

KONSEPTUALISASI WING-IN-GROUND CRAFT SEBAGAI SISTEM TRANSPORTASI HIBRIDA: TINJAUAN SISTEMATIS ATAS KESELAMATAN, OPERASI, DAN KESIAPAN SERTIFIKASI

CONCEPTUALIZING WING-IN-GROUND CRAFT AS A HYBRID TRANSPORT SYSTEM: A SYSTEMATIC REVIEW OF SAFETY, OPERATIONS, AND CERTIFICATION READINESS

Andi Fiardi¹, Afandi Sahputra^{1*}, Hasan Sadili², Antoni Arif Priadi²

¹Program Studi Permesinan Kapal, Politeknik Pelayaran Malahayati, Aceh Besar, Indonesia

²Program Studi Sistem Kelistrikan Kapal, Politeknik Pelayaran Malahayati, Aceh Besar, Indonesia

³Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, Jakarta, Indonesia

*email: afandi_sahputra@poltekpelaceh.ac.id

ABSTRAK

Kajian ini menelaah perkembangan diskusi ilmiah tentang wing-in-ground (WIG) craft sebagai sistem moda transportasi hibrida yang menjembatani domain penerbangan dan maritim. Dengan menggunakan pendekatan systematic literature review, artikel ini mensintesis literatur mutakhir mengenai konseptualisasi WIG, karakteristik keselamatan, performa operasional, tata kelola sertifikasi, serta kesiapan kompetensi operator. Hasil kajian menunjukkan bahwa WIG memiliki potensi penting sebagai moda mobilitas pesisir dan kepulauan karena mampu memanfaatkan ground effect untuk meningkatkan efisiensi aerodinamika, mengurangi hambatan, dan memperluas akses pada wilayah yang terbatas infrastruktur. Namun, pemanfaatannya masih dibatasi oleh fragmentasi regulasi, bukti empiris operasional yang terbatas, serta belum matangnya kerangka pelatihan lintas-domain. Sintesis ini menegaskan bahwa kesiapan teknologi WIG harus dikembangkan bersamaan dengan kesiapan manusia, standar sertifikasi, sistem pelatihan berbasis kompetensi, serta harmonisasi tata kelola transportasi udara dan laut. Temuan ini memberikan dasar konseptual bagi pengembangan kebijakan, riset lanjutan, dan eksperimen operasional yang aman untuk penerapan WIG di sektor sipil maupun pertahanan.

Kata kunci: Kompetensi Operator, Sertifikasi Keselamatan, Moda Transportasi Hibrida, Transportasi Maritim, *Wing-In-Ground Craft*

ABSTRACT

This systematic literature review examines wing-in-ground (WIG) craft as a hybrid transport system bridging aviation and maritime domains. It synthesizes recent literature on WIG conceptualization, safety characteristics, operational performance, certification governance, and operator competence readiness. The findings indicate that WIG craft offer considerable potential for coastal and archipelagic mobility by exploiting ground effect to improve aerodynamic efficiency, reduce drag, and support operations in infrastructure-limited regions. Nevertheless, practical deployment remains constrained by fragmented regulatory regimes, limited operational validation, and underdeveloped cross-domain training and certification frameworks. The review argues that WIG technological readiness must be aligned with human readiness, competency-based training, integrated certification pathways, and harmonized air-sea governance. These findings provide a conceptual foundation for future policy development, research agendas, and controlled operational experimentation for safe WIG deployment in civil and defense contexts.

Keywords: Hybrid Transport, Operator Competence, Safety Certification, Maritime Transport, *Wing-In-Ground Craft*

1. Pendahuluan

Wing-In-Ground (WIG) craft kembali memperoleh perhatian dalam literatur transportasi karena menawarkan bentuk mobilitas yang tidak sepenuhnya dapat dikategorikan sebagai pesawat udara maupun kapal laut. Moda transportasi ini beroperasi pada zona *ground effect*, yaitu ruang sangat dekat dengan permukaan air tempat gaya angkat meningkat dan hambatan aerodinamika menurun. Karakteristik tersebut menempatkan WIG sebagai moda transportasi hibrida udara-laut yang memadukan prinsip aerodinamika, navigasi maritim, operasi pesisir, serta kebutuhan keselamatan yang khas (Joiner & Swidan, 2023).

Nilai strategis WIG terletak pada kemampuannya mengisi celah antara kecepatan transportasi udara dan fleksibilitas transportasi laut. Pada konteks kepulauan, pesisir, logistik darurat, dan mobilitas lintas pulau, WIG berpotensi memberikan akses cepat tanpa ketergantungan penuh pada bandar udara atau pelabuhan. Literatur juga menempatkan WIG sebagai platform yang relevan untuk misi pencarian dan pertolongan, respons bencana, mobilitas regional, pengawasan pesisir, serta dukungan operasi pertahanan di wilayah teritorial (Joiner & Swidan, 2023; Bradford, 2022; Ahmed et al., 2023).

Namun, potensi tersebut tidak serta-merta menghasilkan kesiapan implementasi. Operasi dekat permukaan air menghadirkan risiko khusus, antara lain perubahan *sea state*, gangguan gelombang, keterbatasan margin ketinggian, risiko tubrukan dengan lalu lintas maritim, dan kompleksitas transisi antara moda udara dan permukaan. Dengan demikian, pembahasan WIG tidak cukup hanya menekankan efisiensi aerodinamika, tetapi juga harus mengaitkannya dengan keselamatan, regulasi, kompetensi manusia, dan tata kelola operasional (Fenton & Chapsos, 2023; Humphries et al., 2022; Vio & Brdar, 2022).

Literatur mutakhir menunjukkan pergeseran fokus dari desain teknis menuju konsep operasi, otomasi, sertifikasi, dan kesiapan manusia. Perkembangan serupa terjadi pada urban air mobility, unmanned aerial systems, dan maritime autonomous surface ships, yaitu bidang-bidang yang menuntut integrasi antara teknologi, regulasi, dan kompetensi operator (Mishra & Palanisamy, 2023; Takács & Haidegger, 2022; Mazur et al., 2022; Yan et al., 2024). Dalam konteks WIG, isu ini lebih kompleks karena batas domain penerbangan dan maritim tidak selalu jelas.

Tujuan penelitian ini adalah menyintesis literatur ilmiah mengenai WIG sebagai sistem transportasi hibrida, dengan fokus pada konseptualisasi, keunggulan keselamatan dan operasional, tantangan sertifikasi, serta implikasi kompetensi awak atau operator. Pertanyaan utama yang dijawab ialah: bagaimana WIG dikonseptualisasikan sebagai kategori hibrida antara transportasi udara dan laut, dan apa implikasi hibriditas tersebut terhadap keselamatan, operasi, tata kelola, serta kesiapan sertifikasi.

2. Metode Penelitian

2.1 Strategi Pencarian

Kajian ini menggunakan desain *systematic literature review* untuk menghimpun dan menyintesis bukti ilmiah tentang WIG, keselamatan operasional, otomasi, regulasi, serta kompetensi operator. Strategi pencarian disusun untuk menangkap literatur lintas disiplin karena isu WIG tersebar pada bidang rekayasa, transportasi, kebijakan maritim, penerbangan, dan *human factors*.

Scopus digunakan sebagai basis data utama karena cakupannya kuat pada literatur teknik dan transportasi. Kata kunci inti mencakup “*wing-in-ground*”, “*wing-in-ground-effect*”, “*WIG craft*”, “*ground-effect vehicle*”, dan “*ekranoplan*”. Kata kunci tersebut dikombinasikan dengan istilah yang berkaitan dengan “*safety*”, “*risk*”, “*control*”, “*stability*”, “*autonomous*”, “*regulation*”, “*airworthiness*”, “*certification*”, “*training*”, “*operator qualification*”, dan “*competence*”. Konsep penghubung seperti “*air-sea*”, “*hybrid transport*”, “*multi-medium*”, “*UAM*”, “*UTM*”, “*MASS*”, dan “*civil-military*” juga digunakan untuk menangkap literatur yang relevan dari domain berdekatan (Fenton & Chapsos, 2023; Mishra & Palanisamy, 2023; Takács & Haidegger, 2022; Mazur et al., 2022; Yan et al., 2024).

2.2 Kriteria Kelayakan

Artikel dimasukkan apabila membahas WIG atau platform *near-surface* yang sejenis; membahas keselamatan, stabilitas, kendali, navigasi, regulasi, sertifikasi, pelatihan, peran manusia, atau penerapan operasional; atau menyediakan wawasan yang dapat ditransfer dari domain otonomi udara, kapal otonom, atau moda transportasi hibrida. Pendekatan ini diperlukan karena literatur yang secara eksplisit membahas sertifikasi awak WIG masih terbatas.

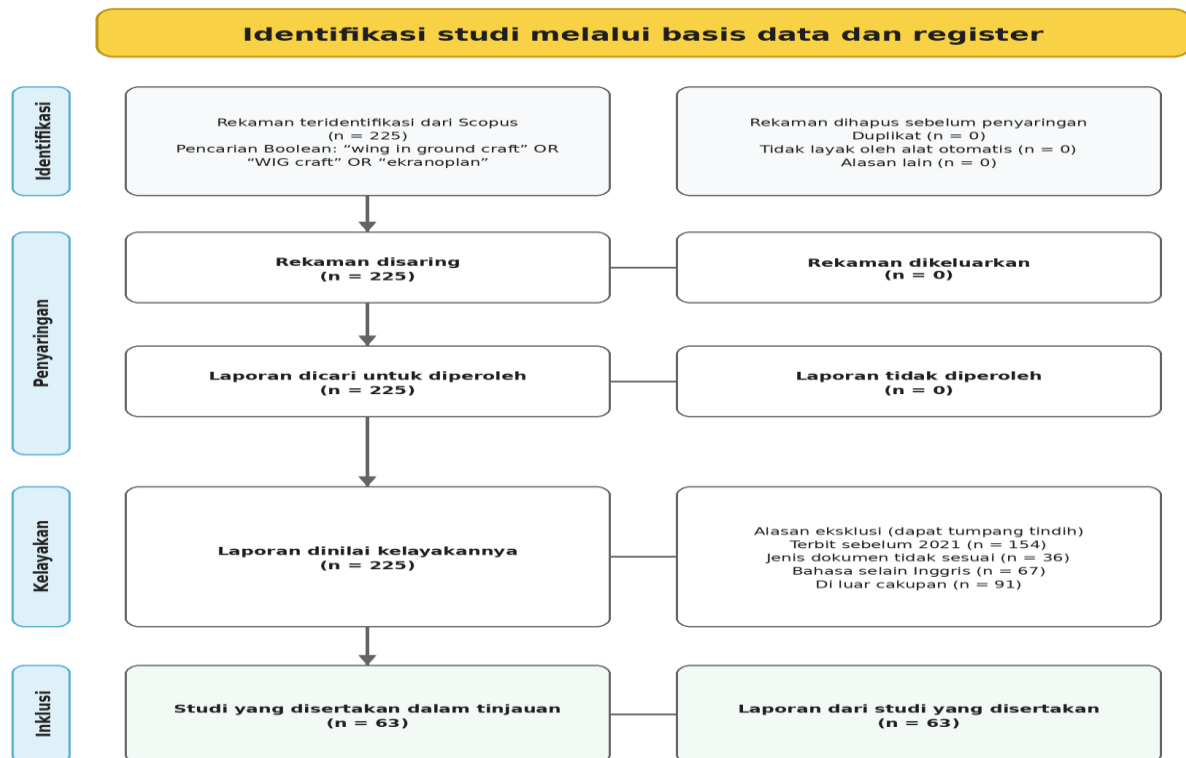
Artikel dikeluarkan apabila tidak memiliki kaitan dengan mobilitas hibrida atau *near-surface*,

tidak relevan terhadap kesiapan operasional, atau tidak menyediakan informasi yang dapat ditelusuri mengenai keselamatan, tata kelola, sertifikasi, atau kompetensi. Materi promosi, komentar spekulatif tanpa metode, dan sumber tanpa jejak bibliografis yang memadai tidak dipertahankan.

2.3 Proses Seleksi

Proses seleksi dilakukan melalui tahap identifikasi, penyaringan judul dan abstrak,

penilaian kelayakan, dan inklusi akhir. Pada tahap awal, 225 catatan dari Scopus diperiksa untuk memastikan kesesuaian ruang lingkup, duplikasi, dan jenis dokumen. Penyaringan tidak hanya bergantung pada kemunculan istilah “*crew certification*” atau “*operator competence*”, sebab banyak studi relevan membahas konsep terkait seperti *airworthiness*, *safety management*, *human-machine supervision*, dan *operational approval*.



Gambar 1. Diagram PRISMA yang Menjelaskan Proses Penyaringan dan Seleksi Literatur.

Proses seleksi artikel dalam kajian ini dilakukan dengan mengacu pada alur PRISMA pada Gambar 1 untuk memastikan bahwa artikel yang digunakan relevan, mutakhir, dan sesuai dengan fokus penelitian. Pada tahap identifikasi, pencarian literatur dilakukan melalui basis data Scopus dengan menggunakan kombinasi kata kunci Boolean, yaitu “*wing in ground Craft*” OR “*WIG craft*” OR “*ekranoplan*”. Dari proses pencarian tersebut diperoleh sebanyak 225 artikel awal. Pada tahap ini tidak terdapat artikel duplikat yang dihapus, tidak ada artikel yang dinyatakan tidak memenuhi syarat oleh alat otomatis, dan tidak ada artikel yang dikeluarkan karena alasan lain. Dengan demikian, seluruh 225 artikel dilanjutkan ke tahap penyaringan.

Pada tahap penyaringan, sebanyak 225 artikel diperiksa berdasarkan judul, abstrak, dan kesesuaiannya dengan ruang lingkup kajian. Tidak ada artikel yang dikeluarkan pada penyaringan

awal, sehingga seluruh artikel tersebut dilanjutkan ke tahap pencarian dokumen lengkap. Seluruh 225 artikel berhasil diperoleh dan tidak terdapat laporan yang gagal diakses. Selanjutnya, artikel-artikel tersebut dinilai kelayakannya berdasarkan beberapa kriteria eksklusi, yaitu tahun publikasi, jenis dokumen, bahasa, dan kesesuaian topik dengan fokus penelitian. Hasil penilaian menunjukkan bahwa 154 artikel dikeluarkan karena terbit sebelum tahun 2021, 36 artikel dikeluarkan berdasarkan jenis dokumen, 67 artikel dikeluarkan karena tidak berbahasa Inggris, dan 91 artikel dikeluarkan karena berada di luar cakupan kajian.

Setelah proses seleksi kelayakan selesai, sebanyak 63 artikel dinyatakan memenuhi kriteria inklusi dan digunakan sebagai sumber utama dalam kajian sistematis ini. Artikel-artikel tersebut dianggap relevan karena membahas aspek-aspek yang berkaitan dengan *wing-in-ground craft*,

termasuk konsep hibrida antara transportasi udara dan laut, keselamatan operasi, sistem kendali, kesiapan regulasi, sertifikasi, serta kompetensi operator. Dengan demikian, proses seleksi ini memastikan bahwa literatur yang dianalisis memiliki keterkaitan langsung dengan tujuan penelitian dan mendukung pembahasan mengenai pengembangan WIG sebagai moda transportasi hibrida yang membutuhkan pendekatan teknis, operasional, dan regulatif secara terpadu.

2.4 Penilaian Kualitas dan Sintesis

Karena literatur yang ditinjau bersifat heterogen, sintesis dilakukan secara naratif, bukan meta-analisis. Untuk studi rekayasa, penilaian kualitas menekankan kejelasan asumsi, transparansi metode, logika validasi, dan keteralihan operasional. Untuk studi regulasi dan tata kelola, penilaian difokuskan pada kejelasan konteks hukum atau kelembagaan, ketelitian

analisis, dan relevansi terhadap sertifikasi hibrida. Untuk studi human factors, penilaian menekankan implikasi kompetensi, realisme konteks operasi, dan relevansi terhadap pengambilan keputusan keselamatan.

Literatur kemudian dikodekan ke dalam empat klaster tematik: dinamika keselamatan dan karakteristik handling, sistem kendali dan otomasi, kesiapan regulasi dan jalur sertifikasi, serta implikasi kompetensi berbasis misi. Bukti teknis tidak diperlakukan sebagai informasi performa yang berdiri sendiri, tetapi diterjemahkan ke dalam implikasi envelope operasi, beban pelatihan, kontrol risiko, dan kebutuhan tata kelola.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Landasan Teoretis

The Synergy of Dynamics and Competence in WIG Safety



Gambar 2. Arsitektur Teoretis Penerapan WIG: Integrasi Sosio-teknis antara Dinamika Transportasi, Kompetensi Manusia, Otomasi, dan Tata Kelola Lintas-Domain.

Pemahaman tentang sertifikasi dan kompetensi awak WIG memerlukan kerangka teoretis majemuk. Pertama, teori sistem sosio-teknis menempatkan keselamatan sebagai hasil interaksi antara artefak teknis, operator manusia, aturan kelembagaan, dan lingkungan operasi. Dalam konteks WIG, kelayakan platform tidak hanya ditentukan oleh ground effect, melainkan juga oleh keselarasan pelatihan, prosedur udara-laut, sistem pengawasan, dan infrastruktur pesisir (Brugnara et al., 2022; York et al., 2021; Humphries et al., 2022).

Kedua, pendekatan *competency-based training* relevan karena kualifikasi WIG tidak dapat direduksi menjadi lisensi pilot atau kecakapan pelaut saja. Operator WIG perlu memahami penerbangan ketinggian rendah di atas air, navigasi maritim, manajemen risiko gelombang, komunikasi lintas-domain, serta transisi antara operasi udara dan permukaan. Oleh karena itu, asesmen kompetensi perlu berbasis kinerja,

skenario, dan kemampuan mengambil keputusan dalam situasi dinamis.

Ketiga, teori *human factors* menjelaskan bahwa operasi WIG menghadirkan beban kognitif yang khas: persepsi ketinggian yang terkompresi, perubahan sea state, kepadatan lalu lintas pesisir, potensi kelelahan, dan kebutuhan koordinasi tim. Keselamatan tidak hanya ditentukan oleh kepatuhan prosedural, tetapi juga oleh kemampuan operator beradaptasi ketika kondisi aktual tidak sepenuhnya sesuai asumsi desain (Chowdhury et al., 2024; White et al., 2021).

Keempat, teori *safety governance* dan *regulation-as-practice* membantu menjelaskan mengapa sertifikasi WIG menjadi tantangan kelembagaan. WIG berada pada batas antara standar penerbangan dan maritim, sementara perkembangan otomasi menambah isu tanggung jawab, verifikasi algoritma, dan pembagian otoritas manusia-mesin. Sertifikasi dalam konteks ini bukan hanya proses verifikasi teknis, tetapi

mekanisme tata kelola untuk menetapkan risiko yang dapat diterima, menetapkan akuntabilitas, dan membangun legitimasi operasional (Fenton & Chapsos, 2023; Borson & Xu, 2022; Currie et al., 2025; Evans & Silbey, 2021).

Secara historis, riset WIG bergerak dari eksplorasi aerodinamika menuju pembahasan kesiapan operasi. Fase awal menekankan stabilitas, lift, drag, dan interaksi permukaan. Fase berikutnya mengembangkan desain hibrida, integrasi lambung-sayap, propulsi, dan kemungkinan operasi multi-medium. Fase mutakhir mulai membahas otomasi, konsep operasi, kesiapan infrastruktur, dan harmonisasi regulasi, sejalan dengan perkembangan pada UAM dan MASS (Mishra & Palanisamy, 2023; Takács & Haidegger, 2022; Mazur et al., 2022; Yan et al., 2024; Humphries et al., 2022).

Perdebatan utama dalam literatur berkisar pada tiga isu. Pertama, apakah WIG harus diatur melalui regulasi penerbangan, regulasi pelayaran, atau regulasi hibrida. Kedua, apakah otomasi mengurangi kebutuhan kompetensi manusia atau justru mengubahnya menjadi kompetensi supervisi. Ketiga, apakah sertifikasi perlu berbasis jenis moda transportasi, profil misi, atau tingkat risiko. Sintesis artikel ini menunjukkan bahwa

The Synergy of Automation and Human Expertise in WIG Control



Gambar 3. Lingkungan *Handling* Kritis-Keselamatan pada Wig: Variasi Stabilitas, Gangguan Gelombang, Kendali Ketinggian, dan Dinamika Masuk Air.

Klaster kedua berkaitan dengan pengaturan ketinggian dan sikap moda transportasi pada ruang operasi yang margin keselamatannya kecil. Studi kendali menunjukkan bahwa *overshoot*, *undershoot*, dan keterlambatan pemulihan dapat meningkatkan risiko kontak dengan permukaan air. Implikasinya, operator harus memahami *envelope protection*, logika kendali otomatis, dan ambang intervensi, bukan hanya mampu mempertahankan ketinggian secara manual.

Klaster ketiga menekankan bahwa asumsi permukaan air yang datar tidak cukup untuk operasi nyata. Gelombang mengubah koefisien aerodinamika, memengaruhi lift dan drag, serta

pendekatan hibrida, berlapis, dan berbasis misi merupakan jalur yang paling masuk akal.

3.2 Dinamika Penerbangan Kritis, Keselamatan, dan Karakteristik *Handling*

Temuan pada Tabel 1 menunjukkan bahwa kompetensi operator WIG berakar pada lingkungan dinamika *near-surface* yang berbeda dari pesawat dan kapal konvensional. Empat arus bukti mendominasi: stabilitas inheren, kendali ketinggian dan sikap moda transportasi, gangguan aerodinamika akibat gelombang, serta keselamatan saat pendaratan di air atau *ditching*. Pola ini memperlihatkan bahwa kompetensi bukan variabel manusia yang berdiri sendiri, melainkan hasil interaksi antara operator, konfigurasi moda transportasi, logika kendali, dan antarmuka air-udara.

Klaster pertama memperlihatkan bahwa margin stabilitas WIG tidak konstan sepanjang proses operasi. Kombinasi kecepatan, ketinggian, dan konfigurasi dapat mengubah perilaku longitudinal, sehingga sertifikasi tidak dapat mengasumsikan semua WIG memiliki karakter *handling* yang sama. Dengan demikian, kualifikasi perlu mempertimbangkan tipe moda transportasi, pengaruh *ground effect*, dan dukungan stabilisasi.

meningkatkan beban koreksi. Oleh karena itu, kompetensi WIG memerlukan *sea-state judgment*, *anticipatory control*, serta keputusan *go* atau *no-go* berdasarkan kondisi lingkungan.

Klaster keempat menyoroti fase pendaratan dan kondisi darurat. *Vertical velocity*, *pitch*, dan *slamming load* menentukan keselamatan struktur dan penumpang ketika moda transportasi memasuki air. Karena pendaratan di air merupakan transisi lintas media, pelatihan perlu memasukkan memahami prosedur *touchdown*, manajemen energi, *fault response*, dan prosedur abnormal secara eksplisit.

Tabel 1. Bukti Keselamatan dan Handling yang Relevan dengan Kompetensi Operator WIG

Referensi	Konfigurasi / Jenis transportasi	WIG moda	Fase operasi yang dikaji	Isu dinamika kritis-keselamatan	Implikasi kendali / penanganan	Kebutuhan kompetensi ditunjukkan	Keterbatasan studi / catatan yang transferabilitas
Su et al. (2022a)	WIG dasar dengan <i>high-aspect-ratio</i>	AeroWIG	Jelajah <i>ground-effect</i> berkecepatan tinggi	Kompresibilitas mengubah stabilitas longitudinal inheren dan perilaku modal pada jarak bebas serta bilangan Mach yang berbeda	Kualitas penanganan dapat berubah secara substansial kombinasi kecepatan dan ketinggian; stabilitas tidak diasumsikan konstan di seluruh <i>operational envelope</i>	Operator harus memahami hubungan stabilitas kecepatan–ketinggian dan mengenali rezim penerbangan yang tidak stabil selama operasi berkecepatan tinggi	Studi stabilitas numerik; implikasi kompetensi bersifat langsung, bukan bukti langsung mengenai kinerja manusia
Hu et al. (2021a)	<i>Airfoil</i> NACA 4412 di dekat permukaan air bergelombang		Jelajah ketinggian rendah di atas gelombang	Permukaan air bergelombang mengubah koefisien aerodinamika dibandingkan asumsi permukaan kaku; efek Reynolds dan Froude berpengaruh	Lingkungan bergelombang dapat menghasilkan fluktuasi respons <i>lift/drag</i> yang memerlukan koreksi berkelanjutan	Operator memerlukan kemampuan antisipasi gangguan dan kompensasi yang kuat dalam penerbangan ketinggian rendah yang dipengaruhi gelombang	Analisis pada tingkat <i>airfoil</i> , bukan studi operasional wahana secara utuh
Nebylov et al. (2021)	Model dinamis ekranoplan/WIG di bawah beban aerodinamika besar		Operasi ketinggian rendah di atas permukaan bawah yang tidak rata	Beban periodik dan impulsif, perubahan kemampuan kendali, serta potensi kehilangan stabilitas di dekat permukaan	Otoritas kendali dan respons wahana dapat berubah secara mendadak akibat variasi ketinggian yang kecil	Kompetensi awak harus mencakup pengenalan kondisi <i>upset</i> , pertimbangan pemulihan, dan pengelolaan perubahan kemampuan kendali yang berlangsung cepat	Studi berfokus pada model; tidak menguji kinerja pilot secara empiris
Mei et al. (2022)	WIG kecil dengan konfigurasi kendali ketinggian berbasis PID		Pengaturan ketinggian pada penerbangan terganggu	Gangguan ketinggian dapat menyebabkan <i>overshoot</i> , <i>undershoot</i> , dan perilaku pemulihan yang tidak aman	Kendali gabungan <i>throttle-elevator-flap</i> memberikan presisi pemulihan terbaik dan mengurangi deviasi	Operator/pengawas harus memahami logika kendali ketinggian dan melakukan intervensi tepat ketika deviasi ketinggian muncul	Berorientasi simulasi dan lebih berfokus pada kinerja kendali daripada pelatihan operasional
Gao et al. (2021)	WIG yang diuji di dekat permukaan halus dan bergelombang menggunakan simulasi terowongan angin		Penerbangan dekat permukaan air tenang dan bergelombang	Permukaan bergelombang secara nyata memengaruhi respons aerodinamika pada berbagai gelombang	Penanganan pada kondisi laut nyata bervariasi dibandingkan asumsi permukaan datar	Operator memerlukan sensitivitas kendali yang bergantung pada situasi dan penilaian penerbangan berbasis kondisi laut	Bukti dari terowongan angin meningkatkan realisme, tetapi masih bersifat praoperasional
Patria et al. (2021)	Kendaraan otonom	WIG	Berbagai skenario jelajah/kendali	Kurangnya teori kendali yang kuat untuk operasi aman pada berbagai fase jelajah	Operasi yang aman bergantung pada kekokohan kendali dalam variasi skenario	Kompetensi bergeser dari pengemudian manual menuju pemantauan sistem terhadap anomali, dan supervisi	Berfokus pada kendali otonom; kompetensi awak disimpulkan, bukan diukur secara langsung

Referensi	Konfigurasi / Jenis transportasi	WIG moda	Fase operasi yang dikaji	Isu dinamika kritis-keselamatan	Implikasi kendali / penanganan	Kebutuhan kompetensi ditunjukkan	Keterbatasan studi / yang catatan transferabilitas
Zhang et al. (2023a)	WIG banyak gangguan/kegagalan	dengan	Pendaratan darurat di air / pendaratan paksa	Beban benturan air selama <i>ditching</i> dapat merusak struktur/peralatan dan mengancam keselamatan penumpang; beberapa kegagalan simultan memperumit kendali	Kecepatan vertikal harus dikelola dalam kondisi terdegradasi; <i>path-following</i> konvensional tidak memadai	Operator memerlukan kompetensi manajemen energi darurat dan respons terhadap kegagalan, atau keterampilan supervisi yang setara pada sistem otomatis	Menekankan solusi kendali berbasis DRL; validasi darurat di dunia nyata masih terbatas
Zhang et al. (2023b)	WIG pendaratan di air	selama	Fase <i>flare</i> pendaratan / masuk air longitudinal	Kecepatan vertikal yang berlebihan dan yang tidak meningkatkan beban <i>slamming</i> saat pendaratan	Kendali longitudinal sangat penting untuk mengurangi tingkat keparahan benturan saat <i>touchdown</i>	Kompetensi harus mencakup pengelolaan wahana saat pendaratan di air dan profil <i>touchdown</i> yang aman	Studi kendali pembelajaran berbasis simulasi, bukan studi pelatihan pilot
Wang et al. (2022a)	WIG beroperasi di permukaan laut	yang	Perlindungan <i>envelope</i> pada kecepatan tinggi dan ketinggian rendah	Batasan sudut sikap yang berubah terhadap waktu diperlukan untuk menghindari kontak dengan permukaan tanah/laut	Penanganan yang aman bergantung pada kepatuhan terhadap batas dinamis sikap wahana yang terkait dengan ketinggian penerbangan	Operator harus memahami batas <i>envelope</i> dan logika perlindungan operasi dengan jarak bebas rendah	Memiliki relevansi operasional yang kuat, tetapi implikasi kompetensi tidak diuji secara eksplisit
Wang et al. (2022b)	WIG lingkungan terowongan angin dengan permukaan bergelombang bergerak	dalam	Penerbangan longitudinal dalam lingkungan bergelombang	Aerodinamika longitudinal bergantung pada tinggi gelombang dan laju perubahan tinggi gelombang	Beban penanganan kerja dapat meningkat karena respons dinamis bergantung pada perubahan geometri permukaan laut, bukan hanya ketinggian rata-rata	Operator memerlukan manajemen <i>pitch</i> /ketinggian yang responsif terhadap gelombang dan antisipasi terhadap efek longitudinal sementara	Realisme eksperimental meningkat, tetapi belum dikaitkan dengan bukti langsung tentang beban kerja kokpit
Su et al. (2022b)	Model dasar pada zona <i>ground-effect</i> didominasi <i>ram span</i>	AeroWIG Jelajah yang <i>effect</i> dan transisi antarzona	Jelajah <i>effect</i> dan transisi antarzona	Stabilitas inheren berbeda pada setiap rezim <i>ground-effect</i>	Zona operasi yang berbeda dapat menuntut strategi penanganan dan margin keselamatan yang berbeda	Sertifikasi awak harus mencerminkan pemahaman tentang stabilitas yang bergantung pada rezim dan sensitivitas kendali terkait	Studi numerik; temuan khusus wahana mungkin tidak dapat digeneralisasi ke semua tata letak WIG
Liu et al. (2021)	<i>Airfoil</i> NACA 4412 di dekat air bergelombang dengan amplitudo bervariasi		Operasi ketinggian rendah pada berbagai amplitudo gelombang	Amplitudo gelombang yang lebih besar menyebabkan fluktuasi aerodinamika yang lebih kuat dan mengancam keselamatan penerbangan	Amplitudo kondisi laut yang lebih tinggi kemungkinan meningkatkan frekuensi koreksi dan risiko destabilisasi	Operator memerlukan kompetensi lebih tinggi untuk kondisi laut buruk, termasuk penilaian ambang batas dalam keputusan <i>go/no-go</i>	Berfokus pada <i>airfoil</i> dan bukan studi operasional tingkat misi secara penuh
Prasolov et al. (2025)	Lima konfigurasi <i>screen glider</i> /ekranoplan	konfigurasi	Evaluasi stabilitas dan pengujian prototipe	Stabilitas spasial pada tiga sumbu, kecepatan stabil, dan ketinggian berbeda menurut konfigurasi	Pilihan konfigurasi secara langsung memengaruhi kemampuan kendali dan kemudahan mempertahankan gerak stabil di atas permukaan	Kebutuhan kompetensi bersifat sensitif terhadap konfigurasi; tata letak mungkin memerlukan keterampilan korektif berkelanjutan yang lebih rendah dibandingkan lainnya	Studi desain/pengujian komparatif, tetapi implikasi sertifikasi masih bersifat implisit

Referensi	Konfigurasi / Jenis transportasi	WIG moda	Fase operasi yang dikaji	Isu dinamika kritis-keselamatan	Implikasi kendali / penanganan	Kebutuhan kompetensi ditunjukkan	Keterbatasan studi / yang catatan transferabilitas
Rośkowicz et al. (2025)	Platform hibrida permukaan-udara	WIG	Fase pendaratan di air / benturan air	Dinamika benturan saat masuk air membentuk kemampuan bertahan keselamatan struktural selama pendaratan	Teknik pendaratan dan kendali penurunan sangat penting untuk meminimalkan beban benturan	Operator memerlukan kompetensi dalam profil pendaratan yang aman dan kesadaran terhadap risiko benturan	Berorientasi dalam hidrodinamika/CFD; hubungan dengan penanganan manusia bersifat tidak langsung
Nazarov et al. (2023)	WIG dengan profil <i>airfoil</i> alternatif		Stabilitas longitudinal pada tahap desain	Bentuk <i>airfoil</i> memengaruhi perilaku aerodinamika stabilitas longitudinal	Pilihan desain mengubah tuntutan penanganan inheren yang dibebankan kepada operator	Kerangka sertifikasi mungkin perlu mempertimbangkan kualitas penanganan khusus tipe, bukan asumsi WIG generik	Terutama merupakan artikel desain/stabilitas; tidak ada penilaian operasional langsung
Hunter et al. (2021)	Drone pengawasan maritim WIG		Pendaratan di air / estimasi beban jatuh	Beban <i>slamming</i> saat pendaratan dapat merusak lambung/pelampung apabila diremehkan	Keselamatan pendaratan di air bergantung pada dinamika <i>touchdown</i> yang kompatibel struktural	Operator/pengawas memerlukan kesadaran terhadap parameter pendaratan agar benturan tetap berada dalam batas struktural yang aman	Spesifik pada UAV dan berfokus pada prediksi beban, bukan perilaku penanganan manusia
Wang et al. (2024)	<i>Airfoil</i> WIG yang dioptimalkan untuk kemampuan anti-gelombang		Jelajah di atas gelombang laut	Osilasi <i>lift</i> yang dipicu gelombang menimbulkan risiko keselamatan penerbangan	Desain <i>airfoil</i> anti-gelombang dapat mengurangi beban dan meningkatkan stabilitas penanganan	Tuntutan kompetensi dapat berkurang melalui desain yang lebih aman, tetapi tetap memerlukan keterampilan penilaian kondisi laut	Studi optimasi yang menyimpulkan manfaat operasional tanpa bukti langsung dari pelatihan penerbangan
Hu et al. (2023)	WIG dengan kendali ketinggian berbasis DRL		Penyesuaian ketinggian / penjejakan lintasan	<i>Overshooting</i> selama perubahan ketinggian menurunkan keselamatan kinerja misi	Penekanan langsung meningkatkan margin keselamatan rendah selama transisi ketinggian	Operator pada sistem berbantuan/otomatis harus memahami perilaku kendali ketinggian dan melakukan intervensi ketika <i>overshoot</i> muncul	

3.3 Sistem Kendali, Navigasi, dan Interaksi Manusia-Otomasi

Literatur tentang seperti yang tercantum pada Tabel 2 menunjukkan sistem kendali dan navigasi berdampak pada pergeseran dari kendali konvensional menuju sistem otonom berbasis AI. Peningkatan otomasi memperbaiki stabilitas, efisiensi lintasan, dan respons pada kondisi abnormal, tetapi pada saat yang sama mengubah peran manusia dari pengendali langsung menjadi supervisor, manajer misi, dan pengambil keputusan pada saat anomali.

Pada tingkat otomasi rendah hingga menengah, sistem bantuan kendali membantu mengurangi beban pilot, terutama dalam pengaturan ketinggian, *pitch*, dan pemulihan dari gangguan. Namun, bantuan tersebut tidak menghapus kebutuhan kompetensi, operator tetap harus memahami perilaku sistem, batas otoritas kendali,

dan kondisi ketika bantuan tidak lagi memadai.

Pada tingkat otomasi tinggi, *deep reinforcement learning*, *trajectory planning*, dan sistem persepsi berbasis CNN memperluas fungsi WIG menuju navigasi, penghindaran tubrukan, dan optimasi misi. Implikasi utamanya adalah kebutuhan kompetensi baru: *trust calibration* terhadap AI, interpretasi keluaran algoritmik, pemantauan *false alarm*, dan kesiapan mengambil alih kendali.

Perkembangan multi-agent dan operasi jarak jauh memperluas ruang lingkup sertifikasi dari lisensi pilot tunggal menjadi kualifikasi operator misi. Operator dapat bertanggung jawab atas koordinasi beberapa platform, validasi rute, manajemen komunikasi, dan keputusan pada kondisi jaringan terdegradasi. Dengan demikian, pelatihan WIG perlu menggabungkan simulasi kendali, skenario komunikasi, dan asesmen

interaksi manusia–otomasi.



Gambar 4. Evolusi Peran Operator Wig dari Pengendalian Manual Menuju Supervisi, Navigasi Berbasis Ai, dan Pengawasan Misi Jarak Jauh.

Tabel 2. Literatur Kendali dan Otomasi yang Relevan dengan Sertifikasi dan Desain Peran Operator WIG

Referensi	Teknologi Kendali/Navigasi	Tingkat Otomasi	Peran Manusia	Manfaat Operasional yang Dilaporkan	Implikasi Kompetensi/Pelatihan	Relevansi Regulasi
Nebylov & Nebylov (2021)	Perumusan konseptual masalah navigasi dan kendali penerbangan untuk <i>heavy ekranoplan</i>	Rendah hingga sedang; tantangan sistem dirumuskan, tetapi belum diselesaikan	Pilot/operator manusia tetap menjadi pusat operasi	Mengidentifikasi tugas navigasi dan kendali yang belum terselesaikan untuk WIG generasi berikutnya	Operator memerlukan kompetensi terpadu dalam navigasi ketinggian rendah, panduan, interpretasi kendali, dan manajemen rute	Menyoroti bahwa penerapan WIG skala besar memerlukan standar navigasi/kendali yang eksplisit sebelum sertifikasi operasional
Patria et al. (2021)	Strategi nonlinear kendali untuk kendaraan otonom dalam berbagai skenario jelajah	Tinggi; kendali otonom menjadi fokus utama	Manusia berperan sebagai pengawas dan mengambil keputusan cadangan	Meningkatkan keselamatan operasi otonom dalam skenario penghindaran rintangan dan pemulihan	Pelatihan perlu diperluas dari pengemudian manual menuju supervisi mode, deteksi anomali, dan penentuan waktu intervensi	Menunjukkan bahwa sertifikasi masa depan harus mencakup operasi WIG otonom dan semi-otonom, bukan hanya kendali manual langsung
Mei et al. (2022)	Arsitektur kendali ketinggian presisi tinggi berbasis PID, meliputi kombinasi <i>throttle, elevator, dan flap</i>	Sedang; berupa augmentasi kendali, bukan otonomi penuh	Pilot manusia didukung oleh sistem kendali	Kendali menghasilkan kinerja <i>overshoot, undershoot</i> , dan waktu stabilisasi yang lebih baik selama gangguan ketinggian	TPF Operator memerlukan kompetensi memahami perilaku kendali ketinggian berbantuan dan mengelola interaksi <i>pitch/ketinggian</i>	Relevan untuk sertifikasi sistem pendukung penanganan dan penetapan batas tanggung jawab antara pilot dan sistem
Hu et al. (2023)	<i>Deep reinforcement learning</i> untuk kendali ketinggian tanpa <i>overshooting</i>	Tinggi; penyesuaian ketinggian dilakukan secara otomatis	Manusia mengawasi transisi ketinggian otomatis, bukan mengendalikan seluruh koreksi secara langsung	Penekanan <i>overshoot</i> secara langsung meningkatkan keselamatan pada ketinggian rendah dan kinerja <i>stealth</i>	Pelatihan perlu mencakup interpretasi perilaku kendali berbasis AI, kalibrasi kepercayaan terhadap sistem, dan melakukan <i>override</i>	Memunculkan isu sertifikasi untuk logika kendali berbasis pembelajaran pada operasi kritis keselamatan dengan jarak bebas rendah
Hu et al. (2024)	Perencanaan lintasan DRL multi-objektif untuk navigasi WIG global dan lokal	Tinggi	Manusia menetapkan prioritas/tujuan misi dan memantau lintasan yang direncanakan	Memungkinkan kompromi lintasan antara kebutuhan jelajah, kecepatan, keselamatan bertahan, dan <i>stealth</i>	Operator memerlukan kompetensi dalam penetapan prioritas misi, interpretasi lintasan, dan pengelolaan kompromi perencanaan	Relevan untuk sertifikasi perencanaan misi berbantuan AI dan kewenangan manusia atas logika rute

Referensi	Teknologi Kendali/Navigasi	Tingkat Otomasi	Peran Manusia	Manfaat Operasional yang Dilaporkan	Implikasi Kompetensi/Pelatihan	Relevansi Regulasi
Hu et al. (2026)	Fungsi berbasis <i>reward</i> untuk perencanaan lintasan perubahan ketinggian yang cepat stabil dan berdeviasi rendah	Tinggi	Manusia mengawasi prioritas optimasi dan keluaran sistem	Mengurangi beban <i>tuning</i> sekaligus meningkatkan kualitas transisi yang cepat stabil	Kompetensi bergeser ke arah supervisi tujuan optimasi, validasi transisi otomatis, dan identifikasi deviasi yang tidak aman	Mendukung perlunya kriteria sertifikasi untuk sistem kendali lintasan adaptif tingkat lanjut
Su et al. (2024)	<i>Turning by Yaw Control</i> (TBYC) menggunakan dorong baling-baling bervektor dengan <i>firmware</i> PX4 yang dimodifikasi untuk WIG VTOL	Sedang hingga tinggi; algoritma kendali baru dengan interaksi pilot/sistem	Operator/pilot manusia menggunakan hukum kendali baru, berpotensi dengan dukungan otomasi	Mencapai manuver belok ketinggian rendah yang stabil dengan variasi ketinggian ujung sayap minimal dalam uji terbang	Operator memerlukan pelatihan konversi untuk memahami logika belok nontradisional, kesadaran terhadap hukum kendali, dan manajemen transisi VTOL-WIG	Menunjukkan bahwa arsitektur kendali yang tidak konvensional dapat memerlukan standar kualifikasi khusus tipe
Dominguez et al. (2026)	Deteksi dan pelacakan kapal berbasis CNN pada citra inframerah untuk operasi WIG tanpa awak	Tinggi; otonomi berbasis persepsi	Manusia berperan sebagai pengawas jarak jauh/manajer misi	Meningkatkan kesadaran situasional otonom untuk penghindaran tabrakan dan pemantauan misi	Pelatihan harus mencakup supervisi sistem persepsi AI, interpretasi <i>false positive/false negative</i> , dan protokol intervensi	Sangat relevan untuk sertifikasi operator jarak jauh dan persetujuan operasional WIG tanpa awak di masa depan
Wang et al. (2022)	Pemodelan dan simulasi longitudinal menggunakan pengujian permukaan bergelombang bergerak	Rendah hingga sedang; mendukung desain sistem kendali, bukan eksekusi otonom	Pilot/operator manusia diimplikasikan ; model memberi dasar bagi augmentasi masa depan	Meningkatkan pemahaman tentang respons aerodinamika longitudinal dalam gerak gelombang yang realistis	Operator dan pelatih perlu memahami bagaimana tinggi gelombang dan laju perubahannya memengaruhi kebutuhan kendali <i>pitch</i> /ketinggian	Relevan secara tidak langsung karena pemodelan realistis penting untuk ketepatan simulator dan standar pelatihan berbasis bukti
Nebylov et al. (2021)	Model matematika nonlinear dan sintesis sistem kendali di bawah beban aerodinamika besar	Sedang	Pilot manusia didukung oleh sistem stabilitas/kendali	Memberikan dasar untuk merancang sistem kendali yang mampu menghadapi perubahan kemampuan kendali secara mendadak di dekat permukaan	Kompetensi mencakup pemahaman batas bantuan kendali dan pemulihan dari situasi ketika otomasi memiliki keterbatasan	Relevan untuk pembuktian kemampuan kendali dalam sertifikasi dan penentuan kapan sistem kendali dapat mengompensasi beban kerja
Zhang et al. (2023a)	Kendali kecepatan vertikal <i>ditching</i> berbasis DRL untuk WIG dengan banyak gangguan/kegagalan	Tinggi	Manusia berperan sebagai pengawas darurat atau pengambil keputusan terakhir	Mengurangi risiko benturan selama pendaratan darurat di air akibat kegagalan ketika <i>path-following</i> tidak memungkinkan	Pelatihan perlu mencakup pemantauan mode terdegradasi, logika <i>emergency override</i> , dan kepercayaan terhadap otomasi dalam kondisi kegagalan berganda	Menyoroti perlunya aturan sertifikasi untuk kendali darurat berbasis AI dalam kondisi abnormal
Zhang et al. (2023b)	Kendali longitudinal berbasis DRL untuk pendaratan WIG di air	Tinggi	Manusia mengawasi logika pendaratan otomatis atau menggunakan nya sebagai pendukung keputusan	Meningkatkan regulasi kecepatan vertikal dan <i>pitch</i> selama pendaratan di air, sehingga mengurangi beban <i>slamming</i>	Operator memerlukan kompetensi dalam aktivasi mode pendaratan, pemantauan, dan prosedur cadangan yang aman ketika otomasi tidak optimal	Relevan untuk sertifikasi fungsi bantuan pendaratan otomatis pada operasi WIG khusus di air

Referensi	Teknologi Kendali/Navigasi	Tingkat Otomasi	Peran Manusia	Manfaat Operasional yang Dilaporkan	Implikasi Kompetensi/Pelatihan	Relevansi Regulasi
Park et al. (2025)	Algoritma pencarian lintasan hemat bahan bakar menggunakan data topografi dan logika melintasi rintangan	Sedang hingga tinggi; mendukung komputasi rute	Perencana misi/operator manusia menyetujui atau memantau pemilihan rute	Meningkatkan efisiensi rute dibandingkan algoritma rute konvensional untuk operasi WIG	Kompetensi mencakup validasi rute, penilaian jarak bebas rintangan, interpretasi kompromi lintasan hemat energi	Mendukung sertifikasi operasional masa depan terkait perencanaan rute, persetujuan navigasi, dan kompetensi dispatch
Dinu et al. (2022)	Algoritma komunikasi dan kendali untuk sistem multiagen heterogen yang mencakup ekranoplan	Sedang; operasi semi-otonom berbasis <i>waypoint</i>	Operator manusia mengendalikan beberapa agen dari pusat kendali	Memungkinkan operasi otonom yang terkoordinasi dalam konteks respons bencana	Operator memerlukan kompetensi supervisi manajemen dan prioritas pengendalian tugas	Memperluas pembahasan sertifikasi dari pengemudian satu wahana menuju kualifikasi supervisi tingkat misi
Märgäritescu et al. (2022)	Modul komunikasi untuk sistem multiagen heterogen dengan ekranoplan semi-otonom	Sedang	Operator manusia mengawasi komunikasi dan keputusan intervensi	Mempertahankan kinerja sistem dalam lingkungan komunikasi yang terganggu	Pelatihan mencakup ketahanan komunikasi, supervisi jarak jauh, dan pengambilan keputusan dalam jaringan terdegradasi	Relevan untuk persetujuan operasi WIG jarak jauh atau terdistribusi dalam misi kompleks
Prasolov et al. (2025)	Pengujian konfigurasi berbantuan stabilisator elektronik untuk <i>screen glider</i> /ekranoplan	Sedang	Pilot manusia bekerja dengan stabilisasi di dalam wahana	<i>Autostabilization</i> mempermudah akses ke operasi <i>ground-effect</i> dan meningkatkan kemampuan kendali pada konfigurasi yang diuji	Model kompetensi perlu membedakan penanganan manual dari operasi berbantuan stabilisasi	Menunjukkan bahwa sertifikasi dapat memerlukan tingkat pengesahan yang dikaitkan dengan teknologi stabilisasi dan kompleksitas konfigurasi

3.4 Kesiapan Regulasi, Tata Kelola Keselamatan, dan Jalur Sertifikasi

Temuan pada Tabel 3 menunjukkan bahwa literatur regulasi WIG belum sematang literatur rekayasa. Tidak ada satu pun studi yang menyediakan arsitektur lisensi lengkap dan harmonis, tetapi hampir seluruh studi mengindikasikan bahwa transfer langsung dari regulasi penerbangan atau maritim tidak memadai. WIG menuntut kerangka sertifikasi yang mampu mengelola regulasi transportasi udara-laut, otomasi, dan keragaman misi seperti yang terlihat pada gambar 5.

Klaster pertama menempatkan WIG dalam konteks komersialisasi dan integrasi layanan transportasi. Jika WIG digunakan untuk penumpang atau barang, maka kualifikasi operator harus mencakup keselamatan layanan, reliabilitas rute, manajemen penumpang, dan standar operasi berulang, bukan sekadar keterampilan mengoperasikan prototipe.

Klaster kedua menekankan lingkungan dan rute khusus. Operasi di wilayah Arktik, rute

pesisir kompleks, atau daerah rawan bencana memerlukan endorsement khusus berbasis lingkungan, kesiapan darurat, dan perencanaan misi. Hal ini menunjukkan bahwa sertifikasi WIG kemungkinan perlu menggabungkan baseline qualification dan mission-specific endorsement.

Klaster ketiga berkaitan dengan otomasi dan supervisi jarak jauh. Sistem deteksi berbasis AI, kendali otonom, serta pendaratan otomatis menggeser fokus kualifikasi dari stick-and-rudder skill menuju pengawasan mode, interpretasi sistem, *override authority*, dan akuntabilitas hukum. Karena itu, sertifikasi moda transportasi dan sertifikasi operator perlu dibedakan secara jelas.

Secara keseluruhan, model sertifikasi yang paling sesuai adalah kerangka berlapis: persetujuan desain dan kelaikan moda transportasi, kualifikasi operator dasar, endorsement berbasis tipe atau konfigurasi, endorsement berbasis misi dan lingkungan, serta kualifikasi tambahan untuk operasi otonom, jarak jauh, atau multi-agent.



Gambar 5. Arsitektur Kompetensi Berbasis Misi Pada WIG: Pengaruh Konteks Operasi terhadap Pelatihan, Asesmen, dan Model Kualifikasi.

Tabel 3. Bukti Regulasi dan Sertifikasi dalam Literatur WIG

Referensi	Fokus regulasi / tata kelola	Konteks yurisdiksi atau kelembagaan	Isu sertifikasi yang dibahas	Logika kualifikasi yang diusulkan/tersirat	Kesenjangan utama yang diidentifikasi	Implikasi kebijakan / standardisasi
1. Tian et al. (2023)	Jalur komersialisasi dan industrialisasi WIG sipil di China	China; konteks penerapan sipil dan industri	Bagaimana kemajuan teknologi dapat beralih menjadi sistem WIG yang diterapkan	Kualifikasi awak perlu disesuaikan dengan operasi komersial, armada, dan ekspektasi keandalan sistem, bukan hanya pengemudian eksperimental	Kesiapan komersial lebih banyak dibahas dibandingkan arsitektur lisensi formal atau standar pelatihan	Mendukung pengembangan kerangka operasional sipil, yaitu sertifikasi harus bergerak melampaui pengujian prototipe menuju standar komersial yang dapat diskalakan
2. Lee et al. (2021)	Estimasi permintaan untuk transportasi intermoda udara-laut menggunakan WIG	Korea; konteks perencanaan transportasi regional	Apakah WIG dapat diintegrasikan ke dalam sistem penumpang/barang sebagai moda transportasi yang layak	Mengimplikasikan kebutuhan kualifikasi operator berbasis rute dan layanan yang terkait dengan keandalan transportasi terjadwal dan keselamatan penumpang	Kelayakan ekonomi dimodelkan, tetapi lisensi operator dan aturan operasional tidak dijelaskan	Menunjukkan bahwa integrasi transportasi akan memerlukan persetujuan operasi formal, regulasi layanan, dan jalur sertifikasi keselamatan penumpang
3. Markov et al. (2023)	Penerapan <i>heavy ekranoplan</i> untuk <i>Northern Sea Route</i>	Arktik; konteks logistik strategis Rusia	Tata kelola penggunaan WIG pada koridor transportasi yang keras, terpencil, dan sensitif secara strategis	Logika kualifikasi kemungkinan memerlukan pengesahan khusus misi untuk lingkungan ekstrem, kompleksitas rute, dan kesiapsiagaan darurat	Tata kelola operasional diimplikasikan, tetapi standar awak, otoritas lisensi, dan interoperabilitas dengan sistem maritim/penerbangan masih belum jelas	Menunjukkan bahwa persetujuan khusus rute dan kategorisasi risiko lingkungan mungkin diperlukan untuk sertifikasi WIG
4. Park et al. (2025)	Pencarian lintasan hemat bahan bakar untuk WIG di atas medan kompleks dan rintangan	Konteks navigasi dan perencanaan operasi	Apakah alat perencanaan misi dapat mendukung penentuan rute WIG yang aman dan patuh dalam lingkungan realistik	Kompetensi operator/dispatcher harus mencakup validasi rute, kesadaran medan/rintangan, dan interpretasi keluaran navigasi algoritmik	Studi membahas kinerja penentuan rute, bukan siapa yang secara hukum berwenang menyetujui, memantau, atau mengubah rute tersebut	Mengarah pada kebutuhan masa depan atas standar kompetensi dispatch/navigasi dan protokol persetujuan perencanaan operasional

Referensi	Fokus regulasi / tata kelola	Konteks yurisdiksi atau kelembagaan	Isu sertifikasi yang dibahas	Logika kualifikasi awak yang diusulkan/tersirat	Kesenjangan utama yang diidentifikasi	Implikasi kebijakan / standardisasi
5. Dominguez et al. (2026)	Deteksi dan pelacakan kapal berbasis inframerah untuk WIG tanpa awak otonom	Konteks pengawasan WIG tanpa awak/otonom	Implikasi sertifikasi dari persepsi berbasis AI untuk penghindaran tabrakan dan kesadaran situasional	Kualifikasi dapat bergeser dari pengemudian di atas wahana menuju supervisi jarak jauh, pengawasan sistem persepsi, kompetensi intervensi	Belum ada pembahasan formal mengenai lisensi operator jarak jauh, tanggung jawab hukum, dan otorisasi operasional	Sangat mendukung munculnya kategori persetujuan terpisah untuk operasi WIG, tanpa awak atau yang diawasi dari jarak jauh
6. Dinu et al. (2022)	Sistem multiagen heterogen yang mencakup ekranoplan untuk skenario bencana	Konteks respons darurat/misi multiagen	Tata kelola misi semi-otonom terkoordinasi yang melibatkan ekranoplan sebagai salah satu aset misi	Kualifikasi manusia melampaui penanganan wahana menuju supervisi tingkat misi, perintah <i>waypoint</i> , dan koordinasi antarplatform	Belum tersedia kerangka standar untuk mensertifikasi pengawas misi atau operator multikendaraan	Menunjukkan bahwa regulasi WIG masa depan mungkin memerlukan pengesahan kendali misi di luar lisensi berbasis tipe kendaraan
7. Märgäritescu et al. (2022)	Arsitektur komunikasi untuk misi ekranoplan multiagen semi-otonom	Konteks sistem darurat/terdistribusi	Keandalan komunikasi sebagai syarat operasi WIG jarak jauh atau semi-otonom yang aman	Kompetensi operator mencakup manajemen ketahanan komunikasi dan pengambilan keputusan jarak jauh dalam kondisi konektivitas terdegradasi	Persyaratan komunikasi teknis belum diterjemahkan ke dalam persetujuan operasional formal atau kriteria lisensi awak	Menunjukkan bahwa standar keandalan komunikasi dapat menjadi bagian dari sertifikasi untuk operasi WIG jarak jauh/tersupervisi
8. Patria et al. (2021)	Kendali otonom WIG dalam berbagai kondisi jelajah	Konteks kendali kendaraan otonom	Apakah operasi otonom yang aman dapat mengurangi ketergantungan pada pengemudian terus-menerus di atas wahana	Logika kompetensi bergeser menuju pemantauan supervisi, manajemen mode, dan intervensi anomali, semata-mata keterampilan <i>stick-and-rudder</i> tradisional	Belum ada kerangka langsung untuk memvalidasi kompetensi operasi atau batas tanggung jawab manusia-mesin	Mendukung model sertifikasi hibrida yang menilai fungsi otonomi wahana dan kompetensi supervisi operator secara terpisah
9. Nebylov & Nebylov (2021)	Tantangan navigasi dan kendali untuk <i>heavy ekranoplan</i>	Operasi <i>heavy ekranoplan</i> skala besar	Bagaimana kompleksitas navigasi/kendali memengaruhi kesiapan penerapan operasional yang aman	Kualifikasi memerlukan kompetensi terpadu dalam navigasi, kendali ketinggian, dan manajemen rute yang melampaui kerangka satu-domain konvensional	Artikel mengidentifikasi tantangan sistem, tetapi tidak menyelesaikan isu lisensi, silabus pelatihan, atau klasifikasi regulasi	Memperkuat argumen bahwa WIG berat memerlukan standar operasional khusus, bukan sekadar pemindahan model penerbangan atau maritim
10. Prasolov et al. (2025)	Perbandingan konfigurasi dan pengembangan prototipe berbantuan stabilisator	Konteks desain dan pengembangan prototipe	Apakah beberapa konfigurasi WIG secara inheren lebih mudah dan lebih aman dikendalikan sehingga memengaruhi kelayakan sertifikasi	Persyaratan kualifikasi mungkin perlu bersifat khusus tipe karena tuntutan kendali sangat bervariasi menurut konfigurasi dan dukungan stabilisasi	Tidak menjelaskan bagaimana logika <i>type-rating</i> atau <i>class-rating</i> harus disusun untuk berbagai platform WIG	Mengimplikasikan kebutuhan masa depan akan kelas sertifikasi atau pengesahan yang dibedakan berdasarkan konfigurasi wahana dan tingkat bantuan stabilitas

Referensi	Fokus regulasi / tata kelola	Konteks yurisdiksi atau kelembagaan	Isu sertifikasi yang dibahas	Logika kualifikasi yang diusulkan/tersirat	Kesenjangan utama yang diidentifikasi	Implikasi kebijakan / standardisasi
11. Su et al. (2024)	<i>Turning by Yaw Control</i> (TBYC) dan implementasi PX4 khusus untuk VTOL	Operasi eksperimental WIG berkecepatan VTOL	Bagaimana kendali baru dan mode operasi memengaruhi persetujuan operasional yang aman	Operator memerlukan pelatihan bergaya konversi untuk belokan berbasis dorong vektor dan transisi hibrida VTOL-WIG	Tidak ada model lisensi formal yang diusulkan untuk arsitektur kendali hibrida	Menunjukkan bahwa subtype WIG yang sedang berkembang dapat memerlukan pengesahan khusus tipe dan pembatasan operasional selama sertifikasi
12. Zhang et al. (2023a)	Kendali darurat berbasis DRL kondisi banyak kegagalan	Operasi abnormal/darurat yang kritis terhadap keselamatan	Apakah kendali dapat dipercaya dalam kondisi abnormal yang menjadi inti persetujuan keselamatan	Kualifikasi manusia dapat bergeser menuju kompetensi supervisi darurat, bukan kendali langsung dalam kegagalan	Belum jelas bagaimana logika darurat AI harus divalidasi, disertifikasi, atau diberi akuntabilitas hukum	Mendukung pengembangan regulasi untuk mensertifikasi fungsi manajemen darurat berbantuan AI pada WIG
13. Zhang et al. (2023b)	Kendali longitudinal berbasis DRL untuk pendaratan di air	Konteks otomasi bantuan pendaratan	Sertifikasi fungsi pendaratan di air yang otomatis atau semi-otomatis	Operator mungkin memerlukan pengesahan untuk aktivasi otomasi, pemantauan, dan manajemen cadangan selama pendaratan	Belum ada standar operasional yang menetapkan ambang pilot atau pemantauan yang dapat diterima untuk pendaratan otomatis di air	Menyoroti perlunya kriteria persetujuan sistem bantuan pendaratan yang khas pada operasi WIG di air
14. Lee et al. (2023)	Analisis paten tren pada teknologi WIG yang dapat diterapkan dalam penerbangan	Ekosistem inovasi dan pengembangan teknologi	Bagaimana arah inovasi dapat membentuk beban sertifikasi dan kebutuhan standarisasi di masa depan	Logika kualifikasi tidak dinyatakan secara eksplisit, tetapi perkembangan teknologi yang cepat mengimplikasikan pembaruan berulang pada materi pelatihan dan pengetahuan tipe	Tren paten tidak membahas penerimaan regulasi atau standarisasi operator	Berguna untuk mengidentifikasi domain teknologi yang dalam waktu dekat dapat mendorong regulator memperbarui aturan sertifikasi WIG
15. Bai et al. (2024)	Tinjauan pesawat amfibi dan teknologi transportasi hibrida terkait dengan pengembangan WIG	Perspektif teknologi transportasi lintas-domain	Kompleksitas regulasi komparatif untuk kendaraan hibrida yang mengaburkan batas antarmoda	Mengimplikasikan bahwa sistem kualifikasi WIG dapat mengambil pelajaran dari kategori hibrida lain yang menggabungkan karakteristik kelautan dan aeronautika	Sertifikasi awak WIG khusus belum terselesaikan; transferabilitas bersifat parsial	Mendukung pendekatan regulasi komparatif untuk merancang standar WIG, terutama ketika tumpang tindih moda memperumit klasifikasi

3.5 Implikasi Kompetensi Berbasis Misi

Tabel 4 memperlihatkan bahwa kompetensi WIG bersifat *mission-sensitive*. Operator untuk layanan penumpang pesisir tidak memiliki profil yang sama dengan operator logistik ekstrem, supervisor WIG otonom, pengendali misi multi-agent, atau operator VTOL-WIG. Oleh karena itu, satu lisensi generik WIG tidak cukup untuk mencakup seluruh variasi aplikasi.

Dalam konteks layanan komersial, kompetensi harus mencakup reliabilitas jadwal, manajemen penumpang dan kargo, prosedur turnaround, keselamatan rute, serta koordinasi antarmoda. Dalam konteks misi ekstrem atau pertahanan,

kompetensi perlu diperluas ke pengambilan keputusan taktis, kesiapan darurat, operasi di lingkungan terbatas, dan manajemen risiko jarak jauh.

Pada operasi otonom dan jarak jauh, kompetensi berubah menjadi kemampuan memantau sistem, menilai keluaran sensor dan AI, mengelola anomali, serta menentukan kapan intervensi diperlukan. Pada operasi multi-agent, operator memerlukan kemampuan command-and-control, manajemen prioritas, serta pengambilan keputusan ketika komunikasi terputus atau tidak stabil.

Implikasi praktisnya adalah perlunya arsitektur

pelatihan berlapis yang membedakan empat jalur: kru layanan sipil rutin, kru dengan endorsement misi/lingkungan khusus, supervisor jarak jauh dan pemantau AI, serta operator komando misi untuk

operasi terdistribusi. Pelatihan tidak cukup dilakukan melalui kuliah atau jam terbang, tetapi perlu menggabungkan simulasi skenario, asesmen performa, dan evaluasi berkala.

Tabel 4. Implikasi Kompetensi Berbasis Misi pada Aplikasi Operasional WIG

Referensi	Aplikasi / profil misi	Lingkungan operasi	Tuntutan operator	tugas Domain yang diperlukan	kompetensi Kebutuhan pelatihan / asesmen	Arah penelitian
1. Lee et al. (2021)	Transportasi intermoda udara-laut untuk penumpang/barang	Koridor transportasi pesisir dan regional yang terhubung dengan jaringan laut/darat yang sudah ada	Menjaga keandalan jadwal, kepatuhan terhadap rute, keselamatan penumpang/barang, dan kesinambungan layanan antarmuka antarmoda	Kompetensi transportasi, keselamatan penumpang, penilaian rute, pengambilan keputusan berorientasi layanan	Pelatihan berbasis skenario operasi terjadwal, penanganan penumpang, prosedur <i>turnaround</i> dan manajemen risiko rute	Penelitian lebih lanjut untuk persyaratan kompetensi awak layanan komersial dalam operasi WIG berfrekuensi tinggi
2. Tian et al. (2023)	Komersialisasi sipil dan penerapan industri WIG	Ekosistem transportasi sipil dan produksi industri	Beroperasi melampaui tahap eksperimental dalam kondisi layanan yang dapat diskalakan, dan dapat diulang, dan terjamin keselamatannya	Kompetensi operasional profesional yang terkait dengan prosedur operasi standar, keandalan, dan konsistensi armada	Kerangka kompetensi harus mencakup kurikulum pelatihan standar untuk operator dan teknisi pemeliharaan WIG komersial	Studi masa depan perlu mendefinisikan bagaimana tahapan komersialisasi mengubah peran operator, pelatihan berulang, dan kelas sertifikasi operasional
3. Markov et al. (2023)	Logistik <i>heavy ekranoplan</i> pada <i>Northern Sea Route</i>	Koridor maritim Arktik yang terpencil, bercuaca ekstrem, dan berjarak jauh	Mengelola kompleksitas rute, kontingensi wilayah terpencil, paparan lingkungan berat, dan kemandirian dalam keadaan darurat	Penilaian lingkungan ekstrem, manajemen risiko misi, kesiapsiagaan darurat, dan kompetensi operasi jarak jauh	Pelatihan pengesahan khusus untuk misi Arktik/terpencil, dukungan operasi dengan terdegradasi, manajemen kontingensi	Penelitian perlu membandingkan kualifikasi dasar WIG dengan pengesahan khusus misi untuk lingkungan operasi ekstrem
4. Hunter et al. (2021)	Drone pengawasan maritim / platform WIG tanpa awak	Area pengawasan maritim / dengan kendala pendaratan di air yang berulang	Merencanakan misi, memantau kondisi kendaraan, mengelola beban pemulihan/pendaratan, dan menafsirkan implikasi risiko struktural	Kompetensi supervisi jarak jauh, pemantauan misi, dan kesadaran risiko pendaratan untuk sistem tanpa awak	Pelatihan harus mencakup misi jarak jauh, integrasi <i>payload</i> /pengawasan, dan pengambilan keputusan pemulihan di air	Diperlukan kajian lebih lanjut mengenai model kompetensi untuk operator misi WIG tanpa awak, bukan hanya awak di atas wahana
5. Dominguez et al. (2026)	Pengawasan maritim otonom menggunakan deteksi dan pelacakan kapal berbasis inframerah	Lingkungan pemantauan maritim dan risiko tabrakan	Mengawasi persepsi otonom, menilai keluaran deteksi, dan melakukan intervensi keputusan navigasi atau penghindaran	Supervisi manusia-AI, kesadaran dan intervensi situasional, kompetensi kompetensi anomali	Penilaian harus mencakup pemantauan manajemen <i>alarm</i> , kewenangan pengambilan keputusan jarak jauh dalam pengawasan	Penelitian masa depan perlu mendefinisikan standar lisensi/kualifikasi bagi pengawas jarak jauh sistem pengawasan WIG otonom
6. Dinu et al. (2022)	Misi respons bencana multiagen yang mencakup ekranoplan semi-otonom	Lingkungan darurat dinamis dengan aset tanpa awak/semi-otonom yang heterogen	Mengoordinasikan beberapa agen, menetapkan <i>waypoint</i> , mengelola prioritas misi, dan mempertahankan kesadaran operasional lintas platform	Kompetensi misi, antarplatform, supervisi, pengambilan keputusan darurat	Pelatihan harus melampaui pengoperasian wahana menuju latihan komando multiagen dan penilaian misi	Penelitian perlu mengeksplorasi model sertifikasi untuk pengawas misi yang mengendalikan atau mengoordinasikan beberapa aset berbasis WIG

Referensi	Aplikasi / profil misi / Lingkungan operasi	Tuntutan operator	tugas Domain yang diperlukan	kompetensi	Kebutuhan pelatihan / asesmen	Arah penelitian
7. Märgäritescu et al. (2022)	Misi darurat terdistribusi dengan partisipasi et ekranoplan yang bergantung pada komunikasi	Situasi darurat/bencana dengan komunikasi tidak stabil	Memantau konektivitas sistem, mempertahankan kesinambungan kendali, dan membuat keputusan dalam kondisi komunikasi terdegradasi	Ketahanan komunikasi jarak jauh, pengambilan keputusan adaptif, dan manajemen misi pada mode terdegradasi	Penilaian mencakup kehilangan komunikasi, prosedur cadangan, dan pelatihan operasi jarak jauh tangguh	Penelitian masa depan perlu mengkaji bagaimana kerapuhan komunikasi mengubah kompetensi dalam misi WIG jarak jauh atau semi-otonom
8. Park et al. (2025)	Penentuan rute hemat bahan bakar dan pencarian lintasan sadar-rintangan	Rute yang dibatasi medan dan memerlukan pelintasan rintangan optimasi energi	Memvalidasi lintasan, menafsirkan kompromi algoritmik, dan menyeimbangkan efisiensi dengan pelaksanaan rute yang aman	Kompetensi analisis navigasi, penilaian jarak bebas terhadap rintangan, dan perencanaan misi berbasis efisiensi energi	Pelatihan mencakup keterampilan dispatch/persetujuan rute, interpretasi algoritma, dan penilaian skenario yang dibatasi medan	Penelitian lebih lanjut diperlukan mengenai kompetensi dispatch dan perencanaan rute sebagai kompetensi yang berbeda dari pengemudian langsung
9. Hu et al. (2024)	Perencanaan lintasan berorientasi <i>stealth</i> /daya tahan untuk optimasi misi	operasional taktis atau sensitif ancaman yang memerlukan kompromi lintasan	Menetapkan prioritas misi, mengawasi rencana lintasan multi-objektif, dan menyeimbangkan kinerja dengan tujuan survivabilitas	Manajemen prioritas misi, penilaian taktis, dan supervisi pembentukan rute berbasis AI	Penilaian mencakup prioritas peninjauan dan intervensi terhadap lintasan direncanakan AI	Penelitian masa depan perlu membahas perbedaan kompetensi antara misi WIG sipil, taktis, dan keamanan
10. Su et al. (2024)	Operasi WIG berkemampuan dengan VTOL dan belokan berbasis dorong bervektor	<i>Operational envelope</i> hibrida yang menggabungkan fase VTOL dan jelajah <i>ground-effect</i> pada ketinggian rendah	Mengelola transisi mode, perilaku belokan baru, dan kemungkinan lepas landas/pendaratan yang lebih kompleks	Kompetensi penanganan khusus tipe, manajemen transisi, dan keterampilan kesadaran mode	Pelatihan konversi diperlukan untuk transisi VTOL-WIG dan respons interpretasi nontradisional	Penelitian masa depan perlu membandingkan tuntutan kompetensi WIG konvensional, amfibi, dan sub tipe VTOL-WIG
11. Prasolov et al. (2025)	Operasi prototipe <i>screen glider</i> /ekranoplan pada berbagai konfigurasi	Operasi eksperimental dan prototipe di dekat permukaan air	Menyesuaikan strategi penanganan dengan stabilitas khusus konfigurasi dan dukungan stabilisasi	Kompetensi <i>type-rating</i> , kesadaran konfigurasi, dan perbedaan antara kendali berbantuan dan kendali manual	Pelatihan dibedakan berdasarkan konfigurasi tingkat stabilitas	Penelitian lebih lanjut perlu menentukan apakah model kompetensi WIG harus berbasis kelas platform, bukan generik
12. Bai et al. (2024)	Perspektif komparatif transportasi hibrida yang relevan dengan penerapan misi WIG	Lingkungan transportasi amfibi dan hibrida lintas-domain	Menafsirkan persyaratan operasional campuran domain mentransfer pelajaran dari kendaraan hibrida yang sebanding	Pemahaman sistem lintas-moda, kesadaran regulasi, dan kompetensi adaptasi operasional	Desain pelatihan dapat mengambil manfaat dari praktik misi dan keselamatan pada sektor transportasi hibrida yang berdekatan	Diperlukan lebih banyak studi komparatif untuk mendefinisikan elemen kompetensi yang dapat ditransfer dari platform amfibi dan hibrida lainnya
13. Lee et al. (2023)	Tren inovasi dan pengembangan an teknologi paten yang pada teknologi penerbangan terkait WIG	Ekosistem pengembangan teknologi yang memengaruhi misi masa depan	Mengikuti perubahan sistem di atas wahana, antarmuka, dan kemampuan yang diperkenalkan oleh teknologi baru	Adaptabilitas teknologi, pembelajaran berulang, kompetensi peningkatan tipe	Pelatihan dan penilaian berorientasi pembaruan diperlukan seiring berkembangnya sistem misi WIG	Penelitian perlu mengkaji bagaimana siklus inovasi teknologi memengaruhi persyaratan kualifikasi berulang

Referensi	Aplikasi / Lingkungan	Tuntutan	tugas Domain	kompetensi	Kebutuhan	Arah	penelitian
si	profil misi	operasi	operator	yang diperlukan	pelatihan / asesmen	mendatang	
14. Patria et al. (2021)	Jelajah WIG otonom dalam berbagai skenario	Operasi ketinggian rendah yang bergantung pada skenario dan sensitif terhadap rintangan	Mengawasi perilaku otonom, memantau transisi skenario, dan melakukan intervensi ketika batas otonomi aman terlampaui	Kompetensi kendali pemantauan otomasi, dan manajemen skenario abnormal	Penilaian harus mencakup kesiapan ambil alih, pemantauan berbasis skenario, dan respons terhadap anomali pada mode otomatis	Studi masa depan perlu membandingkan beban kerja dan persyaratan kompetensi antara profil misi manual, berbantuan, dan otonom	

3.6 Diskusi

Sintesis dari empat tema menunjukkan hubungan yang kuat antara kematangan teknologi WIG dan kebutuhan kesiapan manusia, regulasi, serta integrasi operasional. WIG tidak dapat dipahami hanya sebagai inovasi aerodinamika; ia merupakan sistem sosio-teknis yang menggabungkan moda transportasi, operator, algoritma, prosedur, infrastruktur pesisir, dan otoritas lintas-domain.

Keunggulan utama WIG adalah efisiensi pada *ground effect*, aksesibilitas pesisir, dan fleksibilitas misi. Namun, keunggulan tersebut selalu disertai tantangan keselamatan: variasi gelombang, margin ketinggian yang sempit, risiko tubrukan, dan kebutuhan koordinasi lalu lintas udara-laut. Dengan demikian, manfaat WIG hanya dapat direalisasikan apabila *safety case* dikembangkan secara kontekstual dan berbasis bukti.

Pembahasan regulasi menunjukkan bahwa fragmentasi kewenangan merupakan hambatan kunci. Jika WIG diperlakukan semata-mata sebagai pesawat, aspek seamanship dan interaksi lalu lintas maritim dapat terabaikan. Sebaliknya, jika diperlakukan semata-mata sebagai kapal, karakter flight safety dan airworthiness tidak tertangani memadai. Karena itu, kerangka hibrida yang menggabungkan standar penerbangan dan maritim perlu dikembangkan secara bertahap.

Temuan juga menegaskan pentingnya memasukkan *Human Readiness Levels* (HRL) bersama *Technology Readiness Levels* (TRL). WIG dapat mencapai kematangan teknis tertentu, tetapi tetap belum siap diterapkan apabila operator belum memiliki standar kompetensi, simulator, prosedur normal dan abnormal, serta mekanisme evaluasi performa. Kesiapan manusia merupakan syarat operasional, bukan pelengkap setelah desain selesai.

Untuk konteks Indonesia, implikasi ini sangat relevan karena karakter geografis kepulauan, kebutuhan konektivitas antarpulau, dan kerentanan terhadap bencana menuntut moda transportasi yang cepat dan fleksibel. Namun, penerapan WIG di Indonesia harus diawali melalui *regulatory sandbox*, uji operasi terbatas, koridor rute yang dikendalikan, integrasi dengan otoritas penerbangan dan maritim, serta evaluasi keselamatan berbasis data.

4. Simpulan

Kajian ini menunjukkan bahwa *wing-in-ground craft* merupakan platform transportasi hibrida yang menjanjikan karena menggabungkan efisiensi aerodinamika *ground effect* dengan fleksibilitas operasional maritim. WIG berpotensi mendukung mobilitas pesisir dan kepulauan, logistik cepat, respons bencana, pengawasan maritim, serta operasi pertahanan di wilayah litoral.

Namun, penerapan WIG masih menghadapi tiga kesenjangan utama: belum harmonisnya kerangka regulasi penerbangan-maritim, terbatasnya bukti empiris operasi skala besar, dan belum tersedianya standar kompetensi lintas-domain bagi operator. Selain itu, peningkatan otomasi mengubah peran manusia menjadi supervisor sistem, sehingga pelatihan dan sertifikasi harus mencakup *human-automation interaction*, monitoring AI, dan pengambilan keputusan pada kondisi abnormal.

Pengembangan WIG ke depan perlu diarahkan pada model sertifikasi berlapis yang mencakup kelaikan moda transportasi, kualifikasi operator dasar, endorsement berbasis tipe, endorsement misi dan lingkungan, serta kualifikasi khusus untuk operasi otonom atau jarak jauh. Riset lanjutan juga perlu mengembangkan simulator, skenario pelatihan, *safety case*, dan *regulatory sandbox* untuk memvalidasi operasi WIG secara bertahap.

Kesimpulannya, keberhasilan WIG tidak hanya bergantung pada kemajuan desain dan performa teknis, tetapi pada integrasi teknologi, manusia, dan tata kelola. Tanpa keselarasan ketiga unsur tersebut, potensi WIG sebagai moda transportasi hibrida tidak akan berkembang menjadi implementasi yang aman, layak, dan berkelanjutan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Perhubungan, Direktorat Perkapalan dan Kepelautan, serta Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia Perhubungan atas dukungan dan perhatian yang diberikan dalam penyusunan kajian ini. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada seluruh pihak yang telah memberikan masukan, bantuan, dan dukungan selama proses penyusunan naskah hingga dapat diselesaikan dengan baik.

Daftar Pustaka

- Ahmed, K., Haque, C. E., Agrawal, N., & Sakib, M. S. (2023). Catastrophes Provoquées Par La Nature Et Implication Des Forces Armées : Exploration d'Un Cadre De Collaboration Civilo-Militaire. *Cjem*, 3(1). <https://doi.org/10.25071/2ek7p160>
- Amini, R., Azari, A., Bhaskaran, S., Beauchamp, P., Castillo-Rogez, J., Castaño, R., Chung, S., Day, J. C., Doyle, R. J., Feather, M. S., Fesq, L., Frank, J., Furlong, P. M., Ingham, M. D., Kennedy, B., Kolcio, K., Nesnas, I., Rasmussen, R., Reeves, G., Sorice, C., Theiling, B., & Wyatt, J. (2021). Advancing the Scientific Frontier With Increasingly Autonomous Systems. *vol. 53, no. 4(4)*. <https://doi.org/10.3847/25c2cfef.a09526a1>
- Arnaouti, M., Cahill, G., Baird, M., Mangurat, L., Harris, R., Edme, L. P. P., Joseph, M., Worlton, T. J., & Augustin, S. (2022). Medical Disaster Response: A Critical Analysis of the 2010 Haiti Earthquake. *Frontiers in Public Health*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.995595>
- Boit, S., & Patil, R. (2025). A Prompt Engineering Framework for Large Language Model-Based Mental Health Chatbots: Conceptual Framework. *Jmir Mental Health*, 12, e75078-e75078. <https://doi.org/10.2196/75078>
- Borson, J. E., & Xu, H. (2022). A Path Dependent Approach for Characterizing the Legal Governance of Autonomous Systems. *Ieee Access*, 10, 119985-119998. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3221409>
- Bradford, J. F. (2022). Force Multiplier. *Asian Survey*, 62(4), 666-694. <https://doi.org/10.1525/as.2022.1651914>
- Brugnara, R. L., Andrade, D. D., Fontes, R. D. S., & Leão, M. S. (2022). Safety-Ii: Building Safety Capacity and Aeronautical Decision-Making Skills to Commit Better Mistakes. *The Aeronautical Journal*, 127(1310), 511-536. <https://doi.org/10.1017/aer.2022.74>
- Cha, J., Yun, J. Y., & Hwang, H. Y. (2020). Initial Sizing of a Roadable Personal Air Vehicle Using Design of Experiments for Various Engine Types. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 93(11), 1-14. <https://doi.org/10.1108/aeat-04-2020-0073>
- Chamuah, A., & Singh, R. (2019). Responsibly Regulating the Civilian Unmanned Aerial Vehicle Deployment in India and Japan. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 93(4), 629-641. <https://doi.org/10.1108/aeat-08-2019-0172>
- Chowdhury, M. N., Shafi, S., Arzaman, A. F. M., Teoh, B. A., Kadhim, K. A., Salamun, H., Kadir, F. K. A., Said, S., Kadir, K. A., Embong, A. M., Aziz, N. A. A., & Haz, M. (2024). Navigating Human Factors in Maritime Safety: A Review of Risks and Improvements in Engine Rooms of Ocean-Going Vessels. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 14(1), 1-14. <https://doi.org/10.18280/ijssse.140101>
- Cinelli, I. (2023). How Space Operations Drive Innovation in Human Healthcare. *Ieee Open Journal of Engineering in Medicine and Biology*, 4, 158-161. <https://doi.org/10.1109/ojemb.2023.3244042>
- Cohen, A., Shaheen, S., & Farrar, E. (2021). Urban Air Mobility: History, Ecosystem, Market Potential, and Challenges. *Ieee Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(9), 6074-6087. <https://doi.org/10.1109/tits.2021.3082767>
- Currie, W. L., Schlagwein, D., Leimeister, J. M., & Willcocks, L. (2025). Rethinking Technology Regulation in the Age of AI Risks. *Journal of Information Technology*, 40(3), 236-245. <https://doi.org/10.1177/02683962251378815>
- Duong, P. A., Ryu, B. R., Jung, J., & Kang, H. (2024). A Comprehensive Review of the Establishment of Safety Zones and Quantitative Risk Analysis During Ship-to-Ship LNG Bunkering. *Energies*, 17(2), 512. <https://doi.org/10.3390/en17020512>
- Evans, J., & Silbey, S. S. (2021). Co-Opting Regulation: Professional Control Through Discretionary Mobilization of Legal Prescriptions and Expert Knowledge. *Organization Science*, 33(5), 2041-2064. <https://doi.org/10.1287/orsc.2021.1525>

- Fenton, A. J., & Chapsos, I. (2023). Ships Without Crews: IMO and UK Responses to Cybersecurity, Technology, Law and Regulation of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS). *Frontiers in Computer Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fcomp.2023.1151188>
- Fragiacomo, P., Piraino, F., Genovese, M., Corigliano, O., & Lorenzo, G. D. (2023). Experimental Activities on a Hydrogen-Powered Solid Oxide Fuel Cell System and Guidelines for Its Implementation in Aviation and Maritime Sectors. *Energies*, 16(15), 5671. <https://doi.org/10.3390/en16155671>
- Gilmour, R. G. (2025). Drone-Assisted Organ Transport: A Scoping Review of Clinical, Regulatory, and System Readiness. *Clinical Transplantation*, 39(12). <https://doi.org/10.1111/ctr.70398>
- Grote, M., Cherrett, T., Oakey, A., Royall, P. G., Whalley, S., & Dickinson, J. (2021). How Do Dangerous Goods Regulations Apply to Uncrewed Aerial Vehicles Transporting Medical Cargos?. *Drones*, 5(2), 38. <https://doi.org/10.3390/drones5020038>
- Göktaş, P., & Grzybowski, A. (2025). Shaping the Future of Healthcare: Ethical Clinical Challenges and Pathways to Trustworthy AI. *Journal of Clinical Medicine*, 14(5), 1605. <https://doi.org/10.3390/jcm14051605>
- Handley, H. A. H., See, J., & Savage-Knepshield, P. A. (2024). Human Readiness Levels and Human Views as Tools for User-centered Design. *Systems Engineering*, 27(6), 1089-1102. <https://doi.org/10.1002/sys.21773>
- Hu, L., Yan, X., & Yuan, Y. (2024). Development and Challenges of Autonomous Electric Vertical Take-Off and Landing Aircraft. *Heliyon*, 11(1), e41055. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41055>
- Humphries, F., Horne, R., Olsen, M., Dunbabin, M., & Tranter, K. (2022). Uncrewed Autonomous Marine Vessels Test the Limits of Maritime Safety Frameworks. *Wmu Journal of Maritime Affairs*, 22(3), 317-344. <https://doi.org/10.1007/s13437-022-00295-x>
- Johnson, W. G. (2022). Caught in Quicksand? Compliance and Legitimacy Challenges in Using Regulatory Sandboxes to Manage Emerging Technologies. *Regulation & Governance*, 17(3), 709-725. <https://doi.org/10.1111/rego.12487>
- Joiner, K., & Swidan, A. (2023). Conceptualising a Hybrid Flying and Diving Craft. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(8), 1541. <https://doi.org/10.3390/jmse11081541>
- Katterl, S. (2021). Regulatory Oversight, Mental Health and Human Rights. *Alternative Law Journal*, 46(2), 149-156. <https://doi.org/10.1177/1037969x211013123>
- Khisa, M., & Rwengabo, S. (2023). Militarism and the Politics of Covid-19 Response in Uganda. *Armed Forces & Society*, 50(4), 1118-1149. <https://doi.org/10.1177/0095327x231162848>
- Langston, S., & Brickhouse, A. (2023). Charting the Course: Considerations and Frameworks for Investigating and Regulating Commercial Spaceflight Safety. *New Space*, 12(1), 54-66. <https://doi.org/10.1089/space.2023.0022>
- Madusanka, N. S., Fan, Y., Yang, S., & Xiang, X. (2023). Digital Twin in the Maritime Domain: A Review and Emerging Trends. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(5), 1021. <https://doi.org/10.3390/jmse11051021>
- Mazur, A., Thije, J. T., Vreeken, J., Hesselink, H., Dziugiel, B., Wyka, S., Liberacki, A., Idzikowska, T., Stanczyk, A. D., Utracka, A., Ginter, P., Czupryn, S., Giannuzzi, M., Melo, S., Witkowska-Konieczny, A., Vito, V. D., & Menichino, A. (2022). Regulatory Framework on the UAM Operational Concepts of the ASSURED-UAM Project. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 94(9), 1491-1498. <https://doi.org/10.1108/aeat-01-2022-0021>
- Mishra, S., & Palanisamy, P. (2023). Autonomous Advanced Aerial Mobility—An End-to-End Autonomy Framework for UAVs and Beyond. *Ieee Access*, 11, 136318-136349. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3339631>
- Mthembu, S. E., & Chasomeris, M. (2023). An Assessment of the Capacity and the Performance of Marine Services in South Africa's Ports. *Journal of Transport and Supply Chain Management*, 17. <https://doi.org/10.4102/jtscm.v17i0.879>

- Ningappa, N. G. (2025). Sustainable Propulsion and Advanced Energy-Storage Systems for Net-Zero Aviation. *Energy & Environmental Science*, 18(22), 9786-9838. <https://doi.org/10.1039/d5ee02865e>
- Nzengu, W., Faivre, J., Pauwelyn, A. S., Bolbot, V., Wennersberg, L. A. L., & Θεοτοκάτος, Γ. (2021). Regulatory Framework Analysis for the Unmanned Inland Waterway Vessel. *Wmu Journal of Maritime Affairs*, 20(3), 357-376. <https://doi.org/10.1007/s13437-021-00237-z>
- Panov, I., & Haq, A. U. (2024). A Critical Review of Information Provision for U-Space Traffic Autonomous Guidance. *Aerospace*, 11(6), 471. <https://doi.org/10.3390/aerospace11060471>
- Patria, D., Rossi, C., Fernández, R. A. S., & Domínguez, S. (2021). Nonlinear Control Strategies for an Autonomous Wing-in-Ground-Effect Vehicle. *Sensors*, 21(12), 4193. <https://doi.org/10.3390/s21124193>
- Raptis, E. K., Kapoutsis, A. C., & Kosmatopoulos, E. B. (2025). Agentic LLM-based Robotic Systems for Real-World Applications: A Review on Their Agenticity and Ethics. *Frontiers in Robotics and Ai*, 12. <https://doi.org/10.3389/frobt.2025.1605405>
- Rehberg, L., & Brem, A. (2024). Bridging the Gap: Linking Prototyping and Technology Readiness Levels for Integrative Product Development. *Creativity and Innovation Management*, 34(1), 237-252. <https://doi.org/10.1111/caim.12633>
- Salma, V., & Schmehl, R. (2023). Operation Approval for Commercial Airborne Wind Energy Systems. *Energies*, 16(7), 3264. <https://doi.org/10.3390/en16073264>
- Sy., R. P. R. (2022). Business Strategy for PT Pelita Air Service to Increase Revenue. *International Journal of Current Science Research and Review*, 05(04). <https://doi.org/10.47191/ijcsrr/v5-i4-53>
- Takács, Á., & Haidegger, T. (2022). Infrastructural Requirements and Regulatory Challenges of a Sustainable Urban Air Mobility Ecosystem. *Buildings*, 12(6), 747. <https://doi.org/10.3390/buildings12060747>
- Tantawutho, T., & Khongphueng, V. (2022). Unmanned Aircraft System for Media Production: an Extension of Defense Technology. *Socialis Series in Social Science*, 3, 01-18. <https://doi.org/10.20319/socv3.0118>
- Vidal, C. F., & Wietchikoski, L. (2022). U.S. Hegemony in Latin America: The Southern Command as an Instrument of Consensus and Coercion. *Contexto Internacional*, 44(3). <https://doi.org/10.1590/s0102-8529.20224403e20210038>
- Vio, I., & Brdar, M. (2022). Maritime Autonomous Surface Ships – International and National Legal Framework. *Journal of Maritime & Transportation Science*, 62(1), 141-155. <https://doi.org/10.18048/2022.62.09>
- Wang, J., Zhou, K., Xing, W., Li, H., & Yang, Z. (2023). Applications, Evolutions, and Challenges of Drones in Maritime Transport. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(11), 2056. <https://doi.org/10.3390/jmse11112056>
- White, M., Padfield, G. D., Lu, L., Advani, S., & Potter, M. (2021). Review of Flight Simulation Fidelity Requirements to Help Reduce ‘Rotorcraft Loss of Control in-Flight’ Accident Rates. *Ceas Aeronautical Journal*, 12(4), 701-721. <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00542-6>
- Wilcox, S. R., Wax, R. S., Meyer, M. T., Stocking, J. C., Báez, A. A., Cohen, J., Moss, M., Frakes, M. A., Scruth, E., Weir, W., Zonies, D., Guyette, F. X., Kaplan, L. J., & Cannon, J. W. (2022). Interfacility Transport of Critically Ill Patients. *Critical Care Medicine*, 50(10), 1461-1476. <https://doi.org/10.1097/ccm.00000000000005639>
- Yan, Y., Wang, K., & Qu, X. (2024). Urban Air Mobility (UAM) and Ground Transportation Integration: A Survey. *Frontiers of Engineering Management*, 11(4), 734-758. <https://doi.org/10.1007/s42524-024-0298-0>
- York, D., Xu, J., Foli, K. J., & Potetz, J. (2021). Safety Competency, Certification, and Practical Drift. *Air Medical Journal*, 41(1), 78-81. <https://doi.org/10.1016/j.amj.2021.10.008>
- Şenvar, Ö., & ÜNVER, S. (2022). An Overview to Unmanned Aerial Vehicles From Perspectives of Quality and Safety Management in Aviation. *Uluslararası Muhendislik Arastirma Ve Gelistirme Dergisi*, 14(2), 917-940. <https://doi.org/10.29137/umagd.1064242>