

Jilid

6

فرونٲير

FRONTIER

MEI 2025

**ANGKATAN TENTERA MASA HADAPAN:
INOVASI, KELESTARIAN DAN PRESTASI
DALAM PERTAHANAN**



KUMPULAN SAINS DAN TEKNOLOGI PERTAHANAN
KEMENTERIAN PERTAHANAN, BRUNEI DARUSSALAM



www.mindef.gov.bn



[Instagram.com/mindefbrunei](https://www.instagram.com/mindefbrunei)

FRONTIER

JILID 6

FRONTIER Jilid 6

Angkatan Tentera Masa Hadapan: Inovasi, Kelestarian dan Prestasi dalam Pertahanan

Hak Cipta Terpelihara © 2025

Kementerian Pertahanan Brunei Darussalam

Kandungan yang terdapat dalam jurnal ini merupakan pandangan, idea dan pendapat pengarang masing-masing dan tidak semestinya mewakili Kementerian Pertahanan, Negara Brunei Darussalam, Angkatan Bersenjata Diraja Brunei, jabatanarah-jabatanarah, jawatankuasa atau mana-mana kumpulan dan individu.

Semua hak terpelihara. Tidak ada mana-mana bahagian dalam jurnal ini dapat diterbitkan semula atau diedarkan dalam apa jua bentuk atau dengan apa jua cara, termasuk fotokopi, rakaman, atau kaedah elektronik atau mekanikal lain, tanpa kebenaran secara bertulis terlebih dahulu daripada pengarang.

Kumpulan Frontier

Penasihat

**Brigedier Jeneral (Bersara) Dato Seri Pahlawan
Haji Alirupendi bin Haji Perudin**
*Setiausaha Tetap
Kementerian Pertahanan*

Poh Kui Choon
*Timbalan Setiausaha Tetap
Kementerian Pertahanan*

Ketua Editor

Hasrinah binti Matyassin
*Penolong Pengarah
Pusat Penyelidikan dan Perkembangan Sains dan Teknologi*

Ahli Lembaga Editorial

Kdr Junaidi bin Duraman
Lt Kol. Pg Hairul Nizam bin Pg Hj Ali
Maj Dk (Dr.) Nurhayatul Filzah binti Pg Damit
Maj (Dr.) Ranald bin Mohd Faizal

Kumpulan Penerbitan

Dr. Hjh Siti Tajidah binti Haji Abd Talip
Lina 'Diyana binti Maidin
Suanaty binti Kalak

Penghargaan Khas

Urusetia Sains dan Teknologi Pertahanan

***Para pengarang yang berminat untuk mempamerkan
kertas penyelidikan mereka di dalam FRONTIER
bolehlah menghantar e-mel pertanyaan mereka
kepada Urusetia Sains and Teknologi Pertahanan di
def.technology@mindef.gov.bn***

i

Mengenai *FRONTIER*

ii

Kata-kata Aluan Editorial

01

Inovasi Dalam Logistik Ketenteraan: *Air Force Domestic Logistics System (ADLS)* “Evolusi Ke Arah Sistem Pengurusan Inventori Secara Digital”

12

Tanah di Brunei Darussalam: Tonggak Kelestarian

28

Teknologi Hijau Dalam Operasi Pertahanan: Perspektif Tentera Udara

44

Menganalisa Hubungan antara Keyakinan Diri Berdasarkan Penilaian Kendiri dan Prestasi Simulator: Rangka Kerja Penyelidikan Kuantitatif

Mengenai **FRONTIER**

FRONTIER merupakan sebuah jurnal S&T Pertahanan yang diterbitkan di bawah bimbingan Kumpulan Sains dan Teknologi Pertahanan. Tujuan utama FRONTIER adalah bagi mengongsikan artikel, laporan dan kertas kerja teknikal yang disediakan oleh warga Kementerian Pertahanan (KEMENTAH) dan Angkatan Bersenjata Diraja Brunei (ABDB), yang mana adalah selaras dengan usaha bagi menginstitusikan pengetahuan di dalam KEMENTAH dan ABDB.

Selain itu, FRONTIER juga bertujuan untuk meningkatkan kesedaran, menjana perbincangan dan menyemai inovasi di dalam bidang S&T Pertahanan di kalangan warga KEMENTAH dan ABDB.

Selaras dengan usaha digitisation yang diterajui oleh Kumpulan S&T Pertahanan, salinan FRONTIER boleh dimuat turun dari halaman sesawang KEMENTAH. Salinan terhad jurnal FRONTIER juga akan dicetak dan diedarkan kepada pegawai-pegawai kanan KEMENTAH dan ABDB, serta perpustakaan-perpustakaan di KEMENTAH dan ABDB.

KATA-KATA ALUAN EDITORIAL

Kumpulan Sains dan Teknologi Pertahanan (DSTG) sukacita menerbitkan Jurnal FRONTIER jilid ke-6 yang membawa tema '**Angkatan Tentera Masa Hadapan: Inovasi, Kelestarian dan Prestasi dalam Pertahanan.**'

Edisi kali ini mengetengahkan empat artikel yang memaparkan kajian-kajian yang dijalankan oleh Kementerian Pertahanan (KEMENTAH) dan Universiti Brunei Darussalam, yang meneliti bidang utama dalam inovasi pertahanan, kelestarian, dan prestasi. Artikel-artikel ini meliputi pelbagai topik, daripada pendigitalan logistik Tentera Udara Diraja Brunei, sehinggalah menangani cabaran alam sekitar dan pengintegrasian teknologi hijau dalam operasi pertahanan. Selain itu, jilid ini turut mengupas faktor manusia dalam prestasi dron, memberikan pemahaman yang bernilai dalam usaha mempertingkatkan kesiapsiagaan dan ketahanan ketenteraan.

Artikel pertama, '**Inovasi Dalam Logistik Ketenteraan: Air Force Domestic Logistics System (ADLS) "Evolusi Ke Arah Sistem Pengurusan Inventori Secara Digital"**' menekankan keperluan transformasi digital dalam logistik untuk meningkatkan kecekapan dan ketelusan dalam Tentera Udara Diraja Brunei.

'**Tanah di Brunei Darussalam: Tonggak Kelestarian**' pula menekankan kepentingan kualiti tanah bagi ekosistem Brunei, dan menyeru kepada amalan lestari untuk menangani cabaran alam sekitar.

'**Teknologi Hijau dalam Operasi Pertahanan: Perspektif Tentera Udara**' meneroka integrasi tenaga boleh diperbaharui dan teknologi mampan dalam operasi Tentera Udara, dengan menekankan faedah strategik dan keperluan untuk penyelarasan dengan matlamat kelestarian global.

Akhir sekali, '**Menganalisa Hubungan antara Keyakinan Diri Berdasarkan Penilaian Kendiri dan Prestasi Simulator: Rangka Kerja Penyelidikan Kuantitatif**' mengkaji hubungan antara prestasi simulator dron dan keyakinan sendiri juruterbang, serta memfokus kepada kerumitan dalam mengukur keyakinan dan keperluan kepada kaedah penilaian yang lebih baik.

Sebagai kesimpulan, artikel-artikel dalam jilid ini mencerminkan kemajuan penting dalam bidang pertahanan melalui inovasi teknologi, kelestarian dan pengoptimuman prestasi. Ia memberikan pandangan menyeluruh mengenai landskap pertahanan yang semakin berkembang, di mana kemajuan strategik dalam operasi, pengurusan alam sekitar dan faktor manusia adalah penting dalam membentuk kesiapsiagaan ketenteraan masa hadapan.

Hasrinah binti Matyassin

Ketua Editor

Mengenai Pengarang

► ***Lt (U) Nor-Qurratu'aini binti Mohd Roslan***

Beliau merupakan seorang komander penerbangan bagi unit perolehan bekalan di dalam Skuadron 42, Cawangan No. 4, Tentera Udara Diraja Brunei dan beliau bermula berkhidmat pada tahun 2021.

INOVASI DALAM LOGISTIK KETENTERAAN: *AIR FORCE DOMESTIC LOGISTICS SYSTEM (ADLS)* “EVOLUSI KE ARAH SISTEM PENGURUSAN INVENTORI SECARA DIGITAL”

Lt (U) Nor-Qurratu'aini binti Mohd Roslan

Unit Perolehan Bekalan, Skuadron 42, Cawangan No. 4
Tentera Udara Diraja Brunei

ABSTRAK

Ketenteraan amat bergantung kepada pengurusan inventori yang cekap untuk mengekalkan kesediaan operasi dan sokongan logistik. Dengan adanya kaedah sistem inventori yang manual, pelbagai isu timbul berkaitan dengan proses manual, termasuk kekurangan ketelusan, yang membawa kepada ketidakcekapan dalam membuat keputusan; kekurangan ketepatan dalam perancangan dan ramalan stok yang menjejaskan tahap kesiagaan ketenteraan; kekurangan ketelusan kos, yang membawa kepada ketidaksepadanan stok dan kehilangan akauntabiliti, serta menjejaskan kecekapan operasi, peruntukan sumber, dan keseluruhan kepercayaan dalam organisasi. Pengurusan inventori secara digital merupakan kaedah yang penting untuk Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB). Ia merujuk kepada sistem baharu yang dibawa oleh teknologi maklumat sebagai satu inovasi dalam logistik ketenteraan. Kajian ini menganalisis jurang dalam penggunaan proses inventori manual yang terdapat di dalam Cawangan No. 4, TUDB. Hasil kajian menunjukkan bahawa sistem inventori digital yang dilaksanakan dengan baik amat penting dalam ketenteraan. Walau bagaimanapun, meskipun pelaksanaan sistem inventori digital membawa banyak manfaat, ia juga boleh mendatangkan beberapa kesukaran dan cabaran. Mempercepat transformasi digital, mengatasi cabaran praktikal terhadap teknologi digital yang digunakan dalam ketenteraan, serta dengan meningkatkan tahap aplikasi teknologi digital akan menjadi pembangunan penting terhadap pengurusan peralatan ketenteraan terutama bagi TUDB pada masa yang akan datang.

Kata kunci:

Logistik, Digital, Digitalisasi, Pengurusan Inventori, Teknologi, Ketenteraan, Peralatan

1.0 PENGENALAN

Sebelum ini, pengurusan inventori ketenteraan bergantung kepada kaedah pengesanan secara manual dengan menggunakan sistem berasaskan kertas. Namun, apabila operasi menjadi rumit dan jumlah inventori semakin meningkat, kaedah ini terbukti tidak mencukupi [1]. Oleh itu, pengurusan inventori moden menjadi kaedah yang amat penting dalam bidang ketenteraan di mana perancangan tahap stok merupakan aspek yang amat penting. Inventori merujuk kepada stok atau sumber barangan. Pengurusan inventori boleh didefinisikan sebagai sekumpulan

peraturan dan kawalan yang berfungsi untuk mengesan, menguruskan, dan mengekalkan tahap inventori [2]. Penyediaan jumlah stok yang tepat dapat mengurangkan kos operasi sambil meningkatkan tahap kesiapsiagaan, kecekapan dan responsif terhadap Cawangan No. 4, Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB). Sebaliknya, sebarang permintaan yang dianggap tidak diperlukan dan stok yang berlebihan boleh menyebabkan kerugian dari segi kewangan akibat daripada kerosakan, penurunan kualiti, atau kemerosotan yang terjadi pada barangan tersebut. Pada masa ini, TUDB berada dalam proses transformasi kepada sistem pengurusan inventori secara digital yang dikenali sebagai *Air Force Domestic Logistics System (ADLS)*. Selaras dengan hasrat kebawah Duli Yang Maha Mulia Paduka Seri Baginda Sultan Haji Hassanal Bolkiah Mu'izzaddin Waddaulah ibni Al-Marhum Sultan Haji Omar 'Ali Saifuddien Sa'adul Khairi Waddien, Sultan dan Yang Di-Pertuan Negara Brunei Darussalam dalam titah baginda sempena memperingati Hari Kebangsaan yang ke-38 menekankan kepentingan bagi mempercepatkan transformasi digital negara untuk menyesuaikan diri dengan norma baharu [3]. Diatas inisiatif daripada Pegawai Pemerintah Cawangan No. 4, *ADLS* telah pun dilaksanakan oleh seksyen *Information Technology Development (ITD)* dibawah Unit Kejuruteraan Udara, Bahagian Kelengkapan Teknikal dan Pemeliharaan dengan sokongan daripada *Unit Teknologi Maklumat Pertahanan (UTMP)*, Kementerian Pertahanan terhadap bilik stor domestik yang terdapat di dalam Skuadron 41, Cawangan No. 4. *ADLS* akan dilancarkan secara rasmi pada 28 Januari 2025. Tujuannya adalah untuk menggantikan sistem analog tradisional dalam pengurusan inventori dengan mencipta data berdasarkan waktu nyata (*real-time data*) yang mana dapat menyokong pengesanan, ketelusan, keterlihatan, dan akauntabiliti dengan lebih baik pada kalangan pengguna. Selain itu, pelaksanaan *ADLS* menggambarkan komitmen TUDB untuk mengintegrasikan teknologi terkini ke dalam rangka kerja logistik yang sedia ada.

2.0 SEMAKAN LITERATUR

Kepentingan transformasi digital dalam bidang logistik tidak dapat dinafikan kerana ia merupakan pemangkin yang akan mengubah kaedah tradisional kepada sistem inventori yang lebih cekap dan fleksibel [4]. Dalam kajian yang dilakukan oleh Robert-Cristian, perkembangan minat dalam penyelidikan telah beralih daripada topik pengurusan rantai bekalan tradisional kepada topik berkaitan teknologi baharu dan isu-isu global. Topik berkaitan logistik dan operasi ketenteraan juga semakin mendapat perhatian dalam literatur [5]. Krishnan *et al.* melaporkan bahawa integrasi teknologi dalam logistik telah mengurangkan masa penghantaran sebanyak 30% dan meningkatkan ketepatan inventori sekitar 25% [6]. Johnson menekankan bahawa operasi ketenteraan moden memerlukan penjejakan inventori secara masa nyata untuk memastikan pengagihan sumber yang cekap. Proses manual, bagaimanapun, tidak dapat memenuhi keupayaan tersebut [7].

Jabatan Logistik Utama Angkatan Pertahanan Ethiopia juga telah menjalankan kajian penyelidikan mengenai kesan pengurusan inventori terhadap prestasi organisasi dan kewangan, kerana pengurusannya amat penting dalam logistik ketenteraan. Operasi ketenteraan sangat bergantung kepada bekalan barangan. Aliran bekalan ini mengandangkan keberkesanan pengurusan inventori yang dilakukan beberapa bulan sebelum bekalan tersebut dikeluarkan. Berdasarkan kajian tersebut, beberapa jurang yang menjejaskan prestasi logistik telah dikenal pasti, seperti kekurangan dalam sistem pengurusan berkomputer, sistem pengendalian dan

pelupusan inventori yang tidak mencukupi, serta kekurangan program latihan berkaitan amalan pengurusan inventori [8]. Oleh itu, isu dalam pengurusan inventori merupakan masalah yang lazim terjadi dalam semua organisasi, dan pihak ketenteraan juga tidak terkecuali.

2.1 | Isu dalam Pengurusan Inventori Secara Manual

2.1.1 | Kurang Keterlihatan dalam Pengurusan Data

Tahap Stok Minimum (ataupun *Minimum Stock Level (MSL)*) merupakan isu kritikal yang perlu ditangani bagi mengatasi kejadian di luar jangkaan yang boleh berlaku pada bila-bila masa. Di dalam proses manual, mengekalkan *MSL* adalah sukar kerana kekurangan keterlihatan dalam pengurusan data, yang seterusnya membawa kepada ketidakcekapan dalam membuat keputusan dan mengakibatkan kos operasi yang tinggi. Sebagai contoh, untuk tujuan pelaporan yang mudah, anggota perlu mengakses pelbagai pangkalan data untuk mendapatkan maklumat [9]. Isu ini timbul kerana proses manual tidak menggunakan pendekatan sistematik bagi menyimpan pelbagai barangan. Oleh itu, sistem data moden diperlukan untuk menghasilkan dan menyediakan data yang tepat secara masa nyata.

2.1.2 | Kurang Ketepatan dalam Perancangan dan Ramalan Stok

Kesukaran dalam mengakses dan menggunakan maklumat akan melambatkan pelaksanaan misi ketenteraan. Ramalan yang tidak tepat boleh menyebabkan kekurangan atau lebihan stok, yang akhirnya menyebabkan kelewatan penghantaran bagi barangan asas kepada anggota tentera yang berada di lapangan [9]. Sebagai contoh, kekurangan barangan penting seperti makanan, tempat tidur, dan bahan bakar boleh menjejaskan kesediaan anggota tentera. Oleh itu, sistem inventori berdigital dapat meningkatkan perancangan dan ramalan stok kerana kesilapan yang berpunca daripada manusia dapat dikurangkan.

2.1.3 | Kekurangan Ketelusan Kos

Sistem pengurusan inventori bergantung kepada empat (4) faktor utama, iaitu kawalan dasar tentang kuantiti yang perlu dipesan, kos penyimpanan, penawaran dan permintaan, serta masa diperlukan bagi proses pembekalan. Lebihan stok dalam inventori akan menyebabkan kawalan yang tidak mencukupi dan terjadinya isu pengawalan harga. Kekurangan ketelusan kos dalam proses secara manual juga boleh menjejaskan proses dalam membuat sebarang keputusan. Keputusan yang tepat adalah penting kerana ia memberi kesan langsung kepada permintaan dan perancangan, tempat bagi penyimpanan stok, ramalan terhadap barangan, pengoptimuman peralatan, proses pembelian, dan juga kawalan terhadap kewangan [9].

2.1.4 | Kehilangan Akauntabiliti

Kehilangan akauntabiliti dalam pengurusan inventori secara manual juga boleh menjejaskan kecekapan operasi, pengagihan sumber, dan kepercayaan secara keseluruhan dalam organisasi. Tanpa akauntabiliti, ketidakselarasan dalam rekod inventori menjadi lebih sering berlaku [9]. Masa yang digunakan untuk menyelesaikan ketidakselarasan inventori memerlukan audit manual dan siasatan yang meluas yang mana dapat mengalihkan sumber dan tenaga kerja daripada tugas-tugas utama mereka.

3.0 KAEDAH

Satu kajian telah dijalankan dalam bentuk soal kaji selidik bagi menganalisis jurang utama yang terdapat dalam pengurusan inventori secara manual dalam TUDB. Penyelidikan ini dijalankan untuk membuat penelitian terhadap penyelesaian, dan menekankan kepentingan transformasi yang lancar serta pembangunan sistem inventori digital pada tahap semasa. Sebanyak 50 responden di bawah Skuadron 41, Cawangan No. 4, TUDB, termasuk pegawai dan kakitangan awam, telah mengambil bahagian dalam kajian ini. Kaedah statistik yang digunakan adalah perkadaran = bilangan undian untuk satu soalan, $(n) \times 100\%$, di mana $N=50$. Soal kaji selidik merupakan sumber utama bagi pengumpulan data kerana ia berkesan dalam mengumpulkan maklumat yang diperlukan untuk kajian ini.

4.0 KEPUTUSAN

Jadual 1. Fokus Jurang dalam Pengurusan Inventori Manual

Penemuan	Peratus (%)
Keberkesanan dalam pengurusan dan penjejakan barangan	32.0
Kesilapan dalam pengesahan stok	76.0
Respons terhadap barangan di bawah Tahap Stok Minimum (MSL)	40.0
Kekurangan keterlihatan terhadap kos dan perbelanjaan	56.0
Kekurangan atau lebih stok yang tidak dikenal pasti	44.0
Keperluan mendesak untuk sistem inventori berdigital	98.0
N=50	

Daripada hasil kajian, beberapa jurang telah dikenal pasti dalam penggunaan sistem pengurusan inventori manual yang sedia ada. Sebanyak 32% responden percaya bahawa proses manual masih berkesan untuk mengurus dan menjejak barangan di dalam bilik penyimpanan. Walau bagaimanapun, beberapa kelemahan dalam proses pengurusan inventori manual telah dikenal pasti, di mana 76% responden melaporkan bahawa mereka kerap mengalami kesilapan dalam memasukkan data secara manual, dan 40% responden tidak dapat bertindak balas dengan cepat terhadap barangan yang berada di bawah *MSL*. Sementara itu, kekurangan keterlihatan berkaitan kos dan perbelanjaan serta kekurangan atau lebih stok yang tidak dapat dikenal pasti melalui proses manual dilaporkan sebanyak 56% dan 44% responden masing-masing. Secara keseluruhan, 98% responden bersetuju dengan penerapan sistem inventori berdigital, seperti *ADLS* yang baharu ini (**Jadual 1**).

5.0 PERBINCANGAN

TUDB beroperasi dalam persekitaran yang sangat dinamik dan sentiasa berada dalam situasi yang genting, di mana pengurusan inventori memainkan peranan penting dalam memastikan kesiapsiagaan operasi dan kejayaan misi. Kajian ini menunjukkan bahawa terdapat keperluan untuk beralih daripada sistem inventori manual kepada sistem inventori digital di dalam TUDB. Kertas kerja ini menganalisis pertimbangan yang perlu diberi perhatian oleh TUDB sebelum

merangka sistem inventori digital untuk memastikan keberkesanannya serta kesesuaian dengan keperluan logistik. Penelitian ini juga sejajar dengan misi Cawangan No. 4, iaitu untuk menyediakan sokongan logistik yang mencukupi dan mampan bagi TUDB.

5.1 | Tiang Utama Kerangka Konseptual ADLS

ADLS menekankan kaedah digital dalam pengurusan inventori, di mana pada masa ini terdapat sebanyak 978 barangan domestik yang diuruskan dalam sistem ini, termasuk pakaian seragam, *Unit Equipment Table (UET)*, barang penginapan, stok pertahanan dan pelbagai barangan yang lain. ADLS adalah sistem pengurusan inventori yang berasaskan aplikasi web yang mengesan permintaan, status pembelian, dan memberi isyarat apabila stok berada di bawah paras minimum (*MSL*). Ia juga berupaya bagi mengesan kos dan perbelanjaan berkaitan inventori. Sistem ini melibatkan beberapa aspek utama, termasuk aplikasi perisian canggih untuk membolehkan penjejakan dan pengurusan inventori secara masa nyata serta analitik data yang membolehkan kakitangan logistik ketenteraan untuk membuat keputusan yang tepat terhadap tahap inventori, ramalan permintaan, dan peruntukan sumber. Rangka kerja ADLS memberi tumpuan kepada lima (5) tonggak utama, iaitu pengurusan data berpusat, langkah penjejakan dan pemantauan secara automatik, analitik dan ramalan, keselamatan dan daya tahan serta latihan bagi pengguna dan integrasi, sebagaimana ditunjukkan dalam **Jadual 2**.

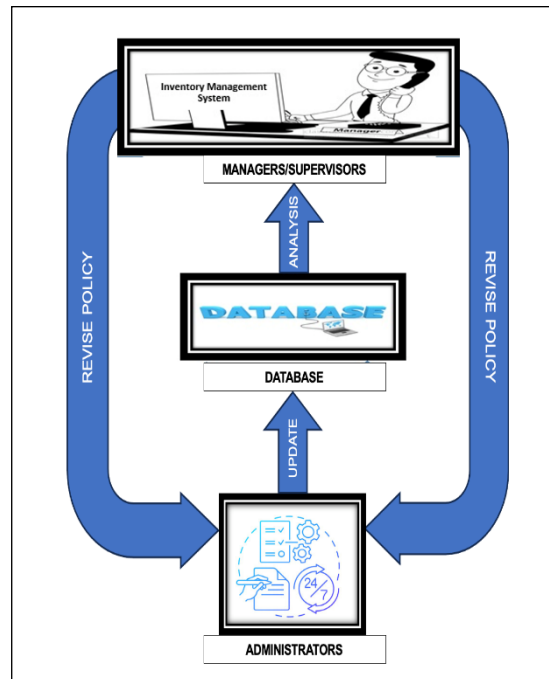
Jadual 2. Tonggak Utama dalam Rangka Konsep ADLS

Tiang Utama	Objektif	Ciri-ciri
Pengurusan Data Terpusat	Mewujudkan sistem bersatu untuk mengurus semua barangan inventori di dalam Skuadron 41.	- Pangkalan data terpusat untuk mengemas kini maklumat secara masa nyata. - Penjejakan terhadap barang yang berada di bawah kontrak yang masih aktif. - Kawalan akses berasaskan peranan agar hanya pengguna yang diberi kuasa untuk menjejak dan mengurus stok.
Penjejakan dan Pemantauan secara Automatik	Mengurangkan kesilapan manusia dan meningkatkan ketepatan.	- Pengiraan secara automatik terhadap Tahap Stok Minimum (<i>MSL</i>). - Amaran untuk stok rendah. - Transaksi keluar dan masuk barangan. - Penjejakan sejarah.
Analitis dan Ramalan	Mengoptimumkan tahap inventori untuk mencegah kekurangan atau lebihan stok serta mengurangkan perbelanjaan operasi.	- Analitik ramalan untuk menjangka permintaan berdasarkan data sejarah dan perkembangan semasa. - Data berasaskan masa nyata untuk memantau tahap stok.

		• Pengiraan secara automatik terhadap perbelanjaan kos.
Keselamatan dan Ketahanan	Melindungi data	• Pelan pemulihan untuk memastikan ketahanan sistem. • Kawalan akses berasaskan peranan.
Latihan bagi Pengguna dan Integrasi	Memastikan penggunaan dan penerimaan sistem berjalan dengan lancar oleh semua kakitangan di bawah 41 Squadron.	• Program latihan yang dilakukan secara menyeluruh. • Aplikasi antara muka yang mesra pengguna. • Mekanisme maklum balas yang berterusan untuk memperbaiki sistem.

5.2 | Peranan Utama dalam ADLS

Terdapat tiga peranan utama dalam *ADLS*, iaitu pentadbir kaunter hadapan, penyelia dan pengurus. Pentadbir kaunter hadapan bertanggungjawab mengemas kini kemasukan pangkalan data seperti transaksi harian bagi proses keluar dan masuk barangan yang terdapat di dalam bilik penyimpanan, memantau tahap barangan dan status pesanan. Penyelia dan pengurus bertanggungjawab bagi memantau dan mengurus pangkalan data agar dapat membuat keputusan yang tepat. Pada tahap ini, sebarang perubahan yang perlu dilakukan pada sistem akan dikaji terlebih dahulu dan diselaraskan dalam dasar organisasi. **Rajah 1** di bawah menunjukkan carta alir bagi peranan utama dalam *ADLS*.



Rajah 2. Carta Alir bagi Peran Utama dalam ADLS.

5.3 | Manfaat dan Cabaran bagi Sistem Inventori Digital

Kajian sebelum ini telah mengenal pasti pelbagai manfaat bagi sistem inventori digital dalam operasi logistik ketenteraan. Salah satu contohnya ialah penggunaan *Logistics Modernisation Program (LMP)* oleh Tentera Amerika Syarikat. *LMP* diperkenalkan untuk menggantikan sistem lama yang ketinggalan zaman dan meningkatkan keupayaan tentera untuk mengurus inventori, penyelenggaraan, rantai bekalan, dan perolehan secara masa nyata [10]. Program ini menguruskan inventori yang bernilai \$40 bilion bagi meningkatkan kesiapsiagaan misi dan memberikan sokongan logistik secara berpusat. Program ini telah menggunakan teknologi canggih seperti GPS, robotik, dan sistem automasi untuk meningkatkan kecekapan dan ketepatan dalam operasi logistik. Tentera Amerika Syarikat juga menggunakan analitik ramalan (*predictive analytics*) untuk meramalkan dan mengurus tahap inventori dengan lebih berkesan. Program ini bukan sahaja memberikan perancangan permintaan dan ramalan dengan lebih baik, tetapi juga dapat mengurangkan kos secara berkesan, meningkatkan peruntukan sumber, dan memastikan penghantaran bekalan yang penting dilakukan pada masa yang tepat kepada pasukan yang berada dalam persekitaran operasi yang pelbagai [11].

Begitu juga dengan *ADLS* yang telah meningkatkan keterlihatan inventori secara signifikan dengan penjejakan secara masa nyata dan pengurusan data yang berpusat. Keupayaan ini menyokong pelaporan yang lebih tepat dan proses dalam membuat keputusan dilakukan dengan lebih baik. Ketelusan kos dalam rangka kerja *ADLS* masih belum diterokai sepenuhnya dari segi kos penyimpanan dan masa penantian terhadap perolehan bagi barangan domestik,

kerana buat masa ini, sistem tersebut hanya dapat memberi pecahan kos secara terperinci untuk inventori di bawah pembekal yang mempunyai kontrak sahaja. Walau bagaimanapun, dengan analitik ramalan yang dilakukan secara automatik dapat memantau *MSL* untuk semua barangan domestik. Dengan itu, perancangan stok dan ramalan permintaan dapat dilakukan dengan lebih berkesan terutamanya dalam memastikan ketersediaan barangan penting untuk anggota tentera pada masa yang tepat. Oleh itu, dengan adanya ciri-ciri tersebut membolehkan pengguna untuk membuat ramalan terhadap penggunaan belanjawan, yang menyumbang kepada pengurusan kewangan dan operasi keseluruhan dengan lebih cekap.

Melalui rangka kerja kawalan akses berdasarkan peranan (*role-based access control framework*) dalam *ADLS*, ia menggalakkan akauntabiliti kerana pengguna diberikan peranan dan tanggungjawab mereka masing-masing. Sistem tersebut menyimpan semua aktiviti pengguna, termasuk kemas kini stok, pergerakan stok, pengubahsuaian atau pelarasan data yang dapat membina ketelusan dalam operasi inventori. Kebolehesanan ini membantu di dalam proses audit dengan lebih cekap dan memastikan pengguna mematuhi kepada keperluan regulasi sistem. Penggunaan sistem inventori digital seperti *ADLS* telah berjaya mengatasi kekurangan yang terdapat di dalam pengurusan inventori secara manual dengan adanya peningkatan dari segi keterlihatan data, ketepatan terhadap kuantiti barangan, ketelusan dalam kos yang meningkat, dan akauntabiliti pengguna juga berjalan dengan lebih berkesan.

Walaupun *ADLS* dapat meningkatkan kesiapsiagaan, kesedaran situasi, dan memperkukuh keupayaan logistik TUDB, akan tetapi penerapan sistem ini juga menghadapi beberapa cabaran semasa pelaksanaannya. Kebimbangan mengenai keselamatan data, proses integrasi dengan sistem lama, serta keperluan untuk latihan bagi seluruh pengguna dan perubahan dalam proses pengurusan berkemungkinan akan menjadi halangan utama. Selain itu, keperluan unik yang terdapat di dalam operasi tentera dan keperluan untuk sistem sandaran yang kukuh menambahkan lagi kerumitan dalam proses pelaksanaannya [1,12]. Oleh itu, TUDB perlu meneroka aplikasi teknologi maju yang terkini, terutamanya dalam topik kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), bagi membangun sistem logistik yang lebih berkesan, cekap, teguh, dan responsif agar dapat menyesuaikan sistem dengan cabaran yang sentiasa berubah.

6.0 LIMITASI

Kepentingan transformasi digital tidak boleh dipandang remeh kerana logistik ketenteraan merupakan bahagian terpenting dalam operasi ketenteraan. Ia memastikan penghantaran sumber penting seperti keperluan asas kepada anggota tentera dapat dilakukan tepat pada masanya. Namun, skop kajian ini tidak merangkumi teknologi canggih yang berpotensi dalam aplikasi pengurusan inventori seperti Analitik Data Besar, Kembar Digital dan Teknologi *Blockchain*, di mana teknologi-teknologi tersebut telah digunakan oleh organisasi ketenteraan di negara lain [4,13]. Seiring dengan perkembangan teknologi yang semaki pesat, ianya akan memainkan peranan yang penting dalam konteks ketenteraan. Oleh itu, teknologi ini mencipta peluang bagi kajian masa depan untuk merangkumi pelbagai hal.

7.0 CADANGAN

Memandangkan terdapat ketidakcekapan di dalam pengurusan inventori secara manual dan dengan adanya perkembangan teknologi global yang semakin pantas, TUDB hendaklah melaksanakan transformasi digital secara aktif, bukan sahaja pada sistem inventori tetapi juga meliputi sistem logistik secara keseluruhan. Bagi menjayakan transformasi ini, sokongan dan komitmen pihak kepimpinan daripada setiap peringkat dalam bahagian strategik, operasi dan taktikal memainkan peranan yang penting.

8.0 KESIMPULAN

Kajian ini telah meneroka isu-isu yang terjadi dalam pengurusan inventori manual yang terdapat di TUDB. Penekanan dalam proses transformasi digital melalui sistem logistik yang sistematik mentakrifkan semula keberkesanan, kecekapan, ketahanan, dan daya tindak operasi logistik. Dengan pelaksanaan *ADLS* pada masa hadapan membolehkan organisasi untuk mengendalikan kumpulan data yang besar dan menguruskan stok dengan lebih berkesan, dengan matlamat untuk memberikan pengetahuan yang luas bagi membuat keputusan yang lebih tepat berdasarkan peningkatan dalam proses analisis. Kesan positif ini dapat direalisasikan kerana *ADLS* menawarkan penyelesaian inovatif terhadap cabaran tradisional yang berkaitan dengan keterlihatan, ketepatan, kebolehesanan, ketelusan kos, dan akauntabiliti, yang sebelum ini telah menyebabkan ketidakcekapan dalam operasi. Penggunaan *ADLS* dapat meningkatkan kesiapsiagaan ketenteraan TUDB, kesedaran situasi, dan keupayaan logistik. Walaupun sistem inventori digital menawarkan peluang yang berkesan untuk meningkatkan logistik ketenteraan, akan tetapi ianya juga boleh mendatangkan pelbagai cabaran semasa peringkat pelaksanaannya, termasuk isu keselamatan data, integrasi dengan sistem legasi, serta keperluan untuk melatih pengguna secara menyeluruh dan berlakunya perubahan dalam tadbir pengurusan. Risiko-risiko ini adalah penting untuk dinilai dan diuruskan dengan betul supaya manfaat yang diperolehi daripada sistem ini tidak terjejas oleh kesan negatifnya. Kesimpulannya, RBAirF hendaklah sentiasa mengikuti inovasi teknologi dan secara proaktif mengintegrasikannya bagi memberi tindak balas yang berkesan terhadap cabaran dinamik dalam persekitaran ketenteraan yang moden.

PENGHARGAAN

Pengarang ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaan kepada Pegawai Pemerintah Cawangan No. 4, TUDB, Lt Kol (U) Pengiran Muhammad Farisan bin Pengiran Haji Metassan, atas dedikasi dan kepimpinan beliau yang tidak berbelah bahagi dalam menggerakkan transformasi digital *ADLS* kedalam sistem logistik TUDB. Ucapan penghargaan juga ditujukan kepada Kpt (U) Pengiran Nizamuddin bin Pengiran Haji Malik Sharun, Kpt (U) Fathin 'Athifah binti Haji Abidin, Lt (U) Dayangku Nurafifah binti Pengiran Haji Damit dan Lt (U) Monira binti Abdullah daripada Cawangan No. 4, TUDB atas bantuan mereka dalam kajian ini. Pengarang juga ingin menyampaikan pengiktirafan kepada bahagian ITD di bawah unit kejuruteraan udara, Bahagian Kelengkapan Teknikal dan Pemeliharaan, termasuk Penasihat, Maj (B) Haji Kamaluddin bin Haji Apong, Pengurus, SSE Makmuri Kaharuddin, Penyelia, Haji Hanafi Jufri bin Haji Mohd

Jamil, Pasukan Pembangun, Nur Hazirah binti Sutono dan Aidee Suherman bin Haji Suhaili serta Norliza Haji Mohd Hendri.

RUJUKAN

- [1] Yu, R. (2023). Application of Digital Technology in Military Equipment Management. *Academic Journal of Management and Social Sciences*, 3(3), 183-185.
- [2] Bean, W. L., Joubert, J. W., & Luhandjula, M. (2016, June). Inventory management under uncertainty: A military application. *Computers & Industrial Engineering*, 96, 96-107.
- [3] Hayat, H. (2022, February 23). *His Majesty urges acceleration in digital transformation*. Retrieved from Borneo Bulletin : <https://borneobulletin.com.bn/his-majesty-urges-acceleration-in-digital-transformation-2/>. Assessed on 10th December 2024.
- [4] Bhatia, V. (2023, October). Exploring Industry 4.0 Technologies for Futuristic Military Logistics. *National Security Development*, 11(1), 75-95.
- [5] Trif, R.-C. (2024, February). The Impact of Emerging Technologies on Supply Chain Management in the Military Organization. 48(2), 91-99.
- [6] Krishnan, R., Perumal, E., Govindaraj, M., & Kandasamy, L. (2024). *Enhancing Logistics Operations Through Technological Advancements for Superior Service Efficiency*. 61-82.
- [7] Md Akhir, R., Ibrahim, A., Abdullah, F. Z., & Othman, H. R. (2019). Determinants of Inventory Management: A Case of Military Practices. *International Journal of Innovation, Creativity and Change*, 6(3), 400-416.
- [8] Weldeyes, L. (2019, June). *The Effect Of Inventory Management Practice On Logistics Performance The Case Of Ethiopian Defense Force Logistics Main Department*. 1-58.
- [9] Md Sapry, H. R., Ahmad Razali, M. I., & Ahmad, A. (2019, December). Exploring Malaysia Military Warehouse Practice. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 9(2), 4638-4643.
- [10] Digital Material Management: How USAF Brings a Digital Transformation. (2024, June 6). <https://specinnovations.com/blog/digital-material-management-how-usaf-brings-a-digital-transformation#:~:text=Digital%20material%20management%20involves%20the,that%20lifecycle%20costs%20are%20minimized>. Assessed on 11th December 2024.
- [11] Advancements in Technology in Military Logistics and Supply Chain. (2024, May 31). <https://militarydispatches.com/technology-in-military-logistics/>. Assessed on 11th December 2024.
- [12] Jesion, D. (2002, March). New Technology Applications for Military Logistics. 1-20. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA404005.pdf>. Assessed on 12th December 2024.
- [13] Arifin, F. M. (2024, June 27). The Concept of Digital-based Military Logistics Supply Chain Management: Strengthening Accuracy and Speed as well as Transparency and Accountability. *Indonesian Naval Technology College Postgraduate International Conference*, 8(1), 207-217.

Mengenai Pengarang

► ***Haezan Jangarun***

Seorang pelajar lepasan ijazah di Program Geosains, Fakulti Sains, Universiti Brunei Darussalam. Beliau memiliki Ijazah Sarjana Muda Sains dalam Geosains dan minat penyelidikannya merangkumi Geokimia Tanah dan Alam Sekitar.

► ***Adlina Misi***

Seorang pelajar lepasan ijazah di Program Geosains, Fakulti Sains, Universiti Brunei Darussalam. Beliau memiliki Ijazah Sarjana Muda Sains dalam Geosains dan Ijazah Sarjana Sains dalam Geosains, dan minat penyelidikannya merangkumi Geokimia Organik dan Evolusi Geologi Tanah Gambut

► ***Elena Ifandi***

Seorang Profesor Madya dalam Mineralogi Terapan dan Geologi Ekonomi di Program Geosains, Fakulti Sains, Universiti Brunei Darussalam. Beliau memiliki Ijazah Sarjana Muda dalam Geologi, Ijazah Sarjana Sains dalam Geosains dan Alam Sekitar, serta PhD dalam Geologi, dan minat penyelidikannya termasuk Mineralogi Terapan, Geokimia Tanah, serta penerapan Pembelajaran Mesin untuk Eksplorasi Logam Kritis dan Mulia, Katalisis Mineral, Tenaga Hijau dan Kelestarian Alam Sekitar.

► ***Basilios Tsikouras****

Seorang Profesor Mineralogi dan Petrologi di Program Geosains, Fakulti Sains, Universiti Brunei Darussalam (UBD). Beliau memiliki Ijazah Sarjana Muda dan PhD dalam Geologi dan minat penyelidikannya termasuk Geokimia Tanah dan Alam Sekitar, Mineralogi Tanah untuk Kelestarian Pertanian dan Alam Sekitar, Eksploitasi Logam Kritis dan Kelestarian, serta Proses Geologi di Mantel Bumi. Kini, beliau merupakan Pengarah Penyelidikan di Pejabat Penolong Naib Canselor untuk Penyelidikan, Inovasi dan Kelestarian (OAVCRIS) di UBD.

**Pengarang koresponden
basilios.tsikouras@ubd.edu.bn*

TANAH DI BRUNEI DARUSSALAM: TONGGAK KELESTARIAN

Haezan Jangarun, Adlina Misli, Elena Ifandi, Basilios Tsikouras*

*Program Geosains. Fakulti Sains
Universiti Brunei Darussalam*

ABSTRAK

Tanah membentuk asas kepada ekosistem daratan dan memainkan peranan penting dalam menyokong kehidupan di Bumi melalui sokongan untuk pertumbuhan tumbuhan, pengawalan kitaran air serta penyimpanan karbon. Di Brunei Darussalam, ekosistem ini mempunyai penyelidikan yang terhad mengenai ciri-ciri mineralogi dan geokimia. Tanah yang ada pada masa ini menghadapi pelbagai cabaran termasuk asid yang tinggi dan kewujudan toksik di Kawasan pertanian serta degradasi tanah gambut akibat aktiviti manusia. Tanah gambut yang ada di Brunei Darussalam berada dalam keadaan kritikal untuk penyimpanan karbon, pemeliharaan biodiversiti dan pengawalan air akibat dari aktiviti manusia yang mana mengancam kestabilannya dan menyebabkan perubahan dari penyerapan karbon kepada sumber karbon dan meningkatkan risiko kebakaran hutan. Populasi yang semakin meningkat di Brunei Darussalam memerlukan pengeluaran makanan yang lebih tinggi, menekankan kepentingan amalan pertanian lestari untuk mengurangkan kemerosotan alam sekitar. Pencemaran tanah akibat bahan pencemar industri dan agrokimia menimbulkan risiko terhadap keselamatan dan ketahanan makanan, yang memerlukan pengurusan sisa yang betul dan langkah-langkah kawalan pencemaran. Usaha untuk menangani cabaran tanah termasuk pengawalan penggunaan tanah, kempen kesedaran awam, dan penglibatan komuniti, dengan kerjasama antara kerajaan dan ahli geosains tempatan adalah penting untuk pengambilan keputusan yang bermaklumat dan pengurusan alam sekitar yang proaktif. Pelaksanaan langkah-langkah untuk melindungi dan memelihara sumber tanah adalah penting untuk mencapai matlamat pembangunan lestari dan memastikan kesejahteraan generasi pada masa ini dan masa depan, dengan menekankan kepentingan penyelidikan mengenai pemeliharaan tanah dan amalan pengurusan tanah yang lestari untuk memelihara sumber yang tidak ternilai ini serta mengurangkan impak aktiviti manusia terhadap kesihatan tanah dan integriti ekosistem.

Kata kunci:

Kelestarian, Tanah, Bahan Organik, Gambut, Wawasan Brunei 2035

1.0 PENDAHULUAN

Tanah adalah asas bagi ekosistem daratan, menyediakan sokongan penting untuk kehidupan di Bumi. Dari menyokong pertumbuhan tumbuhan hingga mengawal kitaran air dan menyimpan karbon, tanah memainkan peranan penting dalam menyokong pelbagai perkhidmatan ekosistem yang penting untuk kesejahteraan manusia [1]. Memahami hubungan yang rumit

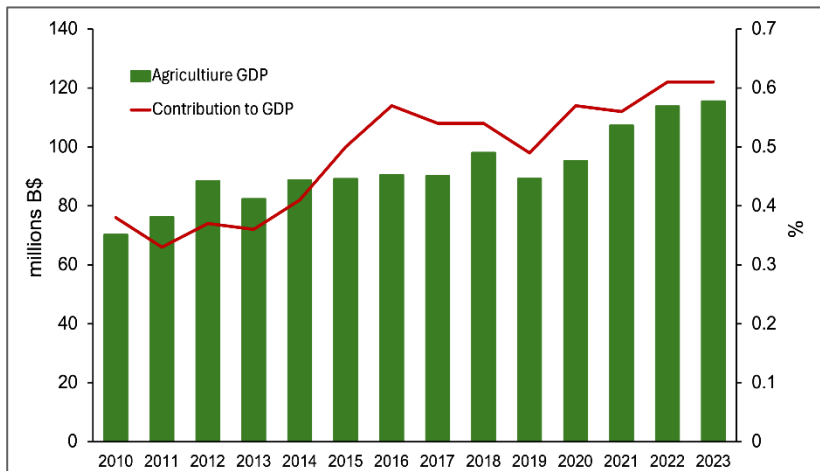
antara tanah dan alam sekitar adalah penting untuk pengurusan tanah yang lestari dan menangani cabaran global seperti keselamatan makanan, kekurangan air, dan perubahan iklim. Selain itu, dengan memahami lebih mendalam tentang tanah dan peranannya dalam menyokong kehidupan, kita dapat lebih menghargai keperluan kritikal untuk melindungi dan menguruskan sumber berharga ini untuk generasi sekarang dan akan datang [1]. Dalam dunia hari ini, adalah penting untuk merancang aktiviti manusia dengan teliti kerana degradasi tanah boleh membawa kesan buruk kepada kualiti tanah seperti peningkatan tahap keasidan tanah, saliniti, perubahan dalam struktur tanah, dan pengurangan bahan organik serta biodiversiti tanah [1,2].

Walaupun tanah yang sihat adalah penting untuk pertanian yang produktif dan pengeluaran makanan yang lestari, penyelidikan yang terhad telah dijalankan mengenai ciri mineralogi dan geokimia tanah di Brunei Darussalam [1,3-10]. Walau bagaimanapun, dalam beberapa tahun kebelakangan ini, terdapat peningkatan ketara dalam kajian tanah, yang mencerminkan kesedaran yang semakin meningkat mengenai kepentingan asas tanah. Kepentingan untuk mengekalkan persekitaran yang bersih dan meningkatkan produktiviti pertanian juga telah menjadi salah satu matlamat pembangunan lestari (SDG) dalam Wawasan 2035 negara ("Wawasan Brunei 2035"). Universiti Brunei Darussalam (UBD) memainkan peranan penting dalam mencapai matlamat ini dengan menjalankan penyelidikan mengenai projek garis dasar geokimia global [5,9]. Projek ini bertujuan untuk menentukan latar belakang geokimia dan nilai ambang yang boleh membantu dalam menentukan sumber geogenik dan antropogenik bagi pencemaran yang berkaitan dengan tanah. Dengan menyediakan data yang kukuh dan boleh dipercayai, ia dapat membantu pembuat dasar dalam merangka pelan pengurusan yang berkesan dari segi pengurusan dan pemulihan tanah. Tanah di Brunei Darussalam adalah sangat asidik, dengan pH sehingga 1.89, jarang melebihi nilai 6 di kawasan yang sangat terhad. Keasidan ini adalah disebabkan oleh kewujudan pirit (FeS_2), namun faktor antropogenik tempatan dan pencemar juga mungkin memainkan peranan penting dalam kesan ini [3,4,9].

Brunei Darussalam memiliki jumlah dan kawasan tanah gambut yang penting [6-8,11-14]. Ekosistem ini terkenal dengan fungsinya sebagai penyimpanan karbon yang penting, sebagai medium untuk mengurangkan aliran air yang mewujudkan kawasan bertakung, dan berfungsi sebagai hotspot bagi biodiversiti. Walau bagaimanapun, kebanyakan tanah gambut di Asia Tenggara telah dikeringkan, ditimbus, dan sebahagian atau sepenuhnya ditebang akibat pengaruh manusia, melepaskan karbon yang terkumpul selama ribuan tahun dan menjadi sangat mudah terbakar. Pengeringan ini boleh menyebabkan penurunan aras air, berlaku kejatuhan tanah, dan kemunculan pelepasan karbon dioksida, yang seterusnya membawa kepada kebakaran hutan akibat pengoksidaan gambut. Akibatnya, kawasan tanah gambut ini telah berkurang secara dramatik, mengubah peranannya dari penyerap karbon kepada sumber karbon [12-14].

Amalan pertanian adalah penyumbang penting kepada pertumbuhan produk domestik di Brunei Darussalam dan oleh itu, meningkatkan serta memelihara kualiti tanah di negara ini adalah aspek utama dalam kelestarian (**Rajah 1**). Tanah juga merupakan faktor penting dalam kualiti air, kerana bahan pencemar boleh meresap dan mencemarkan air tanah, dengan kesan buruk yang signifikan terhadap kesihatan awam. Kertas ini akan menyoroiti isu-isu tanah di

Brunei Darussalam untuk mempertingkatkan pemahaman mengenai Matlamat Pembangunan Lestari yang relevan dengan Wawasan Brunei Darussalam 2035.



Rajah 1. Sumbangan sektor pertanian kepada KDNK (2010 - 2023) dengan data daripada Statistik Pertanian & Agrifood secara Ringkas 2023, Brunei Darussalam.

2.0 KEDUDUKAN GEOGRAFI DAN LATAR GEOLOGI BRUNEI DARUSSALAM

Brunei Darussalam terletak di wilayah barat laut Pulau Borneo. Negara ini mempunyai dua musim, di mana suhu purata tahunan bagi musim kering dan musim hujan masing-masing adalah antara 24 hingga 36°C dan antara 20 hingga 28°C. Brunei Darussalam mengalami jumlah curahan hujan tahunan yang tinggi dengan purata sebanyak 2,900 mm. Dari segi geologi, kawasan ini terdiri daripada tiga sistem delta yang penting: Delta Meligan, yang merupakan yang tertua dan aktif pada Oligosen Tengah hingga Miosen Awal, Delta Champion (Miocene Tengah hingga Pliosen), dan Delta Baram, yang aktif dari Miocene Akhir hingga ke hari ini. Urutan sedimen yang dihasilkan oleh sistem delta yang aktif ini sering menunjukkan variasi dalam jenis fasies, yang dicirikan oleh pergantian antara batu pasir dan batu lempung [15,16].

3.0 JENIS TANAH DI BRUNEI DARUSSALAM

Tanah adalah campuran yang kompleks antara mineral, bahan organik, air, udara, dan organisme hidup. Salah satu cara untuk mengklasifikasikan tanah adalah berdasarkan komposisinya yang terdiri daripada komponen organik dan anorganik.

3.1 | Tanah Anorganik

Tanah anorganik kebanyakannya terdiri daripada zarah mineral yang berasal dari pelapukan batuan dan mineral yang sedia ada. Berbeza dengan tanah organik, yang mengandungi sejumlah besar bahan tumbuhan dan haiwan yang telah reput, tanah anorganik terdiri

terutamanya daripada pasir, lumpur, dan tanah liat. Komposisi dan ciri-ciri tanah ini berbeza bergantung kepada faktor seperti bahan induk, iklim, dan lokasi geografi.

Kepentingan tanah anorganik melangkaui ciri-ciri fizikal semata-mata, memainkan peranan penting dalam mengekalkan fungsi ekosistem dan usaha manusia. Zarah mineral membentuk rangka sokongan untuk akar tumbuhan dan memudahkan pergerakan air serta nutrien dalam profil tanah. Zarah mineral ini menyediakan struktur fizikal dan tekstur tanah, mempengaruhi sifat-sifatnya seperti saliran, pengekalan air, dan ketersediaan nutrien. Selain itu, tanah anorganik bertindak sebagai penyerap dan takungan, bukan sahaja untuk nutrien penting bagi tumbuhan tetapi juga untuk pelbagai bahan pencemar kimia. Peranan berganda ini menekankan kepentingannya dalam proses alam sekitar dan menekankan keperluan untuk pengurusan dan pemeliharaan yang teliti [17,18].

3.2 | Tanah Organik

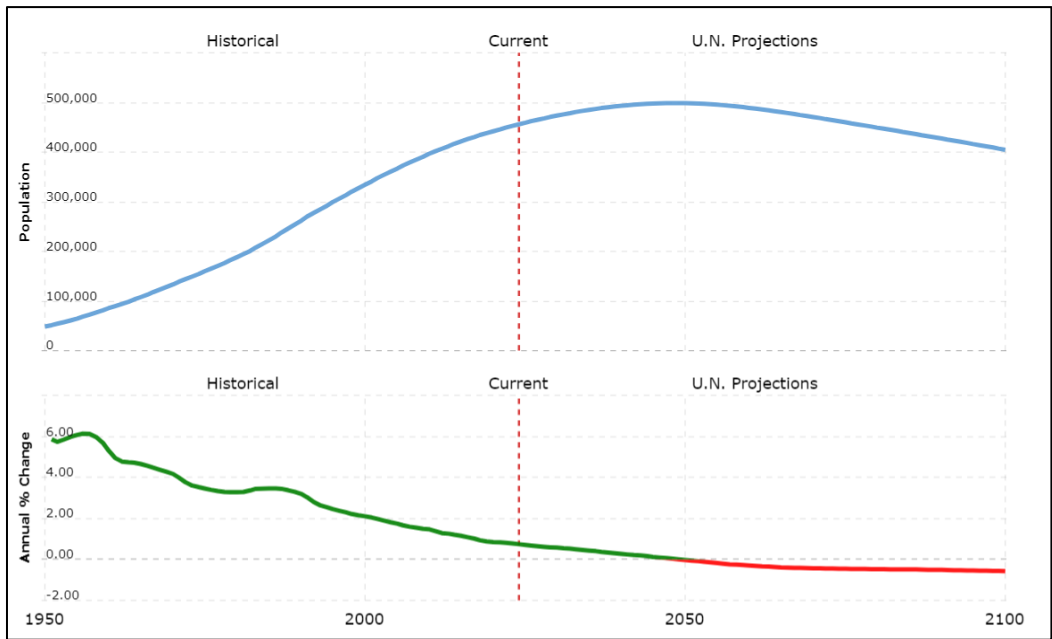
Tanah organik mengandungi bahan organik tumbuhan, yang biasanya terurai secara separa di bawah keadaan berair dan kekurangan oksigen. Jika bahan organik melebihi 50%, tanah tersebut dikenali sebagai gambut, dan ekosistem yang berkaitan disebut sebagai tanah gambut. Ekosistem ini berkembang apabila terdapat lebih penghasilan bahan organik berbanding penguraian dan dominasi humifikasi berbanding respirasi bakteria dan penguraian, yang menyebabkan pengumpulan bahan organik secara bersih [13,14]. Gambut memperkaya tanah dengan nutrien, meningkatkan strukturnya, dan meningkatkan kapasiti pengekalan air.

Tanah gambut terkenal di seluruh dunia kerana fungsinya sebagai penyimpanan karbon yang penting, sebagai medium untuk mengurangkan aliran air yang mencipta kawasan berair, dan bertindak sebagai tempat tinggal bagi pelbagai jenis biodiversiti. Khususnya, tanah gambut tropika muncul sebagai takungan penting karbon organik dekat permukaan, menekankan kepentingannya dalam membentuk dinamik iklim dan memastikan kestabilan alam sekitar. Perubahan berterusan dalam persekitaran, terutamanya melalui aktiviti seperti penyaliran dan pembersihan hutan, menimbulkan ancaman serius terhadap kestabilan tanah gambut ini, melepaskan karbon ke atmosfera dan menjadikannya sangat mudah terbakar. Brunei Darussalam menempatkan beberapa tanah gambut yang masih asli di dunia, yang merupakan kawasan hotspot biodiversiti yang penting. Walaupun mempunyai kepentingan ekologi yang besar, tanah gambut ini secara amnya kurang dikaji dari segi geologi dan sering diabaikan [13].

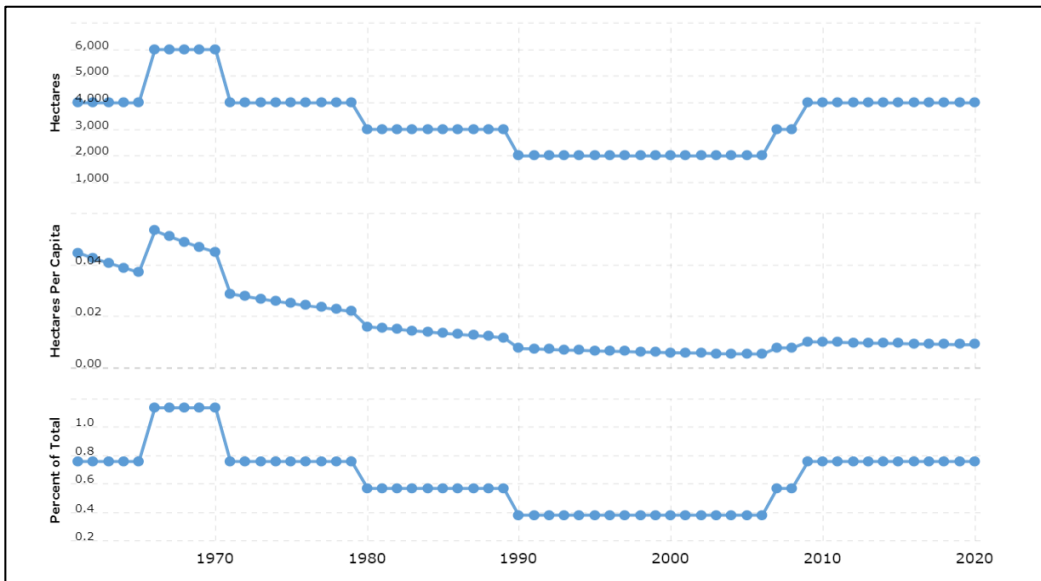
4.0 PERBINCANGAN

Populasi Brunei Darussalam telah meningkat secara berterusan sejak tahun 1950, dengan kadar pertumbuhan terkini antara 0.7% hingga 0.8% (**Rajah 2**), yang menyebabkan kepada peningkatan permintaan untuk makanan. Walau bagaimanapun, aktiviti pertanian dan tanah pertanian telah tidak berubah dalam beberapa tahun kebelakangan ini (**Rajah 3**). Organisasi Makanan dan Pertanian Bangsa-Bangsa Bersatu mendefinisikan tanah arable sebagai tanah yang digunakan untuk tanaman bermusim (kawasan dengan penanaman dua kali setahun dihitungkan sekali), padang rumput sementara untuk pemotongan atau penggembalaan, plot yang

didedikasikan untuk pasaran, dan dan tanah yang ditinggalkan sementara. Tanah yang ditinggalkan kerana pertanian berpindah tidak diambil kira.



Rajah 2. Carta menunjukkan populasi Brunei Darussalam dari tahun 1950 hingga 2024. Proyeksi Pertumbuhan Bangsa-Bangsa Bersatu juga disertakan sehingga tahun 2100 (diubahsuai dari [19]).



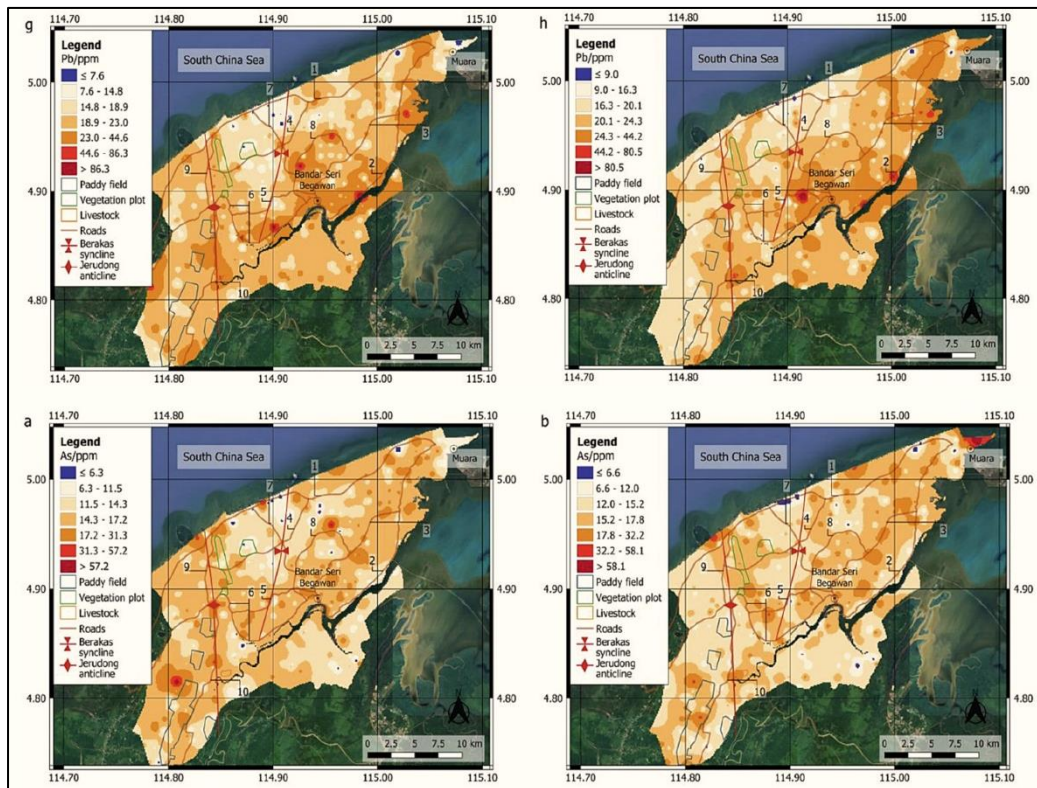
Rajah 3. Tanah pertanian di Brunei Darussalam (dalam hektar) merangkumi tanah yang ditakrifkan oleh Pertubuhan Makanan dan Pertanian Pertubuhan Bangsa-Bangsa Bersatu (diubahsuai dari [20]).

4.1 | Pengaruh tanah anorganik terhadap pertanian, kesihatan awam dan ekonomi

Kesedaran yang semakin meningkat mengenai keperluan untuk meningkatkan pengeluaran makanan menjelang tahun 2050 telah mendorong pelbagai kajian. Peningkatan hasil tanaman adalah penting untuk memberi makan kepada pertumbuhan populasi global yang semakin meningkat. Penggunaan lebih banyak tanah untuk pertanian adalah penyelesaian yang boleh dilaksanakan untuk memenuhi permintaan makanan yang semakin meningkat dan adalah penting untuk mendekati peluasan ini dengan perancangan yang teliti serta pengetahuan untuk memastikan kelestarian dan mengurangkan kemerosotan alam sekitar. Pengurusan nutrien yang betul, seperti putaran tanaman untuk menyuburkan kembali nutrien tanah dan mengekalkan kesuburan tanah serta penggunaan baja dan racun perosak dengan bijak adalah penting untuk mengoptimumkan hasil tanaman dan memastikan keselamatan makanan. Telah terbukti bahawa meningkatkan potensi hasil melalui fotosintesis adalah satu lagi cara untuk meningkatkan pengeluaran tanaman tanpa memerlukan lebih banyak tanah [21,22]. Walau bagaimanapun, cahaya tidak boleh berlebihan bagi tumbuhan yang mana membawa kepada penghambatan fotosintesis itu sendiri [22]. Satu lagi cara untuk meningkatkan hasil tanaman adalah dengan menggunakan kaedah pertanian lestari, seperti memanfaatkan pertanian pintar dengan melaksanakan analisis SWOT untuk menentukan kekuatan, kelemahan, peluang, dan ancaman [23].

Memandangkan tanah memainkan peranan penting dalam kesihatan awam, sama ada melalui rangkaian kediaman atau rantaian makanan, adalah penting untuk menjalankan penyelidikan

bagi memantau kepekatan pencemar dan keadaan keseluruhan tanah. Penyelidikan sebelum ini menunjukkan bahawa nilai yang tinggi bagi unsur-unsur berpotensi toksik (PTE) seperti plumbum (Pb), arsenik (As), tembaga (Cu), kromium (Cr), zink (Zn), mangan (Mn), dan nikel (Ni) berkait secara spatial dengan kawasan pertanian di Daerah Brunei-Muara [9]. Pencemaran industri dan rangkaian jalan menyumbang kepada peningkatan tahap unsur-unsur berpotensi toksik (PTE) di kawasan tersebut, menekankan keperluan untuk meningkatkan kesedaran. Perhubungan spatial PTE dengan kawasan pertanian (**Rajah 4**) menunjukkan bahawa sumber-sumber potensinya adalah baja dan racun perosak, yang mengandungi jumlah logam toksik yang signifikan [9]. Penggunaan baja dan racun perosak secara berterusan dan tidak terkawal boleh membawa kepada pengumpulan PTE yang mengganggu kualiti tanah dan secara beransur-ansur menjadikannya kurang subur [24]. Menangani isu pencemaran tanah, seperti pencemaran dari bahan kimia pertanian atau pencemar industri, adalah penting untuk memastikan keselamatan dan jaminan makanan. Petani tempatan perlu mengamalkan amalan pertanian lestari dan mendapatkan nasihat pakar apabila menggunakan baja dan racun perosak. Selain itu, mereka hanya perlu menggunakan jenama baja dan racun perosak yang diluluskan dan hanya menggunakan baja dengan kepekatan unsur yang tidak melebihi had yang diluluskan. Mengawal penggunaan baja dan racun perosak juga membantu melindungi kehidupan akuatik daripada pencemaran unsur yang dibawa oleh air bawah tanah. Langkah-langkah pemulihan dan amalan penggunaan tanah yang lestari boleh membantu mengurangkan impak pencemaran tanah terhadap pengeluaran makanan. Selain itu, penggubal dasar perlu mempertimbangkan pelaksanaan pelan mitigasi dan pencegahan untuk pengurusan sisa yang betul bagi mencegah pencemaran tanah yang serius.



Rajah 4. Peta geokimia menunjukkan nilai ambang untuk: a) Tanah permukaan Arsenik b) Tanah bawah Arsenik, g) Tanah permukaan Plumbum, dan h) Tanah bawah Plumbum (diubahsuai dari [9]).

Secara semulajadi, tanah asid-sulfat boleh terbentuk dalam pelbagai persekitaran fizikal, termasuk pecahan bahan organik (seperti yang terdapat di kubah gambut kawasan rendah) dan mineral seperti pirit. [3,25]. Di Brunei Darussalam, pirit telah dikenalpasti dalam lapisan syal tanah dan di beberapa muara sungai [3,25]. Semasa musim hujan monsun, sistem muara mudah terdedah kepada pengasidan kerana air bawah tanah yang berasal dari tanah asid-sulfat yang kaya dengan pirit [26,27]. Bermula sejak 5,400 tahun yang lalu, tanah lumpur di sistem muara Brunei telah dipengaruhi oleh aliran asid daripada air tawar yang berasal dari tanah asid-sulfat yang mengandungi pirit [27]. Apabila tanah asid-sulfat terdedah kepada udara akibat hakisan atau penggalian, mineral sulfida teroksida dan mengeluarkan asid sulfurik, menyebabkan penurunan pH tanah [3]. Akibatnya, tanah di Daerah Brunei-Muara sangat berasid dengan tahap pH yang biasanya berada di bawah 5.5 dan mencapai nilai di bawah 3 di kawasan pertanian [9]. Keadaan berasid yang mencabar menghalang pembangunan kawasan untuk tujuan pertanian dengan mengurangkan hasil tanaman dan menggalakkan pergerakan logam berpotensi toksik. Oleh itu, adalah penting untuk merancang kaedah untuk pembaikan dan penyesuaian tanah yang dapat meningkatkan produktiviti dan kesihatan keseluruhan padi dan tanaman lain. Penurunan pH boleh memberi kesan negatif bukan sahaja kepada tumbuhan dan haiwan tetapi juga secara langsung kepada manusia. Ini kerana di bawah keadaan ini, PTE boleh diserap oleh tanaman yang akhirnya akan dimakan oleh manusia dan pengambilan yang berterusan boleh membawa kepada risiko kesihatan dan masalah keselamatan makanan [24].

Ancaman utama kepada pembangunan pertanian di tanah asid-sulfat termasuk penurunan paras air, yang mendedahkan mineral sulfida kepada pengoksidaan dan pengasidanan yang meningkat, serta penurunan tanah yang disebabkan oleh pengoksidaan tanah organik, yang membawa kepada pengurangan sumber tanah yang berharga. Kekurangan kawalan terhadap paras air boleh mengakibatkan peningkatan pengasidanan, penurunan produktiviti, kemerosotan alam sekitar, dan akhirnya, pengurangan sumber tanah. Pengasidanan, atau kehadiran bahan sulfurik, merupakan risiko yang signifikan disebabkan oleh kapasiti penetral asid yang terhad yang diperhatikan dalam tanah paya yang mengandungi mineral sulfida. Biasanya, keasidan tanah dikurangkan oleh mineral karbonat dan tanah liat; namun, Brunei Darussalam, di mana hujan adalah tinggi dan tanah asid yang terhakis dengan kuat, kekurangan batuan karbonat yang boleh meningkatkan pH tanah.

Untuk memanfaatkan dan mencapai pengeluaran yang lestari di tanah berasid akibat kehadiran pirit, adalah penting untuk mempunyai amalan pengurusan yang sesuai. Pengurusan yang paling optimum bagi kawasan yang mengandungi tanah asid-sulfat melibatkan pengurangan risiko dengan mengelakkan pembangunan di kawasan-kawasan ini [4]. Selain itu, dalam kes-kes di mana penggunaan tanah dianggap perlu, memupuk kerjasama formal antara kerajaan dan ahli geosains tempatan muncul sebagai amalan terbaik. Usaha kerjasama ini bertujuan untuk menghasilkan asas geokimia yang menjanjikan dan berdaya maju, memudahkan pembuatan keputusan yang berinformasi dan pelaksanaan langkah-langkah proaktif untuk mengurangkan potensi kesan alam sekitar. Kerajaan telah memperkenalkan langkah-langkah yang bertujuan untuk mengawal amalan penggunaan tanah, menghadkan aktiviti pembalakan dan pembersihan tanah, serta menggalakkan pendekatan pengurusan tanah yang lestari. Selain itu, usaha seperti kempen kesedaran awam dan usaha penglibatan komuniti telah dimulakan untuk memaklumkan pihak berkepentingan mengenai kepentingan memelihara tanah gambut dan potensi bahaya yang berkaitan dengan kebakaran.

4.2 | Kepentingan Tanah Gambut

Tanah gambut di Brunei Darussalam memainkan peranan penting dalam mengekalkan keseimbangan ekologi dan menyokong biodiversiti, terutamanya dalam menghadapi perubahan iklim. Ekosistem unik ini, yang meliputi kira-kira 16% daripada negara ini, sangat terdedah kepada kebakaran hutan, terutamanya semasa musim kemarau apabila paras air turun [13]. Pengurangan kelembapan ini menyebabkan lapisan atas gambut menjadi lebih mudah terbakar, yang membawa kepada pembakaran yang berterusan untuk jangka masa yang panjang, walaupun dengan ketersediaan oksigen yang terhad [28].

Kepentingan tanah gambut melampaui kebolehan untuk terbakar. Ia bertindak sebagai penyerap karbon yang penting, menyimpan jumlah karbon yang banyak terkumpul selama ribuan tahun. Penyimpanan karbon ini amat penting untuk mengurangkan perubahan iklim, kerana tanah gambut yang telah dikeringkan atau terganggu boleh melepaskan gas rumah hijau seperti karbon dioksida dan metana, yang memburukkan pemanasan global. Selain itu, hutan paya gambut di Brunei Darussalam adalah antara yang paling terpelihara di Asia Tenggara, menempatkan pelbagai flora dan fauna yang menyumbang kepada biodiversiti yang kaya di rantau ini [13]. Melindungi habitat ini adalah kritikal bukan sahaja untuk memelihara spesies,

tetapi juga untuk mengekalkan perkhidmatan ekosistem yang menyokong mata pencarian manusia. Pemisah api adalah alat penting dalam mencegah dan mengawal kebakaran hutan gambut dengan mencipta halangan yang mengganggu penyebaran api. Dengan menghadkan penyebaran api, pemisah ini memudahkan usaha pemadaman yang lebih berkesan, melindungi ekosistem yang berharga, dan menggalakkan daya tahan landskap. Penubuhannya menggalakkan amalan pengurusan kebakaran yang proaktif, seperti penyelenggaraan dan pemantauan secara berkala, menyumbang kepada penjagaan tanah yang lestari. Mengintegrasikan parit kebakaran dalam pelan pengurusan tanah meningkatkan keupayaan untuk mengurangkan impak buruk kebakaran hutan gambut, melindungi integriti ekologi dan mempromosikan kelestarian alam sekitar jangka panjang.

Selain daripada pengurusan kebakaran, penyelidikan berterusan mengenai tanah gambut adalah penting untuk memahami evolusi geologinya dan keadaan yang diperlukan untuk pembentukannya. Pengetahuan ini boleh memaklumkan strategi pemuliharaan yang bertujuan untuk memelihara biodiversiti dan ekosistem tanah gambut. Inisiatif penyelidikan kerjasama yang melibatkan pakar tempatan dan antarabangsa dapat meningkatkan lagi pemahaman kita tentang dinamik tanah gambut dan tindak balasnya terhadap perubahan alam sekitar. Secara keseluruhan, melindungi tanah gambut di Brunei Darussalam bukan sahaja penting untuk pengurangan perubahan iklim dan pemeliharaan biodiversiti, tetapi juga untuk memastikan ketahanan komuniti tempatan yang bergantung pada ekosistem ini untuk mata pencarian mereka. Dengan mengutamakan perlindungan tanah gambut dan amalan pengurusan lestari, Brunei Darussalam dapat meningkatkan peranannya sebagai peneraju dalam penjagaan alam sekitar di Asia Tenggara.

4.3 | Peranan kajian tanah yang kritikal dalam strategi ketenteraan

Memahami keadaan tanah tempatan dan mengintegrasikan amalan lestari adalah penting bagi pasukan tentera untuk meningkatkan keselamatan makanan, mempromosikan kelestarian alam sekitar, dan meningkatkan keberkesanan operasi. Dengan menganalisis sifat tanah, operasi ketenteraan dapat melaksanakan amalan pengurusan tanah lestari yang mengelakkan kemerosotan tanah, mengurangkan risiko banjir, dan meningkatkan daya tahan terhadap bencana alam. Pengetahuan ini menyokong perancangan penggunaan tanah strategik, peruntukan sumber yang cekap, dan pemilihan tapak yang optimum untuk operasi ketenteraan, memastikan penggunaan peralatan dan tenaga kerja yang cekap. Selain itu, menangani risiko pencemaran tanah dan mengamalkan strategi pemulihan boleh mengurangkan jejak alam sekitar aktiviti ketenteraan.

Di kawasan terpencil, amalan ini memudahkan pembangunan sistem makanan yang berdikari, meminimumkan kebergantungan pada rangkaian bekalan luaran sambil membenarkan penanaman tanaman makanan dan perubatan. Malangnya, operasi ketenteraan sering mengabaikan impak alam sekitar jangka panjang, hanya menangani isu-isu berkaitan selepas kerosakan yang signifikan berlaku. Pengabaian ini cenderung memberi keutamaan kepada keuntungan jangka pendek berbanding matlamat kelestarian jangka panjang [29]. Walau bagaimanapun, mengintegrasikan amalan lestari dalam pelan operasi awal dapat mencegah kerosakan alam sekitar dan mengurangkan kos pemulihan.

Melaksanakan amalan lestari dalam organisasi ketenteraan mungkin kelihatan senang dan mudah, tetapi beberapa cabaran hadir dalam perlaksanaannya. Sebagai contoh, kekurangan pengetahuan dan pemahaman mengenai amalan lestari di kalangan personel [30]. Selain itu, walaupun amalan ini dilaksanakan, faedah jangka panjang mungkin tidak segera kelihatan, menjadikannya sukar untuk menilai dan melaporkan hasil dan keberkesanan yang nyata [29,31]. Untuk mengatasi cabaran ini, organisasi ketenteraan boleh bermula dengan memberikan latihan mengenai amalan lestari kepada personel mereka. Inisiatif sebegini akan membekalkan personel dengan kemahiran yang diperlukan dan memupuk budaya operasi lestari dalam organisasi. Dengan menyematkan amalan ini ke dalam norma organisasi, operasi ketenteraan boleh menjadi lebih peka terhadap alam sekitar dan lebih cekap. Ini menonjolkan pengiktirafan yang semakin meningkat terhadap sifat global cabaran alam sekitar dan potensi tentera untuk bekerjasama dalam berkongsi amalan terbaik dan membangunkan penyelesaian inovatif [32]. Satu strategi yang berkesan adalah untuk memupuk perkongsian antara organisasi ketenteraan dan penyelidik. Kerjasama sebegini boleh membantu dalam peralihan kepada operasi lestari dan mendorong penambahbaikan berterusan dalam usaha kelestarian negara. Salah satu bidang kerjasama yang amat berharga adalah menyiasat kesan aktiviti pertanian atau pertanian negara jiran terhadap keadaan tanah tempatan. Amalan pertanian merentas sempadan, seperti penggunaan baja kimia, racun perosak, atau teknik pertanian intensif, boleh memberi impak yang luas terhadap kesihatan tanah, kualiti air, dan kestabilan ekosistem di kawasan bersebelahan. Dengan melibatkan diri dalam inisiatif penyelidikan bersama, organisasi ketenteraan dan penyelidik akademik boleh memantau dan menilai impak ini, mengenal pasti potensi risiko kepada tanah tempatan, dan membangunkan strategi mitigasi untuk mengelakkan kemerosotan tanah. Usaha kerjasama ini juga boleh memaklumkan dasar pengurusan tanah mampan dan memupuk kerjasama serantau untuk menangani isu alam sekitar yang dikongsi bersama.

Pasukan Brunei Darussalam boleh mendapat manfaat besar daripada mengadaptasi program penglibatan inovatif yang serupa dengan inisiatif 'Frontline to Farm' (F2F) oleh Appalachian State University. Program ini direka untuk menyokong veteran dalam peralihan kepada amalan pertanian lestari, menyediakan mereka dengan kemahiran dan pengetahuan yang diperlukan untuk kerjaya pertanian yang berjaya. Program F2F menawarkan pelbagai sumber yang komprehensif, termasuk latihan amali, sesi latihan intensif, dan persidangan yang memfokuskan kepada amalan pertanian lestari [32]. Peserta terlibat dalam pengalaman pembelajaran secara praktikal, bekerjasama dengan pakar dalam pelbagai bidang pertanian seperti pengurusan tanah, pengeluaran tanaman, dan perancangan perniagaan. Pendekatan menyeluruh ini bukan sahaja membekalkan veteran dengan kemahiran praktikal tetapi juga memupuk semangat komuniti yang kukuh di kalangan peserta. Dalam jangka panjang, kemahiran dan pandangan yang diperoleh melalui latihan sebegini boleh memberdayakan veteran di Brunei untuk memberi sumbangan besar dalam pemulihan tanah yang tercemar, meningkatkan keselamatan makanan tempatan dan meningkatkan kesedaran untuk kelestarian alam sekitar. Dengan mempromosikan amalan pertanian lestari, pasukan tentera Brunei boleh memainkan peranan penting dalam penjagaan alam sekitar sambil menyokong mata pencarian bekas anggota perkhidmatan. Melaksanakan program seperti F2F juga boleh menggalakkan kerjasama antara organisasi ketenteraan, akademik, dan pakar pertanian tempatan, mewujudkan rangkaian yang menyokong amalan lestari di seluruh rantau ini. Inisiatif ini bukan sahaja memberi manfaat

kepada veteran tetapi juga menyumbang kepada daya tahan keseluruhan sektor pertanian Brunei Darussalam, memastikan ia dapat menghadapi cabaran yang ditimbulkan oleh perubahan iklim dan kebimbangan keselamatan makanan.

5.0 KESIMPULAN

Kepentingan tanah adalah jelas kerana ia berfungsi sebagai asas kehidupan di Bumi, menyokong pertanian, biodiversiti, pengawalan air, dan kestabilan iklim sambil menyediakan habitat untuk pelbagai organisma. Selain daripada fungsi ekologi, tanah juga mempunyai nilai budaya, sejarah, dan ekonomi. Walau bagaimanapun, ia semakin terancam oleh hakisan, kemerosotan, dan pencemaran yang didorong oleh aktiviti manusia. Di Brunei Darussalam, tanah sangat terdedah kepada pengasidan semula jadi, yang diburukkan lagi oleh faktor antropogenik, memerlukan usaha mitigasi yang segera.

Untuk mempromosikan pembangunan pertanian lestari, adalah penting untuk berhati-hati dalam penggunaan baja dan racun perosak secara meluas. Selain itu, pengurusan sisa industri yang berkesan adalah penting untuk mengelakkan pengumpulan unsur-unsur berpotensi toksik yang boleh membahayakan kesihatan awam. Oleh itu, penyelidikan lanjut mengenai pemeliharaan tanah dan amalan pengurusan tanah lestari adalah penting untuk melindungi sumber yang tidak ternilai ini untuk generasi sekarang dan masa depan. Melaksanakan langkah-langkah perlindungan boleh membantu mencapai matlamat pembangunan lestari.

Tanah gambut adalah penting untuk penyimpanan karbon, pemeliharaan biodiversiti, dan pengawalan air, selaras dengan pelbagai Matlamat Pembangunan Lestari, seperti tindakan terhadap perubahan iklim dan air bersih serta sanitasi. Memahami dinamik ekosistem gambut, bersama dengan kerentanannya terhadap kemerosotan dan kebakaran, adalah penting untuk membangunkan strategi pengurusan yang berkesan yang menyumbang secara signifikan kepada matlamat ini. Dengan mengutamakan penyelidikan dan melabur dalam amalan pengurusan tanah gambut lestari, kita dapat memanfaatkan potensi mereka untuk mengurangkan perubahan iklim, memelihara biodiversiti, dan memastikan sumber-sumber penting untuk generasi akan datang.

Menjalankan kajian menyeluruh mengenai komponen tanah organik dan anorganik dapat membantu pembuat dasar dan petani dalam merangka strategi pengurusan tanah dan nutrien yang lebih lestari. Usaha kerjasama yang melibatkan organisasi tentera, penyelidik, dan pihak berkepentingan tempatan adalah penting untuk memantau dan mengurus kesihatan tanah dengan berkesan, memastikan cabaran alam sekitar di kawasan ini ditangani secara bersama.

RUJUKAN

- [1] Grealish GJ, Fitzpatrick RW, Hutson JL. Soil survey data rescued by means of user-friendly soil identification keys and topo sequence models to deliver soil information for improved land management. *GeoResJ*. 2015; 6:81-91.
- [2] Hu Y, Liu X, Bai J, Shih K, Zeng EY, Cheng H. Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization. *Environmental Science and Pollution Research*. 2013; 20:6150-6159.
- [3] Boey, A., Tsikouras, B. & Ifandi, E. *Insights into the origin of pyrite in the sediments of Brunei Darussalam*. Abstract Book, 37th International Geological Congress, Busan, Republic of Korea. 2024:2487.
- [4] Grealish GJ, Fitzpatrick RW. Acid sulphate soil characterization in Negara Brunei Darussalam: A case study to inform management decisions. *Soil Use and Management*. 2013; 29:432–444.
- [5] Jangarun, H., Ifandi, E., Karim, K.N., Tsikouras, B. *Determination of rare earth element baselines in the Brunei Darussalam soils*. Abstract Book, 37th International Geological Congress, Busan, Republic of Korea. 2024:2606.
- [6] Misli, A., Tsikouras, B., Kalaitzidis, S., Ifandi, E., Christanis, K. *The geological evolution and palaeoclimatic significance of the Temburong peatland, Brunei Darussalam*. Abstract Book, 37th International Geological Congress, Busan, Republic of Korea. 2024: 323.
- [7] Misli, A., Tsikouras, B., Omar, M.S., Adenan, S.N., Kalaitzidis, S., Christanis, K., Ifandi, E. (2023): *The evolution of tropical peatlands in Brunei Darussalam: Palaeoenvironmental and palaeoclimatic archives*. Abstracts 20th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society (AOGS), Singapore. 2023.
- [8] Tsikouras, B., Omar, M.S., Kalaitzidis, S., Ifandi, E., Christanis, K. (2024): *Insights into the palaeoclimatic and palaeoenvironmental evolution of Brunei Darussalam through the window of Tasek Merimbun peatland*. Abstract Book, 37th International Geological Congress, Busan, Republic of Korea. 2024:324.
- [9] Karim KN, Tsikouras B, Ifandi E, Lai CK, Osli LN, Shalaby MR, Islam, MA. Geochemical baselines of potentially toxic elements in Brunei-Muara soils, Brunei Darussalam: Towards environmental assessment and risk management. *Journal of Geochemical Exploration*. 2024; 257:1-17.
- [10] Grealish G, Ringrose-Voase A, Fitzpatrick R. Soil Fertility Evaluation in Negara Brunei Darussalam. *Science. Agricultural Sciences*. 2010; 11:121-124.
- [11] Dommain R, Couwenberg J, Joosten H. Development and carbon sequestration of tropical peat domes in south-east Asia: Links to post-glacial sea-level changes and Holocene climate variability. *Quaternary Science Reviews*, 2011; 30:999-1010.
- [12] Mishra S, Page SE, Cobb AR, Lee JSH, Jovani-Sancho AJ, Sjögersten S, Jaya A, Aswandi, Wardle DA. Degradation of Southeast Asian tropical peatlands and integrated strategies for their better management and restoration. *Journal of Applied Ecology*. 2021; 58:1370–1387.

- [13] Omar MS, Ifandi E, Sukri RS, Kalaitzidis S, Christanis K, Lai DTC.
- [14] Bashir S, Tsikouras B. Peatlands in Southeast Asia: A comprehensive geological review. *Earth-Science Reviews*. 2022; 232:1-22.
- [15] Page SE, Rieley JO, Wüst R. *Chapter 7 Lowland tropical peatlands of Southeast Asia. Developments in Earth Surface Processes*. 2006; 9:145-172.
- [16] Roslim A, Briguglio A, Kocsis L, Rahman FA, Bahrein IF, Goeting S, Razak H. Palaeoenvironmental Interpretation of Late Miocene outcrops (Miri and Seria Formations) along Jalan Tutong In Brunei Darussalam. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*. 2020; 70:39–56.
- [17] Osli LN, Shalaby MR, Islam MA, Kalaitzidis S, Damoulianou ME, Karim KNP, Tsikouras B, Pasadakis N. Organic matter characteristics and hydrocarbon generating potential of the Miocene Belait Formation, Brunei-Muara district, Brunei Darussalam. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022; 208:1-15.
- [18] Bini C., Bech J. PHEs, *Environment and Human Health: Potentially Harmful elements in the environment and the impact on human health*. Springer. 2014.
- [19] Marzaioli R, D'Ascoli R, De Pascale RA, Rutigliano FA. Soil quality in a Mediterranean area of Southern Italy as related to different land use types. *Applied Soil Ecology*. 2010; 44:205-212.
- [20] Macrotrends. Brunei Darussalam Population 1950-2024 [Internet]. United Nations; 2024 [cited 2024 Feb 26]. Available from: <https://www.macrotrends.net/countries/BRN/brunei-darussalam/population>
- [21] Macrotrends. Brunei Arable Land 1961-2024 [Internet]. United Nations; 2024 [cited 2024 Feb 26]. Available from: <https://www.macrotrends.net/countries/BRN/brunei-darussalam/arable-land>
- [22] Fróna D, Szenderák J, Harangi-Rákó M. The challenge of feeding the world. *Sustainability in Food Consumption and Food Security*. 2019; 11:1-18.
- [23] Muhie SH. Optimization of photosynthesis for sustainable crop production. *CABI Agriculture and Bioscience*. 2022; 3:1-8.
- [24] Musa SFPD, Basir KH. Smart farming: towards a sustainable agri-food system. *British Food Journal*. 2021; 123:3085-3099.
- [25] Zunaidi AA, Lim LH, Metali F. Assessments of heavy metals in commercially available fertilizers in Brunei Darussalam. *Agricultural Research*. 2021; 10:234-242.
- [26] Grealish G, Fitzpatrick R, Ringrose-Voase A, Hicks W. Chapter 21 Brunei: Summary of acid sulfate soils. *Inland Acid Sulfate Soil Systems Across Australia*. 2008:301-309.
- [27] Proum S, Santos JH, Lim LH, Marshall DJ. Metal accumulation in the tissues and shells of *Indothais gradata* snails inhabiting soft and hard substrata in an acidified tropical estuary (Brunei, South East Asia). *Regional Studies in Marine Science*. 2016; 8:487-497.
- [28] Bolhuis H, Schluepmann H, Kristalijn J, Sulaiman Z, Marshall DJ. Molecular analysis of bacterial diversity in mudflats along the salinity gradient of an acidified tropical Bornean estuary (South East Asia). *Aquatic Biosystems*. 2014; 10:1-13.

- [29] Page SE, Hooijer A. In the line of fire: the peatlands of Southeast Asia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2016; 371:1-9.
- [30] Porancea-Răulea A. Implications of sustainability-oriented strategies on military organizations. *Land Forces Academy Review*. 2023; 28:50-60.
- [31] Porancea-Răulea A, Bătușaru C. Embracing sustainability in military management: Challenges and opportunities. *International Conference Knowledge-Based Organization*. 2024; 30:1-7.
- [32] Porancea-Răulea AS, Bătușaru CM, Rădoiu A. Conscious or Indifferent - Concerns on Digitalization and Sustainability of the Military Higher Education Institution. *International Conference Knowledge-Based Organization*. 2023; 29:152-157.
- [33] Fanatico AC, Gibbard LG, Bramall SB. Frontline to farm: Sustainable farming training for military veterans and beginning farmers. *Poultry Science*. 2025; 104:1-5.

Mengenai Pengarang

► ***Cpt (U) Khairul Anwar @ Firdaus bin Karia***

Pegawai Memerintah, Skuadron 62, Cawangan No. 6, Kumpulan Bantu
Tentera Udara Diraja Brunei
khairulanwar.karia@mindef.gov.bn

► ***Cpt (U) Muhd Najwan bin Masli***

Pegawai Memerintah, Skuadron 61, Cawangan No. 6, Kumpulan Bantu
Tentera Udara Diraja Brunei
najwan.masli@mindef.gov.bn

► ***Lt (U) Rabi'atul Zahidah binti Tahamat***

Ketua Penerbangan, *Accommodation Flight*, Cawangan No. 6, Kumpulan Bantu,
Tentera Udara Diraja Brunei
zahidah.tahamat@mindef.gov.bn

► ***Lt (U) Awg Muhd Nur Aqeel bin Haji Awg Mohamad***

Penolong Pegawai Memerintah, Skuadron 68, Cawangan No. 6, Kumpulan Bantu
Tentera Udara Diraja Brunei
aqeel.mohamad@mindef.gov.bn

TEKNOLOGI HIJAU DALAM OPERASI PERTAHANAN: PERSPEKTIF TENTERA UDARA

**Kpt (U) Khairul Anwar @ Firdaus bin Karia, Kpt (U) Muhd Najwan bin Masli,
Lt (U) Rabi'atul Zahidah binti Tahamat, Lt (U) Awg Muhd Nur Aqeel bin Haji Awg
Muhammad**

*Kumpulan Bantu, Cawangan No. 6
Tentera Udara Diraja Brunei*

RINGKASAN

Cabaran alam sekitar yang semakin meningkat pada abad ke-21 mendorong kepada perubahan besar dalam aktiviti global, termasuk juga dalam sektor pertahanan. Pihak tentera kini telah beralih kepada penggunaan teknologi hijau untuk mengurangkan jejak alam sekitar sambil mengekalkan kecekapan operasi berdasarkan aspek kemampanan. Kertas kerja ini meneroka proses integrasi teknologi hijau dalam operasi Tentera Udara, dengan memberi tumpuan kepada penggunaan sumber tenaga yang boleh diperbaharui, mobiliti yang mampan, infrastruktur yang mesra alam, dan dengan penggunaan bahan inovatif. Berdasarkan dapatan daripada beberapa kes kajian, telah di jelaskan di dalam kertas kerja ini mengenai kelebihan strategik teknologi tersebut termasuk pengurangan kebergantungan kepada rantaian bekalan bahan api dan adanya peningkatan dalam kerjasama global. Walaupun manfaatnya telah jelas dihuraikan namun terdapat cabaran seperti kos permulaan yang tinggi dan dari segi logistik juga kekal menjadi penghalang kepada pelaksanaannya secara penuh. Kertas kerja ini menyimpulkan tentang masa depan teknologi hijau dalam operasi ketenteraan dan kepentingan bagi menyelaraskan strategi pertahanan dengan matlamat untuk mengekalkan kelestarian global.

Kata Kunci:

Teknologi hijau, Kelestarian, Tenaga yang boleh diperbaharui, Biobahan api, Keselamatan tenaga, Kecekapan operasi, Mobiliti yang mampan, Infrastruktur mesra alam, Kemampanan tentera.

1.0 PENGENALAN

Perubahan iklim kini menjadi kebimbangan yang semakin meningkat di Brunei Darussalam, yang terbukti dengan adanya penerbitan Dasar Perubahan Iklim Negara Brunei Darussalam pada tahun 2020. Negara kini menyedari kepentingan dalam mengintegrasikan teknologi hijau sebagai sebahagian daripada komitmennya untuk mengurangkan jejak alam sekitar dan dalam mencapai pembangunan yang mampan. Brunei mengetahui keperluan dalam mengatasi cabaran alam sekitar secara global seperti perubahan iklim, kekurangan sumber, dan kemerosotan alam sekitar. Ini terbukti dengan tertubuhnya Pusat Teknologi Hijau dan Penyelidikan terhadap Kelestarian yang terdapat di Universiti Teknologi Brunei (UTB). Pengiktirafan ini adalah langkah penting untuk mencapai kelestarian dalam Wawasan Brunei

2035, yang bertujuan dalam mengurangkan pengaruh alam sekitar melalui penyelesaian yang mesra alam.

Organisasi pertahanan memainkan peranan besar dalam menyedari keperluan untuk menyesuaikan diri dengan teknologi hijau. Menurut kenyataan dalam Kertas Putih Pertahanan 2021, Angkatan Bersenjata Diraja Brunei (ABDB) telah mengubah kedudukan pertahanan mereka selaras dengan ancaman bukan konvensional yang semakin meningkat dihadapi dunia. Penggunaan teknologi hijau dalam situasi ini sangat penting untuk memastikan kesiapsiagaan operasi sambil mengurangkan pengaruh alam sekitar terhadap aktiviti pertahanan. Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB) sentiasa akan mencari cara untuk meningkatkan keupayaan strategik, dan bekerjasama dengan teknologi hijau dalam pembangunan aset mereka bagi memastikan organisasi tidak terlalu bergantung kepada bahan api fosil, yang mana boleh memberi kesan buruk kepada alam sekitar. TUDB boleh mula meneroka dalam penggunaan sumber tenaga yang boleh diperbaharui, sistem cekap tenaga, dan tatacara mampan yang dapat mengurangkan jejak karbon dalam operasi udara. Di samping itu, kita juga dapat mengambil iktibar daripada projek yang dibuat oleh pasukan bersekutu iaitu Tentera Udara Republik Singapura (RSAF), yang telah mula mencipta penyelesaian mesra alam di gudang pesawat mereka dengan menggunakan panel tenaga solar melalui kaedah LED.

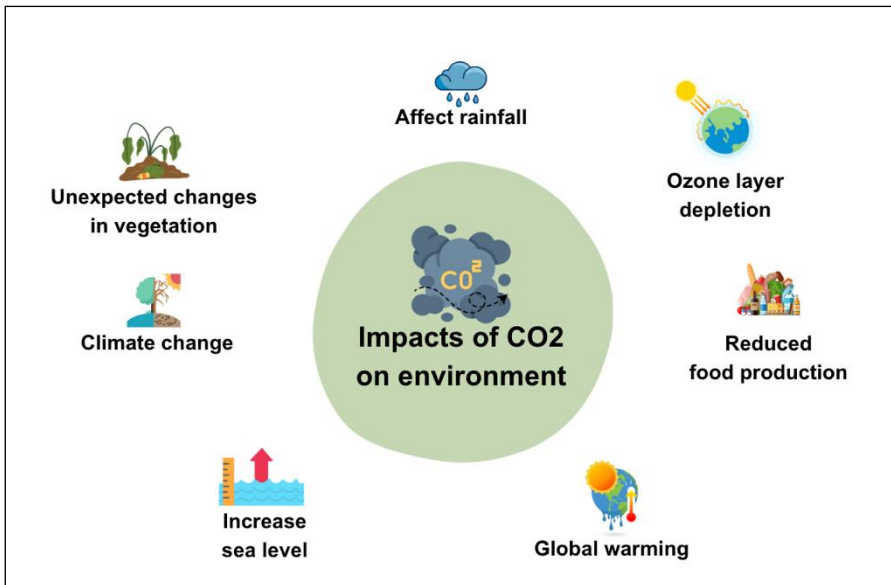
Kertas kerja ini meneroka tentang integrasi teknologi hijau ke dalam operasi udara dengan tumpuan kepada:

1. Penyelesaian tenaga terhadap sistem pengintegrasian bagi sumber tenaga yang boleh diperbaharui.
2. Mobiliti yang mampan untuk pengangkutan dalam logistik ketenteraan.
3. Infrastruktur mesra alam dengan penekanan pada bangunan hijau.
4. Inovasi bahan untuk pembangunan masa depan.

Di samping itu, artikel ini juga turut mengkaji manfaat dan cabaran teknologi tersebut, serta memberikan pandangan mengenai masa depan terhadap strategi bagi sektor pertahanan selaras dengan keberkesanan ketenteraan dengan mengambil kira aspek alam sekitar.

2.0 LATAR BELAKANG

Menurut sejarah, operasi udara banyak bergantung pada sumber tenaga konvensional seperti bahan api fosil. Ini disebabkan oleh pekerjaan mereka yang kebanyakannya melibatkan penggunaan pesawat udara. Pesawat seperti S70i, C295W dan yang sebelum ini C295 telah banyak menggunakan bahan api fosil terutamanya dengan bertambahnya tugas dan berlakunya peningkatan dalam tempoh latihan. Bahan api ini melepaskan gas dengan jumlah yang besar, termasuk karbon dioksida (CO₂), yang menjadi salah satu penyumbang terbesar kepada pemanasan global. Di samping itu, aset bantuan seperti *Iveco Medium Trucks* dan alat penjana enjin berukuran kecil yang berfungsi melalui proses pembakaran turut menyumbang kepada pencemaran apabila berlakunya pembakaran minyak diesel dan menghasilkan gas CO₂. Diantara Kesan-kesan buruk gas CO₂ terhadap lingkungan alam sekitar ditunjukkan dalam [Rajah 1](#).



Rajah 1. Kesan Karbon Dioksida (CO_2) terhadap alam sekitar.

Kesan-kesan ini memicu keperluan terhadap Tentera Udara untuk mengadaptasi teknologi hijau dalam operasi pertahanan bagi memastikan daya tahan operasi, memelihara ekosistem, mengurangkan kos dalam jangka masa panjang melalui sistem yang cekap, serta membuktikan komitmen mereka terhadap orang awam dengan matlamat untuk memelihara kesejahteraan alam sekitar. Selain itu, ia turut menunjukkan kesiapsiagaan sektor pertahanan dalam menangani cabaran masa depan dan pada masa yang sama, menyumbang kepada usaha global dalam memerangi perubahan iklim.

Penggunaan Tenaga Tradisional dalam Tentera Udara

Secara tradisional, Tentera Udara sangat dikenali dengan keperluan mereka terhadap penggunaan bahan api fosil untuk menggerakkan pesawat, kenderaan darat, dan infrastruktur pangkalan. Pergantungan ini telah menyumbang kepada pelepasan gas rumah hijau dan menyebabkan kerentanan logistik, terutamanya dalam memastikan rantai bekalan bahan api terjamin pada kawasan yang tertentu. Di antara kegunaan utama tenaga tradisional ini adalah seperti berikut:

1. Operasi Pesawat
2. Kenderaan Darat dan Peralatan
3. Operasi Pangkalan
4. Sistem Kecemasan dan Sistem bantuan

Keempat-empat aspek ini telah membawa kepada cabaran besar dari segi pengaruh terhadap alam sekitar, risiko operasi, dan kebimbangan mengenai kelestarian dalam masa jangka yang panjang.

Bahan api jet memainkan peranan utama dalam menjana kuasa bagi pengangkutan untuk membawa pesawat dan sistem udara tanpa pemandu (UAS). Sebagai contoh di dalam *TUDB*, kadar penggunaan bahan api pada setiap jam dan pelepasan karbon dioksida (CO₂) bagi setiap liter bahan api yang dibakar diuraikan dalam **Jadual 1** di bawah:

Jenis Pesawat	Kadar Pembakaran Bahan Api/Jam	Pengeluaran CO ₂ bagi Per Liter Bahan Api yang Dibakar
S70i	757 – 946 liter	~2,392 kg/jam
C295	750 – 1,000 liter	~2,520 kg/jam
UAS Integrator X300	1.5 – 3 liter	~7.56 kg/jam

Jadual 1. Kadar penggunaan bahan api dan pelepasan gas CO₂.

Selain itu, peralatan bantuan darat juga memberi kesan yang buruk terhadap alam sekitar kerana pergantungannya yang tinggi terhadap bahan api fosil untuk memenuhi keperluan logistik dan mobiliti. Operasi udara pada lazimnya memerlukan kenderaan tunda, generator, dan trak pengangkutan di pangkalan Tentera Udara. Salah satu kesan daripada keperluan bagi bahan api fosil ialah impak lingkungan yang terhasil daripada pencemaran terhadap udara dan bunyi kerana enjin ini melepaskan nitrogen oksida (NO_x) yang merosakkan kualiti udara. Dalam masa yang sama, bunyi kenderaan daripada enjin bahan api juga turut menghasilkan pencemaran bunyi, terutamanya apabila pangkalan udara terletak berhampiran kawasan perumahan dan lingkungan awam.

Kesan Alam Sekitar

Pembakaran bahan api jet dan produk berasaskan petroleum menghasilkan pelepasan karbon dioksida (CO₂) dan bahan pencemar lain dalam jumlah yang banyak ke atmosfera di mana ianya mempercepat perubahan iklim. Di samping itu, pangkalan dan operasi Tentera Udara menghasilkan sisa yang signifikan, yang boleh mengganggu dan merosakkan ekosistem berhampiran. Kebergantungan terhadap bahan api fosil bukan sahaja mempercepatkan pemanasan global, tetapi ianya juga mendatangkan cabaran terhadap bahagian logistik seperti pengangkutan dan penyimpanan bahan api, terutamanya semasa menjalankan tugas. Beberapa kelemahan bahan api fosil ditunjukkan dalam **Jadual 2**.

Kelemahan	Kesan	Kaedah
Penghakisan tanah	Memusnahkan habitat kehidupan liar	Penggalian dan pemprosesan minyak dan gas bawah tanah
Pencemaran air	Air tercemar dan membahayakan ekosistem	Operasi perlombongan arang batu dan minyak yang tumpah semasa proses pengambilan
Pengeluaran	Menjejaskan kesihatan	Pembakaran bahan api fosil

Jadual 2. Kelemahan Bahan Api Fosil.

Namun, disebabkan global kini beralih ke arah tenaga bersih dan mampan serta terdapatnya tekanan yang semakin meningkat terhadap kerajaan dan institusi untuk mengurangkan pelepasan gas rumah hijau, organisasi ketenteraan mula meneroka teknologi alternatif yang mesra alam. Beberapa contoh termasuk kenderaan tempur infantri Terrex S5, yang diperkenalkan oleh Angkatan Bersenjata Singapura semasa *Singapore Airshow* pada tahun 2024, serta ladang solar yang dicipta oleh *Leh Indian Air Force Station* yang ditubuhkan pada tahun 2020. Sektor ketenteraan yang lain kini mula menyedari manfaat teknologi hijau dan kepentingannya yang semakin meningkat untuk diintegrasikan dalam misi dan operasi harian mereka.

Keperluan yang Semakin Meningkat terhadap Teknologi Hijau

Tentera Udara diketahui sebagai salah satu pengguna tenaga yang terbesar dalam organisasi ketenteraan. Oleh itu, dengan adanya proses peralihan kepada teknologi hijau dapat menawarkan pelbagai peluang dan cabaran. Kertas kerja ini meneroka sudut pandang dengan lebih luas terhadap penerapan teknologi hijau. Ini termasuk perkembangan pada kelestarian global dan menetapkan sasaran khusus terhadap alam sekitar yang ditetapkan oleh institusi ketenteraan. Di samping itu, matlamat operasi juga menjadi pendorong bagi melaksanakan integrasi teknologi tersebut. Teknologi hijau menawarkan dua kelebihan utama:

1. Mengurangkan Kerosakan Alam Sekitar

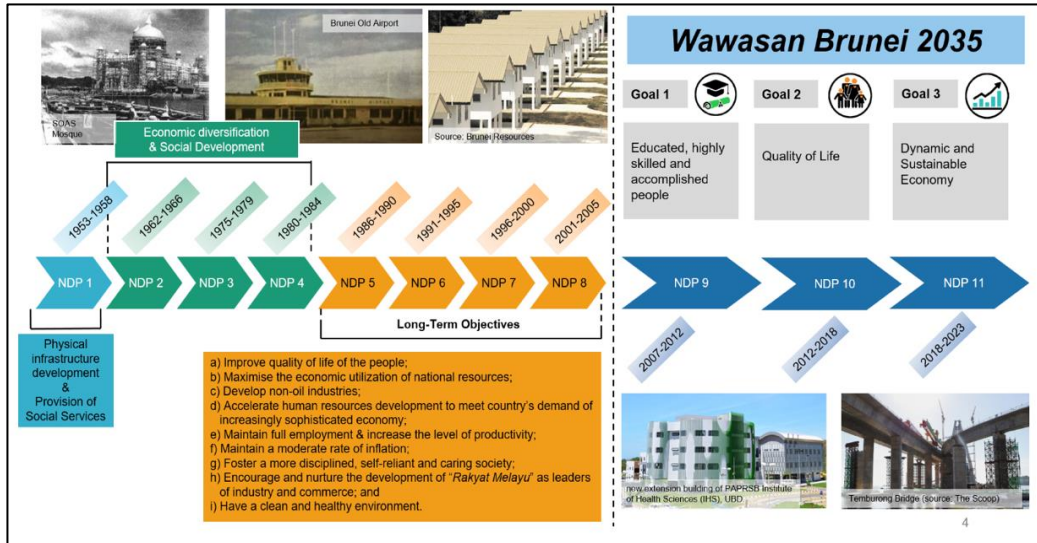
Mengatasi perubahan iklim adalah tanggungjawab semua yang bukan sahaja bermanfaat kepada persekitaran tetapi juga kepada anggota tentera, dengan memperbaiki kualiti udara di kawasan operasi yang mereka diami. Usaha untuk mengurangkan kemerosotan alam sekitar ini akan meningkatkan kepercayaan orang awam terhadap pihak tentera seiring dengan matlamat ketenteraan dalam mencapai sasaran bagi mempertahankan kelestarian serantau dan antarabangsa.

2. Meningkatkan Ketahanan Strategik Tentera Udara Melalui Pengurangan Kebergantungan pada Sumber yang Terbatas

Kebergantungan terhadap bahan api fosil menimbulkan cabaran logistik dan kerentanan, terutama semasa berlakunya konflik. Rantaian bekalan bahan api menjadi sasaran mudah bagi pihak lawan, yang mana dapat menimbulkan risiko kepada operasi udara dan keselamatan kakitangan. Modus operandi utama tugas udara adalah untuk memastikan keunggulan udara melalui pengawasan dan bantuan kepada pasukan darat dan maritim. Sebarang gangguan kepada bekalan bahan api boleh menjejaskan operasi yang mana dapat melemahkan keberkesanan tugas, dan menyebabkan kegagalan dalam mencapai objektif misi. Peralihan kepada teknologi hijau akan membentuk organisasi yang berdaya sendiri dengan mengurangkan risiko kerentanan dan mengurangkan kebergantungan kepada bahan api fosil.

3.0 APLIKASI TEKNOLOGI HIJAU DALAM PERTAHANAN

Terdapat beberapa inisiatif yang boleh diterapkan oleh Tentera Udara dalam usaha mengurangkan kesan buruk terhadap alam sekitar. TUDB boleh membangunkan konsep ini untuk dimasukkan ke dalam Rancangan Pembangunan Negara (*National Development Plan*) pada masa hadapan, sebagai usaha untuk menjadi salah satu organisasi utama di negara ini yang mengutamakan teknologi hijau, sejajar dengan matlamat *Wawasan Brunei 2035*, seperti yang ditunjukkan dalam **Rajah 2**.

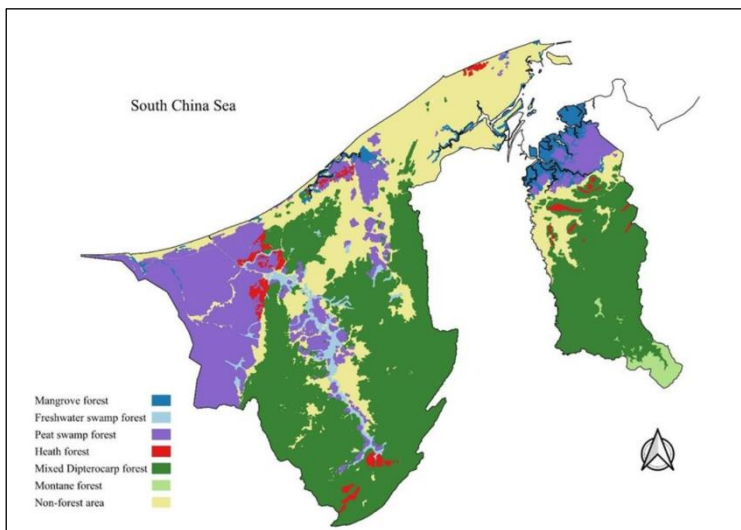


Rajah 2. Gambaran Keseluruhan mengenai NDPs.

► **Solusi bagi Tenaga yang Boleh Diperbaharui**

Salah satu perubahan paling ketara dalam operasi ketenteraan ialah peningkatan terhadap penggunaan tenaga yang boleh diperbaharui. Sumber tenaga seperti tenaga **solar** dan **biobahan api** kini dianggap sebagai alternatif yang sesuai bagi menggantikan bahan api fosil tradisional. Sebagai contoh, panel solar telah dipasang di pangkalan udara terpencil dan *Forward Operating Bases (FOBs)* untuk membekalkan tenaga bagi sistem komunikasi, pencahayaan, dan fungsi kritikal yang lain. Tenaga solar menyediakan bekalan elektrik secara berterusan bagi menjalankan tugas di pangkalan seperti kemudahan kepada bahagian perubatan dan pusat kawalan. Dengan itu, mereka tidak perlu bimbang lagi terhadap kegagalan bekalan elektrik atau gangguan bekalan air bagi sistem yang menggunakan kuasa elektrik. Bekalan elektrik dihasilkan melalui jumlah cahaya matahari yang berhasil diperolehi oleh panel solar dan ianya cukup untuk menghasilkan tenaga untuk keperluan pangkalan. Selain itu, teknologi ini membolehkan Tentera Udara dalam mengurangkan kebergantungan kepada kumpulan bahan api dan alat penjana kuasa.

Tenaga angin juga diperkenalkan sebagai salah satu alternatif yang strategik. Penggunaan turbine angin di lokasi tertentu boleh membantu Tentera Udara mempelbagaikan sumber tenaga mereka, bagi memastikan kesinambungan operasi terutamanya di kawasan terpencil di mana bekalan tenaga tradisional adalah terhad atau tidak boleh dipercayai. Bagi ABDB, keperluan ini sangat kritikal kerana kebanyakan kawasan di negara Brunei Darussalam diliputi oleh hutan hijau tropika. Hal ini merupakan satu cabaran yang dihadapi semasa menjalankan operasi di *Forward Operating Bases* (FOBs) dan *Forward Arming* dan *Refueling Points* pada kawasan hujung sempadan Brunei yang dipenuhi tumbuhan hijau, seperti yang ditunjukkan dalam **Rajah 3**. Inisiatif teknologi masa depan hendaklah dirancang dengan lebih teliti untuk mengurangkan sisa dan pencemaran, bagi melindungi hutan semula jadi di negara ini daripada kerosakan alam sekitar, khususnya melalui pelepasan gas karbon. Sebagai tambahan, **biobahan api** yang berasal daripada bahan organik yang boleh diperbaharui, telah diuji untuk digunakan dalam pesawat dan kenderaan darat yang mana ianya dapat menawarkan alternatif mesra alam kepada bahan api jet konvensional.



Rajah 3. Pembahagian Hutan di Brunei.

► **Mobiliti Mampan**

Kerajaan Brunei baru-baru ini menyatakan hasrat untuk mempromosikan penggunaan kenderaan elektrik (*electric vehicles* (EVs)) dengan menekankan kepentingan mobiliti mampan untuk menyesuaikan diri dengan perkembangan dan cabaran semasa. Seiring dengan itu, Tentera Udara di seluruh dunia telah memanfaatkan usaha kepada elektrifikasi kenderaan darat bagi mencapai mobiliti mampan. Integrasi **kenderaan elektrik (EVs)** dan **teknologi hibrid** ke dalam armada tentera mewakili langkah signifikan ke arah pengurangan penggunaan bahan api dan pelepasan karbon. Kenderaan elektrik ini amat berguna untuk operasi di pangkalan, dimana ia dapat menggantikan kenderaan berkuasa bahan api tradisional dengan alternatif pelepasan gas yang rendah. Langkah ini sejajar dengan matlamat pengurangannya seperti mana yang telah ditetapkan dalam Perjanjian Paris, di mana Negara Brunei Darussalam juga turut menjadi

sebahagian daripada negara yang ikut serta. Salah satu cara bagi membangun inisiatif terhadap pertahanan negara ialah dengan beralih kepada penggunaan kenderaan yang mempunyai pengeluaran gas yang rendah. Dengan cara yang demikian dapat membuat pelepasan gas rumah hijau berkurangan sebanyak 20%.

Tentera Udara juga telah membuat kajian terhadap penggunaan peralatan bantuan darat (*ground support equipment, GSE*) yang berkuasa elektrik untuk pesawat yang mana dapat mengurangkan keperluan dalam menggunakan peralatan berkuasa diesel dan meningkatkan kecekapan tenaga di pangkalan udara secara keseluruhan. Sektor penerbangan pula menunjukkan perkembangan pesat ke arah penggunaan **biobahan api**. Beberapa pesawat tentera telah berjaya beroperasi menggunakan biobahan api dan dengan ini membuktikan bahawa terdapat potensi untuk menggunakan bahan bakar tersebut bagi mengurangkan kebergantungan terhadap bahan api petroleum konvensional. Dalam jangka masa yang panjang, penggunaan biobahan api, hidrogen, dan enjin hibrid dapat mengurangkan jejak karbon Tentera Udara dengan lebih berkesan, khususnya dalam tugas yang tidak melibatkan misi tempur seperti program latihan dan aktiviti logistik.

► **Infrastruktur Mesra Alam**

Penerapan bagi tindakan terhadap pembinaan yang mesra alam adalah sangat penting untuk mewujudkan pangkalan ketenteraan yang lebih mampan. **Infrastruktur hijau** melibatkan **reka bentuk bangunan yang cekap tenaga, sistem penjimatan air, dan bahan binaan yang kukuh**. Tentera Udara telah menggabungkan elemen-elemen ini ke dalam reka bentuk dan pembinaan bagi kemudahan baru, seperti lapangan terbang dan barak. Faedah-faedah seperti **pencahayaian berkuasa solar, sistem penuaian air hujan, dan bumbung hijau (*green roofs*)** menyumbang kepada pengurangan terhadap kesan alam sekitar di pangkalan tentera.

Sistem penyejukan dan pemanasan berasaskan kuasa tenaga yang boleh diperbaharui telah mula diperkenalkan di pangkalan tentera. Sistem-sistem ini bukan sahaja menjimatkan penggunaan tenaga, tetapi juga meningkatkan kelestarian operasi ketenteraan secara keseluruhan, sama ada untuk kemudahan yang baru mahupun yang sedia ada.

► **Bahan Lestari dan Program Kitar Semula yang Canggih**

Penggunaan **bahan termaju** dan **inisiatif kitar semula** dalam Tentera Udara merupakan bahagian penting dalam mengurangkan sisa dan mempromosikan kelestarian. Sektor ketenteraan merupakan organisasi yang paling banyak menggunakan pelbagai bahan termasuk logam hingga plastik. Oleh itu, program kitar semula telah dijalankan bagi memastikan bahan-bahan daripada perlengkapan yang akan dimusnahkan, seperti pesawat dan kenderaan, untuk diubah suai atau dikitar semula. Sebagai contoh, Tentera Udara telah mula menggunakan **bahan ringan** dan **bahan komposit yang mesra alam** dalam pembinaan pesawat, yang bukan sahaja membantu mengurangkan kesan terhadap alam sekitar tetapi juga dapat meningkatkan kecekapan bahan api.

Selain itu, usaha untuk mengitar semula cecair yang digunakan dalam aktiviti penerbangan, bahan logam, dan bahkan sisa elektronik telah dimasukkan ke dalam prosedur operasi untuk mengurangi penghasilan sisa dan mengurangkan keperluan untuk pengambilan bahan mentah.

4.0 KAJIAN KES

Kajian Kes 1 | *Lapangan Terbang Bertenaga Solar di Lokasi yang Terpencil*

Salah satu inisiatif paling jelas dalam teknologi hijau di dalam Tentera Udara ialah dengan penggunaan **tenaga solar** untuk membekalkan tenaga di lapangan terbang yang terpencil. **Tentera Udara Amerika Syarikat** telah melaksanakan pemasangan panel solar di *Forward Operating Bases (FOBs)* di beberapa kawasan seperti Kepulauan Pasifik dan Timur Tengah. Lokasi-lokasi ini sering menghadapi cabaran logistik untuk mengekalkan bekalan bahan api, yang bukan sahaja mahal tetapi juga terdedah kepada ancaman serangan musuh. Melalui pemasangan panel solar, Tentera Udara berjaya mengurangkan kebergantungan terhadap penghantaran bahan api dan mengurangkan jejak gas karbon yang terhasil daripada proses operasi mereka. Dalam beberapa lokasi, tenaga solar telah digunakan pada sistem utama seperti pencahayaan, komunikasi, dan operasi di lapangan terbang. Dengan itu, tenaga solar menjadi bahagian penting dalam misi ketenteraan yang mampan di rantau tersebut.

Kajian Kes 2 | *Ujian dan Integrasi Biobahan api*

Tentera Udara juga telah mengambil langkah penting dalam proses penggunaan **biobahan api** ke dalam armada penerbangannya. Pada tahun 2008, **Tentera Udara Amerika Syarikat** telah menjalankan ujian penerbangan pertama terhadap **C-17 Globemaster** menggunakan campuran 50/50 bahan api jet tradisional dengan **biobahan api** yang diperoleh daripada alga dan sumber yang boleh diperbaharui lainnya. Pencapaian penting ini membuktikan usaha untuk mengurangkan kebergantungan ketenteraan terhadap bahan api fosil dan memperkenalkan bahan api alternatif yang lebih bersih. Sejak dari itu, Tentera Udara sentiasa menguji dan mengintegrasikan biobahan api ke dalam operasi, dengan fokus utama mereka ialah untuk memastikan campuran bahan api ini memenuhi piawaian ketenteraan sambil menyediakan alternatif yang lebih mesra alam. Pada tahun 2016, satu lagi pencapaian telah diperolehi dengan pelaksanaan tugas rutin dengan menggunakan biobahan api di beberapa pangkalan udara di mana ianya membuka jalan bagi mereka untuk menuju ke arah penggunaan bahan api pada aktiviti penerbangan dengan lebih mampan dan meluas.

Kajian Kes 3 | *Peralatan Bantuan Darat (GSE) Elektrik*

Peralatan Bantuan Darat (*Ground Support Equipment, GSE*) berkuasa elektrik telah berjaya diterapkan di beberapa pangkalan Tentera Udara Amerika Syarikat. Secara tradisionalnya, GSE seperti trak tunda, *forklift*, dan kenderaan tunda bagi pesawat berfungsi menggunakan enjin diesel dan petrol. Namun, dalam beberapa tahun kebelakangan ini, Tentera Udara telah memulakan peralihan kepada GSE berkuasa elektrik bagi mengurangkan penggunaan bahan api dan mengurangkan pelepasan gas karbon. Sebagai contoh, di Pangkalan **Tentera Udara Nellis**, kenderaan tunda pesawat berkuasa elektrik telah diguna pakai bagi mengurangkan keperluan bahan api diesel dan membantu menyumbang kepada persekitaran pangkalan yang lebih bersih. Peralihan kepada GSE elektrik juga mengurangkan kos penyelenggaraan dan meningkatkan kecekapan tenaga dalam operasi harian di pangkalan udara.

5.0 MANFAAT TEKNOLOGI HIJAU DALAM PERTAHANAN

Penggunaan teknologi hijau dalam operasi pertahanan memberikan pelbagai manfaat yang melangkaui pemuliharaan terhadap alam sekitar. Manfaat ini memberi kesan kepada strategi ketenteraan, kecekapan operasi, keberkesanan kos, dan hubungan secara antarabangsa.

► *Pengurangan Impak terhadap Alam Sekitar*

Manfaat yang paling utama terhadap penggunaan teknologi hijau dalam sektor pertahanan ialah dengan adanya pengurangan jejak alam sekitar dalam operasi ketenteraan. Tentera Udara kini menggunakan **sumber tenaga yang boleh diperbaharui**, seperti solar dan angin bagi mengurangkan kebergantungannya kepada bahan api fosil, yang seterusnya dapat mengurangkan pelepasan gas rumah hijau. Ini bukan sahaja membantu mengatasi perubahan iklim tetapi juga mengurangkan kerosakan ekologi yang disebabkan oleh pengangkutan dan penggunaan bahan api berskala besar. Dengan mengamalkan pendekatan yang lebih mampan, pihak tentera dapat membantu dalam menjayakan matlamat alam sekitar secara global dengan melibatkan diri sebagai peneraju dalam kemampanan.

► *Peningkatan Kecekapan Operasi*

Teknologi hijau, seperti **tenaga solar**, **biobahan api**, dan **pesawat cekap tenaga**, boleh meningkatkan kecekapan operasi ketenteraan dengan lebih baik. Contohnya, sistem tenaga yang boleh diperbaharui membolehkan Tentera Udara menjadi lebih bebas dalam penggunaan tenaga dengan adanya pengurangan beban terhadap rantai logistik bagi bekalan bahan api. Lapangan terbang dan pangkalan tentera berkuasa solar boleh beroperasi secara autonomi termasuk kawasan-kawasan yang terpencil yang mana dapat mengurangkan risiko terhadap kekurangan atau gangguan bahan api. Di samping itu, penggunaan **kenderaan elektrik** dan **sistem hibrid** dapat meningkatkan kecekapan tenaga dan meningkatkan lagi pergerakan di dalam pangkalan. Dengan adanya kaedah tersebut, keperluan untuk menggunakan kenderaan berkuasa bahan api tradisional dapat dikurangkan.

► *Penjimatan Kos*

Walaupun teknologi hijau memerlukan permulaan kos yang tinggi namun faedah kewangan yang didapati dalam jangka masa panjang adalah cukup besar. Tentera Udara boleh mencapai penjimatan yang ketara dengan adanya pengurangan dalam penggunaan bahan api, kos penyelenggaraan yang lebih rendah untuk peralatan cekap tenaga, dan sistem tenaga yang boleh diperbaharui tersebut mempunyai jangka hayat yang lebih lama. Sebagai contoh, dengan beralih kepada penggunaan **biobahan api** tersebut dapat mengurangkan kos bahan api penerbangan dari semasa ke semasa, manakala **panel solar** boleh membekalkan tenaga percuma sebaik sahaja dipasang. Melihat pada jangka masa yang panjang, pelaburan ini boleh menjimatkan kewangan dalam kos bahan api dan proses penyelenggaraan, yang mana duit tersebut boleh diperuntukkan semula kepada keperluan tugas kritikal yang lain.

► *Keselamatan Tenaga*

Teknologi hijau menawarkan **keselamatan tenaga** yang lebih baik untuk operasi ketenteraan, terutamanya di lokasi terpencil di mana rantai bekalan bahan api terdedah kepada pelbagai gangguan dan cabaran. Contohnya, dengan menggunakan **tenaga solar** untuk menambah sumber tenaga tradisional, Tentera Udara mengurangkan kebergantungannya pada grid kuasa berpusat dan memastikan bekalan tenaga yang lebih berdaya tahan. Ini amat penting di zon konflik di mana penghantaran bahan api boleh ditangguhkan atau dipintas yang mana dapat membahayakan misi ketenteraan. Keupayaan untuk menjana dan menyimpan tenaga di lokasi tertentu dapat menyediakan fleksibiliti dalam pekerjaan dan meningkatkan kejayaan misi.

► *Peningkatan terhadap Kerjasama Global dan Reputasi*

Penggunaan teknologi hijau juga mengukuhkan **perkongsian antarabangsa**. Kebanyakan negara telah menandatangani perjanjian iklim antarabangsa, seperti **Perjanjian Paris**, dan komitmen tentera dari segi kemampuannya dapat meningkatkan hubungan diplomatik masing-masing. Tentera Udara Amerika Syarikat, contohnya, telah bekerjasama dengan negara-negara bersekutu dalam projek berkaitan dengan tenaga yang boleh diperbaharui yang mana membolehkan mereka untuk memperkukuh kepimpinannya dalam pengawasan alam sekitar. Dengan menyelaraskan strategi ketenteraan dengan inisiatif alam sekitar secara global, Tentera Udara berhasil meningkatkan reputasinya dan menyumbang kepada keamanan dan kestabilan global.

6.0 CABARAN DAN KETERBATASAN

Walaupun penyepaduan teknologi hijau ke dalam operasi Tentera Udara menawarkan pelbagai faedah namun pada masa yang sama terdapat cabaran dan had yang akan dihadapi. Cabaran ini mesti dipertimbangkan dengan teliti untuk memastikan bahawa penggunaan teknologi hijau tidak akan menjejaskan kesiapsiagaan operasi atau keberkesanan keseluruhan.

► *Kos Permulaan yang Tinggi*

Salah satu halangan utama untuk penerapan teknologi hijau dalam operasi tentera ialah **kos permulaannya**. Teknologi seperti panel solar, peralatan cekap tenaga, dan pengeluaran biobahan api memerlukan pelaburan yang besar untuk memulainya. Walaupun teknologi ini selalunya membawa kepada penjimatan pada masa jangka yang panjang akan tetapi kos yang tinggi yang berkaitan dengan penyepaduannya boleh menjadi penghalang, terutamanya dalam sektor yang menuntut kesiapsiagaan dan fleksibiliti operasi secara berterusan. Pihak tentera mesti mempertimbangkan dampak kewangan dalam jangka masa yang pendek berbanding matlamat kemampuan pada jangka masa yang panjang dan kecekapan operasi.

► *Kebolehpercayaan dalam Persekitaran yang Sukar*

Tentera Udara beroperasi di beberapa persekitaran yang paling mencabar di Bumi seperti di kawasan gurun, gunung, dan keadaan Artik, di mana kebolehpercayaan sumber tenaga yang boleh diperbaharui menjadi tidak menentu. Contohnya, **tenaga solar** sangat bergantung

kepada cahaya matahari, yang mungkin terhad di kawasan kutub atau semasa cuaca mendung. Begitu juga, **turbin angin** mungkin tidak dapat menjana tenaga yang mencukupi di kawasan yang mempunyai kelajuan angin yang rendah. Oleh itu, penyelidikan dan mempelajari kemajuan teknologi secara berterusan adalah perlu bagi memastikan bahawa teknologi hijau tersebut dapat memberikan manfaat dan mampu memenuhi permintaan operasi semasa berada dalam persekitaran yang mencabar.

► *Infrastruktur dan Logistik*

Cabaran logistik untuk melaksanakan teknologi hijau dalam sektor ketenteraan merupakan salah satu halangan yang sering terjadi. Tentera Udara memerlukan bahan api yang banyak untuk pesawat dan asetnya yang lain, yang selalunya ditempatkan di lokasi terpencil. Peralihan kepada biobahan api atau tenaga solar boleh merumitkan rantai bekalan dan infrastruktur, terutamanya di kawasan di mana teknologi ini belum lagi dapat digunakan sepenuhnya. Dalam kes sedemikian, operasi ketenteraan berkemungkinan akan menghadapi kesukaran dalam mendapatkan dan memberikan solusi terhadap tenaga hijau yang mana boleh mengganggu keberkesanan misi.

► *Integrasi dengan Sistem yang Sedia Ada*

Satu lagi halangan yang akan dihadapi ialah berkaitan dengan proses **integrasi** teknologi hijau itu sendiri dengan sistem ketenteraan yang sedia ada. Banyak pesawat, kenderaan, dan peralatan penting lain direka bentuk untuk menggunakan bahan api fosil tanpa mengambil kira pemahaman tentang teknologi hijau tersebut. Justeru itu, menyesuaikan sistem ini dengan penyelesaian tenaga alternatif boleh menjadi mahal dan akan memakan masa yang lama. Pihak tentera mesti mencari jalan untuk mengimbangi penyepaduan teknologi moden dan mampan ini dengan tuntutan operasi daripada peralatan usang.

► *Penentangan Politik dan Birokrasi*

Penerimaan teknologi baharu sering menghadapi tentangan kerana inersia birokrasi atau kurangnya kesediaan politik. Terdapatnya cabaran daripada sektor tradisional tentera yang menganggap teknologi hijau sebagai tidak teruji atau sekunder kepada keupayaan tempur. Menangani tentangan sedemikian memerlukan kepimpinan yang kukuh, komunikasi yang jelas tentang manfaat yang boleh diambil, dan mampu menerima perubahan dalam budaya organisasi yang merangkumi kemampanan di samping kesiapsiagaan operasi.

Bagi mengatasi cabaran ini, kerajaan dan organisasi pertahanan mesti mengutamakan pelaburan terhadap teknologi hijau dalam industri penerbangan. Perkongsian di antara sektor awam dan swasta boleh mempercepatkan inovasi dengan memanfaatkan kepakaran yang terdapat dalam sektor swasta. Kerjasama antarabangsa juga penting agar negara-negara boleh berkongsi pengetahuan, mengumpul sumber, dan menetapkan piawaian untuk mengamalkan operasi penerbangan yang lebih mesra alam. Di samping itu, menggabungkan matlamat kemampanan ke dalam dasar dan strategi pertahanan boleh mendorong perubahan budaya dalam organisasi ketenteraan.

7.0 TINJAUAN MASA DEPAN

Menggunakan teknologi hijau di dalam operasi Tentera Udara pada masa hadapan merupakan cadangan yang positif namun perjalanan membina ketenteraan yang mampan dan cekap tenaga secara sepenuhnya adalah satu jalan yang rumit. Seiring dengan adanya kemajuan teknologi secara berterusan akan memberikan harapan yang besar terhadap penyepaduan bagi tenaga yang boleh diperbaharui dan amalan yang mampan ke dalam operasi Tentera Udara.

► *Kemajuan dalam Tenaga yang Boleh Diperbaharui*

Memandangkan pasaran tenaga global beralih ke arah sumber yang lebih bersih, kemajuan dalam **teknologi solar**, **tenaga angin**, dan **penyimpanan tenaga** akan memainkan peranan yang sangat penting dalam menjadikan pangkalan tentera lebih berdikari. Pada masa akan datang, dengan adanya panel solar dengan kecekapan yang lebih tinggi dan dengan penggunaan bahan yang lebih tahan lama, akan membolehkan Tentera Udara untuk memanfaatkan tenaga solar walaupun berhadapan dalam persekitaran yang mencabar. Di samping itu, **penyelesaian penyimpanan tenaga**, seperti bateri canggih dan superkapasitor, akan membantu dalam menyimpan lebihan tenaga untuk digunakan ketika pengeluaran bagi tenaga yang boleh diperbaharui berada di tahap rendah. Ini bertujuan bagi memastikan bekalan kuasa yang berterusan.

► *Hidrogen dan Biobahan Api*

Dalam sektor penerbangan, **hidrogen** dan **biobahan api** mempunyai potensi yang besar dalam menggantikan bahan api fosil. Pesawat berkuasa hidrogen kini sudah berada pada peringkat pembangunan. Pada masa hadapan, hidrogen berpotensi dalam menjadi pilihan yang berdaya maju bagi penerbangan yang beroperasi jarak jauh dengan menyediakan alternatif neutral karbon menggantikan bahan api penerbangan tradisional. Sementara itu, biobahan api dijangka akan diperbaiki lagi bagi mendapatkan hasil yang lebih baik dan tersedia secara meluas, agar pengguna dapat memanfaatkannya secara lebih luas dalam pesawat tentera, kenderaan, dan kapal. Peralihan ini boleh mengurangkan pelepasan karbon Tentera Udara secara mendadak sambil mengekalkan tahap prestasi operasi yang tinggi.

► *Kecerdasan Buatan (AI) dalam Pengurusan Tenaga*

Gabungan **AI** dan **pembelajaran mesin** boleh merevolusikan cara Tentera Udara menguruskan penggunaan tenaga. AI boleh mengoptimumkan penggunaan tenaga yang boleh diperbaharui di seluruh tugas tentera agar dapat melaraskan pekerjaan secara masa nyata berdasarkan keadaan cuaca, permintaan tenaga, dan keperluan operasi. Ini akan membolehkan pengagihan tenaga yang lebih cekap, mengurangkan pembaziran dan meningkatkan daya tahan operasi ketenteraan secara menyeluruh.

► *Reka Bentuk Pesawat dan Armada yang Mampan*

Armada Tentera Udara di masa hadapan boleh direka bentuk berdasarkan faktor kemampanan sebagai keutamaan. Bahan yang ringan, enjin yang lebih cekap tenaga, dan sistem pendorongan hibrid akan dimasukkan ke dalam reka bentuk pesawat baharu bagi mengurangkan penggunaan

bahan api dan gas pelepasannya. Lebih-lebih lagi, usaha untuk meningkatkan **kecekapan bahan api** pada pesawat yang sedia ada melalui pengubahsuaian reka bentuk dan penggunaan bahan api alternatif akan terus memainkan peranan penting dalam mengurangkan impak terhadap alam sekitar di dalam organisasi ketenteraan.

► *Kerjasama Global dan Integrasi Dasar*

Memandangkan negara-negara di seluruh dunia bertekad untuk menangani perubahan iklim, kerjasama global mengenai kemampuan ketenteraan akan menjadi lebih kritikal. Tentera Udara, bersama-sama dengan cabang tentera yang lain, perlu menyelaraskan strateginya dengan mengadakan perjanjian antarabangsa mengenai alam sekitar, seperti **Perjanjian Paris**. Kerjasama daripada negara-negara bersekutu sangat diperlukan bagi memastikan operasi ketenteraan berjalan dengan baik dan mesra alam disamping penerimaan mereka terhadap penggunaan teknologi hijau tersebut.

8.0 KESIMPULAN

Teknologi hijau dalam operasi pertahanan bukan sekadar mengikuti perkembangan terkini bahkan ia adalah merupakan keperluan strategik. Memandangkan dunia menghadapi cabaran alam sekitar yang mendesak maka sektor tentera hendaklah sentiasa mencari cara untuk mengembangkan organisasi dalam mengimbangi kecekapan operasi dengan lebih kukuh. Bagi Tentera Udara, menerima pakai teknologi hijau seperti penggunaan tenaga yang boleh diperbaharui, biobahan api, dan infrastruktur yang mesra alam adalah penting untuk mengekalkan kesiapsiagaan operasi sambil mengurangkan impak terhadap alam sekitar. Diantara cabaran yang akan dihadapi ialah seperti kos permulaan yang tinggi, infrastruktur yang terbatas, dan keperluan untuk penyepaduan dengan sistem yang sedia ada. Namun pada sisi yang lain, terdapat faedah yang besar melebihi halangan tersebut jika dilihat pada masa jangka yang panjang.

Penerimaan terhadap penggunaan teknologi hijau bukan sahaja menawarkan kelebihan bagi alam sekitar tetapi juga dari segi strategik. Dengan mengurangkan kebergantungan kepada bahan api fosil, Tentera Udara boleh meningkatkan keselamatan tenaga, meningkatkan kecekapan operasi, dan mengurangkan kelemahan logistik. Tambahan pula, apabila proses mengintegrasikan teknologi hijau yang canggih ini ke dalam operasi ketenteraan, ia akan memberikan kesan yang positif dalam menjadi contoh teladan dengan menunjukkan bagaimana tanggungjawab alam sekitar boleh wujud bersama dengan kuasa ketenteraan.

Melihat ke masa hadapan, kemajuan dalam tenaga yang boleh diperbaharui, bahan api hidrogen, AI, dan reka bentuk armada yang kukuh akan mengubah operasi Tentera Udara. Perkembangan ini bukan sahaja akan menyumbang kepada pasukan tentera yang lebih mampan tetapi juga membantu masyarakat global dalam memerangi perubahan iklim. Akhirnya, operasi pertahanan pada masa depan akan bersatu dengan menggabungkan kekuatan organisasi ketenteraan dalam melindungi dan menjaga alam sekitar dan memastikan bahawa Tentera Udara akan sentiasa bersedia sedia untuk menghadapi cabaran yang akan timbul pada masa depan sambil memelihara bumi ini untuk generasi yang akan datang.

RUJUKAN

- [1] U.S. Department of Defense. Department of Defense Strategic Sustainability Performance Plan. 2016. Available from: www.defense.gov.
- [2] U.S. Air Force. *Renewable Energy and Green Technology Integration in Air Force Operations*. 2020. U.S. Air Force, Public Affairs.
- [3] Jansson R, Laine M. Military Sustainability: The Integration of Green Technologies in Defence Forces. *J Def Environ Manag*. 2019;12(3):110-125.
- [4] National Defense Authorization Act (NDAA). *Section on Sustainability Initiatives for Military Operations*. U.S. Government Publishing Office; 2022.
- [5] Smith T, Chang H. Biofuels in Military Aviation: A Study on Fuel Alternatives for the U.S. Air Force. *Aviat Energy*. 2017;45(4):62-74.
- [6] International Energy Agency. *Renewable Energy and Military Operations*. 2020. Available from: www.iea.org.
- [7] U.S. Air Force. Energy Independence: The Role of Solar Power in Remote Military Installations. *Air Force Energy J*. 2018;7(2):34-47.
- [8] Barrett M, Hargrave M. The Future of Green Technology in Defence: Opportunities and Challenges. *Def Sci Technol Org*. 2021;29(5):200-213.
- [9] Luckenbaugh J. SINGAPORE AIRSHOW: ST Engineering Unveils Hybrid-Electric Fighting Vehicle [Internet]. 2024 [cited 2024]. Available from: <https://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2024/2/18/st-engineering-unveils-hybrid-electric-fighting-vehicle>.
- [10] Tehreek-i-Insaf P. Ladakh gets largest solar project at Leh Indian Air Force Station [Internet]. 2020 [cited 2024]. Available from: <https://economictimes.indiatimes.com/news/defence/ladakh-gets-largest-solar-project-at-leh-indian-air-force-station/articleshow/79428239.cms?from=mdr>.

Mengenai Pengarang

► **Mej (U) Muhammad Adif bin Haji Zaman**

Pegawai Memerintah Cawangan No. 2. Beliau sebelum ini telah berkhidmat sebagai Pegawai Memerintah Skuadron 262, di mana beliau memainkan peranan penting dalam meningkatkan keupayaan operasi, yang mana salah satunya meliputi pelaksanaan simulator penerbangan dron bagi meningkatkan kecekapan dan keselamatan dalam operasi udara tanpa pemandu. Dengan pengalaman luas dalam pertahanan udara dan arahan operasi, beliau terus mendorong inovasi dan pembangunan strategik dalam Cawangan No. 2.

► **Kpt (U) Pg Md Hassanal Arif bin Pg Md Ali Sham**

Pegawai Operasi Rejimen Cawangan No. 2. Beliau sebelum ini telah berkhidmat sebagai Pegawai Operasi Skuadron 262, yang mana tanggungjawab beliau meliputi pegawasan aset dron dan anti-dron Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB). Seorang penggemar dron yang bersemangat, beliau mempunyai minat dalam menerbangkan dron sebagai hobi, sekali gus meningkatkan kepakarannya dalam sistem udara tanpa pemandu serta potensi bagi aplikasi dalam operasi ketenteraan.

► **Kpt (U) Pg Muddaththir Zaki Pg Haji Baharuddin***

Beliau adalah Pegawai Pertahanan Udara dan telah berkhidmat sebagai Timbalan Pegawai Memerintah (2IC) di Skuadron 262 di bawah Cawangan No. 2, Kumpulan Operasi, TUDB sejak awal tahun 2024. Beliau memegang Ijazah Sarjana Muda (Kepujian) dalam Kejuruteraan, dengan pengkhususan dalam Kawalan Automatik dan Kejuruteraan Sistem dari Universiti Sheffield, United Kingdom. Semasa pengajian beliau, beliau telah memulakan satu projek bertajuk "*Evaluating Machine Learning Algorithm to Solve CAPTCHA: A New Harmonic Approach to Signature Based Recognition*". Sepanjang kerjayanya, beliau pernah ditugaskan ke jabatan-jabatan yang lain seperti Pegawai Latihan Kompeni Rekrut, Pegawai Operasi Rejimen Cawangan No. 2, Pegawai Pentadbir Cawangan No. 2, Komander Trup Skuadron 238 dan Pegawai Dalam Latihan (Juruterbang) Skuadron 73, Cawangan No. 7. Pengalaman luas beliau dalam latihan dan minat beliau yang mendalam terhadap kemajuan teknologi mendorong usaha beliau untuk mengintegrasikan *Artificial Intelligence (AI)* dalam kaedah latihan ketenteraan konvensional.

**Pengarang utama & koresponden
Zaki.baharuddin@mindef.gov.bn*

MENGANALISA HUBUNGAN ANTARA KEYAKINAN DIRI BERDASARKAN PENILAIAN KENDIRI DAN PRESTASI SIMULATOR: RANGKA KERJA PENYELIDIKAN KUANTITATIF

Mej (U) Muhammad Adif bin Haji Zaman, Kpt (U) Pg Md Hassanal Arif bin Pg Md Ali Sham, Kpt (U) Pg Muddaththir Zaki Pg Haji Baharuddin*

*Kumpulan Operasi, Cawangan No. 2
Tentera Udara Diraja Brunei*

RINGKASAN

Kajian ini menyoroti hubungan di antara prestasi simulator dron dan tahap keyakinan yang dinilai sendiri di kalangan juruterbang dron dengan menggunakan proses penilaian selama dua hari yang melibatkan tinjauan penilaian sendiri dan persekitaran simulasi dron. Tahap keyakinan dinilai melalui soalan skala linear (1–5) yang dijalankan pada akhir peringkat simulasi perlumbaan dron pandangan pihak ketiga (third-person) dan pandangan pihak pertama (first-person). Metrik prestasi, termasuk masa yang dinormalisasi, konsistensi kelajuan, kadar penyelesaian, dan penalti ralat, digabungkan ke dalam formula Skor Keyakinan (Confidence Score, CS), untuk menggambarkan prestasi juruterbang secara kuantitatif. Korelasi pangkat Spearman digunakan untuk mengkaji keselarasan antara CS dan skor penilaian diri. Hasil kajian menunjukkan korelasi positif yang lemah ($p=0.083$ untuk perlumbaan pandangan pihak ketiga dan $p=0.173$ untuk perlumbaan dari sudut pandang pihak pertama), yang menunjukkan keselarasan minimum antara metrik prestasi dan keyakinan yang dirasakan sendiri. Kajian ini dijalankan di dalam persekitaran yang terkawal menggunakan DJI Flight Simulator bersama DJI Mavic 2 Zoom drone, untuk memastikan konsistensi dan mengurangkan bias. Penemuan dari analisis ini menekankan kompleksiti dalam menilai keyakinan dalam operasi dron dan keperluan untuk rangka kerja penilaian yang lebih diperhalusi bagi memahami hubungan di antara penilaian diri dan prestasi. Penyelidikan masa hadapan disarankan untuk mempertimbangkan sampel yang lebih luas dan data kualitatif untuk meningkatkan pemahaman mengenai dinamik keyakinan para juruterbang.

Kata Kunci:

keselamatan dron, keselamatan penerbangan, simulator DJI Flight, simulator latihan dron, kecemasan dron, perlumbaan dron, terbang dengan yakin

1.0 PENGENALAN

Peningkatan penggunaan simulator penerbangan dron dalam latihan dan di dalam situasi yang mencabar telah menegaskan keperluan untuk metrik yang boleh dipercayai bagi menilai prestasi dan keyakinan juruterbang. Di antara faktor penting bagi tugas yang memerlukan kecepatan

dan ketepatan yang tinggi, seperti perlumbaan dron, adalah keyakinan dalam membuat keputusan, pelaksanaan tugas, dan pencapaian prestasi secara keseluruhan. Namun, untuk mengukur keyakinan dengan objektif adalah satu cabaran, terutamanya dalam keadaan di mana penilaian diri yang subjektif mungkin tidak dapat menggambarkan kebolehan atau kelemahan juruterbang secara tepat.

Simulator penerbangan dron menyediakan persekitaran yang terkawal untuk menilai prestasi juruterbang dalam pelbagai keadaan, sekaligus dapat memberikan maklumat yang penting untuk dianalisis bagi menilai keyakinan individu secara objektif. Metrik seperti kadar penyelesaian tugas, konsistensi, kelajuan, dan kekerapan ralat dapat memberikan manfaat yang berguna kepada juruterbang dari segi kebolehppercayaan dan kecekapan dalam membuat keputusan. Dengan menggabungkan penunjuk prestasi ini ke dalam kerangka berstruktur dapat menghasilkan skor keyakinan yang mencerminkan keupayaan juruterbang dalam memenuhi keperluan prestasi secara objektif.

Kajian ini membentangkan satu kerangka kuantitatif untuk menilai metrik keyakinan berdasarkan data prestasi yang dikumpulkan daripada simulator penerbangan dron. Kerangka ini menggabungkan metrik seperti kadar penyelesaian tugas, tempoh masa diperlukan, kebolehubahan, dan kekerapan ralat ke dalam model pemberat skor untuk menghasilkan skor keyakinan yang lebih terperinci. Selain itu, kajian ini juga menyelidik korelasi di antara skor objektif dan penilaian sendiri subjektif untuk menilai keselarasan antara prestasi yang dinilai oleh diri sendiri dan prestasi sebenar.

Dengan menyediakan pendekatan sistematik untuk penilaian keyakinan, penyelidikan ini memberi sumbangan kepada pembangunan protokol latihan yang lebih berkesan, penilaian prestasi, dan reka bentuk sistem. Hasil daripada kajian ini tidak terbatas kepada perlumbaan dron sahaja akan tetapi ianya juga boleh diguna pakai dalam bidang yang lain seperti sistem autonomi, latihan penerbangan, dan interaksi antara manusia dan komputer.

2.0 SEMAKAN LITERATUR

Hubungan di antara keyakinan dan prestasi telah banyak dikaji dalam berbagai bidang seperti penerbangan, sukan, dan pembedahan [1,2]. Dalam persekitaran-persekitaran tersebut, keyakinan mempengaruhi dalam proses membuat keputusan, pengambilan risiko, dan pembetulan ralat. Teori kecekapan diri Bandura (1997) mencadangkan bahawa individu dengan tahap keyakinan yang lebih tinggi cenderung untuk mencapai prestasi yang lebih baik kerana mereka percaya dengan keupayaan mereka untuk menangani tugas-tugas yang mencabar. Namun, keyakinan yang berlebihan boleh membawa kepada keputusan yang buruk atau tindakan yang kurang memuaskan, manakala kurang keyakinan akan menyebabkan keraguan dan gagal dalam mengambil peluang yang terbaik.

Dalam persekitaran yang berisiko tinggi, keyakinan adalah sangat penting kerana ia secara langsung mempengaruhi keupayaan seorang juruterbang untuk mengemudi laluan yang sulit, memulihkan kesilapan, dan membuat keputusan yang pantas semasa berada di dalam situasi yang kritikal. Keyakinan seorang juruterbang terhadap keupayaan diri mereka sendiri boleh

membawa kepada keputusan yang lebih cepat dan tepat, serta mengetahui akan risiko yang dihadapi bagi menyelesaikan tugas dalam masa yang singkat.

Kajian-kajian terdahulu mendapati bahawa ketidakselarasan antara penilaian diri subjektif dan prestasi sebenar menunjukkan perbezaan yang ketara dalam tingkah laku juruterbang. Buehler et al. (1994) mendapati bahawa keyakinan yang dirasakan sendiri dalam proses membuat keputusan sering kali tidak berhubung kait dengan prestasi sebenar, yang membawa kepada konsep "bias keyakinan" ("*confidence bias*") [3]. Ketidakselarasan ini adalah sangat relevan dalam misi udara tanpa pemandu, di mana keyakinan yang dirasakan oleh seorang juruterbang dron boleh mempengaruhi prestasi mereka secara jelas tetapi tidak semestinya seiring dengan data objektif.

Pelbagai metrik prestasi biasanya digunakan untuk menilai kemahiran dan keupayaan juruterbang dron, seperti masa litar, kadar penyelesaian tugas, dan kekerapan kesilapan. Metrik-metrik ini sangat penting untuk memahami tahap kemahiran dan konsistensi juruterbang, terutamanya dalam persekitaran di mana prestasi tinggi adalah kritikal.

- **Metrik Berdasarkan Masa:** Metrik prestasi yang sering digunakan bagi menggunakan dron ialah masa. Keupayaan juruterbang untuk menyelesaikan laluan litar dalam masa yang singkat sering kali menjadi penentu utama bagi sesebuah kejayaan. Kajian menunjukkan bahawa kelajuan sahaja tidak mencukupi untuk menentukan prestasi keseluruhan, kerana ia tidak mengambil kira aspek konsistensi atau pengurusan kesilapan [4].
- **Konsistensi:** Konsistensi, yang sering diukur melalui *coefficient of variation* (CV) dalam masa litar, memainkan peranan penting dalam penilaian prestasi. Juruterbang yang konsisten kurang cenderung untuk membuat kesilapan besar dan lebih mampu menyesuaikan diri dengan keadaan yang sering berubah semasa dalam perlumbaan [5]. Variabiliti yang tinggi dalam masa litar biasanya menunjukkan keyakinan dan kemahiran yang tidak stabil, manakala prestasi yang konsisten mencerminkan juruterbang yang stabil dan yakin.
- **Kadar Penyelesaian:** Kadar penyelesaian tugas (*task completion rate*, CR) mengukur peratusan tugas yang berjaya diselesaikan oleh seorang juruterbang. Dalam perlumbaan dron, metrik ini menggambarkan keupayaan juruterbang untuk mengemudi tanpa kemalangan, menampilkan tahap kemahiran mereka dalam mengawal keadaan dalam tempoh masa yang panjang. Griffiths et al. (2018) mendapati bahawa kadar penyelesaian tugas mempunyai kaitan dengan prestasi dunia nyata dalam penerbangan, yang mana ianya menunjukkan bahawa metrik ini boleh digunakan sebagai indikator bagi menilai tahap kemahiran dan kebolehpercayaan [6].
- **Kekerapan Kesilapan:** Kekerapan kesilapan merupakan salah satu faktor penting dalam menilai prestasi juruterbang. Kadar ralat yang tinggi biasanya dikaitkan dengan tahap keyakinan yang rendah, kerana ia menunjukkan kurangnya kawalan dan kemampuan dalam membuat keputusan di bawah tekanan [7]. Sebaliknya, juruterbang yang membuat jumlah kesilapan yang lebih sedikit cenderung mempunyai tahap keyakinan yang lebih tinggi, kerana mereka dapat mengatasi halangan dengan berkesan tanpa hilang kawalan. Kekerapan kesilapan boleh menjadi petunjuk utama tentang bagaimana juruterbang mengendalikan tekanan dan mengatasi situasi yang di luar jangkaan.

3.0 KAEDAH

Kajian ini menyelidik pembangunan skor keyakinan secara menyeluruh bagi juruterbang dron dengan menggunakan simulator penerbangan berdasarkan kepada metrik prestasi seperti penyelesaian tugas, konsistensi, kekerapan kesilapan, dan penggunaan masa. Metodologi ini dibahagikan kepada tiga peringkat: kawalan asas dron (*basic drone control*), perlumbaan dron dari sudut pandangan pihak ketiga (*third-person View, TPV*), dan perlumbaan dron dari pandangan pihak pertama (*first-person view, FPV*). Tugas di setiap peringkat akan menjadi semakin rumit, menyerupai senario dunia nyata di mana juruterbang dikehendaki menunjukkan kemahiran, keyakinan, dan keupayaan dalam menyesuaikan diri dalam persekitaran penerbangan yang pelbagai.

3.1 | Peserta

Kajian ini melibatkan 17 peserta daripada Skuadron 262, terdiri daripada pangkat Soldadu (Pvt) dan Sarjan (Sjn). Purata umur peserta adalah di antara 25 hingga 30 tahun, mewakili demografi tipikal dalam kumpulan operasi ini.

Secara purata, peserta telah mencatatkan 225 minit jam penerbangan operasi; namun, adalah penting untuk diperhatikan bahawa 40% peserta tidak mempunyai pengalaman penerbangan operasi dunia sebenar dan hanya menjalani latihan menggunakan *DJI Flight Simulator*. Gabungan pengalaman operasi dan simulasi sahaja ini menyediakan set data yang pelbagai untuk menilai korelasi antara kemahiran penerbangan dan keyakinan.

3.2 | Reka Bentuk Kajian

Kajian ini dilaksanakan dalam tempoh dua hari dengan menggabungkan tinjauan dalam talian dan sesi simulator dron untuk menilai tahap keyakinan peserta. Penyelidikan ini direka untuk mengurangkan pengaruh luaran dan memastikan konsistensi di sepanjang penilaian.

Penilaian Diri Tahap Keyakinan: Tahap keyakinan dinilai menggunakan kaedah penilaian sendiri pada skala 1–5 untuk menilai keyakinan peserta. Peserta menilai tahap keyakinan mereka sendiri selepas menyelesaikan tugas di setiap peringkat untuk mengetahui sebarang perubahan selepas pengalaman mereka menggunakan simulator.

Penerangan Simulator: Simulator *DJI Flight* digunakan untuk menyerupai operasi dron dalam dunia nyata. Simulator ini menyediakan pengalaman yang terkawal dan sangat luas, dengan memberikan pendedahan kepada peserta terhadap tugas seperti penerbangan asas dan manuver kawalan, navigasi dalam menghindari halangan pada perlumbaan dron dari segi pandangan pihak ketiga dan pandangan pihak pertama. Reka bentuk simulator ini membantu dalam meniru situasi tekanan tinggi untuk memberi pandangan tentang prestasi juruterbang dan keyakinan mereka dalam senario operasi.

Persekitaran Terkawal: Kajian dijalankan dalam persekitaran yang terkawal bagi memastikan peserta menjalani ujian yang seragam. Hanya satu model dron—*DJI Mavic 2 Zoom*—digunakan sepanjang penilaian. Ini bertujuan bagi memastikan konsistensi dalam ciri-ciri dan prestasi dron.

Pengawalan jarak jauh yang digunakan terdiri daripada alat khusus untuk *DJI Mavic 2 Zoom*, bagi mengekalkan tahap keselesaan peserta dan memori otot mereka.

Semua peserta diberikan pendekatan yang seragam, yang mana membolehkan perbandingan yang adil dan boleh dipercayai antara tahap keyakinan sebelum dan selepas ujian simulasi.

3.3 | Peringkat Ujian Berstruktur

Peringkat 1 | Kawalan Asas Dron

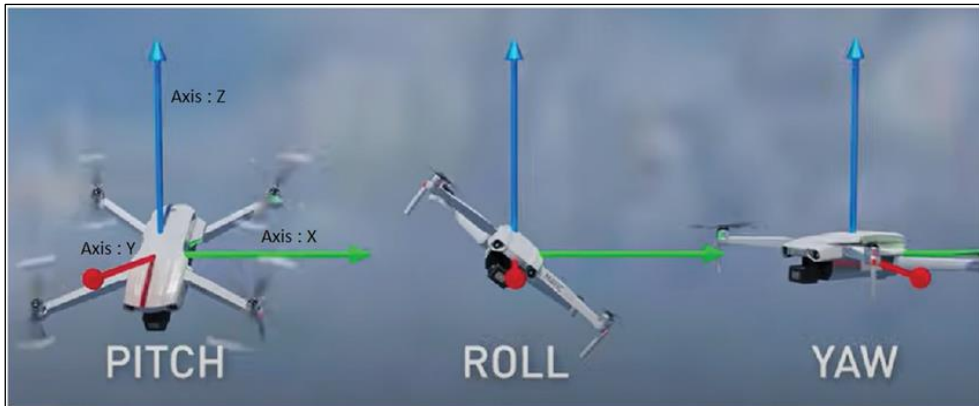
Objektif:

Peringkat pertama merupakan peringkat pengenalan yang bertujuan untuk menilai keupayaan asas peserta dalam mengendalikan dron. Pada peringkat ini, peserta diperkenalkan kepada kawalan dan navigasi asas dron di dalam persekitaran yang terkawal tanpa persaingan.

Tatacara:

- **Latihan Juruterbang:** Peserta diberi sesi pengenalan ringkas tentang kawalan dan ciri-ciri simulator dron.
- **Pelaksanaan Tugas:** Peserta diberikan tugas untuk melaksanakan kawalan asas dan proses gerakan termasuk pendikit naik/turun, ke hadapan/belakang, *yaw* kanan/kiri, dan *roll* kanan/kiri, manakala manuver dilakukan dengan mengesan satu titik statik tertentu dan melaksanakan manuver dengan menggambar angka lapan (8). Setiap peserta menjalani latihan asas bagi proses kalibrasi bagi memastikan mereka terbiasa dengan manuver dron asas seperti menaikkan, menurunkan, dan membelok. Tahap kesukaran bagi tugas yang diberikan direka untuk membantu juruterbang agar merasa lebih selesa dan terbiasa dengan dron yang digunakan serta meningkatkan lagi kemahiran kawalan mereka.



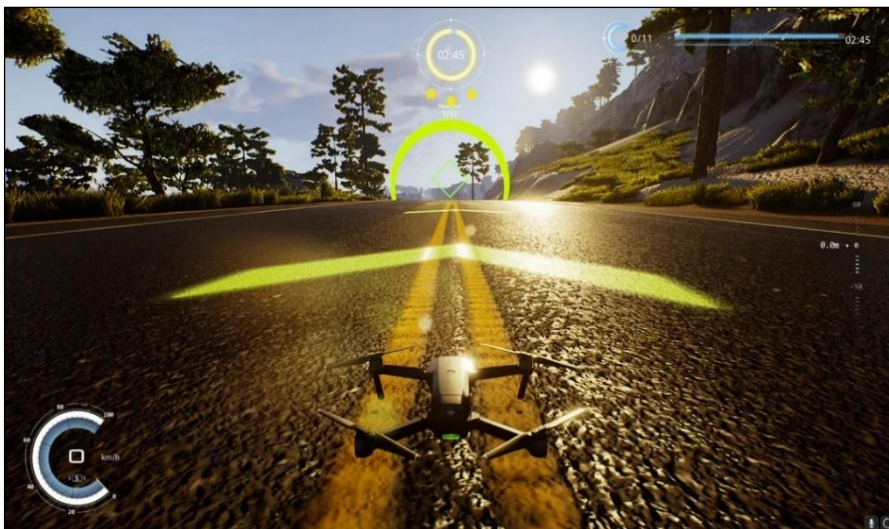


- **Metrik Prestasi:** Tiada metrik prestasi dikumpulkan pada peringkat ini..
- **Penilaian Keyakinan:** Tiada penilaian keyakinan dilakukan pada peringkat ini.

Peringkat 2 | *Perlumbaan Dron dari sudut Pandangan Pihak Ketiga (TPV)*

Objektif:

Peringkat kedua memperkenalkan elemen penuh persaingan dengan perlumbaan dron dari sudut pandang pihak ketiga (TPV). Juruterbang kini menghadapi pelbagai halangan dan perlu mengemudi melalui pintu gerbang (*gates*) dan menghindari rintangan sambil mengawal kelajuan dan ketepatan. Mod TPV membolehkan juruterbang untuk melihat dron dari perspektif pihak ketiga dengan memberikan medan pandangan yang lebih luas berbanding *FPV*.



Tatacara:

- **Persediaan Laluan:** Laluan perlumbaan yang rumit direka dengan pelbagai halangan, selekoh tajam, dan bermacam-macam pintu gerbang. Laluan ini dihadkan kepada tempoh masa maksimum selama 3 minit, dan juruterbang ditugaskan untuk melengkap tugas tersebut dengan secepat mungkin sambil mengekalkan ketepatan dan mengelakkan perlanggaran.
- **Latihan Juruterbang:** 1x sesi latihan menggunakan mod *TPV*.
- **Pelaksanaan Tugas:** Setiap peserta dikehendaki untuk melengkapkan tiga laluan perlumbaan dengan tahap kesukaran yang semakin meningkat, iaitu 10 pintu, 14 pintu, dan terakhir sebanyak 17 pintu gerbang. Masa dan ralat dicatat sepanjang tempoh perlumbaan dijalankan. Mereka juga disarankan untuk melakukan satu pusingan sebagai latihan sebelum perlumbaan rasmi dimulakan.
- **Metrik Prestasi:**

Metrik	Penerangan	Kaedah Pengukuran	Petunjuk Keyakinan
(a)	(b)	(c)	(d)
Kadar Penyelesaian	Peratusan tugas yang berjaya diselesaikan semasa simulasi.	Mengira bilangan tugas yang diselesaikan / jumlah tugas yang diberikan.	Kadar penyelesaian yang lebih tinggi menunjukkan tahap keyakinan yang tinggi, dan begitu juga sebaliknya.
Masa Pusingan	Masa yang diambil untuk menyelesaikan satu pusingan.	Ukuran masa (dalam saat) dari permulaan hingga tamat.	Masa penyelesaian yang lebih pantas menggambarkan keyakinan yang tinggi. Kegagalan untuk menyelesaikan tugas atau masa penyelesaian yang lebih lama melambangkan keyakinan yang rendah.
Kekerapan Ralat	Bilangan ralat seperti perlanggaran, manuver yang salah, atau objektif yang tidak tercapai.	Menghitung bilangan ralat pada setiap sesi simulasi.	Bilangan ralat yang lebih sedikit bermakna adanya peningkatan pada keyakinan peserta, dan begitu juga sebaliknya.

Konsistensi	Kestabilan prestasi di sepanjang sesi simulasi.	Membandingkan metrik prestasi (kadar penyelesaian dan masa) bagi setiap sesi simulasi.	Prestasi yang stabil menandakan tahap keyakinan yang tinggi dan begitu juga sebaliknya.
Tinjauan Penilaian Kendiri	Penilaian peserta terhadap keyakinan mereka sendiri sebelum dan selepas melengkapkan tugas.	Soal kaji selidik atau tinjauan menggunakan skala Likert (1–5). Perbezaan antara skor akhir dan skor awal menunjukkan hasil.	Skor yang lebih tinggi / positif menunjukkan peningkatan terhadap keyakinan. Skor yang lebih rendah / negatif menampilkan penurunan dalam keyakinan.

- Penilaian Keyakinan:** Pada penghujung peringkat 2, peserta diminta untuk menjawab soalan penilaian kendiri dengan kaedah skala bagi menilai tahap keyakinan mereka.

Peringkat 3 | Perlumbaan Dron Dari Sudut Pandangan Pihak Pertama (FPV)



Objektif:
Peringkat ketiga beralih kepada perlumbaan menggunakan pandangan pihak pertama (FPV), di mana juruterbang melihat laluan perlumbaan secara langsung dari perspektif dron tersebut. Peringkat ini menyerupai situasi perlumbaan sebenar dan memerlukan pemikiran dan sudut pandangan yang tinggi bagi juruterbang.

Prosedur:

- **Persediaan Laluan:** Laluan perlumbaan dalam peringkat 3 mengekalkan tahap kerumitan yang serupa seperti dalam peringkat 2 tetapi dilihat sepenuhnya melalui perspektif *FPV*. Juruterbang tidak lagi mempunyai visi dari sudut pandangan pihak ketiga dan perlu bergantung sepenuhnya kepada persepsi mereka tentang persekitaran dron seperti yang dilihat dari kamera utama sahaja.
- **Latihan Juruterbang:** 1x sesi latihan menggunakan mod *FPV*.
- **Pelaksanaan Tugas:** Juruterbang mesti melengkapkan laluan perlumbaan yang sama sebanyak beberapa kali, tetapi kali ini mereka perlu melaksanakannya dalam pandangan *FPV*. Seperti dalam peringkat 2, masa perlumbaan dan ralat akan dicatat.
- **Metrik Prestasi:** Menggunakan metrik prestasi yang sama dari peringkat sebelumnya.
- **Penilaian Keyakinan:** Pada penghujung peringkat 3, peserta diminta untuk menjawab soalan pemantauan sendiri untuk menilai tahap keyakinan mereka selepas melengkapkan tugasan yang diberikan.

3.4 | Analisis Data

Selepas menyelesaikan ketiga peringkat tersebut, data prestasi akan dianalisis untuk menghasilkan Skor Keyakinan (*Confidence Score*, *CS*) secara terperinci. Model penarafan komposit menggunakan pemberat akan digunakan untuk menilai keyakinan peserta berdasarkan metrik prestasi seperti kadar penyelesaian tugas, masa litar, konsistensi, dan kekerapan ralat. Metrik berkenaan akan digunakan untuk mengira *CS* yang menggambarkan prestasi objektif dan keyakinan juruterbang.

Analisis korelasi juga akan dilakukan untuk menilai hubungan antara Skor Keyakinan (*CS*) yang akan dikira secara objektif dengan Penilaian Kendiri Subjektif (*Self-Evaluation*, *SE*) selepas tamat Peringkat 2 (perlumbaan pandangan pihak ketiga) dan Peringkat 3 (perlumbaan pandangan pihak pertama). Korelasi ini akan dianalisis menggunakan nilai korelasi terhadap kedudukan menggunakan formulasi *Spearman* untuk memahami penjajaran (atau ketidaksejajaran) di antara penilaian keyakinan secara subjektif dan objektif.

Prosedur – Cara Menghasilkan *CS*

Untuk mendapatkan *CS* secara kuantitatif daripada data yang dikumpulkan, fungsi berikut digunakan:

$$T_{norm} = \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}},$$

di mana, T_{norm} ialah masa litar peserta yang dikemas kini pada skala 0 hingga 1, T ialah purata masa litar, T_{min} ialah masa terpantas (masa terbaik), dan t_{max} ialah masa terpanjang (masa terburuk). Sekiranya tugas gagal diselesaikan, masa litar dicatat sebagai 180 saat. $1 - T_{norm}$ melambangkan "kecekapan prestasi" yang dinormalisasi, di mana nilai lebih tinggi menunjukkan prestasi yang hebat.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu},$$

Di mana, *Correlation of Variation* (CV) adalah ukuran terhadap kepelbagaian yang dinormalisasi: nilai rendah menunjukkan keyakinan yang tinggi; *Standard Deviation* (σ): nilai yang kecil menandakan prestasi yang padu; μ adalah purata masa. $1 - CV$ menunjukkan konsistensi, di mana nilai yang tinggi bermaksud kestabilan prestasi yang hebat.

$$CR = \frac{\text{Tasks Completed}}{\text{Tasks Assigned}},$$

Di mana, *Completion Rate* (CR), berkisar daripada 0 (tiada tugas diselesaikan) kepada 1 (kesemua tugas diselesaikan). Nilai CR yang lebih tinggi melambangkan prestasi yang terbaik.

$$EP = \frac{EF_{avg}}{EF_{max}},$$

Di mana, *Error Penalty* (EP) merupakan penalti yang diperkenalkan untuk nilai *Error Frequency* (EF) yang tinggi. Manakala, EF_{avg} ialah purata *Error Frequency* yang dihitung pada setiap peringkat (terdiri daripada tiga proses). EF_{max} ialah nilai tertinggi yang dicatatkan bagi *Error Frequency*, dan ianya dinormalisasi diantara angka 0 dan 1. EP yang rendah menunjukkan prestasi yang hebat.

Kesemua data yang diperlukan boleh diukur; dengan itu, membolehkan pengiraan menjadi lebih jelas dan objektif. Model yang dicadangkan untuk mengira *Confidence Score* (CS) ialah seperti berikut:

$$CS = \alpha x (1 - \text{Normalized Time}) + \beta x (1 - CV) + (\gamma x CR) - (\delta x EP)$$

Di mana, α , β , γ , δ adalah pemberat yang jumlahnya 1; δ merupakan penalti untuk ralat bagi mengimbangi kesan ralat terhadap metrik lain. Pemberat telah ditentukan berdasarkan

pengetahuan dan pemahaman dari pengarang sendiri, dengan mengutamakan kadar penyelesaian tugas terlebih dahulu diikuti masa litar, konsistensi dan akhir sekali adalah ralat.

α – menekankan masa litar = 0.3

β – imbalan kepada konsistensi = 0.2

γ – mengutamakan penyelesaian tugas = 0.4

δ – penalti untuk ralat = 0.1

Tatacara – Cara Mendapatkan Kolerasi di antara CS & SE

Definisi Pembolehubah:

- CS_2 – Skor Keyakinan untuk Peringkat 2
- CS_3 – Skor Keyakinan untuk Peringkat 3
- SE_2 – Penilaian Kendiri setelah menyelesaikan Peringkat 2
- SE_3 – Penilaian Kendiri setelah menyelesaikan Peringkat 3

Pada setiap peringkat, peserta disusun berdasarkan status CS daripada jumlah kesemua peserta. Hitung perbezaan kedudukan (d) di antara skor kedudukan CS & SE. Penarafan semua peserta menjadi sukar disebabkan oleh kedudukan yang terbatas kerana nilai SE terdiri daripada angka yang terhad kepada julat yang rendah (1-5) dan kebanyakan peserta mempunyai nilai SE yang sama. Dalam kes ini, peserta yang mempunyai status terhad hendaklah menggunakan purata kedudukan. Sebagai contoh, jika 3 peserta mempunyai nilai SE yang sama iaitu angka 4 dan masing-masing peserta menduduki tempat ke-5, ke-6 dan ke-7 di dalam senarai yang telah disusun maka hendaklah diberikan kepada setiap peserta tersebut kedudukan $(5+6+7)/3 = 6$.

Contoh:

CS_2 kedudukan ke-4 / 17

SE_2 kedudukan ke-6 / 17 (selepas menghitung purata skor)

$$d = 6 - 4 = 2$$

Oleh itu, formulasi bagi pengiraan kolerasi kedudukan *Spearman* ialah:

$$\rho = 1 - \frac{6 \times \sum d^2}{n \times (n^2 - 1)}$$

Di mana,

n adalah jumlah peserta (17 dalam kajian ini) dan $\sum d^2$ adalah jumlah perbezaan kuasa dua antara kedudukan CS and SE.

4.0 HASIL

4.1 | Perbandingan Metrik Prestasi

Jadual 1 merumuskan metrik prestasi yang direkodkan untuk semua peserta melalui dua peringkat pada kajian ini: Pandangan Pihak Ketiga (Peringkat 2) dan Pandangan Pihak Pertama (Peringkat 3)

Peringkat	T_{norm} (Mean ± SD)	CV (Mean ± SD)	CR (%)	EP (Mean ± SD)
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
2	0.81 ± 0.19	0.13 ± 0.14	21%	0.62 ± 0.08
3	0.70 ± 0.12	0.18 ± 0.12	37%	0.67 ± 0.09

Jadual 1. Perbandingan purata metrik prestasi.

Keputusan menunjukkan adanya peningkatan dalam prestasi pada Peringkat 3, dengan pengurangan pada T_{norm} , konsistensi yang lebih tinggi, dan kadar penyelesaian tugas (CR) yang lebih tinggi. Walau bagaimanapun, terdapat sedikit peningkatan dalam penalti ralat yang mencerminkan kesulitan terhadap kawalan dron dari sudut pandangan pihak pertama.

4.2 | Perbandingan CS

CS untuk setiap peserta dihitung menggunakan model pemberat seperti dalam **Jadual 2**.

$CS = \alpha x (1 - Normalized\ Time) + \beta x (1 - CV) + (\gamma x CR) - (\delta x EP)$

Peringkat	CS (Mean ± SD)
(a)	(b)
2	0.25 ± 0.13
3	0.34 ± 0.12

Jadual 2. Perbandingan terhadap purata CS.

CS terlihat lebih tinggi dalam peringkat 3 (pandangan pihak pertama) disamping tugas yang semakin rumit. Ini menandakan terdapatnya peningkatan dalam keyakinan yang mana menunjukkan bahawa peserta merasa selesa dan telah menyesuaikan diri dengan litar perlumbaan.

4.3 | Perbandingan Skor SE

Skor *SE* telah dikumpulkan dengan menggunakan skala 1–5 setelah selesai Peringkat 2 dan Peringkat 3. Statistik deskriptif untuk *SE* adalah seperti dalam **Jadual 3**.

Peringkat	SE (Mean $\pm$ SD)
(a)	(b)
2	3.68 $\pm$ 0.94
3	3.04 $\pm$ 1.00

Jadual 3. Perbandingan purata skor SE selepas Peringkat 2 dan 3.

Penurunan *SE* dari Peringkat 2 ke Peringkat 3 mengusulkan bahawa peserta merasa kurang yakin apabila beralih ke pandangan pihak pertama.

4.4 | Hubungan di antara CS dan SE

Korelasi kedudukan melalui rumusan *Spearman* digunakan untuk menilai hubungan antara CS dan *SE* bagi Peringkat 2 dan Peringkat 3. Hasil keputusan disimpulkan dalam **Jadual 4**.

Peringkat	<i>Spearman's</i> ρ
(a)	(b)
2	0.083
3	0.173

Jadual 4. Korelasi *Spearman* ρ antara CS dan *SE*.

Korelasi positif yang sangat lemah terlihat pada kedua-dua peringkat. Secara umumnya, apabila satu pembolehubah meningkat, pembolehubah yang lain juga ikut meningkat. Namun hubungan ini sangat lemah dan mungkin boleh diabaikan. Korelasi yang lemah ini menandakan bahawa CS dan *SE* tidak sejajar, yang mana ianya menunjukkan bahawa penilaian sendiri peserta mungkin tidak melambangkan prestasi mereka semasa menggunakan simulator.

5.0 PERBINCANGAN

Mengapa Korelasi Lemah?

▪ Faktor Manusia:

- Peserta mungkin membuat penilaian sendiri (*Self-Evaluation*, *SE*) berasaskan pada perasaan subjektif dan bukan prestasi sebenar.
- Mungkin terdapat ketidakselarasan dalam mentafsir skala *SE* (1–5). Setiap peserta mungkin memiliki pemahaman yang berbeza.

- **Variasi Kesukaran Tugas:**
 - Perubahan variasi dari Peringkat 2 ke Peringkat 3 mungkin melemahkan penjaran antara CS dan SE.
- **Model CS:**
 - Nilai berat (α , β , γ , δ) dalam model CS mungkin tidak mencerminkan sepenuhnya persepsi keyakinan para peserta.
 - Metrik prestasi yang digunakan untuk menghasilkan model CS mungkin tidak mencukupi.

6.0 CADANGAN

Kedua-dua model CS dan metodologi SE hendaklah diteliti lagi untuk mengkaji dengan lebih lanjut tentang penyesuaian diantara keduanya. Langkah ini mungkin menghasilkan korelasi yang lebih kuat dalam kajian di masa depan. Walaupun keyakinan adalah suatu perkara yang tidak nyata, berikut adalah beberapa cadangan metrik prestasi utama yang perlu dipertimbangkan dalam model CS:

Metrik	Penerangan	Kaedah Pengukuran	Petunjuk Keyakinan
(a)	(b)	(c)	(d)
Masa Tindak Balas	Tempoh masa untuk bertindak balas terhadap cabaran yang timbul semasa simulasi atau ketika menghadapi situasi di luar jangkaan.	Ukuran masa (saat) dari rangsangan ke tindakan.	Masa tindak balas yang pantas menunjukkan keyakinan yang tinggi.
Tingkah Laku terhadap Pengambilan Risiko	Berani untuk mencuba melakukan tugas yang mencabar tanpa ada keraguan yang berlebihan atau keinginan untuk menarik diri.	Mencatat proses yang dilalui atau menetapkan tahap kesukaran terhadap tugas.	Penilaian terhadap pengambilan risiko yang seimbang menandakan keyakinan tanpa kecuai.
Kelajuan dalam Membuat Keputusan	Masa yang diambil untuk menetapkan tindakan yang dilakukan semasa menghadapi situasi yang sulit.	Mengukur masa bermula dari penyampaian tugas sehingga proses tindakan yang diambil oleh juruterbang.	Keputusan pantas dan tepat menunjukkan keyakinan.

Penilaian daripada Pengajar	Pengajar memerhatikan tingkah laku, ketenangan, dan keupayaan juruterbang dalam menyesuaikan diri semasa simulasi.	Menerapkan rubrik piawai untuk menilai tingkah laku (contoh: 1–10).	Maklum balas yang positif daripada pengajar mencerminkan keyakinan.
------------------------------------	--	---	---

Kajian di masa depan hendaklah menggunakan jumlah data yang besar iaitu dengan kadar minimum seramai 50 peserta. Bagi mengelakkan berlakunya ketidakadilan maka semua peserta hendaklah terdiri daripada kumpulan yang tidak memiliki latar belakang tentang penerbangan dron dan mereka hendaklah berada dalam lingkungan umur yang sama.

6.0 KESIMPULAN

Kajian ini meneliti hubungan antara prestasi juruterbang dron yang diukur menggunakan Skor Keyakinan (*Confidence Score*, CS), dan keyakinan yang dinilai sendiri (*Self-Evaluation*, SE) dalam dua peringkat simulasi: perlumbaan dari sudut pandangan pihak ketiga (Peringkat 2) dan perlumbaan menggunakan pandangan pihak pertama (Peringkat 3). Korelasi pangkat menggunakan rumusan *Spearman* diterapkan untuk menilai penjajaran antara metrik-metrik yang diterapkan dalam kajian ini.

Hasil menunjukkan hubungan korelasi positif yang lemah di kedua-dua peringkat, dengan $p=0.083$ untuk Peringkat 2 dan $p=0.173$ untuk Peringkat 3. Penemuan ini mengemukakan hubungan yang minima antara CS dan SE, di mana ianya menunjukkan bahawa keyakinan yang dinilai sendiri tidak menggambarkan prestasi yang diukur melalui tugas simulasi dron. Peningkatan terhadap korelasi dalam peringkat 3 melambangkan penjajaran yang tinggi antara keyakinan dan prestasi apabila peserta berhasil menyesuaikan diri dengan tugas yang semakin mencabar iaitu melalui sudut pandangan pihak pertama. Namun, hubungan secara keseluruhannya menunjukkan ikatan yang lemah. Hasil daripada kajian ini mendedahkan bahawa tahap prestasi bagi tugas simulasi dron tidak boleh dinilai sepenuhnya dengan menggunakan tingkat keyakinan yang diukur oleh diri sendiri.

Korelasi yang lemah menekankan kompleksiti dalam mengukur keyakinan dan hubungannya dengan prestasi dalam konteks simulasi dron. Faktor-faktor seperti pemikiran individu yang berbeza dalam persepsi sendiri, kesukaran tugas, dan pemberat metrik dalam formula CS telah mempengaruhi hasil keputusan yang diperolehi. Kajian pada masa yang akan datang hendaklah meneroka pendekatan lain dalam proses pemarkahan, mengumpulkan lebih ramai peserta, dan menambah lagi ukuran kualitatif untuk mendapatkan pemahaman yang lebih mendalam mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi penjajaran antara keyakinan dan prestasi semasa menjalani operasi dron.

7.0 RUJUKAN

- [1] Ghahari, S., & Fattahi, A. (2020). A review on drone-based systems and the application of unmanned aerial vehicles in agriculture. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 8(2), 100–113. <https://doi.org/10.1139/juvs-2019-0023>
- [2] Knezevic, I., Kovačević, M., & Dukić, G. (2019). *Drone performance in simulation-based training*. Proceedings of the 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 1035–1040. <https://doi.org/10.23919/MIPRO.2019.8757113>
- [3] Zhou, M., Xie, H., & Zhang, D. (2018). Confidence measurement for drone operators in simulated environments. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 91(1), 123–134. <https://doi.org/10.1007/s10846-017-0663-3>
- [4] Stoll, P., & Kupper, A. (2017). Training and evaluating drone pilots using flight simulators. In A. Oliveira, S. Nascimento, & P. Fonseca (Eds.), *Advances in Artificial Intelligence and Soft Computing* (pp. 129–141). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58904-5_13
- [5] Rathore, M. A., & Sultana, F. (2020). Measuring pilot confidence in simulation-based training. *Journal of Aerospace Engineering*, 33(5), 04020082. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0001157](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001157)
- [6] Pavlidis, G., & Ioannides, M. (2020). Confidence-based performance evaluation in drone racing and obstacle navigation simulation. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2020, Article ID 2341523. <https://doi.org/10.1155/2020/2341523>
- [7] Liu, Y., Wang, L., & Zhou, J. (2019). Assessing and improving pilot training for drone operations: A simulator-based approach. *Journal of Robotics*, 2019, Article ID 7845630. <https://doi.org/10.1155/2019/7845630>
- [8] Müller, J., & Kuehl, N. (2020). Evaluating drone simulator-based training outcomes: The role of self-assessment and performance metrics. *Human Factors in Simulation*, 46(4), 512–524. <https://doi.org/10.1177/0018720819841514>
- [9] Spearman, C. (1904). The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology*, 15(1), 72–101. <https://doi.org/10.2307/1412159>
- [10] Gould, S. J., & Sopher, R. (2021). Confidence and skill in drone operation: A framework for assessment and improvement. *Journal of Aviation Psychology*, 39(2), 45–58. <https://doi.org/10.1080/10508414.2021.1922401>

FRONTIER JILID 6
***Angkatan Tentera Masa Hadapan: Inovasi, Kelestarian dan Prestasi
dalam Pertahanan***

Hak Cipta Terpelihara © 2025
Kementerian Pertahanan Brunei Darussalam