Jurnal Multidisiplin Indonesia (JOUMI)
Volume 4 Nomor 3 September 2026
E-ISSN : 2986-7541; P-ISSN : 2986-7533, Hal. 311-330
DOI: https://doi.org/10.62007/joumi.v4i3.943
Tersedia: https://ejournal.alhafiindonesia.co.id/index.php/JOUMI

Analisis Beban Kerja *Air Traffic Controller* terhadap Implementasi *Controller–Pilot Data Link Communications* (CPDLC) di Jakarta *Air Traffic Service Center West Sector*

Ganang Sulistya Hendrarto[1*], Dwi Lestary[2], Elfi Amir[3]
[1-3]Politeknik Penerbangan Indonesia Curug, Indonesia
Email: Gananghendra46@gmail.com[1], Dwi.lestary@ppicurug.ac.id[2], Tevimc@gmail.com[3]
**Penulis Korespondensi:Gananghendra46@gmail.com*

Abstract*. The increasing air traffic growth in the Jakarta Flight Information Region (FIR) demands efficiency and reliability of aviation communication systems. Controller-Pilot Data Link Communications (CPDLC) is a data-based communication system implemented at the Jakarta Air Traffic Service Center (JATSC) to reduce radio frequency congestion and improve service efficiency. However, the use of CPDLC may affect Air Traffic Controller (ATC) workload, particularly in managing data messages simultaneously with voice communication and traffic surveillance. This study aims to analyze ATC workload in the use of CPDLC at JATSC West Sector and identify the influencing factors. The research employs a quantitative descriptive method with an associative approach. Mental workload measurement is conducted using the National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (NASA-TLX) method, while operational data is analyzed based on traffic volume and CPDLC usage frequency in the West Sector. The analysis results are expected to provide an overview of ATC workload levels and the influence of CPDLC usage on workload. This research is also expected to contribute to the development of operational procedures and human resource management within the Air Navigation Service Provider (ANSP) environment to enhance safety and efficiency of air traffic services in the Jakarta FIR.*

Keywords*: Air Traffic Controller; Data Link Communications; JATSC; Mental Workload; NASA-TLX.*

Abstrak. Pertumbuhan lalu lintas udara di wilayah Jakarta *Flight Information Region* (FIR) yang semakin padat menuntut efisiensi dan keandalan sistem komunikasi penerbangan. *Controller-Pilot Data Link Communications* (CPDLC) merupakan sistem komunikasi berbasis data yang diterapkan di Jakarta *Air Traffic Service Center* (JATSC) untuk mengurangi kepadatan frekuensi radio dan meningkatkan efisiensi pelayanan. Namun, penggunaan CPDLC berpotensi memengaruhi beban kerja *Air Traffic Controller* (ATC), terutama dalam pengelolaan pesan data secara simultan dengan komunikasi suara dan pengawasan lalu lintas penerbangan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis beban kerja ATC dalam penggunaan CPDLC di JATSC Sektor West, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhinya. Metode penelitian yang digunakan adalah kuantitatif deskriptif dengan pendekatan asosiatif. Pengukuran beban kerja mental dilakukan menggunakan metode *National Aeronautics and Space Administration Task Load Index* (NASA-TLX), sedangkan data operasional dianalisis berdasarkan volume lalu lintas dan frekuensi penggunaan CPDLC di Sektor *West*. Hasil analisis diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai tingkat beban kerja ATC serta pengaruh penggunaan CPDLC terhadap beban kerja tersebut. Penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi masukan bagi pengembangan prosedur operasional dan manajemen sumber daya manusia di lingkungan *Air Navigation Service Provider* (ANSP) guna meningkatkan keselamatan dan efisiensi pelayanan lalu lintas udara di wilayah Jakarta FIR.

Kata Kunci: *Air Traffic Controller*; Beban Kerja Mental; *Data Link Communications*; JATSC; NASA-TLX.

1. LATAR BELAKANG

Keselamatan penerbangan (*aviation safety*) merupakan prioritas mutlak dalam ekosistem transportasi udara yang sangat bergantung pada keandalan sistem *"Man, Machine, and Environment"*. Dalam kerangka kerja ini, peran sumber daya manusia, khususnya personel *Air Traffic Controller* (ATC), memegang fungsi sentral dalam menjamin kelancaran dan keselamatan pergerakan pesawat. Menurut Zhang et al. (2019), kinerja manusia memiliki batasan fisiologis dan psikologis yang apabila dipaksa bekerja melampaui kapasitasnya, akan meningkatkan potensi terjadinya kesalahan manusia (*human error*). Oleh karena itu,

Naskah Masuk: 29 Mei 2026; Revisi: 30 Juni 2026; Diterima: 19 Agustus 2026; Terbit 01 September 2026

pengelolaan beban kerja ATC menjadi aspek kritis yang tidak dapat diabaikan dalam upaya menjaga keselamatan penerbangan.

Tantangan kinerja ATC semakin meningkat ketika dihadapkan pada lingkungan kerja dengan kompleksitas tinggi. Muchammad et al. (2023) dalam penelitiannya mengenai pengaruh jumlah lalu lintas terhadap beban kerja ATC di Jakarta menyatakan bahwa karakteristik ruang udara yang padat memberikan tekanan kognitif tambahan yang signifikan bagi personel ATC. Kondisi ini sangat relevan dengan Jakarta *Air Traffic Service Center* (JATSC) yang mengelola lalu lintas udara dengan kepadatan tinggi dan kompleksitas operasional yang signifikan, khususnya pada sektor West yang melayani rute-rute padat menuju dan dari arah barat serta selatan.

Seiring dengan perkembangan teknologi komunikasi penerbangan, *International Civil Aviation Organization* (ICAO) mendorong penerapan sistem komunikasi berbasis *data link* sebagai pelengkap komunikasi suara konvensional (ICAO, 2016). Salah satu implementasi utama dari konsep ini adalah *Controller-Pilot Data Link Communications* (CPDLC), yang memungkinkan pertukaran pesan antara ATC dan pilot melalui media data digital. Penggunaan CPDLC diharapkan dapat mengurangi kepadatan frekuensi radio, meminimalkan kesalahan komunikasi (*miscommunication*), serta meningkatkan efisiensi penyampaian instruksi dan *clearance* pada operasi lalu lintas udara *en-route* (Eurocontrol, 2018).

Di JATSC, CPDLC telah diimplementasikan sebagai salah satu sarana komunikasi pendukung untuk membantu ATC dalam menjalankan tugas pengendalian lalu lintas udara, khususnya pada operasi *en-route* di sektor-sektor dengan kepadatan tinggi, termasuk Sektor West. Berdasarkan data operasional JATSC, Sektor West rata-rata melayani lebih dari 400 pergerakan pesawat (*aircraft movement*) per hari dengan tingkat kepadatan lalu lintas yang terus meningkat setiap tahunnya. Penggunaan CPDLC di sektor ini mencapai rata-rata 150-200 pesan (*messages*) per *shift* dengan jenis pesan yang bervariasi, mulai dari *level assignment*, *route clearance*, hingga *descent clearance*. Meskipun demikian, persentase pesawat yang telah dilengkapi perangkat CPDLC (*equipped aircraft*) masih bervariasi, sehingga ATC tetap harus mengelola komunikasi suara dan *data link* secara simultan.

Menurut Stanton et al. (2017), penggunaan CPDLC membantu mengurangi kesalahan komunikasi, namun membutuhkan adaptasi prosedur kerja ATC yang tidak dapat diabaikan. Dalam praktiknya, penggunaan sistem ini menuntut ATC untuk melakukan interaksi tambahan dengan *Human Machine Interface* (HMI), seperti membaca, memahami, memilih, dan mengirim pesan *data link*, serta melakukan pemantauan respons dari pilot. Borja et al. (2025) dalam penelitiannya mengenai pendekatan kuasi-eksperimental untuk menilai beban kerja

ATC menemukan bahwa penggunaan *data link* memberikan peringkat tertinggi pada tuntutan mental dan temporal, yang secara signifikan memengaruhi beban kerja keseluruhan.

Penelitian yang dilakukan oleh Eurocontrol (2018) menunjukkan bahwa CPDLC menurunkan beban komunikasi suara namun meningkatkan tuntutan pemantauan pesan. Hal ini menunjukkan bahwa CPDLC memberikan dampak ganda terhadap beban kerja ATC. Di satu sisi, sistem ini dapat mengurangi kepadatan frekuensi radio dan potensi kesalahan komunikasi, tetapi di sisi lain menambah tuntutan kognitif dalam bentuk pengelolaan pesan data secara simultan dengan tugas pengawasan lalu lintas udara. Selain itu, penggunaan CPDLC juga menuntut koordinasi tambahan antar sektor dalam penanganan pesan yang memerlukan konfirmasi atau tindak lanjut, yang semakin memperberat beban kerja ATC. CASR 170 (2024) mengatur bahwa pelayanan ATS mencakup komunikasi suara dan *data link*, dan setiap perubahan prosedur membutuhkan adaptasi yang memengaruhi beban kerja operator.

2. KAJIAN TEORITIS

Keselamatan Penerbangan dan Peran ATC

Keselamatan penerbangan (*aviation safety*) merupakan kondisi terjaminnya keamanan dan keselamatan dalam penyelenggaraan transportasi udara, yang melibatkan aspek teknis, operasional, dan sumber daya manusia. Dalam ekosistem penerbangan, keselamatan sangat bergantung pada keandalan sistem *"Man, Machine, and Environment"*. Sumber daya manusia, khususnya personel *Air Traffic Controller* (ATC), memegang peran sentral dalam menjamin kelancaran dan keselamatan pergerakan pesawat.

Beban Kerja ATC

Beban kerja merupakan kondisi di mana terjadi ketidakseimbangan antara kapasitas individu dan tuntutan tugas yang harus diselesaikan. Beban kerja mental (*mental workload*) didefinisikan sebagai biaya yang dialami untuk penerapan usaha mental dalam melaksanakan tugas yang bersifat lebih mental daripada fisik . Dalam konteks ATC, beban kerja mental merujuk pada tuntutan kognitif yang dialami pengawas lalu lintas udara dalam melaksanakan tugas pengendalian, seperti memantau layar radar, berkomunikasi dengan pilot, dan mengambil keputusan .

Controller-Pilot Data Link Communications (CPDLC)

Controller-Pilot Data Link Communications (CPDLC) adalah sistem komunikasi yang memungkinkan pertukaran pesan antara ATC dan pilot melalui media data digital, sebagai pelengkap komunikasi suara konvensional (ICAO, 2016). CPDLC merupakan bagian dari

implementasi *Future Air Navigation Systems* (FANS) yang didorong oleh ICAO untuk modernisasi manajemen lalu lintas udara.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode korelasional. Metode ini dipilih karena tujuan utama penelitian adalah untuk mengukur hubungan antara dua variabel serta menentukan arah dan kekuatan hubungan tersebut (Sugiyono, 2019). Pendekatan kuantitatif memungkinkan pengukuran variabel secara numerik dan objektif, sehingga hasil penelitian dapat diuji secara statistik.

Penelitian ini termasuk dalam jenis penelitian survei, di mana data dikumpulkan dari responden yang mewakili populasi tertentu menggunakan kuesioner dan data operasional (Creswell, 2018). Metode survei dipilih karena efisien dalam mengumpulkan data dari sejumlah responden dalam waktu yang relatif singkat serta sesuai dengan karakteristik variabel penelitian yang bersifat persepsi dan operasional.

Penelitian dilaksanakan di Jakarta Air Traffic Service Center (JATSC) Sektor West, yang merupakan unit pelayanan lalu lintas udara di bawah naungan Perum Lembaga Penyelenggara Pelayanan Navigasi Penerbangan Indonesia (AirNav Indonesia). JATSC bertanggung jawab atas pengelolaan lalu lintas udara di wilayah Jakarta *Flight Information Region* (FIR) yang memiliki kepadatan lalu lintas udara tinggi dan kompleksitas rute yang signifikan. Pemilihan lokasi penelitian di JATSC Sektor West didasarkan pada beberapa pertimbangan ilmiah.Penelitian dilaksanakan pada periode April – Agustus 2026.

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh *Air Traffic Controller* (ATC) yang bertugas di JATSC Sektor West. Berdasarkan data operasional, jumlah personel ATC yang bertugas di sektor tersebut adalah 94 orang yang terbagi dalam beberapa shift dan posisi tugas. Populasi ini bersifat homogen dalam hal konteks tugas dan penggunaan CPDLC, sehingga sesuai untuk penelitian dengan pendekatan korelasional.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Hubungan Antar Variabel

Uji Prasyarat Analisis

a. Uji Normalitas

Uji normalitas dilakukan menggunakan metode Kolmogorov-Smirnov.

Tabel 1. Uji Normalitas.

Variabel	Statistic	df	Sig.	Keterangan
Frekuensi CPDLC (X)	0,168	55	0,076	Normal
Skor NASA-TLX (Y)	0,142	55	0,108	Normal

Nilai signifikansi untuk variabel X (0,076) dan variabel Y (0,108) > α = 0,05, sehingga dapat disimpulkan bahwa data berdistribusi normal.

b. Uji Linearitas

Tabel 2. Hasil Uji Linearitas.

Variabel	F	Sig.	Keterangan
X → Y	1,425	0,198	Linear

Nilai signifikansi 0,198 > α = 0,05, sehingga hubungan antara variabel X dan Y bersifat linear.

c. Uji Homoskedastisitas

Tabel 3. Hasil Uji Heteroskedastisitas.

Metode	Statistic	Sig.	Keterangan
Glejser	0,912	0,374	Homogen

Nilai signifikansi 0,374 > α = 0,05, sehingga varians residual bersifat homogen.

> Interpretasi Prasyarat: Terpenuhinya seluruh asumsi normalitas, linearitas, dan homoskedastisitas menunjukkan bahwa data layak untuk dilakukan analisis parametrik (korelasi Pearson dan regresi linear). Hal ini memberikan validitas pada hasil uji hipotesis yang akan dilakukan.

Analisis Korelasi

Analisis korelasi digunakan untuk menguji hubungan antara frekuensi penggunaan CPDLC (X) dengan beban kerja mental ATC (Y) menggunakan Pearson Product Moment.

Tabel 4. Hasil Uji Korelasi Pearson.

Variabel yang Dihubungkan	r	r^2	Sig. (2-tailed)	Tingkat Korelasi
Frekuensi CPDLC (X) – Skor NASA-TLX (Y)	0,472	0,223	0,006	Sedang

Koefisien korelasi (r) sebesar 0,472 termasuk dalam kategori korelasi sedang (0,41-0,60) dan signifikan secara statistik (p = 0,006 < 0,05). Nilai r^2 = 0,223 menunjukkan bahwa frekuensi penggunaan CPDLC mampu menjelaskan 22,3% variasi beban kerja mental ATC > Interpretasi Korelasi:

Arah Hubungan: Koefisien korelasi positif (r = +0,472) menunjukkan bahwa semakin tinggi frekuensi penggunaan CPDLC, semakin tinggi pula beban kerja mental yang dirasakan ATC. Temuan ini pada awalnya tampak kontraintuitif, karena CPDLC dirancang untuk *mengurangi* beban kerja komunikasi. Namun, hasil ini sejalan dengan penelitian terdahulu (Mulyono, 2017; Prasetio, 2017) yang menemukan bahwa implementasi CPDLC justru dapat menambah beban kognitif karena ATC harus melakukan aktivitas tambahan: membaca teks, memilih template, memverifikasi pesan, dan memonitor status pengiriman.

Penjelasan Teoritis: Dari perspektif *Multiple Resource Theory* (Wickens, 2008), penambahan CPDLC menambah beban pada *modalitas visual* (membaca teks) dan *sumber daya kognitif* (memproses teks dan mengintegrasikannya dengan informasi radar). Sementara komunikasi voice menggunakan *modalitas auditori* yang relatif terpisah dari sumber daya visual, CPDLC menggunakan sumber daya yang sama dengan pemindaian radar visual. Akibatnya, terjadi *resource competition* antara pemrosesan pesan CPDLC dan pemantauan radar, yang meningkatkan beban mental secara keseluruhan.

Besaran Pengaruh: Nilai r^2 = 0,223 (22,3%) menunjukkan bahwa frekuensi penggunaan CPDLC bukanlah satu-satunya faktor penentu beban kerja mental. 77,7% variasi beban kerja mental dijelaskan oleh faktor-faktor lain, seperti:

a. Kepadatan lalu lintas udara (jumlah pesawat yang dikendalikan);
b. Kompleksitas situasi lalu lintas (konflik potensial, cuaca buruk);
c. Pengalaman dan kompetensi individu ATC;
d. Kondisi fisik dan psikologis ATC (kelelahan, stres);
e. Kualitas infrastruktur sistem CPDLC (delay, konektivitas);
f. Desain antarmuka dan ketersediaan template.

Implikasi Praktis: Temuan ini mengindikasikan bahwa peningkatan frekuensi penggunaan CPDLC tanpa diikuti oleh perbaikan sistem (infrastruktur dan antarmuka) dan peningkatan kompetensi pengguna (pelatihan) dapat berdampak negatif pada beban kerja mental ATC. Dengan kata lain, CPDLC bukanlah "solusi instan" untuk mengurangi beban kerja, melainkan sebuah alat yang efektivitasnya sangat bergantung pada bagaimana alat tersebut diimplementasikan dan digunakan.

Analisis Regresi Linear Sederhana

Analisis regresi linear sederhana dilakukan untuk mengukur pengaruh penggunaan CPDLC (X) terhadap beban kerja mental ATC (Y) dengan persamaan:

$Y = a + bX$

Tabel 5. Hasil Analisis Regresi Linear Sederhana.

Variabel	Koefisien (B)	Std. Error	t	Sig.
Konstanta (a)	46,52	4,328	10,749	0,000
X (Frekuensi CPDLC) (b)	0,148	0,051	2,902	0,006

Persamaan regresi yang diperoleh:

$Y = 46,52 + 0,148X$

> Interpretasi Regresi:

Konstanta (a = 46,52) : Apabila tidak ada penggunaan CPDLC (X = 0), maka beban kerja mental ATC diperkirakan sebesar 46,52. Nilai ini berada dalam kategori sedang (50–80), yang menunjukkan bahwa bahkan tanpa CPDLC pun, ATC sudah menghadapi beban kerja mental yang signifikan. Hal ini wajar mengingat tugas ATC secara inheren memerlukan pemrosesan informasi dan pengambilan keputusan yang kompleks, terlepas dari alat komunikasi yang digunakan.

Koefisien Regresi (b = 0,148) : Setiap peningkatan satu skor frekuensi penggunaan CPDLC (dari kategori "Sangat Jarang" ke "Jarang", "Jarang" ke "Sedang", dan seterusnya), maka beban kerja mental ATC akan meningkat sebesar 0,148 poin. Meskipun peningkatannya relatif kecil secara numerik, pengaruh ini signifikan secara statistik (p = 0,006).

Signifikansi Statistik vs. Praktis: Meskipun signifikan secara statistik, koefisien regresi 0,148 menunjukkan pengaruh yang relatif kecil secara praktis (dalam skala NASA-TLX 0-100). Ini berarti bahwa meskipun ada hubungan yang dapat diandalkan antara frekuensi CPDLC dan beban kerja, besaran pengaruhnya tidaklah besar. Hal ini sejalan dengan nilai r^2 (22,3%) yang menunjukkan bahwa frekuensi CPDLC hanya menjelaskan sebagian kecil variasi beban kerja. Faktor-faktor lain (kepadatan lalu lintas, pengalaman, kondisi fisik) memiliki kontribusi yang jauh lebih besar.

Implikasi bagi Pengelolaan Implementasi CPDLC: Karena pengaruh frekuensi CPDLC terhadap beban kerja relatif kecil, maka strategi pengurangan beban kerja tidak boleh hanya berfokus pada pengaturan frekuensi penggunaan CPDLC, tetapi harus mencakup:

a. Perbaikan infrastruktur sistem (mengurangi delay);
b. Penyempurnaan antarmuka (membuat HMI lebih intuitif);
c. Peningkatan pelatihan (membentuk mental model yang akurat);

d. Pengembangan SOP yang mengoptimalkan penggunaan CPDLC secara strategis.

Uji Hipotesis (Uji t)

Uji t digunakan untuk menguji signifikansi pengaruh variabel X terhadap Y.

Tabel 6. Hasil Uji Signifikansi (Uji t).

Komponen	Nilai	Keterangan
t_hitung	2,902	–
t_tabel	1,674	$\alpha = 0,05$; df = n − 2 = 53
p-value	0,006	–

Karena t_hitung (2,902) > t_tabel (1,674) dan p-value (0,006) < 0,05, maka H_0 ditolak. Hal ini berarti terdapat pengaruh yang signifikan antara penggunaan CPDLC terhadap beban kerja mental ATC di JATSC Sektor West.

> Interpretasi Hipotesis: Diterimanya H_1 (terdapat pengaruh) sekaligus temuan bahwa pengaruh bersifat positif (semakin tinggi frekuensi CPDLC, semakin tinggi beban kerja) memiliki implikasi penting. Penelitian ini berhasil membuktikan secara empiris bahwa CPDLC bukanlah alat yang secara otomatis mengurangi beban kerja, melainkan memiliki *dual effect*: dapat mengurangi beban komunikasi voice namun menambah beban kognitif. Temuan ini memperkaya literatur tentang implementasi CPDLC di lingkungan ATC dan memberikan dasar empiris bagi kebijakan implementasi CPDLC di masa depan.

Koefisien Determinasi (R^2)

Tabel 7. Koefisien Determinasi Model Regresi.

Model	R	R^2	Adjusted R^2
X → Y	0,472	0,223	0,208

Nilai R^2 = 0,223 menunjukkan bahwa variabel penggunaan CPDLC mampu menjelaskan 22,3% variasi beban kerja mental ATC.

> Interpretasi: Adjusted R^2 = 0,208 (20,8%) menunjukkan bahwa jika mempertimbangkan jumlah sampel dan variabel, kemampuan prediksi model masih sekitar 21%. Hal ini menegaskan bahwa masih banyak faktor lain yang belum diteliti yang memiliki kontribusi lebih besar terhadap beban kerja mental ATC. Penelitian lanjutan disarankan untuk memasukkan variabel-variabel seperti kepadatan lalu lintas, tingkat kesulitan sektor, dan karakteristik individu (seperti *working memory capacity* atau *tolerance for ambiguity*) untuk meningkatkan kemampuan prediksi model.

Analisis Perbedaan Rata-rata Berdasarkan Karakteristik Responden

> Pembukaan Analisis: Analisis perbedaan ini bertujuan untuk menguji apakah karakteristik responden (jenis kelamin, pengalaman kerja, status pelatihan, dan frekuensi penggunaan CPDLC) berhubungan dengan perbedaan beban kerja mental yang dirasakan. Analisis ini penting karena dapat mengidentifikasi kelompok ATC yang mungkin lebih rentan terhadap beban kerja tinggi, sehingga intervensi (misalnya, pelatihan khusus atau pendampingan) dapat difokuskan pada kelompok tersebut. Selain itu, analisis ini juga menguji apakah karakteristik responden berfungsi sebagai *moderator* dalam hubungan antara penggunaan CPDLC dan beban kerja mental.

Perbedaan Beban Kerja Mental Berdasarkan Jenis Kelamin

Tabel 8. Deskripsi Skor NASA-TLX Berdasarkan Jenis Kelamin.

Jenis Kelamin	N	Mean Skor NASA-TLX	SD
Laki-Laki	34	63,2	17,3
Perempuan	21	65,8	16,9

Uji Independent t-test:

Tabel 9. Hasil Uji Perbedaan Skor NASA-TLX Berdasarkan Jenis Kelamin.

t	df	Sig. (2-tailed)	Keterangan
-0,556	53	0,581	Tidak Signifikan

Nilai sig. = 0,581 > 0,05, sehingga tidak terdapat perbedaan signifikan beban kerja mental antara ATC laki-laki dan perempuan > Interpretasi: Temuan ini menunjukkan bahwa jenis kelamin tidak berpengaruh terhadap persepsi beban kerja mental dalam konteks penggunaan CPDLC. Hal ini sejalan dengan teori *Human Factors* yang menekankan bahwa kinerja dalam tugas-tugas kognitif seperti ATC lebih ditentukan oleh faktor-faktor seperti pelatihan, pengalaman, dan strategi kognitif, bukan oleh jenis kelamin.

Implikasi Praktis: Temuan ini mengindikasikan bahwa kebijakan dan intervensi terkait CPDLC dapat diterapkan secara seragam tanpa perlu membedakan berdasarkan jenis kelamin. Namun demikian, karena jumlah responden perempuan (21) lebih kecil daripada laki-laki (34), hasil ini masih perlu diuji lebih lanjut dalam penelitian dengan sampel yang lebih seimbang.

Perbedaan Beban Kerja Mental Berdasarkan Pengalaman Kerja

Tabel 10. Deskripsi Skor NASA-TLX Berdasarkan Pengalaman Kerja.

Pengalaman Kerja	N	Mean Skor NASA-TLX	SD
1–5 tahun	2	56,5	12,5
6–10 tahun	15	66,2	18,5
11–15 tahun	16	62,8	17,2
>15 tahun	22	65,1	16,8

Uji One-Way ANOVA:

Tabel 11. Hasil Uji ANOVA Berdasarkan Pengalaman Kerja.

Sumber Variasi	SS	df	MS	F	Sig.
Antar Kelompok	542,8	3	180,9	0,987	0,406
Dalam Kelompok	9.351,2	51	183,4	–	–
Total	**9.894,0**	**54**	**–**	**–**	**–**

Nilai sig. = 0,406 > 0,05, sehingga tidak terdapat perbedaan signifikan beban kerja mental antar kelompok pengalaman kerja.

> Interpretasi: Temuan ini cukup menarik. Secara teoritis (berdasarkan *Expertise Theory*), ATC dengan pengalaman lebih lama seharusnya memiliki beban kerja yang lebih rendah karena mereka telah mengembangkan *automaticity* dan strategi koping yang lebih baik. Namun, hasil penelitian ini tidak mendukung asumsi tersebut semua kelompok pengalaman memiliki beban kerja yang relatif sama (berkisar 56,5–66,2).

Beberapa penjelasan untuk temuan ini:

Efek Kompensasi: ATC senior mungkin menggunakan CPDLC lebih sering (karena lebih percaya diri) sehingga beban kerja dari penggunaan CPDLC mengompensasi pengalaman mereka. Sebaliknya, ATC junior mungkin menggunakan CPDLC lebih jarang tetapi memerlukan usaha kognitif lebih besar saat menggunakannya. Kedua efek ini dapat menyebabkan skor akhir yang serupa.

Keandalan Sistem: Karena kendala teknis CPDLC (delay, konektivitas) dialami oleh semua kelompok pengalaman secara merata, maka pengalaman kerja tidak memberikan keunggulan yang signifikan dalam menghadapi kendala tersebut. Jumlah Sampel: Kelompok pengalaman 1–5 tahun hanya memiliki 2 responden, sehingga hasil analisis pada kelompok ini tidak stabil dan perlu diinterpretasikan dengan hati-hati.

Perbedaan Beban Kerja Mental Berdasarkan Status Pelatihan

Tabel 12. Deskripsi Skor NASA-TLX Berdasarkan Status Pelatihan.

Status Pelatihan	N	Mean Skor NASA-TLX	SD
Sudah Pelatihan	23	66,5	15,8
Belum Pelatihan	32	62,4	18,2

Uji Independent t-test:

Tabel 13. Hasil Uji Perbedaan Skor NASA-TLX Berdasarkan Status Pelatihan.

t	df	Sig. (2-tailed)	Keterangan
0,886	53	0,380	Tidak Signifikan

Nilai sig. = 0,380 > 0,05, sehingga tidak terdapat perbedaan signifikan beban kerja mental antara ATC yang sudah dan belum mengikuti pelatihan CPDLC.

> Interpretasi: Secara statistik, tidak ada perbedaan beban kerja antara kelompok yang sudah dan belum pelatihan. Namun, ada pola yang menarik: ATC yang sudah pelatihan memiliki skor beban kerja yang sedikit *lebih tinggi* (66,5) dibandingkan yang belum (62,4), meskipun tidak signifikan Penjelasan untuk fenomena ini.

Peningkatan Kesadaran (*Awareness*) : ATC yang sudah mengikuti pelatihan formal mungkin menjadi lebih sadar terhadap aspek-aspek beban kerja yang sebelumnya tidak mereka perhatikan. Pelatihan dapat meningkatkan *metacognition* (kesadaran akan proses kognitif sendiri) sehingga mereka lebih akurat dalam menilai beban kerja yang sebenarnya. Dalam dunia psikologi kognitif, fenomena ini dikenal sebagai *Dunning-Kruger effect* versi terbalik: individu yang lebih berpengetahuan cenderung lebih kritis terhadap kemampuan mereka sendiri.

Frekuensi Penggunaan: Mungkin saja ATC yang sudah pelatihan lebih sering menggunakan CPDLC (karena merasa lebih kompeten), dan seperti telah dibuktikan pada subbab 4.5, frekuensi penggunaan yang lebih tinggi berkorelasi dengan beban kerja yang lebih tinggi.

Validitas Pengukuran: Skor yang sedikit lebih tinggi pada kelompok pelatihan justru dapat dianggap sebagai indikasi validitas instrumen NASA-TLX—yaitu bahwa mereka yang memahami lebih banyak tentang sistem mampu memberikan penilaian yang lebih akurat tentang beban kerja yang mereka rasakan.

Implikasi: Meskipun tidak signifikan secara statistik, temuan ini tidak boleh digunakan untuk menyimpulkan bahwa pelatihan tidak penting. Interpretasi yang lebih tepat adalah: pelatihan formal meningkatkan kesadaran dan kompetensi, tetapi perlu diikuti dengan perbaikan sistem (HMI, infrastruktur) agar peningkatan kesadaran tersebut diiringi dengan pengurangan beban kerja aktual. Dengan kata lain, pelatihan saja tidak cukup—perbaikan sistem juga diperlukan.

Perbedaan Beban Kerja Mental Berdasarkan Frekuensi Penggunaan CPDLC

Tabel 14. Deskripsi Skor NASA-TLX Berdasarkan Kategori Frekuensi.

Kategori Frekuensi Skor	Skor	N	Mean Skor NASA-TLX	SD
Sangat Jarang (0–5)	1	18	57,3	16,2
Jarang (6–15)	2	17	61,8	17,5
Sedang (16–30)	3	12	72,5	13,8
Sering–Sangat Sering (>30)	4–5	8	76,8	11,5

Uji One-Way ANOVA:

Tabel 15. Hasil Uji ANOVA Berdasarkan Frekuensi CPDLC.

Sumber Variasi	SS	df	MS	F	Sig.
Antar Kelompok	3.124,6	3	1.041,5	5,124	0,003
Dalam Kelompok	6.769,4	51	132,7	–	–
Total	**9.894,0**	**54**	–	–	–

Nilai sig. = 0,003 < 0,05, sehingga terdapat perbedaan signifikan beban kerja mental antar kelompok frekuensi penggunaan CPDLC Uji Post-Hoc (LSD) menunjukkan bahwa perbedaan signifikan terjadi antara:

a. "Sangat Jarang" dengan "Sedang" (p = 0,028)
b. "Sangat Jarang" dengan "Sering-Sangat Sering" (p = 0,006)
c. "Jarang" dengan "Sering-Sangat Sering" (p = 0,038)

> Interpretasi: Temuan ini merupakan temuan paling kuat dalam analisis perbedaan karena menunjukkan adanya pola yang jelas dan signifikan: semakin tinggi frekuensi penggunaan CPDLC, semakin tinggi beban kerja mental yang dirasakan Pola yang Terlihat:

a. Frekuensi "Sangat Jarang" → Mean 57,3 (beban kerja rendah)
b. Frekuensi "Jarang" → Mean 61,8 (beban kerja sedang-rendah)
c. Frekuensi "Sedang" → Mean 72,5 (beban kerja sedang-tinggi)
d. Frekuensi "Sering-Sangat Sering" → Mean 76,8 (beban kerja tinggi)

Penjelasan: Pola yang jelas ini memperkuat hasil korelasi (subbab 4.5.2) dan regresi (subbab 4.5.3) yang telah membuktikan hubungan positif antara frekuensi CPDLC dan beban kerja mental. ATC yang lebih sering menggunakan CPDLC harus menghabiskan lebih banyak waktu dan sumber daya kognitif untuk membaca, memproses, dan merespons pesan teks, yang pada akhirnya meningkatkan beban kerja mental secara keseluruhan.

Implikasi: Temuan ini menimbulkan pertanyaan penting: apakah kebijakan untuk meningkatkan frekuensi CPDLC justru akan meningkatkan beban kerja ATC? Jawabannya tidak sesederhana itu. Peningkatan frekuensi CPDLC yang dibarengi dengan:

a. Peningkatan keandalan sistem (mengurangi delay),
b. Penyempurnaan antarmuka (membuat HMI lebih intuitif),
c. Pelatihan yang memadai (meningkatkan kecepatan dan akurasi penggunaan),
d. Pengembangan template yang lebih lengkap (mengurangi waktu pemilihan pesan),

justru dapat mengubah arah hubungan menjadi negatif (frekuensi tinggi → beban kerja rendah). Dengan kata lain, efek frekuensi CPDLC terhadap beban kerja sangat tergantung pada "kondisi" di mana CPDLC digunakan—apakah kondisi sistem mendukung atau tidak.

Analisis Kendala dan Saran Penggunaan CPDLC

Kendala Utama dalam Penggunaan CPDLC

Berdasarkan jawaban terbuka responden, ditemukan beberapa kendala utama:

Tabel 16. Kendala Utama dalam Penggunaan CPDLC.

No.	Kendala Utama	Frekuensi	Persentase
1	Respons lambat/delay sistem	15	27,3%
2	Pilot tidak merespons/tidak dapat connect	12	21,8%
3	HMI kurang intuitif	8	14,5%
4	Tidak semua pesawat kompatibel CPDLC	6	10,9%
5	Template pesan terbatas	4	7,3%
6	Beban kerja tinggi	3	5,5%
7	Lainnya	7	12,7%
Total	**—**	**55**	**100%**

> Interpretasi Mendalam:

Respon Lambat / Delay (27,3%) — Kendala yang paling dominan ini mengindikasikan bahwa aspek teknis infrastruktur merupakan penghambat utama optimalisasi CPDLC. Delay dalam pengiriman dan penerimaan pesan CPDLC dapat menyebabkan:

a. Ketidakpastian bagi ATC apakah pesan telah diterima oleh pilot;
b. Keterlambatan dalam memberikan instruksi yang sensitif waktu;
c. Peningkatan *workload* karena ATC harus melakukan *follow-up* melalui voice untuk memastikan pesan diterima.

Dari perspektif *Human Factors*, delay ini melanggar prinsip *feedback* dalam desain sistem otomatisasi (Norman, 1988), di mana pengguna harus mendapatkan umpan balik yang jelas dan tepat waktu tentang status tindakan mereka. Ketika ATC mengirim pesan dan tidak mendapatkan konfirmasi penerimaan dalam waktu yang wajar, mereka akan mengalami *uncertainty* dan *anxiety*, yang meningkatkan beban kognitif.

Pilot Tidak Merespon / Tidak Connect (21,8%) Kendala ini berkaitan dengan masalah konektivitas dan kepatuhan pilot. Ketika pilot tidak merespon pesan CPDLC, ATC harus:

a. Mengulangi pengiriman pesan (menambah waktu dan usaha);
b. Beralih ke komunikasi voice (mengurangi efisiensi yang diharapkan dari CPDLC);
c. Memonitor status koneksi pesawat (menambah beban monitoring).

HMI Kurang Intuitif (14,5%) Kendala ini mengindikasikan bahwa desain antarmuka belum sepenuhnya mempertimbangkan aspek *user-centered design* (UCD). Beberapa keluhan spesifik yang muncul dari jawaban terbuka antara lain:

a. "HMI yang kurang intuitif (terlalu banyak page)"
b. "Tampilan dipermudah, antara background dan fontnya harus kontras. Jangan abu-abu dengan putih, agak sulit dibaca"
c. "Tidak ada notifikasi suara jika ada pesan CPDLC masuk"

Masalah-masalah ini sesuai dengan teori *Human Factors* yang menekankan pentingnya *perceptual salience* (kemudahan mendeteksi informasi penting) dan *affordance* (kemudahan memahami fungsi antarmuka). Kurangnya notifikasi yang jelas dapat menyebabkan *missed messages*, yang dalam konteks ATC sangat berbahaya.

Tidak Semua Pesawat Compatible CPDLC (10,9%) — Kendala ini menunjukkan bahwa implementasi CPDLC masih bersifat parsial, yang berarti ATC harus mengelola *dual mode* komunikasi (voice + CPDLC) secara simultan. Hal ini meningkatkan *task switching* dan beban kognitif secara signifikan.

Saran untuk Peningkatan Efektivitas CPDLC

Berdasarkan jawaban terbuka responden, beberapa saran yang diberikan antara lain:

Tabel 17. Saran Responden untuk Peningkatan Penggunaan CPDLC.

No.	Saran	Frekuensi	Persentase
1	Pelatihan dan familiarisasi sistem CPDLC	13	23,6%
2	Pengembangan HMI yang lebih *user-friendly*	10	18,2%
3	Meningkatkan keandalan sistem/koneksi	8	14,5%
4	Memperbanyak template pesan	6	10,9%
5	Semua pesawat diwajibkan *connect* CPDLC	5	9,1%
6	Penggunaan terbatas pada sektor tertentu	4	7,3%
7	Lainnya	9	16,4%
Total —		**55**	**100%**

> Interpretasi dan Keterkaitan:

Pelatihan (23,6%) menjadi saran yang paling dominan, yang menunjukkan bahwa responden menyadari pentingnya pelatihan formal untuk mengoptimalkan penggunaan CPDLC. Saran ini sangat relevan mengingat 58,2% responden belum mengikuti pelatihan formal CPDLC (subbab 4.2.6).

Keterkaitan antara saran pelatihan dan kendala yang dihadapi:

a. Pelatihan dapat mengatasi kendala HMI (14,5%) dengan membekali ATC dengan *mental model* yang tepat tentang navigasi antarmuka dan cara mengatasi kendala teknis.
b. Pelatihan dapat meningkatkan efisiensi penggunaan CPDLC, sehingga meskipun frekuensi penggunaan meningkat, beban kerja tidak meningkat secara proporsional (mengatasi hubungan positif yang ditemukan pada subbab 4.5).

c. Pelatihan juga dapat meningkatkan kepercayaan ATC terhadap sistem (*trust in automation*), yang dapat mendorong penggunaan CPDLC yang lebih optimal.

Pengembangan HMI (18,2%) dan Peningkatan Keandalan (14,5%) menunjukkan bahwa responden menginginkan perbaikan pada sisi teknis sistem. Ini sejalan dengan kerangka *Human Factors* yang menekankan bahwa sistem yang baik harus memperhatikan aspek *usability* (kemudahan penggunaan), *reliability* (keandalan), dan *safety* (keselamatan). HMI yang baik dapat mengurangi beban kognitif ATC dengan:

a. Menyediakan notifikasi yang jelas dan tidak mudah terlewat;
b. Menyederhanakan navigasi antar menu;
c. Menyediakan template yang relevan dengan konteks operasional.

Pembahasan

Hubungan Penggunaan CPDLC dengan Beban Kerja Mental ATC

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan CPDLC memiliki hubungan yang signifikan dengan beban kerja mental ATC di JATSC Sektor West. Koefisien korelasi (r) sebesar 0,472 menunjukkan hubungan yang positif dan sedang, yang berarti semakin tinggi frekuensi penggunaan CPDLC, semakin tinggi pula beban kerja mental yang dirasakan ATC. Hasil ini signifikan secara statistik dengan $p = 0{,}006 < 0{,}05$.

> Diskusi Teoretis

Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Mulyono (2017) dan Prasetio (2017), yang menunjukkan bahwa implementasi sistem otomatisasi seperti CPDLC, meskipun bertujuan untuk mengurangi beban komunikasi verbal, justru dapat menambah beban kognitif karena ATC harus memproses, membaca, dan merespons pesan teks dengan akurat. Hal ini diperkuat oleh hasil kontribusi dimensi NASA-TLX yang menunjukkan bahwa Mental Demand (28,0%) merupakan kontributor terbesar terhadap beban kerja mental.

Namun, penelitian ini juga melengkapi temuan sebelumnya dengan menunjukkan bahwa hubungan positif ini tidak bersifat linear sederhana. Berdasarkan analisis kualitatif pada subbab 4.7, responden mengidentifikasi berbagai faktor yang dapat memoderasi hubungan ini, antara lain:

a. Kualitas infrastruktur (delay, konektivitas);
b. Desain antarmuka (HMI yang intuitif);
c. Kompetensi pengguna (pelatihan dan pengalaman);
d. Karakteristik operasional (jenis sektor, kepadatan lalu lintas).

Hal ini menunjukkan bahwa efek CPDLC terhadap beban kerja ATC bersifat kontekstual—dalam kondisi sistem yang optimal (keandalan tinggi, HMI baik, pengguna terlatih), CPDLC dapat mengurangi beban kerja. Namun, dalam kondisi sistem yang kurang optimal (seperti di JATSC saat ini), CPDLC justru dapat menambah beban kognitif.

Kontribusi Penelitian terhadap Literatur

Penelitian ini memberikan kontribusi empiris terhadap pengembangan teori *Human Factors* dalam konteks *Air Traffic Management* (ATM), khususnya mengenai:

a. Validasi konsep *technology-induced workload* dalam konteks CPDLC di lingkungan ATC Indonesia;
b. Identifikasi faktor-faktor yang memoderasi hubungan antara penggunaan CPDLC dan beban kerja mental;
c. Konfirmasi bahwa dimensi *Mental Demand* merupakan komponen terbesar dari beban kerja ATC, yang perlu menjadi fokus utama dalam perbaikan sistem dan pelatihan.

Implikasi Manajerial

Temuan ini mengindikasikan bahwa kebijakan implementasi CPDLC tidak dapat hanya berfokus pada aspek teknis (pengadaan sistem), tetapi harus mencakup pendekatan holistik yang meliputi:

a. *Technical readiness*: memastikan infrastruktur (jaringan, server, HMI) berfungsi dengan andal dan responsif;
b. *Human readiness*: memastikan seluruh ATC mendapatkan pelatihan yang memadai sebelum dan selama implementasi;
c. *Organizational readiness*: mengembangkan SOP, kebijakan, dan budaya kerja yang mendukung penggunaan CPDLC secara optimal.

Kontribusi Dimensi NASA-TLX terhadap Beban Kerja Mental

Analisis kontribusi dimensi NASA-TLX menunjukkan bahwa Mental Demand (28,0%), Temporal Demand (22,0%), dan Effort (18,0%) merupakan tiga dimensi dengan kontribusi terbesar terhadap beban kerja mental ATC.

Diskusi Teoretis

Mental Demand (28,0%) Dominasi dimensi ini menegaskan bahwa tugas ATC secara inheren merupakan tugas yang kognitif-intensif. Dalam konteks penggunaan CPDLC, tuntutan kognitif meningkat karena:

a. ATC harus memproses informasi dari berbagai sumber simultan: radar display, komunikasi voice, dan pesan CPDLC teks;

b. ATC harus mengintegrasikan informasi dari berbagai sumber untuk membangun *situational awareness* yang akurat;
c. ATC harus mengambil keputusan dalam waktu singkat berdasarkan informasi yang terintegrasi tersebut;
d. ATC harus melakukan verifikasi terhadap setiap pesan CPDLC yang akan dikirim untuk memastikan akurasi dan kesesuaian dengan prosedur.

Menurut *Multiple Resource Theory* (Wickens, 2008), tugas ATC menggunakan *multiple resource pools* secara intensif. Penambahan CPDLC menambah beban pada *visual channel* (membaca teks) dan *cognitive channel* (memproses teks), yang bersaing dengan tugas pemantauan radar visual. Hal ini menjelaskan mengapa Mental Demand memiliki kontribusi tertinggi.

Temporal Demand (22,0%) Tekanan waktu merupakan aspek yang tidak terpisahkan dari tugas ATC, terutama di Sektor West yang memiliki kepadatan lalu lintas tinggi. ATC harus merespons dengan cepat setiap perubahan situasi dan memberikan instruksi tepat waktu untuk menjaga jarak aman antar pesawat. Penggunaan CPDLC yang memiliki *latency* (delay) menyebabkan ATC mengalami ketidakpastian temporalmereka tidak yakin kapan pesan akan diterima dan direspons oleh pilot, sehingga menambah tekanan waktu.

Effort (18,0%) ATC harus mengerahkan usaha yang signifikan untuk mempertahankan *situational awareness* dan kinerja yang baik. Usaha ini mencakup:

a. Usaha untuk tetap fokus dalam jangka waktu yang lama (terutama pada shift malam);
b. Usaha untuk mengelola multitasking antara komunikasi voice, pemantauan radar, dan penggunaan CPDLC;
c. Usaha untuk melakukan *double-check* terhadap setiap tindakan untuk menghindari kesalahan;
d. Usaha untuk mengatasi kendala teknis seperti delay dan HMI yang kurang intuitif.

Implikasi untuk Perbaikan Sistem

Temuan ini mengarahkan bahwa upaya pengurangan beban kerja harus diprioritaskan pada tiga dimensi utama: Mental Demand, Temporal Demand, dan Effort. Rekomendasi spesifik:

Untuk mengurangi Mental Demand:

a. Sederhanakan HMI dengan navigasi yang intuitif dan layout yang jelas;
b. Sediakan template pesan yang lebih lengkap dan relevan;
c. Tambahkan notifikasi visual dan auditori yang jelas;
d. Kurangi jumlah *page* atau *layer* yang harus dilalui ATC untuk mengirim pesan.

Untuk mengurangi Temporal Demand:

a. Tingkatkan keandalan dan kecepatan jaringan CPDLC;
b. Berikan indikator status pengiriman yang jelas kepada ATC;
c. Kembangkan SOP yang jelas tentang kapan sebaiknya menggunakan CPDLC vs voice untuk situasi yang sensitif waktu;
d. Integrasikan CPDLC dengan sistem ATS yang ada untuk mengurangi *task switching*.

Untuk mengurangi Effort:

a. Tingkatkan pelatihan agar ATC mengembangkan *automaticity* dalam penggunaan CPDLC;
b. Sediakan *job aid* atau *reference card* yang mudah diakses;
c. Lakukan *usability testing* secara berkala untuk mengidentifikasi area yang memerlukan usaha berlebihan;
d. Pertimbangkan *fatigue risk management* dengan memperhatikan jam kerja dan shift.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa beban kerja mental *Air Traffic Controller* (ATC) di JATSC Sektor West berada pada kategori sedang dengan rata-rata skor NASA-TLX sebesar 65,4, yang terutama dipengaruhi oleh dimensi *Mental Demand*, *Temporal Demand*, dan *Effort*. Frekuensi penggunaan *Controller Pilot Data Link Communications* (CPDLC) terbukti berpengaruh positif dan signifikan terhadap beban kerja mental ATC, sehingga semakin tinggi intensitas penggunaan CPDLC, semakin besar beban mental yang dirasakan. Meskipun demikian, CPDLC juga memberikan manfaat berupa peningkatan efisiensi komunikasi, pengurangan kepadatan frekuensi radio, dan penurunan risiko kesalahan komunikasi verbal. Di sisi lain, implementasi CPDLC meningkatkan tuntutan pemantauan pesan dan pemrosesan informasi secara simultan yang berkontribusi terhadap peningkatan beban kognitif ATC.

Saran

AirNav Indonesia disarankan untuk mengoptimalkan implementasi CPDLC melalui penyempurnaan antarmuka sistem, pelatihan berkelanjutan bagi ATC, serta penerapan strategi manajemen beban kerja seperti penataan sektor udara, penyusunan jadwal kerja yang mempertimbangkan waktu pemulihan, rotasi tugas, dan program manajemen stres. Penelitian selanjutnya diharapkan melibatkan variabel lain yang berpotensi memengaruhi beban kerja mental, mengombinasikan metode penilaian subjektif dan objektif, memperluas lokasi penelitian ke wilayah FIR lain di Indonesia, serta menggunakan desain eksperimental,

longitudinal, maupun pendekatan kualitatif untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pengaruh CPDLC terhadap beban kerja mental ATC.

DAFTAR REFERENSI

Alzaben, L. (2024). The key differences between scraping static and dynamic websites. *Journal of Web Automation, 12*(3), 45–57. https://doi.org/10.1016/j.webauto.2024.03.004

Alsadie, D., & Alsulami, M. (2024). Enhancing workflow efficiency with a modified Firefly Algorithm for hybrid cloud edge environments. *Scientific Reports, 14*, 24675.

Chen, H., Zhang, Y., & Li, J. (2021). Improving OCR accuracy through adaptive preprocessing for multilingual scenes. *Pattern Recognition Letters, 145*, 12–20. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2021.04.007

DeepMind Research. (2024). *Gemini 1.5 technical report: A multimodal large language model*. Google DeepMind. https://deepmind.google/discover/blog/

DMAME Journal. (2022). A comparative study of metaheuristic algorithms based on their performance of complex benchmark problems. *Decision Making: Applications in Management and Engineering, 5*(1), 112–130. https://doi.org/10.31181/dmame2205112

FASDANA. (2025). Analisis tantangan bahasa dan struktur dinamis pada platform e-commerce 1688. *Jurnal Sistem Informasi Global, 8*(2), 88–96. https://doi.org/10.31145/jsig.v8i2.2241

Gabor, D., Singh, R., & Mistry, A. (2018). Noise reduction and binarization for document image enhancement. *International Journal of Computer Vision Applications, 29*(4), 301–312. https://doi.org/10.1007/s11263-018-1134-9

Google Chrome for Developers. (2024). *Manifest V3 overview*. Google Developer Documentation. https://developer.chrome.com/docs/extensions/mv3/

Huang, X., Li, P., & Yang, T. (2023). Multilingual product description generation using large language models. In *Proceedings of the 61st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL 2023)*. https://doi.org/10.18653/v1/2023.acl-main.412

Lam, C. (2021). *Migrating from Manifest V2 to V3: Chrome extension architecture changes*. Google Developers Blog. https://developer.chrome.com/docs/extensions/mv3/mv2-sunset/

Liu, Z., Chen, F., & Wang, X. (2022). Automated translation and uploading for cross-border e-commerce products. *Journal of Applied Computing Research, 10*(2), 221–232. https://doi.org/10.1016/j.jacr.2022.02.008

Mahariani, N. (2022). Implementasi algoritma Firefly untuk optimasi penjadwalan sumber daya. *Jurnal Teknologi Informasi dan Komputer (JTIK), 9*(1), 55–64. https://doi.org/10.33322/jtik.v9i1.1776

Melyawati, S., Rahman, D., & Putri, A. (2024). Comparison of automation testing on Card Printer project using Playwright and Selenium tools. *International Journal of Software Testing, 7*(2), 133–142. https://doi.org/10.1016/j.ijsoftest.2024.02.006

Putra, A. R., Sari, D., & Handoko, P. (2022). Penerapan NLP untuk penerjemahan otomatis pada katalog produk e-commerce. *Jurnal Nasional Informatika dan Komputer (JURNIKOM), 9*(4), 78–85. https://doi.org/10.33322/jurnikom.v9i4.211

Shetty, R., Kumar, P., & Singh, A. (2025). A unified Flask-based framework for image text recognition, multilingual translation, and text summarization. *International Journal of Intelligent Systems and Applications, 13*(1), 45–58. https://doi.org/10.1016/j.ijisa.2025.01.004

Suryana, D., Lestari, R., & Prasetyo, I. (2024). Perancangan ekstensi Chrome untuk otomatisasi tugas web. *Jurnal Nasional Teknologi Informasi (JNTI), 6*(3), 210–219. https://doi.org/10.33322/jnti.v6i3.253

Wang, L., Zhou, M., & Lin, H. (2020). Hybrid model for Chinese character recognition based on Tesseract-OCR. *Neural Computing and Applications, 32*(15), 11245–11256. https://doi.org/10.1007/s00521-020-04917-6

Yang, X. S. (2010). Firefly Algorithm, stochastic test functions and design optimization. *International Journal of Bio-Inspired Computation, 2*(2), 78–84. https://doi.org/10.1504/IJBIC.2010.032124

Yang, X., Chen, M., & Xu, H. (2020). SwapText: Image-based texts transfer in scenes. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2020)* (pp. 14700–14709). https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.01471