juga dapat menurun ketika seorang operator harus mengawasi otomatisasi, mengenali mode yang salah, dan sekaligus mendiagnosis gangguan (Endsley, 1995, 2021; Parasuraman et al., 2000). Bukti simulator maritim menunjukkan

bahwa peningkatan kompleksitas lalu lintas dan skenario darurat secara nyata menaikkan beban mental, stres fisiologis, dan kebutuhan komunikasi tim (Lochner et al., 2018; Wulvik et al., 2020; Žagar et al., 2020; Yan et al., 2022).

Instrumen internasional menyediakan prinsip yang relevan tetapi tidak memberikan satu angka universal. Pedoman IMO membedakan tipe WIG dan menetapkan filosofi keselamatan serta kompetensi khusus, sedangkan prinsip minimum safe manning menuntut kecukupan jumlah, kualifikasi, beban kerja, jam kerja-istirahat, dan kemampuan merespons keadaan darurat (IMO, 2002, 2005, 2011, 2018, 2020, 2022; ILO, 2022). Penelitian pada kapal konvensional dan kapal otonom juga menunjukkan bahwa otomatisasi tidak otomatis mengurangi awak; pengurangan hanya layak ketika tugas, kompetensi, pengawasan, dan fallback system dihitung ulang secara sistematis (Alapetite & Kozine, 2017; Ahvenjärvi, 2016; Kooij & Hekkenberg, 2021; Felski & Zwolak, 2020; Wróbel et al., 2017).

Kesenjangan penelitian terletak pada belum tersedianya metode transparan yang mengubah fungsi misi menjadi komposisi minimum yang berkualifikasi tanpa menghitung kapasitas seseorang lebih dari satu kali pada tugas yang simultan. Sebagian pendekatan bersifat konseptual, sedangkan pendekatan yang terlalu bergantung pada penilaian pakar berpotensi menghasilkan angka presisi tanpa dasar yang dapat direplikasi. Penelitian ini merekonstruksi pengawakan WIG sebagai masalah alokasi tugas terbatas kompetensi dan fase. Tujuannya adalah: menentukan komposisi awak operasional inti yang memenuhi cakupan simultan pada empat skenario WIG; menguji kestabilan hasil terhadap variasi beban dan kapasitas; serta mengidentifikasi fase pertama yang menjadi tidak layak ketika satu awak dikurangi. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi enumerasi peran integer, uji max-flow/min-cut, cadangan rekayasa, penghapusan satu peran, dan simulasi stokastik jaringan tugas dalam satu arsitektur keputusan yang dapat diaudit.

## 2. Metode Penelitian

### *Desain Penelitian dan Protokol Bukti*

Penelitian menggunakan sintesis bukti terstruktur, analisis tugas fungsional, enumerasi

integer terbatas, uji alokasi max-flow/min-cut, verifikasi penghapusan peran, dan simulasi stokastik jaringan tugas. Desain rekayasa dipilih karena data kecelakaan, beban kerja, dan kinerja awak WIG yang tersedia untuk publik belum cukup matang untuk mengestimasi koefisien pengawakan secara langsung. Pendekatan ini tidak menggantikan validasi manusia, tetapi membuat setiap asumsi, matriks input, aturan, serta batas klaim dapat diperiksa dan direplikasi.

Korpus analitis terdiri atas 36 sumber: 29 artikel jurnal dan tujuh instrumen internasional. Dengan demikian, 80,6% daftar pustaka berasal dari jurnal nasional atau internasional.

**Tabel 1.** Domain Bukti dan Kontribusinya Terhadap Model

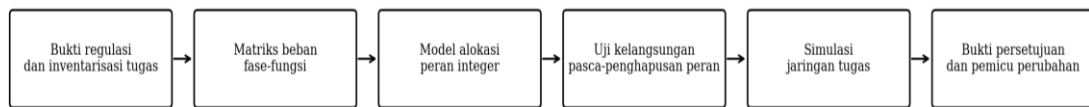
| Domain bukti                     | Sumber representatif                            | Kontribusi                                                     |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Regulasi WIG                     | IMO, 2002, 2005, 2018                           | Klasifikasi, envelope operasi, kompetensi dan filosofi darurat |
| Pengawasan dan ketenagakerjaan   | IMO, 2011, 2022; ILO, 2022                      | Cakupan fungsi, beban kerja, jam kerja-istirahat dan ketahanan |
| Keselamatan kapal cepat          | IMO, 2020                                       | Keandalan teknis, proteksi penumpang dan survival              |
| Human performance                | Endsley, 1995, 2021; Wickens, 2002              | Situational awareness dan konflik sumber daya simultan         |
| Otomatisasi dan pengurangan awak | Ahvenjärvi, 2016; Kooij & Hekkenberg, 2021      | Kredit otomatisasi, fallback dan redistribusi tanggung jawab   |
| Validasi simulator               | Lochner et al., 2018; Brandsæter & Madsen, 2024 | Pengukuran beban, desain skenario dan kriteria kinerja         |

Sumber dipertahankan apabila memberi dasar bagi sedikitnya satu elemen model, yaitu fungsi operasional, konkurensi fase, kapasitas kompetensi, kredit otomatisasi, kelelahan, redundansi, atau validasi simulator. Praktik Delphi dan desain skenario simulator mengacu pada prinsip konsensus dan validasi yang dilaporkan Beiderbeck et al. (2021), Diamond et al. (2014), Brandsæter dan Madsen (2024), serta Harrington et al. (2025). Tidak ada data responden atau konsensus pakar yang diklaim; hasil penelitian ini merupakan validasi komputasional internal.

### ***Dekomposisi Fase Misi dan Fungsi Keselamatan***

Jaringan misi dibagi menjadi enam fase: persiapan; surface taxi; akselerasi di air dan transisi; jelajah dalam ground effect atau di luar ground effect yang diizinkan; pendekatan dan alighting; serta kondisi abnormal atau darurat. Operasi Tipe B dan Tipe C tidak dibuat sebagai fase rata-rata yang terpisah, tetapi direpresentasikan melalui peningkatan beban kendali, navigasi, dan darurat pada fase jelajah dan pendekatan. Strategi ini mempertahankan fokus model pada puncak kebutuhan simultan.

Enam fungsi yang wajib tersedia adalah komando, kendali lintasan, navigasi dan collision avoidance, komunikasi, pengelolaan sistem teknis, serta respons darurat. Kewajiban penumpang dimasukkan ke dalam beban darurat dan peran petugas keselamatan-darurat; jumlah cabin attendant tambahan tidak ditetapkan oleh model inti karena harus diturunkan dari tata letak pintu keluar, distribusi penumpang, peralatan survival, dan demonstrasi evakuasi.



Luaran: komposisi inti robust, kualifikasi peran, fase kegagalan, dan kebutuhan validasi

**Gambar 1.** Alur yang Dapat Direplikasi untuk Penentuan Awak WIG dan Validasi Internal.

**Tabel 2.** Dekomposisi Fase Misi dan Pemicu Konkurensi

| Fase                  | Tugas representatif                                | Fungsi puncak                      | Pemicu utama                                     |
|-----------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Persiapan             | Rute, cuaca, massa, sistem dan briefing            | Komando, navigasi, teknis          | Kesalahan laten menjalar sepanjang misi          |
| Surface taxi          | Lookout, COLREG, manuver, radio                    | Kendali, navigasi, komunikasi      | Lalu lintas campuran dan jarak pandang           |
| Transisi              | Daya, pitch/height, surface scan, restraint        | Kendali, navigasi, teknis, darurat | Konkurensi tertinggi dan margin koreksi terkecil |
| Jelajah               | Lintasan, gelombang/lalu lintas, mode monitoring   | Kendali, navigasi, komunikasi      | Pemantauan otomatisasi dan referensi menurun     |
| Pendekatan /alighting | Clearance, descent, kondisi permukaan              | Kendali, navigasi, darurat         | Koreksi terlambat berkonsekuensi tinggi          |
| Abnormal/ darurat     | Stabilisasi, diagnosis, distress, divert, evacuate | Seluruh fungsi                     | Kebutuhan teknis dan occupant bersamaan          |

### **Beban Tugas dan Kapasitas Kompetensi**

Untuk skenario s, fase p, dan fungsi f, beban dasar  $d_{spf}$  dinyatakan sebagai beban kerja ekuivalen-orang. Nilai 1,0 berarti jumlah beban yang secara teoritis dapat ditanggung satu orang yang sepenuhnya kompeten apabila tidak ada konflik tugas lain. Angka tersebut berasal dari inventaris tugas regulasi dan digunakan sebagai input verifikasi metodologis, bukan rata-rata armada yang telah diukur.

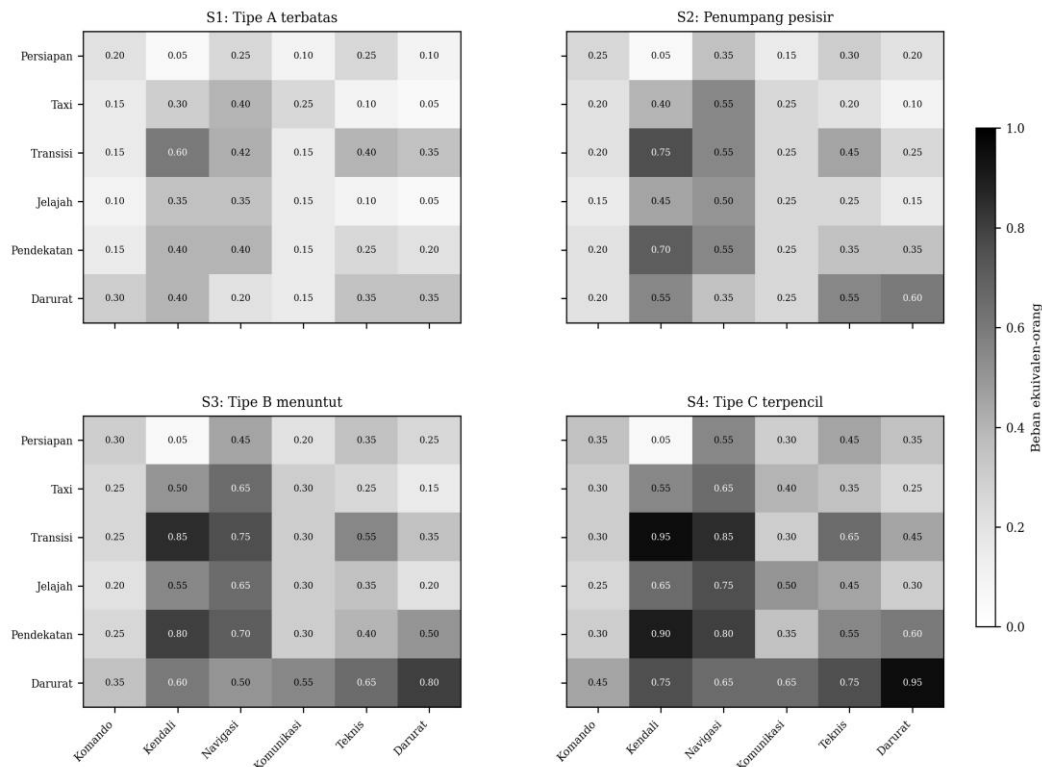
Lima tipe peran dimodelkan: master/WIG pilot (MP), first officer/co-pilot (FO), navigation and

communications officer (NKO), technical systems officer (TSO), serta safety and emergency officer (KDO). Kapasitas kompetensi  $a_{rf}$  berada pada rentang 0-1. Nilai 1 menunjukkan kemampuan mandiri yang harus didukung kualifikasi tipe WIG yang masih berlaku, sedangkan nilai lebih rendah menunjukkan kapasitas bantuan. Matriks ini mencegah sertifikat maritim atau penerbangan konvensional dianggap otomatis setara dengan kompetensi WIG.

**Tabel 3.** Matriks Kapasitas Kompetensi Peran Terhadap Fungsi

| Peran | Komando | Kendali | Navigasi | Komunikasi | Teknis | Darurat |
|-------|---------|---------|----------|------------|--------|---------|
| MP    | 1,00    | 1,00    | 0,75     | 0,60       | 0,25   | 0,40    |
| FO    | 0,70    | 0,95    | 0,90     | 0,80       | 0,30   | 0,50    |
| NKO   | 0,35    | 0,35    | 1,00     | 1,00       | 0,20   | 0,40    |
| TSO   | 0,20    | 0,10    | 0,25     | 0,30       | 1,00   | 0,65    |
| KDO   | 0,15    | 0,05    | 0,20     | 0,55       | 0,20   | 1,00    |

Keterangan: MP = master/WIG pilot; FO = first officer/co-pilot; NKO = perwira navigasi dan komunikasi; TSO = perwira sistem teknis; KDO = petugas keselamatan dan darurat.



**Gambar 2.** Matriks Beban Fase-Fungsi untuk Empat Skenario Verifikasi Metodologis.

### Model Alokasi Peran Integer Robust

Variabel  $n_r$  adalah jumlah non-negatif orang pada peran  $r$ . Fungsi tujuan meminimalkan jumlah awak operasional inti  $N$ . Berbeda dengan pemilih peran biner, formulasi ini mengizinkan dua orang atau lebih pada peran yang sama ketika misi membutuhkan kemampuan mandiri ganda.

$$\min N = \sum_r n_r \quad (1)$$

Variabel  $y_{rpf}$  menunjukkan alokasi beban dari peran  $r$  kepada fungsi  $f$  pada fase  $p$ . Cakupan dihitung terhadap beban robust sebesar  $\rho d_{spf}$  dengan  $\rho = 1,20$ . Faktor 20% merupakan cadangan rekayasa eksplisit, bukan probabilitas kecelakaan.

$$\sum_r y_{rpf} \geq \rho d_{spf}, \text{ untuk setiap } p \text{ dan } f \quad (2)$$

Jumlah beban yang dialokasikan kepada suatu kelompok peran tidak boleh melebihi jumlah personel pada peran tersebut dikalikan batas utilisasi fase  $u_p$ . Persiapan, surface taxi, dan jelajah menggunakan  $u_p = 0,90$ ; transisi, pendekatan, dan darurat menggunakan  $u_p = 0,85$  agar tersisa cadangan kognitif bagi monitoring dan kejadian tidak terencana.

$$\sum_f (y_{rpf} / a_{rf}) \leq u_p n_r, \text{ untuk setiap } r \text{ dan } p \quad (3)$$

Kapasitas kompetensi membatasi alokasi sehingga fungsi tidak dapat diberikan kepada peran yang tidak memiliki kemampuan relevan. Kelayakan tiap fase dievaluasi sebagai jaringan aliran bipartit dari kapasitas peran menuju kebutuhan fungsi. Teorema max-flow/min-cut menjadikan uji tersebut eksak dan mencegah satu

orang dihitung memberikan kapasitas penuh secara bersamaan kepada beberapa fungsi.

$$0 \leq y_{rpf} \leq a_{rf} n_r \quad (4)$$

Ruang desain membolehkan nol, satu, atau dua orang pada setiap peran dengan maksimum delapan awak inti. Setiap skenario mensyaratkan satu MP, sedikitnya satu FO, dan satu TSO. Layanan penumpang memerlukan KDO; skenario Tipe B menuntut dan Tipe C memerlukan NKO; skenario Tipe C terpencil memerlukan FO kedua untuk mempertahankan kemampuan kendali independen. Seluruh  $3^5 = 243$  kombinasi peran diuji secara eksak dan diranking berdasarkan jumlah awak, duplikasi peran, dan kapasitas sisa.

### Uji Kelangsungan Setelah Penghapusan Peran

Setiap komposisi terpilih diuji kembali dengan menghilangkan satu orang dari setiap peran yang ada secara bergantian. Tim tersisa harus memenuhi survival vector yang mencakup stabilisasi, komunikasi distress, navigasi segera, isolasi teknis, dan inisiasi alighting atau evakuasi. Persyaratan tidak memaksa misi normal dilanjutkan, tetapi memastikan hilangnya satu orang tidak menghapus seluruh kemampuan mengendalikan wahana dan memulai rencana darurat.

$$\text{Feasible}(n - e_q, h_s) = 1, \text{ untuk setiap peran } q \text{ yang tersedia} \quad (5)$$

**Skenario Verifikasi dan Simulasi Jaringan Tugas**

Empat skenario arketipal digunakan. S1 adalah operasi Tipe A terbatas pada siang hari di perairan terlindung dengan delapan orang di dalam wahana. S2 adalah layanan penumpang Tipe A pesisir dalam lalu lintas sedang dengan 30 orang. S3 adalah operasi Tipe B malam hari di perairan terbuka dengan 50 orang. S4 adalah operasi Tipe C terpencil dengan kemampuan keluar ground effect secara berkelanjutan, dukungan SAR terbatas, dan 100 orang. Skenario tersebut bukan deskripsi wahana komersial tertentu, melainkan urutan pengujian yang lengkap dan transparan.

Validasi internal menggunakan 10.000 percobaan stokastik untuk setiap komposisi terpilih dan pembandingan yang dibentuk dengan menghilangkan peran khusus terakhir. Beban dasar dikalikan faktor lingkungan tingkat skenario, faktor fase, faktor fungsi, dan kejadian reversion otomatisasi yang diambil dari distribusi triangular terbatas. Faktor kelelahan terbatas mengurangi kapasitas. Seed acak ditetapkan pada 20260715 agar hasil dapat direproduksi.

$$D_{sp}f^{(m)} = d_{sp}f E_s^{(m)} P_{sp}^{(m)} F_{sp}f^{(m)} R_{sp}f^{(m)} \quad (6)$$

Endpoint utama adalah kelayakan seluruh misi pada semua fase. Interval kepercayaan Wilson 95% dihitung untuk proporsi layak. Empat pemeriksaan a priori diterapkan: jumlah awak tidak boleh menurun ketika tuntutan skenario meningkat; komposisi harus lulus cadangan 20% dan penghapusan peran; desain terpilih harus mencapai sedikitnya 99,9% kelayakan simulasi; dan desain yang dikurangi harus menunjukkan penurunan material. Fase pertama yang gagal dicatat untuk menguji apakah model menemukan puncak beban yang masuk akal secara operasional.

**3. Hasil dan Pembahasan****Sintesis Bukti Fungsional**

Sintesis menunjukkan bahwa tidak ada satu domain regulasi yang mewakili seluruh sistem operasi WIG. Instrumen maritim menetapkan kewajiban navigasi, watchkeeping, teknis, ketenagakerjaan, dan survival; pedoman WIG memberi kategori wahana, batas operasi, serta kompetensi tipe; sedangkan literatur human factors menjelaskan konflik tugas simultan, monitoring otomatisasi, dan koordinasi tim. Temuan tersebut membenarkan perlakuan pengawakan sebagai safety case lintas domain, bukan konversi sederhana dari dokumen minimum safe manning kapal atau komposisi kokpit pesawat.

Matriks fase-fungsi memperlihatkan dua konsentrasi beban. Fase transisi memadukan kendali tinggi, navigasi, pengawasan teknis, dan kesiapan darurat. Fase darurat memadukan stabilisasi, diagnosis, komunikasi, dan proteksi occupant. Beban jelajah lebih rendah secara agregat, tetapi asumsi otomatisasi dan rute terpencil meningkatkan tuntutan monitoring pada S3 dan S4. Pola ini konsisten dengan penelitian yang menemukan bahwa beban kerja maritim berubah menurut kompleksitas lalu lintas, mode kontrol, dan kejadian abnormal (Yoshida et al., 2021; Yan et al., 2022; Lochner et al., 2018).

**Komposisi Awak Operasional Inti Robust**

Enumerasi eksak menghasilkan kenaikan monoton dari tiga menjadi enam awak inti. Setiap komposisi terpilih memenuhi seluruh fase pada beban desain 20% dan lulus penghapusan satu orang terhadap survival vector. Rasio cadangan di atas satu menunjukkan bahwa cut kapasitas terkecil tetap melebihi kebutuhan.

**Tabel 4.** Komposisi Awak Operasional Inti Robust

| Skenario | Awak | Komposisi peran yang dipilih        | Cadangan Dasar | Cadangan pada $\rho=1,20$ | Penghapusan Peran |
|----------|------|-------------------------------------|----------------|---------------------------|-------------------|
| S1       | 3    | 1 MP + 1 FO + 1 TSO                 | 1,500          | 1,250                     | Lulus             |
| S2       | 4    | 1 MP + 1 FO + 1 TSO + 1 KDO         | 1,360          | 1,133                     | Lulus             |
| S3       | 5    | 1 MP + 1 FO + 1 NKO + 1 TSO + 1 KDO | 1,349          | 1,124                     | Lulus             |
| S4       | 6    | 1 MP + 2 FO + 1 NKO + 1 TSO + 1 KDO | 1,308          | 1,090                     | Lulus             |

S1 tidak lagi mendukung baseline konseptual dua orang. Orang ketiga diperlukan karena command pair tidak dapat mempertahankan kendali, navigasi, dan fault management secara simultan di bawah beban transisi robust. S2 menambah KDO agar kewajiban penumpang dan

darurat tidak menarik awak kendali atau teknis dari stasiunnya. S3 menambah NKO khusus, sedangkan S4 menambah FO kedua untuk menjaga redundansi kendali pada operasi Tipe C yang terpencil.

Penambahan awak tidak semata-mata mengikuti kapasitas penumpang. Penggerak utama

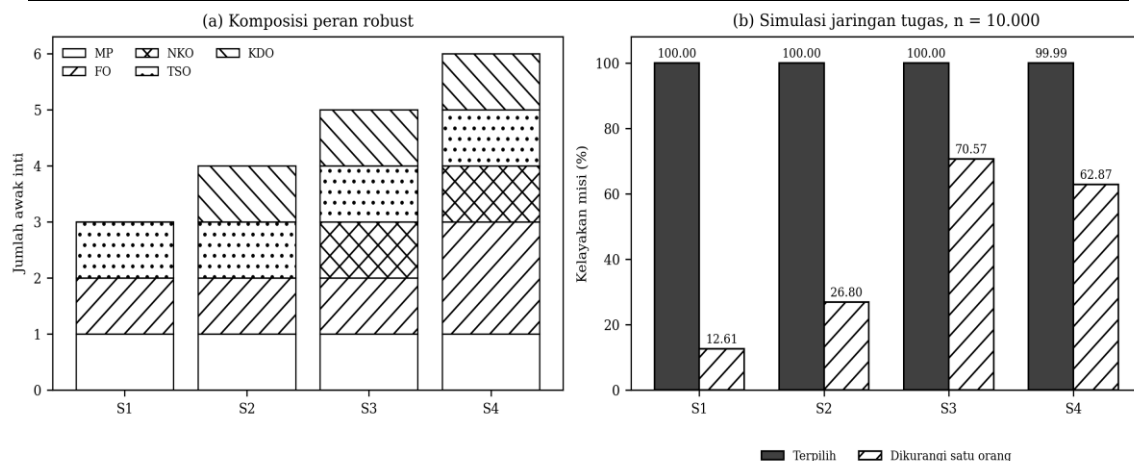
adalah struktur tugas. Skenario dengan penumpang sedikit dapat tetap membutuhkan tambahan personel bila traffic, cuaca, reversion otomatisasi, atau dukungan darurat meningkatkan konkurensi. Sebaliknya, angka hasil tidak mencakup cabin attendant tambahan atau spesialis misi yang harus ditentukan melalui analisis evakuasi dan keselamatan terpisah.

#### Validasi Internal Berbasis Simulasi

Tim robust tetap layak dalam seluruh percobaan S1-S3 dan dalam 9.999 dari 10.000

**Tabel 5.** Hasil Simulasi Jaringan Tugas, 10.000 Percobaan Per Desain

| Skenario | Awak Terpilih | Layak Terpilih, % (IK 95%) | Awak Dikurangi | Layak Dikurangi, % (IK 95%) |
|----------|---------------|----------------------------|----------------|-----------------------------|
| S1       | 3             | 100,00 (99,962-100,000)    | 2              | 12,61 (11,97-13,28)         |
| S2       | 4             | 100,00 (99,962-100,000)    | 3              | 26,80 (25,94-27,68)         |
| S3       | 5             | 100,00 (99,962-100,000)    | 4              | 70,57 (69,67-71,46)         |
| S4       | 6             | 99,99 (99,943-99,998)      | 5              | 62,87 (61,92-63,81)         |



**Gambar 3.** Komposisi Peran Terpilih dan Diskriminasi Terhadap Alternatif yang Dikurangi Satu Orang.

#### Diskriminasi Fase Kegagalan

Fase pertama yang gagal bersifat koheren secara operasional. Sebanyak 98,01% kegagalan tim S1 yang dikurangi pertama kali muncul pada transisi. Kegagalan S2 terkonsentrasi pada transisi dan respons darurat, sedangkan S3 dan S4

**Tabel 6.** Distribusi Fase Pertama yang Tidak Layak pada Tim yang Dikurangi

| Skenario | Total Gagal | Transisi (%) | Pendekatan (%) | Darurat (%) |
|----------|-------------|--------------|----------------|-------------|
| S1       | 8.739       | 98,01        | 1,99           | 0,00        |
| S2       | 7.320       | 60,37        | 6,17           | 33,46       |
| S3       | 2.943       | 17,87        | 8,05           | 74,07       |
| S4       | 3.713       | 21,28        | 20,44          | 58,28       |

#### Arsitektur Kompetensi dan Pembuktian

Kapasitas matematis suatu peran hanya sah bila didukung kompetensi yang dapat

percobaan S4. Batas bawah Wilson melebihi 99,94%. Sebaliknya, pembanding yang dikurangi satu orang sering gagal dan tidak memenuhi kriteria penerimaan internal. Pemisahan terbesar terjadi pada S1 dan S2, ketika tim yang dikurangi hanya layak pada 12,61% dan 26,80% percobaan. Tim S3 dan S4 yang dikurangi dapat bertahan pada kondisi yang lebih ringan, tetapi masih gagal masing-masing pada 29,43% dan 37,13% percobaan.

didominasi fase darurat dengan tambahan kegagalan pendekatan dan transisi. Tidak ada tim yang pertama kali gagal pada persiapan, surface taxi, atau jelajah. Temuan ini menguatkan premis bahwa beban rata-rata jelajah merupakan dasar yang lemah untuk mengurangi jumlah awak.

didemonstrasikan. Sertifikat maritim atau lisensi pilot diperlakukan sebagai prior learning, bukan kesetaraan otomatis. Assessment harus mencakup

filosofi kendali wahana, sistem propulsi dan kelistrikan, envelope yang disetujui, prosedur darurat, dan transfer of control. Pemeriksaan simulator berulang diperlukan karena manuver abnormal yang jarang dilakukan rentan terhadap

skill decay. Crew resource management harus dinilai sebagai kontrol teknis melalui perilaku monitoring, challenge-and-response, komunikasi, dan pengambilan keputusan (Salas et al., 2006; Rasmussen, 1983).

**Tabel 7.** Arsitektur Kompetensi dan Validasi Berbasis Peran

| Peran | Akuntabilitas Utama                                                        | Bukti kompetensi Minimum                                                                   | Skenario Validasi Kritis                                                             |
|-------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| MP    | Komando keseluruhan, kendali utama, go/no-go, diversion atau ditching      | Kualifikasi tipe WIG tingkat lanjut; COLREG; meteorologi; command CRM; emergency command   | Full-mission check; unstable approach; degraded control; emergency command           |
| FO    | Monitoring independen, takeover kendali, threat and error management       | Kualifikasi co-pilot WIG; monitoring; BRM/CRM; abnormal recovery                           | Takeover; incapacitation; mode reversion; rejected transition                        |
| NKO   | Lookout, rute, collision avoidance, radio dan koordinasi traffic           | Navigasi laut lanjut; COLREG; komunikasi maritim/penerbangan; awareness lintasan WIG       | Lalu lintas padat; jarak pandang terbatas; radio saturation; navigation disagreement |
| TSO   | Pengawasan propulsi, kelistrikan, kendali dan otomatisasi; fault isolation | Type course sistem wahana; keselamatan listrik; software/cyber awareness; fault management | Gangguan propulsi/kendali ketika command team mempertahankan lintasan                |
| KDO   | Keselamatan occupant, kebakaran, evakuasi, survival dan first response     | Passenger safety; crowd/crisis management; firefighting; survival; first aid               | Asap; hard alighting; water evacuation; occupant cedera atau incapacitated           |

### **Implikasi Model Terhadap Batas Keselamatan**

Hasil revisi mengubah klaim numerik utama. Baseline dua orang yang tampak memadai ketika fungsi dinilai terpisah tidak bertahan setelah alokasi spesifik fase, cadangan 20%, pemisahan fault diagnosis, dan survival screen diterapkan. Tim dua orang S1 gagal pada 87,39% percobaan, hampir seluruhnya saat transisi. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah awak harus menjadi luaran pengujian, bukan asumsi desain.

Transisi berdurasi singkat, tetapi durasi bukan proksi beban yang memadai. Power management, pitch-height control, surface scanning, traffic assessment, technical monitoring, dan occupant restraint terjadi pada margin koreksi sempit. Pada skenario yang lebih kompleks, keadaan darurat menjadi batas utama karena tim harus menstabilkan wahana, mendiagnosis gangguan, mempertahankan navigasi, mengirim distress, memilih lokasi alighting, dan melindungi occupant secara simultan.

Otomatisasi hanya memperoleh kredit pengurangan awak apabila safety case membuktikan deteksi gangguan, alarm yang dapat dipahami, manual reversion, dan recovery dalam waktu tersedia. Autopilot dapat mengurangi

kendali manual pada jelajah stabil, tetapi tidak menghilangkan monitoring dan takeover. Penelitian tentang operator kapal otonom memperlihatkan bahwa kompleksitas antarmuka, keterbatasan visibilitas, dan keandalan sistem tetap memengaruhi workload (Man et al., 2015; Yoshida et al., 2021). Remote support juga tidak dihitung sebagai kapasitas langsung di kapal karena latency, kehilangan konektivitas, sensory gap, dan ketidakjelasan kewenangan dapat mengurangi efektivitas.

Redundansi bersifat fungsional, bukan sekadar numerik. Seseorang hanya menjadi barrier apabila berkualifikasi, current, memiliki akses terhadap kontrol dan informasi, serta berwenang mengambil alih. Pendidikan WIG perlu menjembatani domain maritim dan aeronautika. Perwira maritim membutuhkan aerodinamika ground effect, energy-height management, flight-control modes, meteorologi aeronautika, dan abnormal recovery. Pilot membutuhkan COLREG, interpretasi lalu lintas laut, sea-state assessment, komunikasi kapal, marine survival, dan damage-control. Perancangan skenario simulator harus menyeimbangkan realisme, tujuan penilaian, dan transfer kompetensi

ke praktik (Brandsæter & Madsen, 2024; Harrington et al., 2025).

Dalam konteks kepulauan Indonesia, WIG berpotensi mengisi celah kecepatan dan biaya antara feri dan penerbangan berjadwal. Namun, operasi juga menghadapi konveksi tropis, kapal ikan, alat bantu navigasi yang tidak merata, perbedaan kemampuan SAR, dan dukungan teknis yang jauh dari pusat. Karena itu, persetujuan harus berbasis rute dan musim, bukan menyalin tabel awak pabrikaan. Operasi Tipe A yang terbatas sebaiknya menjadi tahap awal sebelum envelope Tipe B atau Tipe C diperluas setelah tersedia data operasi dan simulator.

#### ***Keterbatasan dan Validasi Eksternal***

Validitas internal meningkat karena seluruh komposisi diuji secara eksak dan input dipublikasikan, tetapi penelitian ini belum menetapkan kinerja manusia eksternal. Beban fase-fungsi dan kapasitas kompetensi tetap berupa engineering values yang transparan, bukan koefisien hasil pengukuran armada WIG yang matang. Distribusi ketidakpastian menguji ketahanan terhadap variasi yang masuk akal, bukan membuktikan bahwa distribusi tersebut mewakili seluruh wahana, rute, atau operator.

Validasi eksternal perlu dilakukan dalam dua tahap. Pertama, panel Delphi yang terdiri atas desainer WIG, test pilot, master mariner, spesialis human factors, regulator, dan personel SAR menilai fungsi, anchor beban, matriks kompetensi, dan logika skenario menggunakan kriteria konsensus yang ditetapkan sebelumnya (Beiderbeck et al., 2021; Diamond et al., 2014). Kedua, eksperimen human-in-the-loop yang counterbalanced membandingkan tim terpilih dan tim yang dikurangi pada transition failure, propulsion fault, pilot incapacitation, navigation saturation, hard alighting, dan evakuasi. Ukuran objektif mencakup trajectory deviation, response time, missed alerts, communication accuracy, checklist completion, dan recovery success; NASA-TLX, situation-awareness probes, serta physiological measures digunakan sebagai pelengkap (Wulvik et al., 2020; Žagar et al., 2020; Yan et al., 2022).

Batas tersebut tidak membatalkan kontribusi komputasional. Klaim penelitian dibatasi pada hal yang benar-benar ditunjukkan: tim terpilih adalah komposisi terkecil yang memenuhi model yang dipublikasikan, cadangan robust, survival screen, dan validasi stokastik internal. Angka tersebut merupakan kandidat untuk pengujian eksternal, bukan minimum legal.

#### **4. Simpulan**

Penelitian ini merekonstruksi pengawakan aman WIG sebagai masalah alokasi tugas spesifik fase yang dibatasi kompetensi dan memvalidasi secara internal komposisi awak melalui enumerasi eksak, uji max-flow/min-cut, cadangan rekayasa 20%, penghapusan peran, dan simulasi stokastik jaringan tugas. Hasil model menghapus asumsi bahwa dua awak teknis secara umum memadai untuk misi WIG terbatas. Komposisi inti robust adalah tiga orang untuk skenario Tipe A terbatas, empat orang untuk layanan penumpang Tipe A pesisir, lima orang untuk operasi Tipe B yang menuntut, dan enam orang untuk operasi Tipe C terpencil. Tim terpilih mencapai sedikitnya 99,99% kelayakan pada 10.000 percobaan, sedangkan tim yang dikurangi satu orang hanya mencapai 12,61%-70,57%. Transisi mendominasi kegagalan skenario sederhana, sementara keadaan darurat mendominasi operasi Tipe B dan Tipe C. Implikasi utamanya adalah bahwa beban jelajah rata-rata, ukuran wahana, jumlah penumpang, dan tingkat otomatisasi tidak cukup untuk menjadi proksi pengawakan. Persetujuan harus membuktikan cakupan fungsi simultan, independent monitoring dan takeover, pengelolaan gangguan teknis, kontrol kelelahan, serta survival setelah satu awak kehilangan kemampuan. Angka hasil penelitian tetap merupakan baseline rekayasa tervalidasi internal dan wajib dikalibrasi melalui expert review, simulator human-in-the-loop, drill di wahana, dan bukti evakuasi sebelum diadopsi regulator.

#### **Ucapan Terima Kasih**

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Pelayaran Malahayati atas dukungan kelembagaan dalam pengembangan kajian ini. Penelitian tidak menerima pendanaan eksternal dan tidak mengklaim penggunaan data peserta manusia pada tahap validasi internal.

#### **Daftar Pustaka**

- Ahvenjärvi, S. (2016). The human element in autonomous shipping. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(4), 78. <https://doi.org/10.3390/jmse4040078>
- Alapetite, A., & Kozine, I. (2017). Safe manning of merchant ships: An approach and computer tool. *Maritime Policy & Management*, 44(3), 323-335. <https://doi.org/10.1080/03088839.2016.1276305>
- Aminzadeh, A., & Khayatian, A. (2017). Stability analysis for time-varying WIG craft dynamics

- in the presence of wavy boundary and gust. *Ocean Engineering*, 145, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.08.031>
- Beiderbeck, D., Frevel, N., von der Gracht, H. A., Schmidt, S. L., & Schweitzer, V. M. (2021). Preparing, conducting, and analyzing Delphi surveys: Cross-disciplinary practices, new directions, and advancements. *MethodsX*, 8, 101401. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101401>
- Brandsæter, A., & Madsen, A. (2024). A simulator-based approach for testing and assessing human supervised autonomous ship navigation. *Journal of Marine Science and Technology*, 29, 432-445. <https://doi.org/10.1007/s00773-024-00998-1>
- Chun, H. H., & Chang, C. H. (2002). Longitudinal stability and dynamic motions of a small passenger WIG craft. *Ocean Engineering*, 29(10), 1145-1162. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(01\)00098-1](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(01)00098-1)
- de Divitiis, N. (2005). Performance and stability of a winged vehicle in ground effect. *Journal of Aircraft*, 42(1), 148-157. <https://doi.org/10.2514/1.4830>
- Diamond, I. R., Grant, R. C., Feldman, B. M., Pencharz, P. B., Ling, S. C., Moore, A. M., & Wales, P. W. (2014). Defining consensus: A systematic review recommends methodologic criteria for reporting of Delphi studies. *Journal of Clinical Epidemiology*, 67(4), 401-409. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2013.12.002>
- Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 37(1), 32-64. <https://doi.org/10.1518/001872095779049543>
- Endsley, M. R. (2021). A systematic review and meta-analysis of direct objective measures of situation awareness: A comparison of SAGAT and SPAM. *Human Factors*, 63(1), 124-150.
- Felski, A., & Zwolak, K. (2020). The ocean-going autonomous ship: Challenges and threats. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 41. <https://doi.org/10.3390/jmse8010041>
- Harrington, S., Sellberg, C., & Lindwall, O. (2025). Crafting congruence: Towards systematic scenario design in maritime simulator training and assessment. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 24, 157-178. <https://doi.org/10.1007/s13437-024-00356-3>
- International Labour Organization. (2022). *Maritime Labour Convention, 2006, as amended*. ILO.
- International Maritime Organization. (2002). *Interim guidelines for wing-in-ground craft (MSC/Circ.1054)*. IMO.
- International Maritime Organization. (2005). *General principles and recommendations for knowledge, skills and training for officers on wing-in-ground craft (MSC/Circ.1162)*. IMO.
- International Maritime Organization. (2011). *Principles of minimum safe manning (Resolution A.1047(27))*. IMO.
- International Maritime Organization. (2018). *Revised guidelines for wing-in-ground craft (MSC.1/Circ.1592)*. IMO.
- International Maritime Organization. (2020). *International Code of Safety for High-Speed Craft, 2000: 2020 edition*. IMO.
- International Maritime Organization. (2022). *STCW including 2010 Manila amendments: STCW Convention and STCW Code*. IMO.
- Jia, Q., Yang, W., & Yang, Z. (2016). Numerical study on aerodynamics of banked wing in ground effect. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 8(2), 209-217. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2016.03.001>
- Karpuk, S. (2024). Constraint analysis methodology for ground-effect vehicle conceptual design. *Ocean Engineering*, 308, 118252. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118252>
- Kooij, C., & Hekkenberg, R. G. (2021). The effect of autonomous systems on the crew size of ships: A case study. *Maritime Policy & Management*, 48(6), 860-876. <https://doi.org/10.1080/03088839.2020.1805645>
- Lochner, M., Duenser, A., Lutzhoft, M., Brooks, B., & Rozado, D. (2018). Analysis of maritime team workload and communication dynamics in standard and emergency scenarios. *Journal of Shipping and Trade*, 3, 2. <https://doi.org/10.1186/s41072-018-0028-z>
- Man, Y., Lundh, M., Porathe, T., & MacKinnon, S. N. (2015). From desk to field: Human factor issues in remote monitoring and controlling of autonomous unmanned vessels. *Procedia Manufacturing*, 3, 2674-2681. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.635>
- Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A*, 30(3), 286-297. <https://doi.org/10.1109/3468.844354>

- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 13(3), 257-266. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1983.6313160>
- Rozhdestvensky, K. V. (2006). Wing-in-ground effect vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 42(3), 211-283. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2006.10.001>
- Salas, E., Wilson, K. A., Burke, C. S., & Wightman, D. C. (2006). Does crew resource management training work? An update, an extension, and some critical needs. *Human Factors*, 48(2), 392-412. <https://doi.org/10.1518/001872006777724444>
- Wang, L., Yang, K., Yue, T., & Liu, H. (2022). Wing-in-ground craft longitudinal modeling and simulation based on a moving wavy ground test. *Aerospace Science and Technology*, 126, 107605. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107605>
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(2), 159-177. <https://doi.org/10.1080/14639220210123806>
- Wróbel, K., Montewka, J., & Kujala, P. (2017). Towards the assessment of potential impact of unmanned vessels on maritime transportation safety. *Reliability Engineering & System Safety*, 165, 155-169. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.03.029>
- Wulvik, A. S., Dybvik, H., & Steinert, M. (2020). Investigating the relationship between mental state (workload and affect) and physiology in a control room setting (ship bridge simulator). *Cognition, Technology & Work*, 22, 95-108. <https://doi.org/10.1007/s10111-019-00553-8>
- Xie, J., Song, L., Huang, J., & Fu, J. (2022). Parameter study on lateral moments of banked wings in ground effect. *Chinese Journal of Aeronautics*, 35(3), 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.03.024>
- Yan, S., Wei, Y., Li, F., & Tran, C. C. (2022). Develop a comprehensive method to evaluate the mental workload of ship operators. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(8), 1133. <https://doi.org/10.3390/jmse10081133>
- Yoshida, M., Shimizu, E., Sugomori, M., & Umeda, A. (2021). Identification of the relationship between maritime autonomous surface ships and the operator's mental workload. *Applied Sciences*, 11(5), 2331. <https://doi.org/10.3390/app11052331>
- Žagar, D., Svetina, M., Košir, A., & Dimc, F. (2020). Human factor in navigation: Overview of cognitive load measurement during simulated navigational tasks. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(10), 775. <https://doi.org/10.3390/jmse8100775>