

MEMAJUKAN KEUPAYAAN
PERTAHANAN MELALUI TEKNOLOGI,
FAKTOR MANUSIA DAN INOVASI
OPERASI



فرونتیئر

FRONTIER

JILID

7

20
26



KUMPULAN SAINS DAN TEKNOLOGI PERTAHANAN
KEMENTERIAN PERTAHANAN, BRUNEI DARUSSALAM

FRONTIER

JILID 7

FRONTIER

Jilid 7: Memajukan Keupayaan Pertahanan melalui Teknologi, Faktor Manusia dan Inovasi Operasi.

Hak Cipta Terpelihara © 2026

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.



www.mindef.gov.bn



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

Kumpulan Frontier

**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**

Penasihat



**Brigadier 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



Lt Col. Pg Hairul Nizam bin Pg Hj Ali
Cdr Junaidi bin Duraman
Maj (Dr.) Ranald bin Mohd Faizal

Kumpulan Penerbitan



Dr. Hjh Siti Tajidah binti Hj Abd Talip
Nuramanina binti Hamdani
Nuriffah Izzati binti Tuming

Penghargaan Khas



Dr. Nurhazwana binti Haji Jumat
Urusetia Sains dan Teknologi Pertahanan

Kandungan

i

Mengenai *FRONTIER*

02

Gambaran Umum Kaedah Pengesanan Kakisan dan Kesesuaiannya dalam Operasi Pertahanan Tropika

27

Memperkuh Budaya Keselamatan dalam Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB): Daripada Pematuhan kepada Komitmen

38

Gambaran Keseluruhan Teknologi *Additive Manufacturing (3D Printing)* Bagi Industri Ketenteraan

ii

Kata-kata Aluan Editorial

66

Latihan *Winch* Realiti Maya (VR): Melengkapkan Penerbangan Secara Langsung untuk Meningkatkan Kesiediaan Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB) dalam Mencari dan Menyelamat (Carilamat)

80


Pakaian Tentera dan Peralatan Inovatif bagi Angkatan Bersenjata Diraja Brunei (ABDB): Meningkatkan Ketahanan Haba, Keselamatan dan Keberkesanan Operasi

90

Faktor Manusia dan Ergonomik dalam Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB)



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 dengan sukacitanya mempersembahkan FRONTIER Jilid ke-7, yang bertemakan *"Memajukan Keupayaan Pertahanan melalui Teknologi, Faktor Manusia dan Inovasi Operasi."*

Edisi ini menghimpunkan artikel-artikel yang mengetengahkan usaha berterusan Kementerian Pertahanan dan Angkatan Bersenjata Diraja Brunei (ABDB), khususnya dalam kalangan komuniti Sains dan Teknologi Pertahanan, dalam memperkukuh keberkesanan operasi, kebolehsuaian dan ketahanan. Sumbangan dalam edisi ini merangkumi bidang-bidang utama seperti pengesanan kakisan dalam persekitaran tropika, inovasi pakaian dan kelengkapan perlindungan ketenteraan, faktor manusia dan ergonomik dalam operasi udara, budaya keselamatan dalam Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB), teknologi pembuatan tambahan, serta aplikasi realiti maya dalam latihan.

Artikel *"Cabaran Umum Kaedah Pengesanan Kakisan dan Kesesuaiannya Dalam Operasi Pertahanan Tropika"* meneliti cabaran yang dipengaruhi oleh iklim Negara Brunei Darussalam serta menilai pendekatan pengesanan bagi menyokong penyelenggaraan proaktif dan meningkatkan kesiapsiagaan aset. *"Pakaian Tentera dan Peralatan Inovatif Bagi Angkatan Bersenjata Diraja Brunei (ABDB)"* pula meneroka usaha meningkatkan ketahanan haba, keselamatan dan prestasi operasi melalui reka bentuk yang dipertingkatkan serta penggunaan teknologi baharu.

Seterusnya, *"Faktor Manusia dan Ergonomik dalam Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB)"* menampilkan pengaruh tekanan persekitaran dan fisiologi terhadap prestasi anak kapal udara, sekali gus menekankan kepentingan pengintegrasian faktor manusia dalam pembangunan keupayaan. Ini disokong oleh artikel *"Memperkukuh Budaya Keselamatan dalam Tentera Udara Diraja Brunei: Daripada Pematuhan Kepada Komitmen"* yang menggambarkan peralihan ke arah budaya keselamatan yang lebih proaktif dan berteraskan nilai.

Selain itu, *"Gambaran Keseluruhan Teknologi Additive Manufacturing (3D Printing) Bagi Industri Ketenteraan"* memberikan perspektif mengenai teknologi baharu yang menawarkan fleksibiliti dalam fungsi sokongan, manakala *"Latihan Winch Realiti Maya (VR): Melengkapkan Penerbangan Secara Langsung Untuk Meningkatkan Kesediaan Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB) Dalam Mencari dan Menyelamat (CARILAMAT)"* mengetengahkan potensi teknologi imersif dalam meningkatkan keberkesanan latihan dan kesiapsiagaan operasi.

Secara keseluruhannya, artikel-artikel dalam edisi ini memperlihatkan usaha berterusan dalam memajukan keupayaan pertahanan melalui pengintegrasian teknologi, faktor manusia dan inovasi operasi. Ia turut memberikan pandangan yang bernilai dalam menyokong pembuatan keputusan berasaskan bukti serta menekankan kepentingan pelaburan berterusan dalam Sains dan Teknologi Pertahanan bagi memastikan kesiapsiagaan dan ketahanan ABDB yang mampan.

Hasrinah binti Matyassin
Editor-in-Chief

Mengenai Pengarang

► *Dr Nurhazwana binti Haji Jumat*

Beliau merupakan seorang Pegawai Penyelidik di Pusat Penyelidikan dan Pembangunan Sains dan Teknologi (P3ST), di mana beliau mengkhusus dalam Penyelidikan Persekitaran Tropika, meneliti kesan keadaan iklim tropika terhadap bahan, sistem, dan prestasi manusia. Beliau memiliki Ijazah Doktor Falsafah (PhD) dalam Geosains dari Universiti Brunei Darussalam. Dr Nurhazwana telah menyumbang kepada beberapa projek penyelidikan dalam bidang sains dan teknologi pertahanan, dengan minat khusus dalam menerapkan penemuan saintifik bagi menyokong sistem operasi yang lestari dan berdaya tahan dalam persekitaran tropika.

GAMBARAN UMUM KAEDAH PENGESANAN KAKISAN DAN KESESUAIANNYA DALAM OPERASI PERTAHANAN TROPIKA

Dr Nurhazwana binti Haji Jumat

*Pusat Penyelidikan dan Perkembangan Sains dan Teknologi (P3ST)
Kementerian Pertahanan*

ABSTRAK

Kakisan (corrosion) merupakan ancaman signifikan terhadap integriti struktur, kesiapsiagaan operasi, dan keberkesanan penyelenggaraan, terutamanya di persekitaran yang dicirikan oleh kelembapan tinggi, pendedahan kepada garam, dan aktiviti biologi. Iklim tropika Brunei Darussalam meningkatkan risiko ini, menekankan keperluan strategi pengesanan kakisan peringkat awal yang disesuaikan dengan persekitaran tempatan. Dalam kertas ini, pelbagai teknik pengesanan kakisan seperti pemeriksaan visual, non-destructive testing (NDT), kupon kakisan, X-ray fluorescence (XRF), scanning electron microscopy berserta energy dispersive spectroscopy (SEM-EDS), dan kaedah elektrokimia dinilai berdasarkan keupayaan pengesanan, daya tahan terhadap persekitaran, dan kebolegunaan operasi. Kertas ini juga menyorot risiko kakisan yang dihadapi Angkatan Bersenjata Diraja Brunei (ABDB) dan jurang sedia ada dalam strategi pengesanan semasa, termasuk kekurangan data, penggunaan alat canggih yang kurang optimum, dan kekurangan kepakaran dalam sains kakisan. Penemuan daripada kertas ini menyokong kerangka pengesanan yang lebih integrasi dan spesifik iklim untuk menyokong penyelenggaraan proaktif, meningkatkan prestasi aset, dan memperkukuh kesiapsiagaan pertahanan jangka panjang.

Kata kunci:

Pengesanan Kakisan, Pertahanan, Persekitaran Tropika, NDT, XRF, SEM, EDS

1.0 PENDAHULUAN

Kakisan secara amnya didefinisikan sebagai degradasi berperingkat bahan akibat proses kimia atau elektrokimia dengan persekitarannya. Ia merupakan proses yang semulajadi merosakkan, selalunya mengakibatkan kehilangan progresif sifat bahan, integriti struktur, dan prestasi struktur. *The Association for Materials Protection and Performance (AMPP)* mentakrifkan kakisan sebagai kemerosotan sesuatu bahan, biasanya logam, disebabkan oleh tindak balas dengan

persekitarannya [1]. Jabatan Pertahanan A.S. (*U.S. Department of Defense*) juga menggambarkan kakisan sebagai kemerosotan sifat sesuatu bahan akibat tindak balas bahan tersebut dengan persekitaran kimianya [2].

Kakisan kekal sebagai cabaran yang berterusan dan mahal di pelbagai sektor industri di seluruh dunia dengan implikasi yang mendalam. Ia menjejaskan fungsi dan keselamatan sistem kejuruteraan, meningkatkan kos penyelenggaraan dan menimbulkan risiko alam sekitar yang signifikan. Dari segi struktur, ia mengancam integriti infrastruktur kritikal seperti paip, kapal terbang, kapal laut, dan aset ketenteraan. Beban ekonomi global akibat kakisan dianggarkan melebihi USD 2.5 trilion setahun, yang menyumbang kira-kira 3.4% daripada KDNK global pada tahun 2013 [3]. Dalam industri yang kritikal kepada keselamatan seperti pengangkutan, pertahanan, dan tenaga, kakisan yang tidak dikesan atau diurus dengan lemah boleh mengakibatkan akibat yang dahsyat termasuk kegagalan infrastruktur, pencemaran alam sekitar, dan kehilangan nyawa. Realiti ini menekankan keperluan sistem pengesanan dan pemantauan kakisan yang boleh dipercayai dan proaktif untuk memastikan kebolehpercayaan operasi, penjimatan kos, dan jangka hayat aset.

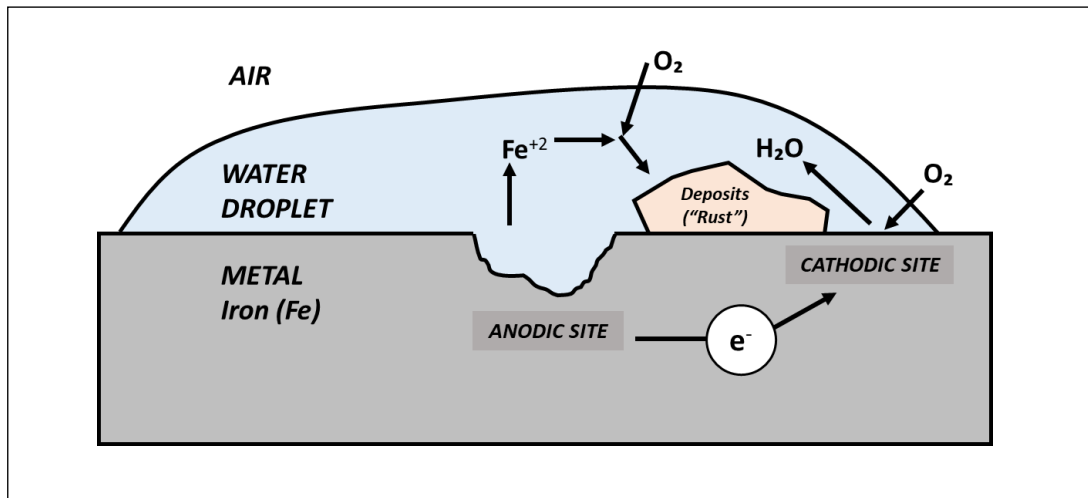
Bagi Brunei Darussalam, risiko kakisan diperburuk oleh iklim tropika khatulistiwa yang dicirikan oleh keadaan panas, lembap, dan berasin, dengan suhu purata antara 26°C hingga 32°C dan kelembapan relatif antara 80% hingga 90% sepanjang tahun, serta hujan tahunan melebihi 3,000 mm [4]. Faktor persekitaran berterusan ini mewujudkan kondisi ideal untuk permulaan dan pecutan proses kakisan. Di kawasan pesisir dan rendah, risiko ini diperkuat lagi oleh pendedahan kepada angin berasin, fluktuasi pasang surut, dan aktiviti biologi. Keadaan sedemikian memudahkan mekanisme kakisan agresif, termasuk *pitting*, *crevice corrosion*, dan *microbiologically influenced corrosion (MIC)*, yang boleh berkembang lebih cepat dan lebih sukar dikesan daripada kakisan umum. Bagi infrastruktur pertahanan dan platform ketenteraan, cabaran persekitaran ini menimbulkan risiko signifikan terhadap kesiapsiagaan, jangka hayat, dan keselamatan aset. Dalam iklim yang agresif ini, ketiadaan tempoh rehat bermusim menyebabkan aset ketenteraan terus terdedah.

Walaupun pemantauan kakisan melibatkan penjejakan jangka panjang pendedahan persekitaran dan degradasi bahan dari masa ke masa, pengesanan kakisan terutamanya berkaitan dengan pengenalan, penentuan lokasi, dan pengkategorian kerosakan secara tepat pada masanya setelah ia mula muncul. Dalam aplikasi ketenteraan, di mana kebolehpercayaan peralatan, kesinambungan misi, dan keselamatan personel adalah penting, pengesanan kakisan yang berkesan membentuk barisan pertahanan pertama yang kritikal. Berbeza dengan strategi pencegahan yang bergantung pada salutan (*coating*), perlindungan katodik (*cathodic protection*), atau kawalan persekitaran, teknik pengesanan bertujuan untuk mendedahkan kakisan aktif atau tersembunyi yang mungkin belum kelihatan tetapi boleh menjejaskan integriti struktur atau prestasi sistem dalam masa terdekat. Berdasarkan risiko ini, terdapat keperluan mendesak untuk kaedah pengesanan kakisan yang selaras dengan iklim dan keperluan operasi spesifik Brunei Darussalam. Artikel ini bertujuan untuk meneroka pelbagai kaedah pengesanan kakisan dengan penilaian keberkesanan dan kebolehgunaan mereka untuk digunakan dalam persekitaran tropika yang dipengaruhi laut, yang lazim di Brunei Darussalam.

2.0 MEKANISME KAKISAN DALAM PERSEKITARAN TROPIKA

Kakisan secara asas didorong oleh kecenderungan termodinamik logam untuk kembali ke keadaan yang lebih stabil melalui interaksi dengan persekitaran. Dalam sistem logam, pembentukan sel kakisan (*corrosion cell*) memerlukan empat komponen penting: tapak anod (*anodic site*), tapak katod (*cathodic site*), laluan ionik (*ionic path*), dan laluan elektronik (*electronic path*) [5].

Proses ini biasanya bermula melalui pembezaan kawasan anod dan katod pada permukaan logam. Di anod, atom logam kehilangan elektron melalui tindak balas pengoksidaan, dan di katod, elektron ini digunakan oleh tindak balas pengurangan yang melibatkan unsur persekitaran seperti oksigen atau ion hidrogen [6,7]. Contoh klasik ialah karat besi dalam kehadiran oksigen dan kelembapan, yang biasanya bermula dengan (i) tindak balas anod: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ dan (ii) tindak balas katod: $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ (untuk persekitaran berasid) atau $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ (untuk keadaan neutral hingga beralkali) [8]. Tindak balas ini menghasilkan hidroksida besi (III): $4\text{Fe} + 3\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3$. Sebatian (*compound*) ini tidak stabil dan secara beransur-ansur bertukar menjadi oksida besi terhidrat, juga dikenali sebagai karat: $\text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$.



Rajah 1. Mekanisme kakisan ringkas (karat) bagi besi.

Kakisan melibatkan dua arus serentak: (i) arus ionik melalui elektrolit (*electrolyte*), dipacu oleh pergerakan ion, dan (ii) arus elektronik melalui logam, dipacu oleh aliran elektron dari anod ke katod. Kelembapan yang mengandungi garam terlarut (*dissolved salts*) berfungsi sebagai elektrolit dan penting untuk mengekalkan proses ini.

Kadar dan sifat kakisan dipengaruhi secara kuat oleh pemboleh ubah persekitaran, termasuk suhu, kelembapan, pH, ketersediaan oksigen, dan kehadiran ion agresif seperti klorida [5,8]. Dalam persekitaran tropika Brunei Darussalam, pemboleh ubah ini biasanya ekstrem dan berterusan. Kelembapan tinggi memudahkan pembentukan filem elektrolit yang berterusan pada permukaan logam yang terdedah, manakala suhu tinggi meningkatkan kinetik tindak balas dan kadar penyebaran [9]. Tambahan pula, kitaran basah-kering yang kerap dalam iklim khatulistiwa memperburuk kakisan dengan mengumpul garam permukaan dan memperkenalkan tahap

oksigen yang berubah-ubah, yang seterusnya menggalakkan pengudaraan berbeza dan serangan kakisan setempat [10].

Infrastruktur pesisir dan pemasangan luar pesisir amat terdedah kepada pendedahan berterusan kepada angin berasin, aerosol laut, dan fluktuasi pasang surut, yang mendorong kakisan yang dipengaruhi klorida. Selain itu, persekitaran akuatik yang kaya dengan biologi dan berenergi rendah di Brunei Darussalam, seperti zon bakau, tebing sungai dan muara, menyokong pembentukan biofilm dan koloni mikroba, sekali gus meningkatkan risiko kakisan yang dipengaruhi mikrobiologi. Berdasarkan keadaan ini, beberapa mekanisme kakisan adalah amat relevan bagi infrastruktur dan aset operasi Brunei Darussalam, yang diterangkan seperti berikut:

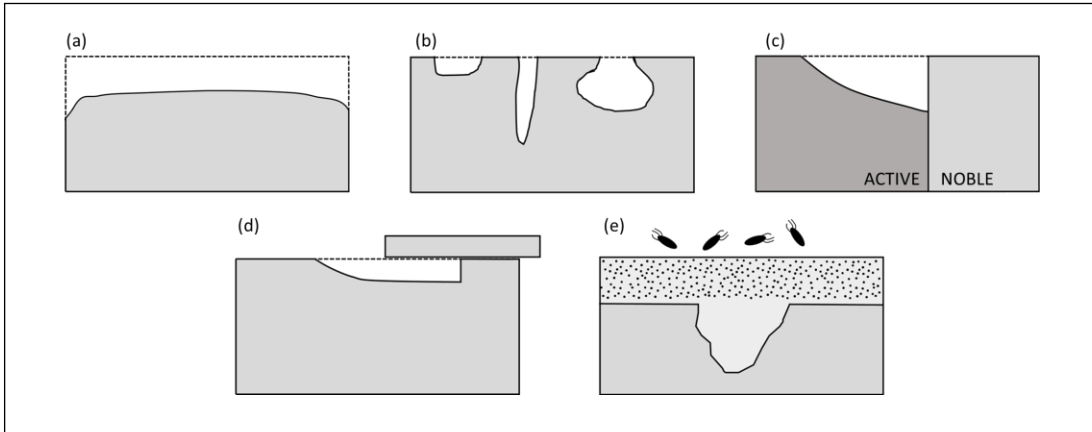
Uniform corrosion. Bentuk kakisan paling mudah, dicirikan oleh kehilangan bahan secara seragam di seluruh permukaan logam. Ia biasanya berlaku pada keluli struktur yang tidak dilapisi atau tidak dilindungi dengan baik, terutamanya apabila terdedah kepada keadaan lembap atau basah dalam tempoh yang panjang [7].

Pitting corrosion. Bentuk kakisan yang terlokalisasi dan agresif, biasanya dimulakan oleh ion klorida yang menembusi dan mengganggu filem pelindung (*protective film*) pada logam seperti *stainless steel* dan aloi aluminium. Ini menghasilkan lubang kecil tetapi dalam yang sukar dikesan dan boleh menyebabkan kegagalan tiba-tiba [8].

Crevice corrosion. Kakisan celah berlaku di kawasan terkurung atau terlindung, di mana elektrolit terperangkap. Contoh termasuk di bawah gasket, *washer*, pengikat, atau sambungan logam bertindih. Kekurangan oksigen setempat dalam celah mewujudkan sel pengudaraan (*aeration cell*) berbeza yang menggalakkan pengasidan dan pelarutan (*dissolution*) logam [6].

Galvanic corrosion. Kakisan galvanik berlaku apabila dua logam yang berbeza disambungkan secara elektrik melalui medium konduktif, seperti air laut. Logam yang lebih anodik terkorosi secara lebih cepat, manakala logam yang lebih mulia dilindungi. Ini adalah isu biasa dalam pemasangan logam bercampur pada platform ketenteraan dan pemasangan pesisir [11].

Microbiologically influenced corrosion (MIC). MIC ialah bentuk kakisan pelbagai faktor yang berlaku akibat agen mikroba, khususnya *sulphate-reducing bacteria* (SRB), bakteria pengoksida besi (*iron-oxidising bacteria*), dan kulat. Organisma ini menghasilkan produk metabolik yang korosif seperti hidrogen sulfida atau asid organik, seterusnya mengubah persekitaran elektrokimia setempat. MIC sering ditemui dalam tangki simpanan air, paip, dan persekitaran bioaktif lain [12].



Rajah 2. Rajah skematik pelbagai jenis kakisan yang relevan dalam persekitaran tropika termasuk (a) *Uniform corrosion*, (b) *Pitting corrosion*, (c) *Galvanic corrosion*, (d) *Crevice corrosion*, dan (e) *Microbiologically-influenced corrosion (MIC)*.

Ringkasan mekanisme kakisan di atas disajikan dalam **Jadual 1**. Pemahaman yang mendalam mengenai mekanisme ini adalah penting untuk membuat keputusan yang tepat mengenai pemilihan bahan, strategi perlindungan, dan teknologi pengesanan kakisan yang sesuai untuk lanskap tropika Brunei Darussalam.

Jadual 1. Ringkasan ciri utama mekanisme kakisan yang lazim dalam persekitaran tropika.

Jenis kakisan	Penerangan	Lokasi tipikal	Risiko kerosakan	Faktor pemacu utama
<i>Uniform corrosion</i>	Kehilangan bahan secara sekata di seluruh permukaan logam	Struktur <i>steel</i> yang terdedah dalam persekitaran lembap	Pelemahan struktur logam secara beransur-ansur dari masa ke masa	Pendedahan berterusan kepada kelembapan dan oksigen
<i>Pitting corrosion</i>	Pembentukan lubang kecil tetapi dalam pada kawasan tertentu	Struktur pesisir, komponen <i>stainless steel</i> / aluminium	Kerosakan sukar dikesan yang boleh menyebabkan kegagalan mengejut	Ion klorida yang merosakkan lapisan pelindung permukaan
<i>Crevice corrosion</i>	Berlaku di ruang sempit dan terlindung di mana air terperangkap	Sambungan berbolt, gasket, washer, kawasan bertindih	Serangan setempat yang dipercepatkan dan melemahkan sambungan atau jahitan	Elektrolit bertakung dan kekurangan oksigen dalam ruang sempit

Galvanic corrosion	Berlaku apabila logam berlainan disambungkan secara elektrik dalam medium konduktif	Pemasangan yang menggunakan pelbagai jenis logam	Kakisan dipercepatkan pada logam yang lebih anodik	Sentuhan antara logam berlainan dalam persekitaran konduktif
MIC	Disebabkan oleh aktiviti mikroorganisma (e.g., SRB, bakteria pengoksida besi)	Tangki air, paip, muara, zon bioaktif	Kerosakan pantas dan tidak menentu di kawasan lembap akibat aktiviti mikroba	Koloni mikroba yang menghasilkan hasil sampingan bersifat korosif (<i>corrosive by-products</i>)

3.0 TEKNIK PENGESANAN KAKISAN

Pemantauan kakisan yang berkesan adalah penting untuk mengurangkan degradasi bahan dan mengekalkan integriti struktur aset kritikal. Pelbagai teknik pengesanan dan penilaian telah digunakan merentasi pelbagai industri bagi menyokong pengenalan, pengkuantitan, dan pemantauan kakisan. Kaedah-kaedah ini berbeza secara ketara dari segi kepekaan pengesanan, keperluan peralatan, kos, serta kebolehsuaian terhadap keadaan persekitaran. Oleh itu, kesesuaian dan aplikasi setiap kaedah amat bergantung kepada konteks operasi dan persekitaran pendedahan yang spesifik. **Jadual 2** membentangkan ringkasan perbandingan ciri utama teknik pengesanan kakisan yang dibincangkan dalam kertas ini, dengan penekanan terhadap aplikasinya dalam persekitaran Brunei Darussalam.

Pemeriksaan Visual

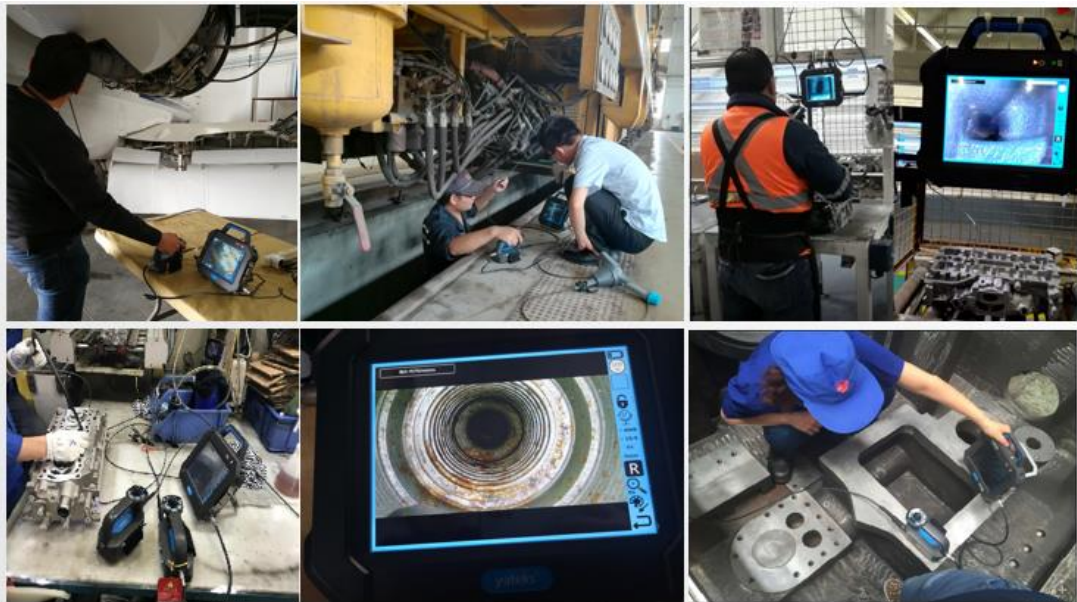
Pemeriksaan visual merupakan teknik paling asas dan paling lazim digunakan dalam pengesanan kakisan. Ia melibatkan pemerhatian secara langsung terhadap permukaan untuk mengenal pasti tanda-tanda degradasi yang boleh dilihat seperti perubahan warna, pembentukan karat, lepuhan, pengelupasan, kakisan titik atau rekahan. Teknik ini lazimnya dilakukan menggunakan mata kasar atau dibantu oleh peralatan asas seperti kanta pembesar, lampu suluh, cermin pemeriksaan, atau peralatan yang lebih canggih seperti boreskop dan sistem pemeriksaan visual jarak jauh (*remote visual inspection, RVI*) [13].

Kelebihan utama pemeriksaan visual ialah sifatnya yang tidak merosakkan, kos yang rendah, dan kemudahan pelaksanaan sama ada dalam penyelenggaraan rutin mahupun penilaian keadaan awal. Kaedah ini biasanya digunakan sebagai pendekatan barisan pertama dalam program pemeriksaan kakisan sebelum penggunaan alat diagnostik yang lebih maju.

Walau bagaimanapun, pemeriksaan visual mempunyai beberapa kekangan yang ketara. Teknik ini bersifat subjektif dan sangat bergantung kepada pengalaman serta kemahiran pemeriksa, keadaan pencahayaan, dan tahap kebolehcapaian permukaan. Ia terhad kepada kakisan pada peringkat permukaan dan mungkin gagal mengesan kakisan peringkat awal, bawah permukaan, atau kakisan setempat seperti *pitting*, *crevice corrosion* dan *MIC*, terutamanya di bawah penebat, salutan cat atau pertumbuhan marin [14]. Dalam iklim tropika, perkembangan kakisan yang pantas di bawah

salutan atau dalam persekitaran kelembapan tinggi bermakna tanda-tanda visual selalunya hanya muncul selepas kerosakan yang ketara telah berlaku [15].

penggredan piawai seperti ISO 4628 untuk degradasi salutan, ASTM D610 untuk penilaian karat, atau NACE SP0178 bagi kriteria pemeriksaan kimpalan dan struktur [16,17,18]. Piawaian ini menyediakan rangka kerja penilaian yang konsisten bagi mengurangkan subjektiviti dan memastikan dokumentasi yang seragam antara kitaran pemeriksaan. Penilaian visual biasanya disokong oleh dokumentasi fotografi dan perbandingan berkala dengan keadaan rujukan asal. Walau bagaimanapun, dalam persekitaran berisiko tinggi seperti sistem pertahanan atau platform luar pesisir, pemeriksaan visual perlu dilengkapi dengan teknik *non-destructive testing* (NDT) lain, termasuk pengukuran ketebalan ultrasonik untuk mengesan kehilangan bahan, ujian penembusan pewarna untuk mengesan rekahan permukaan, atau sensor pemantauan kakisan bagi menjejaki aktiviti kakisan secara masa nyata [19].



Rajah 3. Aplikasi boreskop industri dalam pelbagai senario penyelenggaraan dan pemeriksaan. Peranti genggam (*handheld devices*) ini membolehkan pemeriksaan visual masa nyata terhadap struktur dalaman untuk mengesan kakisan, haus atau sekatan tanpa pembongkaran. Sumber imej: Shenzhen Yateks Co. Ltd.

Non-Destructive Testing (NDT)

NDT merangkumi satu set teknik diagnostik yang digunakan untuk pengesanan, pencirian dan pemantauan kecacatan berkaitan kakisan tanpa menyebabkan kerosakan pada bahan atau struktur yang diuji. Berbanding pemeriksaan visual, teknik NDT menawarkan kepekaan yang lebih tinggi dan resolusi kedalaman yang lebih baik, serta keupayaan untuk mengenal pasti kecacatan bawah permukaan, penipisan bahan, dan rekahan keletihan [20]. Keupayaan ini menjadikan NDT amat bernilai untuk pemeriksaan aset kritikal, di mana pengesanan awal adalah penting bagi

mengelakkan kegagalan bencana. Antara kaedah NDT yang lazim digunakan adalah seperti berikut:

Ultrasonic testing (UT). UT menggunakan gelombang bunyi berfrekuensi tinggi untuk mengukur ketebalan bahan dan mengesan kecacatan dalaman seperti kakisan titik dan penipisan bahan.

Radiographic testing (RT). RT menggunakan sinar-X atau sinar gama untuk menghasilkan imej struktur dalaman, menjadikannya berkesan bagi mengenal pasti kecacatan bawah permukaan dan kakisan dalam kimpalan serta sistem paip.

Eddy current testing (ECT). ECT menggunakan aruhan elektromagnet untuk mengesan kecacatan permukaan dan hampir permukaan dalam bahan konduktif, dan amat berguna untuk aloi bukan ferus (*non-ferrous alloys*).

Magnetic particle inspection (MPI). MPI melibatkan penggunaan medan magnet (*magnetic fields*) dan zarah besi (*iron particles*) pada bahan feromagnet untuk menonjolkan rekahan permukaan dan ciri kakisan akibat tegasan (*stress-induced*).

Kaedah NDT terhad oleh beberapa keperluan operasi, termasuk keperluan kepada tenaga kerja mahir, peralatan yang ditentukur dengan betul, keadaan persekitaran yang terkawal, serta penyediaan permukaan yang mencukupi. Dalam persekitaran tropika dengan kelembapan tinggi, hujan lebat dan turun naik suhu, mengekalkan keadaan ujian yang optimum semasa pemeriksaan di tapak boleh menjadi cabaran logistik, terutamanya bagi aplikasi jauh atau luar pesisir [21]. Walaupun terdapat kekangan ini, NDT kekal sebagai elemen penting dalam strategi pemantauan kakisan. Pelaburan berterusan dalam teknologi NDT yang mudah alih, automatik dan tahan cuaca adalah disyorkan bagi meningkatkan keberkesanan dalam penempatan tropika.



Rajah 4. Juruteknik menjalankan pengesanan kakisan menggunakan *phased array ultrasonic testing (PAUT)*. Susunan ini memaparkan pengimejan masa nyata untuk pengesanan kecacatan dan pengukuran ketebalan yang tepat. Sumber imej: Evident Scientific.

Kupon Kakisan dan Pengukuran Gravimetrik

Kupon kakisan ialah spesimen logam piawai yang digunakan untuk menilai tingkah laku kakisan di bawah keadaan perkhidmatan sebenar. Kupon ini dipasang dalam persekitaran operasi bagi mensimulasikan keadaan pendedahan sebenar untuk tempoh tertentu. Selepas tempoh pendedahan, kupon dikeluarkan, dibersihkan mengikut prosedur piawai, dan ditimbang bagi mengira kehilangan jisim serta kadar kakisan [22].

Kaedah ini dihargai kerana kesederhanaannya, kos yang rendah, dan keupayaannya mencerminkan keadaan dunia sebenar, termasuk kesan kimia air setempat, suhu, biofouling, dan kadar aliran [23]. Selain itu, ia lazimnya mencerminkan kadar kakisan purata dan mungkin gagal mengesan bentuk serangan setempat, kecuali digabungkan dengan teknik sokongan seperti *scanning electron microscope (SEM)* atau analisis mikrobiologi [24].

Despite their practicality, corrosion coupons are limited by their inability to perform real-time monitoring, which prohibits applications requiring immediate feedback. Moreover, they typically capture average corrosion rates and may fail to detect localised forms of attack, unless combined with complementary techniques like scanning electron microscopy (SEM) or microbiological analysis [7].

Bagi meningkatkan ketepatan diagnostik, kupon kakisan sering digunakan bersama sensor elektrokimia, pensampel biofilm, atau analisis kimia mendapan permukaan untuk memberikan

penilaian yang lebih menyeluruh terhadap dinamik kakisan dalam persekitaran yang kompleks atau bioaktif.



Rajah 5. Contoh kupon kakisan daripada keluli karbon (*carbon steel*), zink dan kuprum (*copper*) sebelum dan selepas pendedahan. Sumber imej: Caproco Corrosion Prevention Ltd.

X-Ray Fluorescence (XRF)

XRF ialah teknik spektroskopi tidak merosakkan yang digunakan untuk menentukan komposisi unsur bahan dengan mengukur sinar-X sekunder (atau pendarfluor) bercirikan yang dipancarkan daripada sampel apabila ia dirangsang oleh sumber sinar-X primer. XRF amat berkesan untuk mengenal pasti produk kakisan, unsur aloi, bahan cemar permukaan, dan degradasi salutan, menjadikannya alat bernilai untuk pengesanan bahan dan analisis kegagalan [25].

Kemunculan penganalisis XRF genggam moden telah memperluaskan aplikasinya dalam pemeriksaan di tapak merentasi pelbagai industri. Instrumen ini mampu memberikan keputusan pantas dan masa nyata tanpa merosakkan permukaan, menjadikannya sesuai untuk pemeriksaan pantas dan diagnostik awal dalam persekitaran operasi [26].

Walau bagaimanapun, prestasi XRF dipengaruhi oleh beberapa pemboleh ubah operasi. Keadaan permukaan seperti kekasaran, kelembapan atau kehadiran produk kakisan boleh melemahkan kualiti isyarat dan menjejaskan ketepatan pengukuran. Di samping itu, keputusan yang boleh dipercayai bergantung kepada rutin penentuan dan pembetulan matriks, terutamanya apabila mengukur lapisan nipis atau skala kakisan yang tidak homogen. Dalam iklim tropika, kelembapan tinggi dan zarah garam (*salt particles*) bawaan udara boleh merumitkan penyediaan permukaan dan konsistensi pengukuran, sekali gus memerlukan pembersihan menyeluruh dan pengukuran berulang untuk memastikan bacaan yang mewakili [27].

Walaupun XRF tidak menyediakan pemprofilan kedalaman atau pengenalpastian kecacatan mikrostruktur, ia kekal sebagai alat sokongan yang sangat berkesan dalam program pemantauan kakisan. Apabila digabungkan dengan pemeriksaan visual, mikroskopi atau analisis elektrokimia, XRF meningkatkan ketepatan diagnostik dan kefahaman menyeluruh terhadap keadaan kakisan.



Rajah 6. Analisis elemental di tapak menggunakan penganalisis XRF genggam untuk mengesahkan komposisi aloi paip dan mengenal pasti risiko kakisan. Sumber imej: Olympus Corporation.

Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDS)

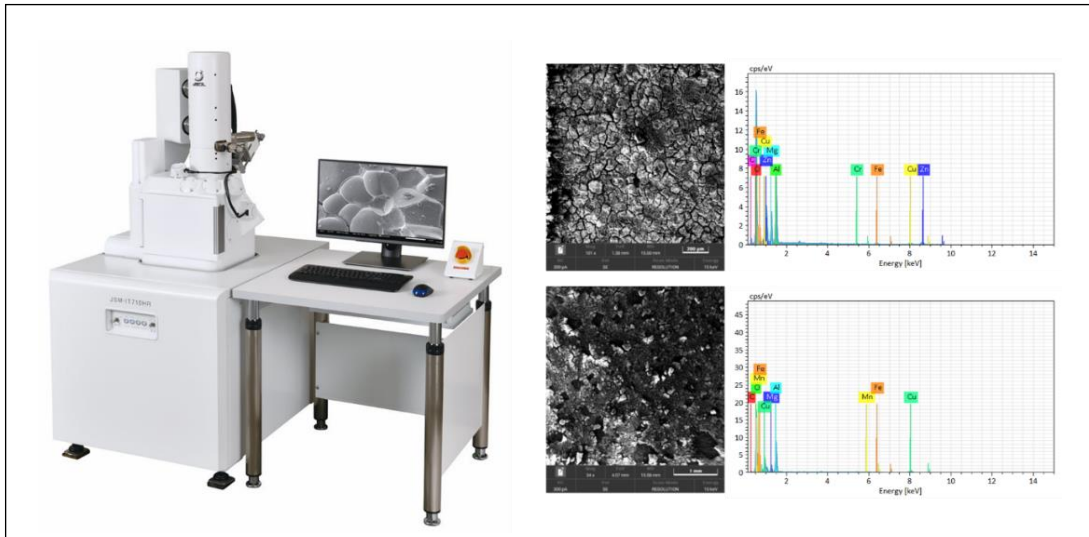
SEM yang digabungkan dengan EDS merupakan teknik analisis berkuasa tinggi yang digunakan untuk analisis permukaan terperinci dan pencirian unsur dalam kajian kakisan. SEM mampu menghasilkan imej resolusi tinggi terhadap morfologi kakisan pada permukaan logam (contohnya kekasaran permukaan, perambatan rekahan atau geometri kakisan titik) pada pembesaran melebihi 100,000 \times . EDS melengkapkan analisis ini dengan menyediakan data komposisi unsur pada titik-titik tertentu di permukaan, menjadikannya sangat berkesan untuk mengenal pasti produk kakisan dan mengesan spesies bahan cemar [28].

Dalam persekitaran tropika, SEM-EDS amat bermanfaat dalam penilaian pasca-pendedahan kupon kakisan atau analisis kegagalan komponen selepas terdedah kepada keadaan lembap, berasin atau bioaktif [29]. Ia memberikan maklumat yang mungkin terlepas daripada pemeriksaan visual, seperti evolusi kakisan titik bawah permukaan, pemisahan mikrostruktur, atau mendapan setempat yang terbentuk dalam zon bertakung atau aktif secara mikrobiologi.

Walaupun mempunyai kelebihan analitikal yang tinggi, SEM-EDS secara semula jadi merupakan teknik berasaskan makmal dan memerlukan keadaan vakum, salutan konduktif elektrik, serta tenaga kerja mahir. Ia tidak sesuai untuk penggunaan lapangan, dan kos operasi serta keperluan penyediaan yang agak tinggi sering menghadkan penggunaannya kepada siasatan peringkat forensik atau penilaian kakisan berorientasikan penyelidikan [30].

Namun demikian, apabila diintegrasikan ke dalam rangka kerja pemantauan kakisan yang lebih menyeluruh, SEM-EDS kekal sebagai alat yang amat diperlukan untuk menyediakan bukti mikrostruktur bagi mengesahkan pemerhatian lapangan. Melalui SEM-EDS, pengguna akhir dapat

meningkatkan pemahaman terhadap mekanisme kakisan serta menyokong keputusan yang lebih bermaklumat dalam pemilihan bahan, strategi perlindungan dan perancangan penyelenggaraan keseluruhan.



Rajah 7. Scanning electron microscope (SEM) untuk pencirian bahan lanjutan dan analisis mikrostruktur. Imej diadaptasi daripada JEOL USA, Inc.

Teknik Electrokimia

Kaedah elektrokimia seperti *Linear Polarisation Resistance* (LPR) dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) lazim digunakan untuk pemantauan kakisan, khususnya dalam persekitaran basah atau lembap. Teknik-teknik ini mampu mengesan aktiviti kakisan pada peringkat awal dan menyediakan data masa nyata mengenai punca serta kadar kakisan bahan yang dikaji [8].

LPR melibatkan penggunaan sapuan voltan arus terus *dDirect current*, DC) yang kecil berhampiran potensi kakisan dan pengukuran arus yang terhasil untuk mengira rintangan polarisasi logam yang dikaji. Rintangan ini berkadar songsang dengan kadar kakisan, menjadikan LPR kaedah yang pantas dan berkesan untuk mengkuantitikan kakisan seragam secara masa nyata [6]. Kesederhanaan dan kelajuannya menjadikan LPR sesuai untuk aplikasi lapangan, walaupun ia kurang sensitif terhadap fenomena kakisan peringkat awal atau setempat.

EIS pula berfungsi dengan mengenakan voltan arus ulang alik (*Alternating current*, AC) kecil ke atas permukaan logam merentasi julat frekuensi tertentu, menghasilkan spektrum impedans kompleks yang memberikan maklumat tentang pelbagai proses berkaitan kakisan. Ia amat bernilai untuk menilai degradasi salutan, mengesan tanda awal kakisan, dan menilai kakisan bawah permukaan atau kakisan yang dipengaruhi mikrobiologi (MIC) [31].

Kelembapan tinggi, suhu panas dan perubahan keadaan elektrolit dalam persekitaran tropika boleh menyukarkan pemerolehan pengukuran yang boleh dipercayai menggunakan teknik elektrokimia. Peralatan juga memerlukan elektrod rujukan yang stabil, sentuhan elektrik yang

bersih, dan penenturan berkala, yang boleh menjadi cabaran logistik untuk dikekalkan di lokasi terpencil atau marin [32].

Walaupun terdapat kekangan ini, LPR dan EIS kekal sebagai alat penting dalam pemantauan kakisan. Apabila digabungkan dengan perakam data automatik atau sensor jauh, keupayaan teknik ini untuk mengesan kakisan pada peringkat awal menjadikannya sangat bernilai bagi strategi penyelenggaraan ramalan dan pengurusan aset.



Rajah 8. Sistem potensiostat/galvanostat yang disambungkan kepada sel ujian kakisan tiga elektrod untuk pengukuran LPR dan EIS. Susunan ini merangkumi elektrod kerja (sampel logam), elektrod rujukan, dan elektrod pembantu yang direndam dalam larutan elektrolit. Sumber imej: Corrtest Instruments.

Jadual 2. Ringkasan ciri utama kaedah pengesanan kakisan dan kebolehsuaiannya dalam persekitaran tropika.

Teknik	Penerangan	Kekuatan	Kelemahan	Kebolehlaksanaan In-situ	Kesesuaian di Brunei Darussalam
Pemeriksaan Visual	Pemeriksaan asas pada peringkat permukaan untuk mengenal pasti tanda kakisan yang boleh dilihat menggunakan mata kasar atau alat bantuan	Ringkas, kos rendah, tidak merosakkan; sesuai sebagai kaedah barisan pertama	Terhad kepada permukaan; subjektif; bergantung pada keterlihatan dan akses	Ya; mudah dilaksanakan di tapak	Berkesan untuk pemeriksaan rutin, tetapi berisiko terlepas kakisan peringkat awal akibat perkembangan kakisan yang pantas dalam iklim tropika

NDT (UT, RT, ECT)	Pengesanan kecacatan bawah permukaan tanpa merosakkan bahan	Kepekaan tinggi terhadap kecacatan bawah permukaan; sesuai untuk aset kritikal	Memerlukan operator mahir, peralatan ditentukan, dan keadaan ujian terkawal	Bersyarat; boleh dilaksanakan di tapak dengan persediaan dan latihan yang mencukupi	Berguna untuk pemeriksaan struktur dan luar pesisir; pelaksanaan boleh terjejas oleh kelembapan tinggi dan kekangan akses
Kupon Kakisan	Pendedahan sampel logam dalam persekitaran sebenar untuk penilaian kakisan melalui kehilangan jisim	Mewakili pendedahan persekitaran sebenar; sesuai untuk pemantauan jangka panjang	Tiada data masa nyata; keupayaan terhad untuk mengesan kakisan setempat	Ya; digunakan secara meluas untuk kajian pendedahan jangka panjang	Sangat sesuai untuk pemantauan sungai, pesisir dan marin; menyediakan trend jangka panjang yang boleh dipercayai
XRF	Pengenalpastian komposisi unsur bahan	Analisis pantas komposisi unsur dan salutan di tapak	Dipengaruhi oleh keadaan permukaan; tiada resolusi kedalaman	Ya; penganalisis mudah alih sesuai untuk diagnostik lapangan	Mudah alih dan sesuai untuk saringan pantas, namun memerlukan penyediaan permukaan dalam persekitaran lembap dan berasin
SEM-EDS	Pengimejan resolusi tinggi dan analisis mikro unsur	Analisis terperinci terhadap morfologi dan produk kakisan	Berasaskan makmal; kos tinggi; memerlukan vakum dan penyediaan sampel	Tidak; hanya berasaskan makmal	Sangat sesuai untuk analisis kupon pasca-pendedahan dalam keadaan tropika yang agresif

<p>Teknik Elektrokimia (LPR, EIS)</p>	<p>Pengukuran elektrokimia kadar kakisan</p>	<p>Pengesanan kadar kakisan dan prestasi salutan secara masa nyata</p>	<p>Sensitif terhadap susunan ujian dan kestabilan persekitaran; tafsiran data yang kompleks</p>	<p>Bersyarat; semakin mudah dilaksanakan dengan penggunaan probe dan sensor</p>	<p>Kritikal untuk pemahaman kakisan peringkat awal dan kinetik; kelembapan dan aktiviti biologi merumitkan penggunaan in-situ</p>
--	--	--	---	---	---

Setiap teknik pengesanan kakisan mempunyai kelebihan dan kekangan tersendiri dari segi kepekaan, kebolehcapaian, kos, serta kesesuaian terhadap keadaan persekitaran setempat. Pemeriksaan visual kekal digunakan secara meluas kerana kesederhanaan dan kosnya yang rendah, manakala ujian bukan perosak (NDT) membolehkan pengesanan kecacatan bawah permukaan pada komponen kritikal. Kupon kakisan menyediakan data pendedahan jangka panjang yang bernilai, XRF membolehkan analisis unsur secara pantas di permukaan bahan, dan SEM-EDS memudahkan analisis kegagalan terperinci pada peringkat mikroskopik. Kaedah elektrokimia pula membolehkan pemantauan kadar kakisan secara masa nyata, namun memerlukan keadaan ujian yang terkawal serta penyelenggaraan berkala.

Dalam iklim tropika Brunei Darussalam yang agresif, dicirikan oleh kelembapan tinggi, kemasinan dan aktiviti biologi yang mempercepatkan proses kakisan, pendekatan bersepadu yang menggabungkan pelbagai teknik berdasarkan jenis aset dan keadaan pendedahan menyediakan asas yang paling berkesan untuk pengesanan kakisan awal serta perancangan penyelenggaraan yang berinformasi dan berasaskan bukti.

4.0 PENGESANAN KAKISAN DALAM SEKTOR PERTAHANAN

Kakisan kekal sebagai ancaman berterusan terhadap kesiapsiagaan operasi, keselamatan, dan keberkesanan kos aset ketenteraan. Beban kewangan akibat kakisan adalah sangat besar; anggaran terkini yang diterbitkan oleh Jabatan Pertahanan A.S. menunjukkan kos tahunan melebihi USD 20 bilion, iaitu hampir 20% daripada keseluruhan bajet penyelenggaraan mereka [33]. Dalam konteks Brunei Darussalam, keadaan persekitaran tempatan yang keras mewujudkan risiko tinggi terhadap degradasi bahan merentasi pelbagai platform dan aset ketenteraan. Oleh itu, pengesanan kakisan yang berkesan adalah amat kritikal bagi mencegah kegagalan misi yang penting serta memanjangkan jangka hayat aset. Memandangkan platform ketenteraan berbeza dari segi tahap pendedahan dan kelemahan struktur, strategi pengesanan yang khusus mengikut domain dan menggabungkan pelbagai teknik adalah diperlukan. Kategori platform utama dibincangkan seperti berikut:

Kapal tentera laut dan kenderaan amfibia. Platform laut terdedah kepada kitaran berterusan sentuhan air masin, turun naik pasang surut, serta aerosol marin. Keadaan ini menggalakkan proses kakisan seperti *pitting*, *crevice corrosion*, dan *MIC*, terutamanya di kawasan tertutup seperti tangki

ballast, bilge, dan sistem penyejukan air laut [24]. Kandungan garam yang tinggi dalam air laut memecahkan lapisan perlindungan pada aloi logam, manakala air yang hangat dan bertakung dalam ruang tertutup menggalakkan pertumbuhan bakteria yang mempercepatkan kakisan setempat.

Dalam persekitaran ini, pemeriksaan visual kekal sebagai kaedah paling mudah diakses untuk mengenal pasti kemerosotan cat, pengaratan permukaan atau kecacatan kimpalan, dengan bantuan alat visual jarak jauh seperti boreskop bagi ruang terkurung [34]. Untuk mensimulasikan pendedahan sebenar, kupon kakisan sering dipasang dalam tangki ballast dan sistem air laut, dengan kehilangan jisim digunakan untuk menganggar kadar kakisan dari semasa ke semasa [35]. Teknik elektrokimia seperti LPR adalah bernilai untuk menjejaki kinetik kakisan masa nyata pada komponen terendam, termasuk bahagian dalaman badan kapal dan paip [36]. Dalam siasatan kegagalan, SEM-EDS memainkan peranan penting dalam mencirikan morfologi kakisan liang serta mengenal pasti produk kakisan yang disebabkan oleh klorida atau aktiviti mikrobiologi [30].



Rajah 9. Kakisan dalaman teruk yang diperhatikan dalam tangki ballast sebuah kapal. Imej menunjukkan pembentukan karat yang meluas, kegagalan salutan, dan kakisan liang. Sumber imej: Chemco International.

Kenderaan berperisai dan kenderaan beroda. Kenderaan yang beroperasi di kawasan hutan atau pesisir pantai mudah mengumpul lumpur dan kelembapan pada bahagian bawah kenderaan serta sistem suspensi. Digabungkan dengan turun naik suhu dan aktiviti mikrobiologi, faktor-faktor ini menyumbang kepada kakisan bawah deposit serta kemerosotan salutan yang dipercepatkan, khususnya di kawasan sambungan atau pengikat yang menahan air [14], sekali gus mendedahkan logam asas kepada persekitaran menghakis.

Pemeriksaan visual kekal sebagai alat utama, walaupun keterbatasannya dalam mengesan kakisan peringkat awal atau bawah permukaan telah didokumentasikan dengan baik [37]. Kaedah NDT

seperti UT dan EC digunakan secara meluas untuk mengesan kecacatan kimpalan, kakisan tersembunyi, dan penipisan bahan, terutamanya pada komponen suspensi dan casis [20]. XRF mudah alih semakin digunakan di depot bagi mengenal pasti perubahan bahan, pencemaran permukaan, atau komposisi kerak kakisan, khususnya pada komponen aluminium atau keluli berkekuatan tinggi [28]. Untuk analisis kegagalan lanjutan, SEM-EDS menyediakan pengimejan resolusi tinggi bagi menilai perambatan kakisan di bawah salutan atau di sekitar pengikat [28].

Pesawat tentera. Pesawat tentera lazimnya dibina menggunakan gabungan logam berlainan seperti aluminium, titanium dan keluli tahan karat, yang terdedah kepada kakisan galvanik apabila terdedah kepada elektrolit seperti sisa garam dan pemeluwapan (*condensation*). Kitaran basah-kering yang kerap menyumbang kepada pengumpulan garam pada permukaan pesawat dan di bawah pengikat, yang seterusnya merosotkan salutan pelindung serta mempercepatkan kakisan pada sambungan dan antara muka [38]. Kesan ini menjadi lebih teruk akibat sistem saliran dan pengedapan yang tidak mencukupi, terutamanya bagi pesawat yang diparkir atau tidak beroperasi, di mana kelembapan mudah terkumpul.

Pemeriksaan visual rutin biasanya dilaksanakan selari dengan penyelenggaraan berjadual dan semakin disokong oleh penggunaan dron atau alat endoskopik bagi meningkatkan kebolehcapaian [39]. EC merupakan teknik NDT pilihan bagi pengesanan kakisan pesawat kerana kesesuaiannya untuk aloi bukan ferus dan pemeriksaan pengikat [40]. Teknik elektrokimia, walaupun jarang digunakan di lapangan, telah terbukti berguna dalam persekitaran makmal untuk menilai prestasi perencat kakisan dan degradasi salutan [41]. SEM-EDS sering digunakan bagi menyokong analisis punca kegagalan melalui pengenalanpastian perangkap garam, serangan antara butiran, dan komposisi mendapan yang kompleks [42].



Rajah 10. Pitting dan filiform corrosion yang kelihatan sepanjang garisan rivet dan permukaan kulit aluminium sebuah pesawat tentera. Sumber imej: Aero Corner.

Menara pengawasan, sistem radar dan pemasangan tetap lain. Sistem dan pemasangan ketenteraan sangat terdedah kepada kakisan atmosfera, terutamanya di kawasan terbuka atau pesisir pantai. Sokongan struktur daripada *stainless steels* dan *galvanic steels* terdedah kepada kakisan yang didorong oleh gabungan aerosol garam, pembentukan biofilem, dan degradasi salutan akibat sinaran UV. Biofilem boleh memerangkap kelembapan dan garam pada permukaan,

sekali gus mengurangkan keberkesanan lapisan pasif dan memangkinkan tindak balas elektrokimia setempat yang menggalakkan kakisan [43].

Pemeriksaan visual digunakan secara meluas dan semakin disokong oleh kamera yang dipasang pada UAV untuk penilaian struktur secara umum [14]. Kupon kakisan yang dipasang pada pelbagai aras dan orientasi pada struktur tetap menyediakan data khusus tapak yang bernilai, terutamanya apabila tahap keterukan persekitaran berbeza mengikut ketinggian dan arah pendedahan. XRF menyokong pengesahan bahan dan pengenalpastian awal kehilangan unsur pengalioian atau pembentukan produk kakisan, khususnya pada keluli tahan karat dan tergalvani [24]. Bagi infrastruktur yang terjejas oleh MIC atau pengelupasan salutan, SEM-EDS membolehkan pemetaan komposisi terperinci zon serangan setempat serta pengaruh mikrobiologi [43].

Depoh peluru dan fasiliti penyimpanan peralatan. Depoh lama atau gudang penyimpanan yang tidak dilengkapi kawalan iklim sering berdepan kelembapan relatif yang tinggi serta pengudaraan yang lemah. Keadaan ini menggalakkan kakisan seragam pada permukaan logam yang tidak dilindungi seperti laras senjata, sarung peluru dan rak keluli. Peristiwa pemeluwapan yang didorong oleh perubahan suhu harian meningkatkan lagi kelembapan permukaan, mewujudkan persekitaran kondusif untuk MIC dan pembentukan mendapan menghakis [12].

Pemeriksaan visual kekal penting untuk mengenal pasti tanda awal pengaratan permukaan atau kegagalan cat pada senjata dan peluru yang disimpan. Kupon kakisan menyediakan kaedah kos efektif untuk menjejak trend degradasi jangka panjang di kawasan perwakilan [24]. Fasiliti yang dilengkapi sensor elektrokimia atau perakam kelembapan mendapat manfaat daripada pemantauan masa nyata ambang kritikal. Sekiranya degradasi luar jangka berlaku, SEM-EDS digunakan untuk menganalisis serpihan kakisan atau hasil sampingan berkaitan MIC dengan ketepatan tinggi [43].



Rajah 11. Kakisan permukaan yang kelihatan pada beberapa raifal yang disimpan di luar tanpa perlindungan persekitaran yang mencukupi. Sumber imej: Zerust Rust Prevention.

Secara keseluruhannya, strategi pengesanan kakisan yang mantap akan meningkatkan keupayaan ABDB untuk membuat keputusan yang berinformasi dan berasaskan bukti berkaitan pembaikan, penggantian, dan pengagihan aset. Apabila digabungkan dengan pengetahuan persekitaran, pemprofilan risiko khusus platform, dan selang pemeriksaan yang konsisten, pengesanan kakisan menjadi pemangkin kepada penyelenggaraan proaktif. Pendekatan ini bukan sahaja mengurangkan kos kitar hayat, malah memperkukuh kesiapsiagaan operasi, yang amat kritikal dalam persekitaran operasi tropika yang sangat terdedah kepada kakisan.

5.0 MENANGANI CABARAN PENGESANAN KAKISAN DALAM ANGKATAN BERSENJATA DIRAJA BRUNEI

Memandangkan peranannya yang kritikal dalam memastikan integriti operasi, pengesanan kakisan dalam ABDB membuka ruang penambahbaikan bagi memenuhi keperluan operasi yang semakin berkembang. Rangka kerja sedia ada lazimnya lebih menumpukan kepada mitigasi dan pemantauan berbanding strategi pengesanan pada peringkat awal. Seperti yang telah dihuraikan sebelum ini, pengesanan kakisan awal adalah penting untuk mencegah kerosakan yang tidak dapat dipulihkan, terutamanya dalam iklim tropika Brunei Darussalam yang agresif.

Jurang data. Dasar penyelenggaraan kakisan semasa banyak bergantung kepada piawaian dan garis panduan antarabangsa yang dibangunkan oleh pengeluar peralatan asal (OEM). Garis panduan ini lazimnya tidak mengambil kira keadaan iklim tempatan yang dicirikan oleh kelembapan sepanjang tahun, pendedahan garam yang tinggi, serta aktiviti biologi yang intensif. Kadar kakisan yang tinggi dan sukar diramal sering mengakibatkan keperluan penyelenggaraan awal yang tidak dirancang bagi mengelakkan degradasi struktur yang teruk. Akibatnya, ramalan

kegagalan aset ketenteraan kekal tidak menentu berikutan ketiadaan penanda aras kadar kakisan jangka panjang yang khusus kepada persekitaran tempatan, sekali gus menjejaskan ketepatan ramalan jangka hayat perkhidmatan dan perancangan berasaskan risiko.

Jurang teknologi. Platform dan aset pertahanan masih banyak bergantung kepada pemeriksaan visual manual. Walaupun berguna sebagai alat asas, kaedah visual mempunyai skop yang terhad dan tidak mampu mengenal pasti kakisan bawah permukaan atau pada peringkat awal secara boleh dipercayai. Alat lanjutan seperti sensor dan probe elektrokimia terbenam masih belum diintegrasikan dalam reka bentuk aset atau perancangan penyelenggaraan [15]. Kekangan ini menghadkan keupayaan ABDB untuk beralih daripada penyelenggaraan reaktif kepada penyelenggaraan proaktif dan berasaskan data.

Jurang kepakaran. Menangani kakisan secara berkesan memerlukan bukan sahaja peralatan dan protokol yang sesuai, tetapi juga tenaga kerja mahir yang mampu mentafsir keputusan diagnostik yang kompleks. Walaupun kakitangan teknikal ABDB terlatih dalam peranan kejuruteraan dan penyelenggaraan umum, terdapat kekurangan ketara pakar dalam bidang sains kakisan. Kepakaran masih terhad dalam diagnostik elektrokimia, kalibrasi sensor, tafsiran SEM-EDS, dan forensik kegagalan. Jurang pengetahuan ini melambatkan analisis punca sebenar kegagalan dan menghalang penerapan pendekatan pengurusan kakisan yang lebih maju dan bersifat ramalan.

Amalan penyelenggaraan semasa lazimnya mengikut struktur berperingkat: peringkat pertama melibatkan pemeriksaan visual, peringkat kedua melibatkan pembaikan kecil, manakala peringkat ketiga dan keempat merangkumi pembaikan besar serta kerja baik pulih. Peralihan dasar ke arah penyumberan luar penyelenggaraan peringkat tinggi kepada kontraktor luar berpotensi menampung kekurangan keupayaan jangka pendek, namun pada masa yang sama boleh mengurangkan peluang pembangunan kemahiran teknikal lanjutan dalam kalangan anggota ABDB. Pemerhatian ini adalah bergantung kepada konteks dan keutamaan dasar semasa ABDB.

Fragmentasi dalam Pelaksanaan Piawaian. Penggunaan piawaian dan garis panduan antarabangsa sering dilaksanakan secara umum tanpa pengubahsuaian mengikut konteks tempatan. Selain itu, ketiadaan dasar pengesanan kakisan khusus pertahanan yang bersatu telah mengakibatkan ketidakselarasan dari segi selang pemeriksaan, protokol dokumentasi, dan prosedur diagnostik antara cabang perkhidmatan. Kekurangan integrasi ini menghalang pembelajaran institusi, merumitkan perbandingan antara platform, dan menyekat pembangunan pangkalan data perisikan kakisan berpusat.

Menangani jurang-jurang ini memerlukan perubahan paradigma daripada pengurusan kakisan secara reaktif kepada pendekatan ramalan. Peralihan ini melibatkan bukan sahaja penerapan teknologi pengesanan lanjutan, tetapi juga pengukuhan pengetahuan institusi serta penyesuaian piawaian dan garis panduan kakisan kepada persekitaran operasi unik Brunei. Intervensi strategik berikut menggariskan langkah-langkah praktikal ke arah penambahbaikan amalan pengesanan kakisan merentas ABDB.

a) **Perlaksanaan sistem pengesanan masa nyata**

Platform berisiko tinggi seperti badan kapal tentera laut dan struktur pesawat hendaklah dilengkapi dengan alat pengesanan kakisan masa nyata. Ini termasuk integrasi sensor dan probe elektrokimia serta pemantau kelembapan. Apabila dipasang secara terbenam dalam struktur

seperti tangki ballast, bahagian bawah kenderaan atau tempat perlindungan pesawat, peralatan ini membolehkan amaran awal dan mengurangkan kebergantungan kepada pemeriksaan berkala [20]. Keberkesanan pemantauan masa nyata boleh dipertingkatkan lagi melalui penggunaan *Artificial Intelligence* (AI) dan *Machine Learning* (ML), yang membolehkan ramalan kakisan yang lebih tepat dan seterusnya meningkatkan ketepatan ramalan jangka hayat perkhidmatan aset.

b) Penubuhan pangkalan data berpusat dengan pemodelan ramalan dan pemetaan risiko

Data kakisan setempat yang dikumpul daripada kupon kakisan, analisis kegagalan SEM-EDS, serta sensor persekitaran lapangan hendaklah diintegrasikan ke dalam pangkalan data berpusat yang disokong oleh model ramalan kakisan berasaskan AI dan ML. Repositori data ini boleh menyokong pembangunan model ramalan berasaskan *Geographic Information System* (GIS) bagi memaklumkan jadual penyelenggaraan khusus tapak, pemilihan bahan, dan reka bentuk fasiliti di pangkalan udara, pelabuhan, serta pemasangan darat, termasuk aset awam yang berkaitan bagi membentuk pangkalan data yang lebih kukuh. Pangkalan data ini juga membolehkan analisis lanjutan seperti pembentukan jadual penyelenggaraan tersuai bagi setiap aset.

c) Pembangunan kompetensi sains kakisan

Pembinaan kepakaran dalaman adalah penting bagi menjamin kelestarian usaha pengesanan dan pencegahan kakisan yang maju. ABDB digalakkan untuk melabur dalam latihan bertauliah bagi jurutera, juruteknik dan pemeriksa. Pada masa yang sama, kerjasama dengan Institusi Pengajian Tinggi (IPT) boleh membantu mengintegrasikan diagnostik kakisan, prinsip elektrokimia dan analisis kegagalan ke dalam pendidikan teknikal ketenteraan. Pendekatan dua landasan ini akan meningkatkan keupayaan diagnostik dalaman serta menyokong penginstitutionan jangka panjang pengesanan kakisan secara proaktif.

6.0 KESIMPULAN

Terletak dalam persekitaran tropika, Brunei Darussalam berhadapan dengan cabaran kakisan yang ketara dan unik, dengan parameter persekitaran yang mempercepatkan permulaan serta keterukan degradasi bahan merentas platform pertahanan. Walaupun pelbagai kaedah pengesanan kakisan tersedia, keberkesanannya bergantung kepada pemilihan yang tepat, penyesuaian persekitaran, dan integrasi strategik. Dalam konteks ketenteraan, di mana kegagalan boleh membawa implikasi kritikal terhadap misi, pemeriksaan visual semata-mata adalah tidak mencukupi. Sebaliknya, pendekatan berlapis yang menggabungkan pemantauan elektrokimia masa nyata, NDT bawah permukaan, diagnostik khusus bahan (XRF, SEM-EDS), serta penilaian pendedahan jangka panjang melalui kupon kakisan adalah amat diperlukan.

Menutup jurang keupayaan dalam ABDB memerlukan pelaburan bukan sahaja dalam teknologi, tetapi juga dalam modal insan dan dasar, yang boleh dicapai melalui pembinaan set data setempat, pengukuhan latihan diagnostik kakisan, serta penyeragaman amalan pengesanan agar selari dengan persekitaran operasi Brunei. Transformasi amalan kakisan daripada reaktif kepada ramalan bukan sahaja akan meningkatkan jangka hayat aset, malah memperkukuh daya tahan operasi negara dalam persekitaran pertahanan yang semakin kompleks.

RUJUKAN

- [1] The Association for Materials Protection and Performance. (2023). *What is corrosion?* Association for Materials Protection and Performance. <https://www.ampp.org/about/what-is-corrosion>
- [2] Department of Defense. (2011, February). *Corrosion prevention and mitigation strategic plan*. Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology, and Logistics.
- [3] NACE International. (2016). *International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies (IMPACT) report*. NACE International.
- [4] Brunei Darussalam Meteorological Department. (2022). *Annual climate summary*. Ministry of Transport and Info-communications.
- [5] Davis, J. R. (Ed.). (2000). Basic concepts important to corrosion. In *Corrosion: Understanding the Basics* (pp. 21–48). ASM International.
- [6] Jones, D. A. (1996). *Principles and prevention of corrosion* (2nd ed.). Prentice Hall.
- [7] Revie, R. W., & Uhlig, H. H. (2008). *Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering* (4th ed.). Wiley.
- [8] Fontana, M. G. (1986). *Corrosion Engineering* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- [9] Wang, X., Li, X., & Tian, X. (2015). Influence of temperature and relative humidity on the atmospheric corrosion of zinc in field exposures and laboratory environments. *International Journal of Electrochemical Science*, 10, 8361–8373.
- [10] Friedersdorf, F. J. H., & Demo, J. C. (2019). *Electrochemical sensors for continuous measurement of corrosion and coating system performance in outdoor and accelerated atmospheric tests*. In ASTM International Committee G01 on Corrosion of Metals (Ed.), *Proceedings of ASTM Symposium*.
- [11] U.S. Department of Defense. (2016). *MIL-STD-889C: Dissimilar metals*. Washington, DC: Department of Defense.
- [12] Beech, I. B., & Sunner, J. A. (2004). *Biocorrosion: towards understanding interactions between biofilms and metals*. *Current Opinion in Biotechnology*, 15(3), 181–186.
- [13] American Society for Testing and Materials. (2011). *ASTM G46-94(2011), Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion*. ASTM International.
- [14] Koch, G. H., Brongers, M. P. H., Thompson, N. G., Virmani, Y. P., & Payer, J. H. (2002). *Corrosion cost and preventive strategies in the United States* (FHWA-RD-01-156). U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- [15] Shinohara, Y., & Otsuka, N. (2003). Degradation of coatings and corrosion of steel structures in tropical marine environments. *Corrosion Science*, 45(2), 375–386.
- [16] International Organization for Standardization (ISO). (2016). *ISO 4628-1:2016: Paints and varnishes — Evaluation of degradation of coatings — Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance — Part 1: General introduction and designation system*. ISO.

- [17] ASTM International. (2019). *ASTM D610-19: Standard practice for evaluating degree of rusting on painted steel surfaces*. ASTM International.
- [18] NACE International. (2007). *NACE SP0178-2007: Design, fabrication, and surface finish practices for tanks and vessels to be lined for immersion service*. NACE International.
- [19] Baboian, R. (Ed.). (2005). *Corrosion tests and standards: Application and interpretation* (2nd ed.). ASTM International.
- [20] Hellier, C. (2013). *Handbook of nondestructive evaluation* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- [21] Shibli, S. M. A., & Suresh, A. (2012). Corrosion challenges in tropical marine and offshore environments. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 59(2), 79–86.
- [22] ASTM International. (2014). *ASTM G1-03(2011): Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens*. ASTM International.
- [23] Kutz, M. (Ed.). (2018). *Handbook of environmental degradation of materials* (3rd ed.). William Andrew Publishing.
- [24] Melchers, R. E., & Jeffrey, R. (2008). *Marine corrosion of steel structures*. CRC Press.
- [25] Pavlov, M. D. (2012). *Handbook of materials failure analysis with case studies from the aerospace and automotive industries*. Elsevier.
- [26] Beckhoff, B., Kanngießer, B., Langhoff, N., Wedell, R., & Wolff, H. (Eds.). (2006). *Handbook of practical X-ray fluorescence analysis*. Springer.
- [27] Potts, P. J., & West, M. (Eds.). (2008). *Portable X-ray fluorescence spectrometry: Capabilities for in situ analysis*. Royal Society of Chemistry.
- [28] Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Joy, D. C., Lyman, C. E., Echlin, P., Lifshin, E., ... & Michael, J. R. (2018). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis* (4th ed.). Springer.
- [29] Jones, D. A. (2013). *Principles and prevention of corrosion* (2nd ed.). Pearson.
- [30] Rosa, M. L., & King, F. (2012). In Cottis, B., et al. (Eds.), *Shreir's corrosion* (Vol. 2, pp. 1531–1546). Elsevier.
- [31] Mansfeld, F. (1990). *Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) as a new tool for investigating methods of corrosion protection*. *Electrochimica Acta*, 35(10), 1533–1544.
- [32] Orazem, M. E., & Tribollet, B. (2008). *Electrochemical impedance spectroscopy*. Wiley.
- [33] U.S. Department of Defense. (2016). *Corrosion Policy and Oversight: Annual Report to Congress Fiscal Year 2016*. Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology, and Logistics.
- [34] Little, B. J., & Lee, J. S. (2007). *Microbiologically influenced corrosion*. Wiley.
- [35] Hudson, D. A., & Melchers, R. E. (2012). *The practical use of corrosion coupons in marine environments*. *Corrosion Science*, 65, 26–34.
- [36] Evans, U. R. (1981). *The corrosion and oxidation of metals: Scientific principles and practical applications*. Edward Arnold.

- [37] Defense Science Board. (2004). Corrosion control: U.S. military corrosion prevention and control program. Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology, and Logistics. Retrieved from <https://www.acq.osd.mil>
- [38] Harvey, T. J., Hughes, A. E., Wilson, L., & Muster, T. H. (2007). *The role of aircraft paint systems in corrosion prevention*. *Corrosion Reviews*, 25(5–6), 449–467.
- [39] Federal Aviation Administration (FAA). (2020). *Advisory Circular AC 43-204: Visual inspection for aircraft*. U.S. Department of Transportation. Retrieved from <https://www.faa.gov>
- [40] Bossi, R. H. (2004). *Nondestructive inspection of aging aircraft*. In C. Hellier (Ed.), *Handbook of nondestructive evaluation* (pp. 693–719). McGraw-Hill.
- [41] Trethewey, K. R., & Chamberlain, J. (1995). *Corrosion for science and engineering* (2nd ed.). Longman Scientific & Technical.
- [42] Hughes, A. E., Glenn, A. M., Wilson, L., & Muster, T. H. (2011). *Using advanced analytical tools to understand corrosion in aircraft structures*. *Corrosion Science*, 53(1), 27–35.
- [43] Little, B. J., Lee, J. S., & Ray, R. I. (2014). *The role of biomolecules in corrosion: A review*. *Biofouling*, 30(8), 957–985.

Mengenai Pengarang

► *Mejar (U) Fatin Nur Hanani binti Hamdani*

Beliau kini berkhidmat sebagai Penolong Pegawai Turus II bagi Sel Kesihatan dan Keselamatan Kerja (KKK), Unit Inspektorat Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB). Beliau aktif terlibat dalam mempromosikan inisiatif kesihatan dan keselamatan di seluruh unit. Dengan memberi tumpuan kepada usaha memperkukuh budaya keselamatan serta meningkatkan kesejahteraan operasi, beliau telah memperkenalkan beberapa inisiatif termasuk pelaksanaan sistem pemantauan kelajuan berkuasa solar bagi mengurangkan pemanduan tidak selamat di kawasan premis Pangkalan Udara Rimba, serta penerbitan Buku Panduan Kesejahteraan Minda TUDB yang bertujuan meningkatkan kesedaran kesihatan mental dalam kalangan anggota. Melalui inisiatif ini, penulis terus menyokong komitmen TUDB ke arah mewujudkan pasukan yang lebih selamat, sihat dan berdaya tahan.

MEMPERKUKUH BUDAYA KESELAMATAN DALAM TENTERA UDARA DIRAJA BRUNEI (TADB): DARIPADA PEMATUHAN KEPADA KOMITMEN

Mej (U) Fatin Nur Hanani binti Hamdani

Unit Inspektorat, Tentera Udara Diraja Brunei

ABSTRAK

Keselamatan merupakan komponen kritikal kepada keberkesanan operasi dalam organisasi ketenteraan, khususnya dalam persekitaran berisiko tinggi seperti Tentera Udara Diraja Brunei (TADB). Kajian ini meneliti budaya keselamatan semasa dalam TADB dengan memberi tumpuan kepada peralihan daripada pendekatan berasaskan pematuhan kepada budaya keselamatan berasaskan komitmen. Satu kajian tinjauan kuantitatif telah dijalankan melibatkan 493 orang anggota daripada pelbagai pangkat dan tempoh perkhidmatan bagi menilai sikap, tingkah laku serta persepsi terhadap keselamatan. Hasil kajian menunjukkan bahawa majoriti anggota mempamerkan tingkah laku berasaskan komitmen, seperti tanggungjawab peribadi, motivasi sendiri, serta pematuhan tanpa pengawasan. Walau bagaimanapun, masih terdapat tanda-tanda tingkah laku yang didorong oleh pematuhan, khususnya dalam pemeriksaan keselamatan formal dan prosedur rutin. Kajian turut menunjukkan bahawa anggota yang berpangkat lebih tinggi serta mereka yang mempunyai tempoh perkhidmatan yang lebih lama memperlihatkan tahap komitmen yang lebih kukuh, manakala anggota yang berpangkat rendah dan kurang berpengalaman cenderung bergantung kepada pematuhan prosedur. Penemuan ini menekankan keperluan bagi latihan yang disasarkan, pengukuhan peranan kepimpinan, serta pelaksanaan proses keselamatan yang berfokuskan risiko bagi memperkukuh lagi budaya keselamatan yang proaktif. Kajian ini menyimpulkan bahawa TADB mempunyai asas yang kukuh ke arah budaya keselamatan berasaskan komitmen; namun, intervensi berterusan adalah diperlukan bagi memastikan keselamatan benar-benar diterapkan sebagai nilai bersama organisasi, dan bukan sekadar keperluan berasaskan tugas.

Kata kunci:

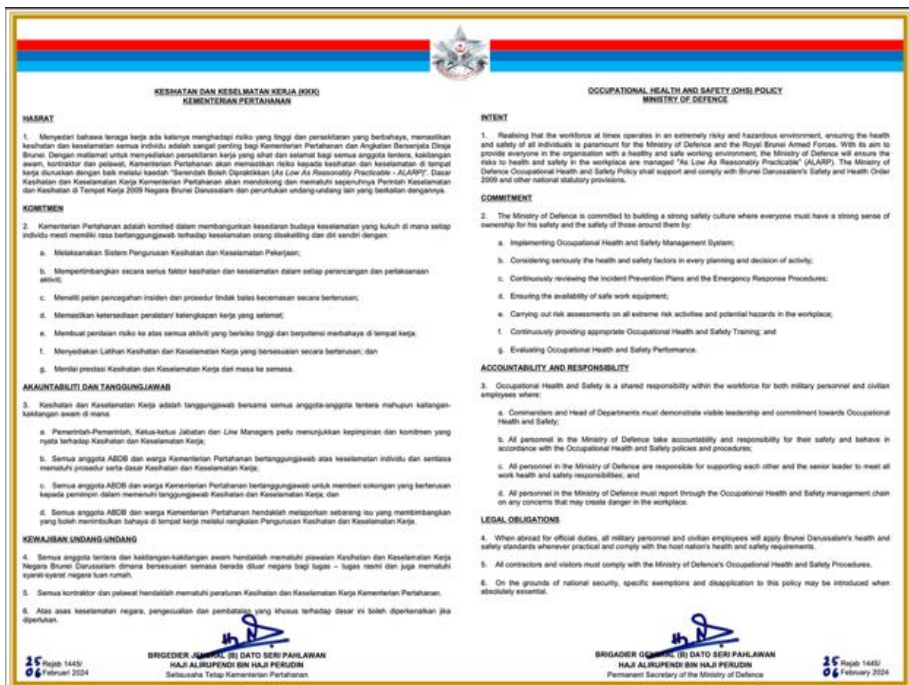
Budaya Keselamatan, Budaya "Tick-Box", Pematuhan, Komitmen, Sikap Keselamatan, Kepimpinan.

1.0 PENDAHULUAN

Dalam mana-mana organisasi ketenteraan, keselamatan merupakan komponen utama bagi keberkesanan operasi. Keselamatan membolehkan ketenteraan mengekalkan keupayaan

kesiapsiagaan tempur serta kebajikan anggota dalam Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB). Kepentingannya melangkaui pematuhan terhadap peraturan dan dasar semata-mata. Operasi ketenteraan lazimnya dijalankan dalam persekitaran berisiko tinggi dan anggota udara sentiasa terdedah kepada risiko berkaitan operasi pesawat, aktiviti penyelenggaraan, pengendalian peluru berpandu serta faktor tekanan persekitaran yang lain. Beroperasi dalam tempo operasi yang pantas, keperluan misi yang ketat dan kerumitan ruang udara menuntut pematuhan mutlak anggota terhadap prinsip Kesihatan, Keselamatan dan Persekitaran (KKP) yang kukuh. Kejayaan misi, keupayaan operasi serta pemeliharaan nyawa dan aset boleh tergugat hanya dengan satu kelalaian dalam disiplin keselamatan. Oleh itu, adalah perlu bagi keperluan operasi untuk memasukkan pengurusan keselamatan dalam perancangan, pelaksanaan dan semakan pasca misi, dan bukan sekadar dianggap sebagai fungsi sokongan.

Menegakkan budaya keselamatan yang mantap dalam TUDB menjamin setiap operasi, sama ada ketika aman atau konflik, dilaksanakan dengan selamat, berkesan dan lestari selaras dengan nilai teras TUDB iaitu 'Komited, Berpasukan dan Cemerlang'. Walaupun pematuhan keselamatan merupakan asas utama bagi mana-mana sistem yang berjaya, kecemerlangan keselamatan sebenar melangkaui sekadar mengikuti prosedur dan senarai semak. Budaya keselamatan sejati dalam tentera udara wujud apabila terdapat pemikiran kolektif dalam organisasi bahawa keselamatan adalah tanggungjawab peribadi. Justeru, ia mesti diterapkan dalam rutin harian anggota, proses membuat keputusan dan amalan kepimpinan. Walaupun Kementerian Pertahanan telah menetapkan penguatkuasaan melalui dasar seperti **Rajah 1**, anggota lelaki dan wanita udara perlu mengekalkan nada tersebut serta mengembangkannya melalui tanggungjawab bersama dan profesionalisme. Pendekatan ini berpotensi mengubah tentera udara daripada sekadar pematuhan kepada komitmen apabila keselamatan menjadi satu kebiasaan di tempat kerja mereka.



Rajah 1. Dasar KKK Kementerian Pertahanan.

2.0 MATLAMAT

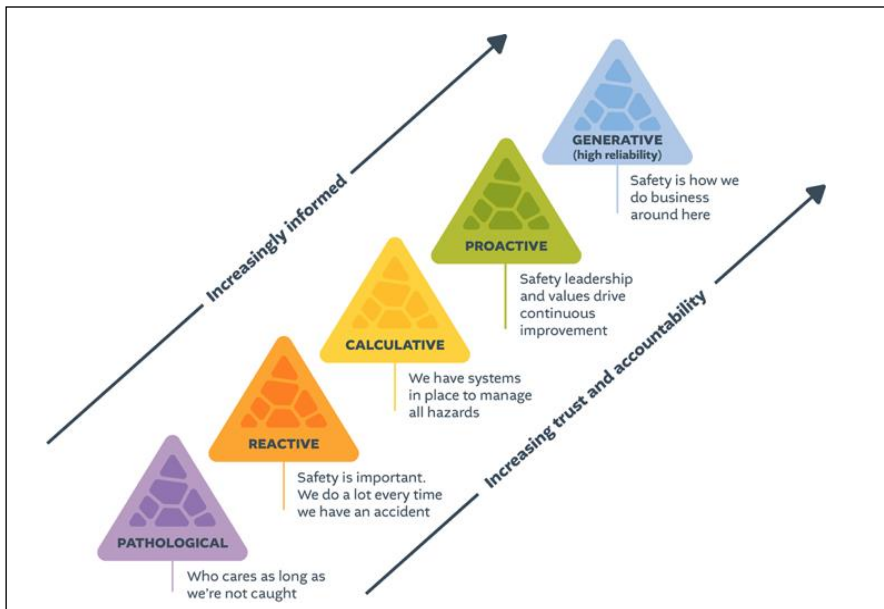
Kertas ini bertujuan menilai budaya keselamatan semasa dalam TUDB, menentukan perbezaan persepsi keselamatan merentasi pangkat dan tempoh perkhidmatan, serta mengenal pasti bidang yang memerlukan penambahbaikan dalam usaha beralih daripada pematuhan kepada komitmen.

3.0 RANGKA KERJA KONSEPTUAL

Subseksyen ini menghuraikan perbezaan konseptual antara pematuhan dan komitmen yang menjadi asas kepada analisis amalan keselamatan dalam TUDB.

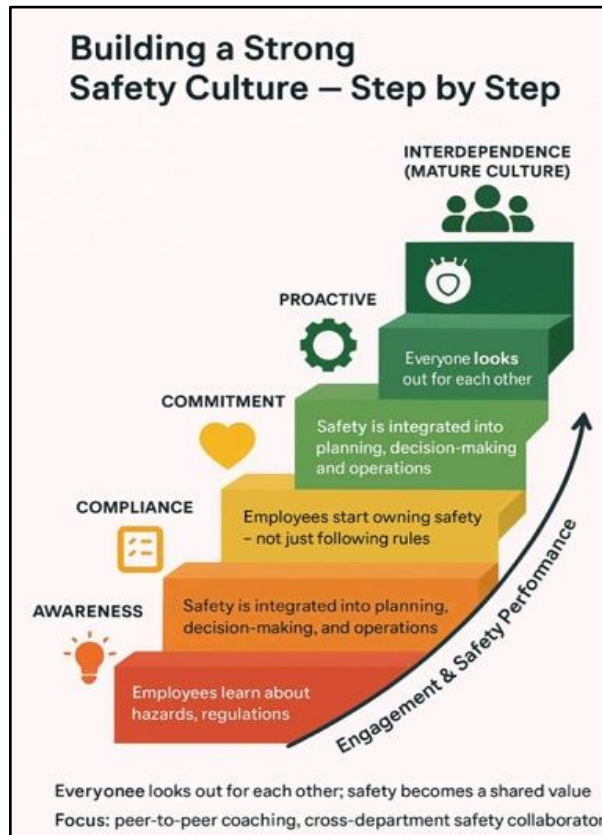
3.1 | Daripada Pematuhan kepada Komitmen

Pematuhan dari segi keselamatan dilakukan untuk memastikan anggota memenuhi tahap minimum keperluan undang-undang dan dasar. Oleh itu, ia dicirikan sebagai berasaskan peraturan, berfokus kepada pemeriksaan serta bergantung pada senarai semak kerana tumpuan utamanya adalah mengikuti manual dan piawaian yang telah ditetapkan [1]. Walaupun pendekatan ini menawarkan konsistensi, ia boleh dianggap sebagai petunjuk negatif terhadap budaya keselamatan kerana organisasi cenderung bersifat reaktif, di mana risiko hanya ditangani selepas ia timbul atau apabila ditemui semasa audit dan pemeriksaan. Dalam mengaplikasikan tangga budaya keselamatan seperti dalam **Rajah 2**, TUDB perlu menilai kedudukan mereka pada masa ini dan apa yang ingin dicapai kerana ini akan membantu mencerminkan tahap kematangan keselamatan TUDB [2]. Walaupun amalan berasaskan pematuhan dapat mengekalkan struktur dan disiplin dalam ketenteraan, hal ini juga boleh menghadkan inisiatif serta pemilikan individu memandangkan keselamatan dilihat sebagai tugas semata-mata dan bukan tanggungjawab bersama.



Rajah 2. Tangga Budaya Keselamatan.

Sebaliknya, keselamatan berasaskan komitmen adalah berlandaskan akauntabiliti individu, komunikasi terbuka serta pengamalan tingkah laku kepimpinan teladan, yang melangkaui keperluan undang-undang dan peraturan. Menurut **Rajah 2**, tahap penglibatan dan prestasi keselamatan meningkat apabila keselamatan diangkat sebagai nilai bersama, di mana anggota dan pengurusan dalam organisasi bersikap proaktif serta setiap individu menganggap keselamatan sebagai tanggungjawab asas [3, 4].



Rajah 3. Membina Budaya Keselamatan yang Kukuh.

Penglibatan dan prestasi keselamatan didorong oleh motivasi serta komitmen untuk melindungi nyawa, aset dan keupayaan operasi, bukannya bergantung kepada penguatkuasaan luaran. Sebagai contoh asas, kepimpinan ditunjukkan melalui dedikasi pemimpin yang sentiasa mengutamakan keselamatan dalam setiap tindakan dan keputusan. Anggota di bawah tanggungjawab mereka pula menyokong usaha ini dengan saling memikul tanggungjawab serta menzahirkan rasa bangga terhadap kerja yang dilaksanakan.

3.2 | Budaya "Tick-Box" dan Impaknya

Walaupun pematuhan menyediakan struktur serta memastikan tanggungjawab, pergantungan yang berlebihan terhadapnya boleh membawa kepada budaya 'tick-box' di mana pencapaian

penunjuk prestasi utama (KPI), keperluan audit dan kejayaan pemeriksaan diberi keutamaan berbanding pengurusan risiko secara sebenar. Hal ini menimbulkan kebimbangan kerana anggota mungkin bertindak hanya atas dasar kewajipan tanpa memahami kepentingan dan risiko yang wujud, sekali gus mengakibatkan sikap leka serta penurunan tahap kewaspadaan. Budaya 'tick-box' menganggap pematuhan sebagai matlamat akhir dan bukannya sebagai usaha untuk mengawal risiko [5]. Mentaliti sebegini boleh melemahkan pemikiran kritis, menjejaskan prestasi keselamatan dan secara asasnya mengurangkan keberkesanan operasi ketenteraan memandangkan ancaman sentiasa berkembang.

Sebagai contoh, taklimat keselamatan induksi yang dijalankan secara tahunan di semua jabatan TUDB sering dilaksanakan semata-mata untuk memenuhi keperluan pematuhan, di mana anggota hadir ke sesi tersebut dan hanya menandatangani senarai kehadiran. Namun demikian, maklumat yang dikongsi tidak semestinya membawa kepada tingkah laku yang lebih selamat di tempat kerja sekiranya tiada penglibatan, pemahaman atau aplikasi yang melangkaui taklimat induksi. Situasi ini menggambarkan budaya 'tick-box' di mana kehadiran direkodkan tetapi pemikiran tidak berubah. Sebaliknya, dalam persekitaran berasaskan komitmen, anggota terlibat secara aktif, mengemukakan soalan dan mengaplikasikan pengajaran yang diperolehi dalam tugas mereka, sekali gus beralih daripada melaksanakan keselamatan sebagai tugas kepada menganggap keselamatan sebagai suatu nilai.

4.0 KAEDAH

Bahagian ini menghuraikan kaedah penyelidikan yang digunakan untuk menilai sikap dan tingkah laku keselamatan dalam TUDB, dengan memberi tumpuan kepada perbezaan antara amalan keselamatan yang didorong oleh pematuhan dan amalan keselamatan berasaskan komitmen.

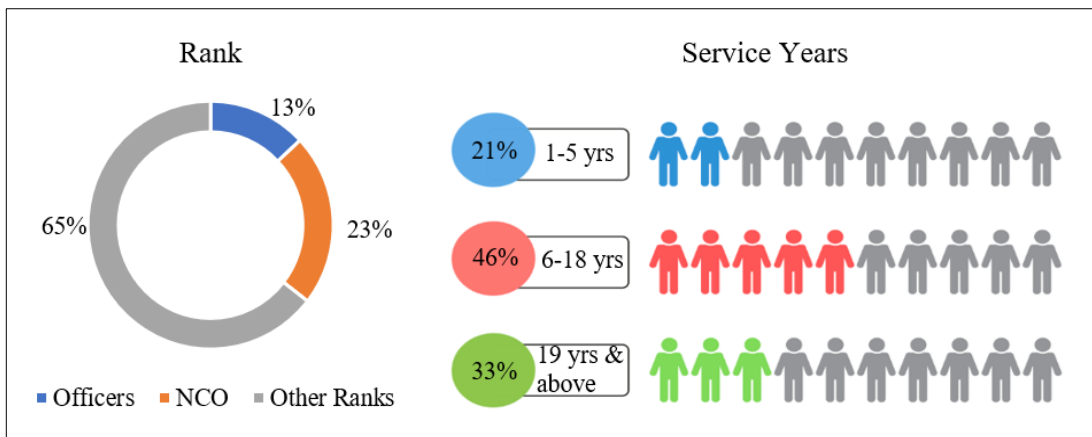
4.1 | Bentuk Kajian Penyelidikan

Kajian ini menggunakan reka bentuk penyelidikan kuantitatif dengan soal selidik berstruktur bagi menilai sikap dan tingkah laku keselamatan semasa dalam TUDB. Pendekatan kuantitatif dipilih kerana ia membolehkan pengukuran persepsi anggota dilakukan secara sistematik, sekali gus memberikan perbandingan yang jelas antara amalan keselamatan berasaskan pematuhan dan amalan keselamatan berasaskan komitmen. Soal selidik tersebut terdiri daripada 11 soalan yang direka untuk mengukur tahap pemahaman peserta terhadap keselamatan serta motivasi mereka dalam mematuhi peraturan keselamatan, di samping menilai sama ada tingkah laku yang ditunjukkan lebih mencerminkan kecenderungan pematuhan atau komitmen. Reka bentuk soal selidik ini menyokong objektif kajian dengan mengenal pasti kecenderungan keselamatan organisasi melalui pengukuran corak merentas pangkat dan tempoh perkhidmatan. Ia juga menyediakan asas untuk menganalisis budaya keselamatan serta mengenal pasti aspek yang memerlukan intervensi atau pengukuhan kepimpinan. Antara soalan utama termasuk sejauh mana peserta menganggap keselamatan penting dalam tugas harian mereka, sama ada mereka percaya bahawa mengekalkan keselamatan merupakan tanggungjawab peribadi, menilai sama ada pemeriksaan keselamatan dilakukan hanya untuk memenuhi keperluan, dan sama ada anggota tetap mematuhi peraturan keselamatan walaupun tiada pengawasan.

4.2 | Peserta Kajian

Seramai 493 anggota yang menyertai secara sukarela, terdiri daripada pegawai, pegawai tidak bertauliah (NCO) dan lain-lain pangkat, telah mengambil bahagian dalam soal selidik ini. Penyertaan tersebut memberikan gambaran yang luas terhadap perspektif dalam organisasi serta membantu mengenal pasti perbezaan yang berpotensi antara jangkaan dasar dengan realiti pelaksanaan. Pangkat dan tempoh perkhidmatan dimasukkan secara sengaja sebagai variabel demografi bagi meneliti sama ada persepsi terhadap keselamatan berbeza mengikut tahap pengalaman kepimpinan dan pendedahan operasi. Kajian ini memberikan ruang untuk analisis terhadap perbezaan yang mungkin wujud antara anggota baharu dengan mereka yang telah berkhidmat lebih lama.

Subtjauk ini membentangkan hasil daripada soal selidik yang dijalankan dalam kalangan anggota TUDB. Ringkasan demografi responden ditunjukkan dalam **Rajah 4**. Pengagihan tersebut memperlihatkan gambaran penyertaan merentas pangkat dan tempoh perkhidmatan.



Rajah 4. Agihan Demografi Responden.

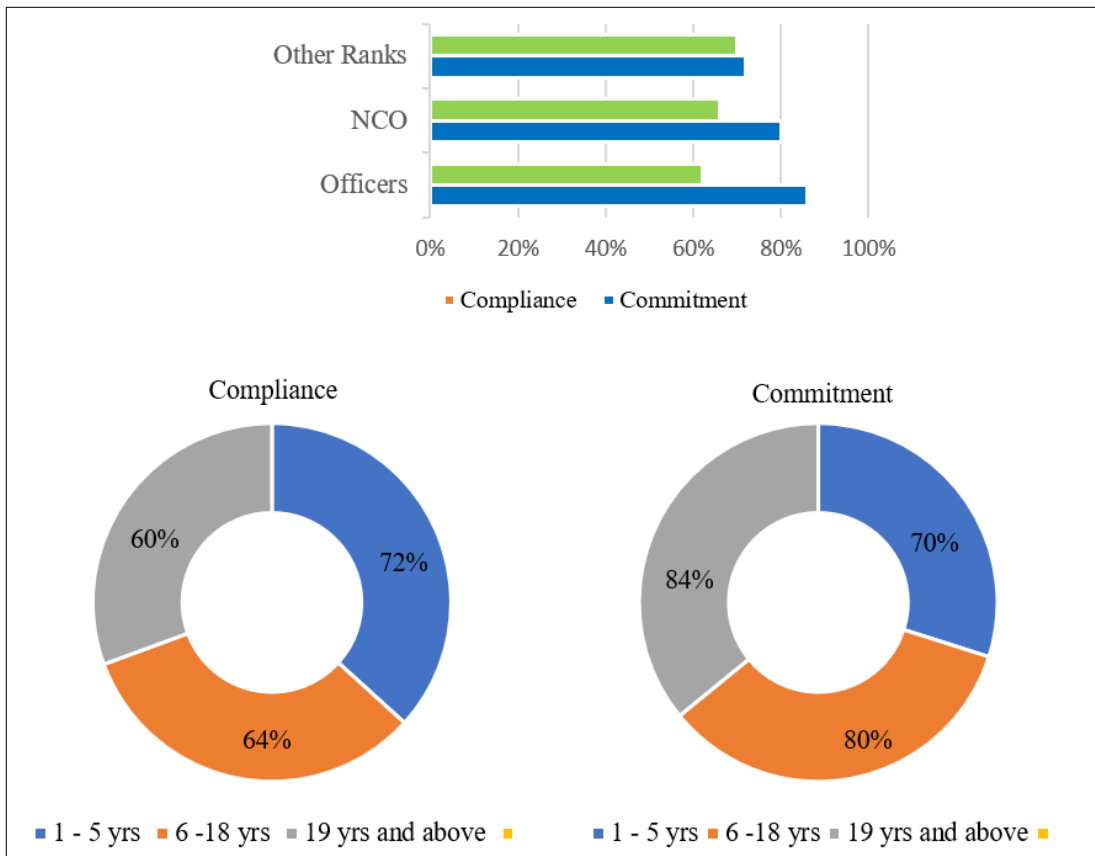
5.0 HASIL DAN PERBINCANGAN

Bahagian ini membentangkan hasil soal selidik serta membincangkan implikasinya berhubung dengan peralihan daripada budaya keselamatan berasaskan pematuhan kepada kaedah yang digerakkan oleh komitmen dalam TUDB.

Soal selidik ini mengenal pasti beberapa petunjuk kukuh mengenai kewujudan budaya keselamatan positif dalam organisasi, di mana responden menunjukkan tahap kesedaran yang tinggi terhadap prosedur keselamatan yang telah ditetapkan. Hal ini mencadangkan bahawa pengetahuan asas keselamatan difahami dengan baik merentas TUDB. Sebagai contoh, dalam Soalan 3 – ‘Sejauh mana anda percaya keselamatan itu penting dalam tugas harian anda?’, seramai 430 daripada 493 responden menilai keselamatan sebagai sangat penting. Selain itu, tahap pematuhan yang tinggi terhadap piawaian operasi menunjukkan bahawa anggota konsisten dalam mengikuti garis panduan dan prosedur, seperti yang ditunjukkan dalam Soalan 10 – ‘Pematuhan anggota terhadap peraturan keselamatan walaupun tiada pengawasan’, di mana 53% responden

sangat bersetuju dan 32% bersetuju bahawa anggota tetap mematuhi amalan keselamatan walaupun tanpa pengawasan. Seterusnya, Soalan 5 – ‘Adakah anda percaya bahawa mengekalkan keselamatan merupakan tanggungjawab peribadi?’ menunjukkan bahawa 95% peserta mengakui keselamatan sebagai tanggungjawab peribadi, sekali gus menyokong penglibatan proaktif dalam mengenal pasti bahaya dan pelaporan yang konsisten. Dapatan ini mencerminkan mekanisme pelaporan yang berfungsi serta persekitaran kerja yang mengiktiraf kepentingan pengenalpastian bahaya.

Hasil kajian menunjukkan asas pematuhan yang kukuh, disokong oleh prosedur yang teratur, pengaruh kepimpinan yang kuat serta sistem pelaporan yang berkesan. Walau bagaimanapun, tingkah laku berasaskan komitmen masih belum seragam di seluruh organisasi seperti yang ditunjukkan dalam **Rajah 5**. Peralihan daripada budaya keselamatan berorientasikan pematuhan kepada budaya yang digerakkan oleh komitmen memerlukan usaha yang menekankan keselamatan psikologi, memperkukuh pemerksaan serta memupuk pemilikan keselamatan pada semua peringkat dalam TUDB.



Rajah 5. Hasil kajian.

Selain daripada itu, respons berkaitan pemeriksaan keselamatan mendedahkan percanggahan yang jelas dalam budaya keselamatan organisasi. Walaupun majoriti anggota menunjukkan

komitmen peribadi yang tinggi terhadap keselamatan, lebih separuh daripada peserta menyatakan bahawa pemeriksaan keselamatan dijalankan semata-mata untuk memenuhi keperluan. Hal ini mencadangkan bahawa pelaksanaan keselamatan dilihat sebagai tugas untuk diselesaikan. Justeru, keadaan ini memperlihatkan kewujudan budaya 'tick-box' dalam mekanisme pemeriksaan dan pelaporan. Walaupun anggota prihatin terhadap keselamatan, mereka menanggap proses keselamatan sebagai sekadar rutin yang dilaksanakan tanpa memahami tujuan dan kepentingannya. Anggota mungkin bermotivasi, namun persekitaran TUDB telah dibentuk oleh jangkaan pematuhan yang ketat, yang lebih menekankan keseragaman prosedur berbanding amalan keselamatan berasaskan risiko.

Beberapa item dalam soal selidik menonjolkan peluang untuk meningkatkan budaya keselamatan berasaskan komitmen. Apabila ditanya mengenai sebab utama mereka mematuhi peraturan keselamatan, sebahagian kecil responden (7%) menyatakan bahawa ia adalah kerana keperluan peraturan, manakala sebilangan lain menyebut faktor ketakutan terhadap tindakan disiplin atau jangkaan daripada pegawai mereka. Hal ini menunjukkan bahawa pematuhan sebahagian anggota masih digerakkan oleh faktor kepatuhan semata-mata. Begitu juga dalam Soalan 4 – 'Saya memahami dengan jelas dasar dan prosedur keselamatan di unit saya', kebanyakan responden melaporkan pemahaman yang jelas, namun terdapat sebilangan kecil yang menunjukkan ketidakpastian, mencerminkan bahawa tidak semua anggota benar-benar menghayati panduan keselamatan. Selain itu, respons terhadap Soalan 9 – 'Pemeriksaan keselamatan dilakukan hanya untuk memenuhi keperluan' menunjukkan bahawa 121 peserta sangat bersetuju dan 142 peserta bersetuju dengan kenyataan tersebut. Penemuan kajian ini memperlihatkan kewujudan budaya 'tick-box' serta menonjolkan aspek yang boleh diperkukuh melalui peningkatan keupayaan, keselamatan psikologi dan penglibatan proaktif bagi mengukuhkan tingkah laku keselamatan berasaskan komitmen merentas semua peringkat dalam TUDB.

Secara lebih menyeluruh, perkara ini memperlihatkan cabaran yang dihadapi oleh TUDB dalam usaha beralih daripada sistem yang menilai prestasi terutamanya melalui indikator pematuhan kepada pengiktirafan bahaya secara proaktif. Walau bagaimanapun, adalah penting untuk diperhatikan bahawa organisasi berada pada landasan yang betul kerana wujudnya komitmen daripada anggota, namun reformasi dalam proses masih diperlukan bagi menyelaraskan amalan dengan nilai keselamatan. Usaha ini boleh dilaksanakan melalui penglibatan kepimpinan, penambahbaikan terhadap kualiti dan tujuan pemeriksaan serta peralihan kepada penilaian berasaskan risiko bagi memastikan sistem organisasi benar-benar menyokong komitmen kukuh yang ditunjukkan oleh anggota lelaki dan wanita TUDB [5].

6.0 KESIMPULAN

Secara keseluruhan, hasil soal selidik memberikan gambaran yang jelas mengenai budaya keselamatan dalam TUDB. Seksyen 2.2 menunjukkan profil demografi peserta, menunjukkan keseimbangan antara pangkat dan tempoh perkhidmatan yang memastikan kepelbagaian perspektif dalam respons. Hasil dan perbincangan dalam Seksyen 3.0 mendedahkan bahawa majoriti anggota menunjukkan pendekatan keselamatan berasaskan komitmen, khususnya dalam aspek tanggungjawab peribadi, motivasi yang mendalam serta pematuhan terhadap prosedur tanpa pengawasan. Walau bagaimanapun, terdapat indikasi tingkah laku berasaskan pematuhan, terutamanya dalam pemeriksaan keselamatan formal, yang mencadangkan bahawa pematuhan

prosedur lebih diutamakan berbanding penglibatan keselamatan secara proaktif. Secara keseluruhan, penemuan ini menunjukkan budaya keselamatan yang positif, namun memaparkan bidang tertentu yang memerlukan pengukuhan serta penglibatan berterusan bagi memperkukuh tingkah laku keselamatan proaktif merentas semua peringkat pangkat dan pengalaman.

7.0 CADANGAN

Berdasarkan hasil soal selidik, beberapa tindakan disyorkan bagi memperkukuh peralihan daripada budaya keselamatan berasaskan pematuhan dalam TUDB. Cadangan ini memberi tumpuan kepada usaha meningkatkan tingkah laku proaktif, memperbaiki sistem organisasi serta memperteguh pengaruh kepimpinan.

Dalam usaha menangani kekurangan ini, TUDB perlu meningkatkan penglibatan kepimpinan. Penglibatan konsisten daripada para pemimpin adalah penting dalam membentuk persepsi keselamatan merentas semua peringkat pangkat [6]. Pemimpin bukan sahaja harus menguatkuasakan piawaian, tetapi turut serta secara aktif dalam perbincangan keselamatan harian, melaksanakan lawatan penglibatan rutin serta mewujudkan peluang untuk dialog terbuka. Apabila pemimpin menunjukkan minat yang tulen terhadap keselamatan melebihi pematuhan prosedur semata-mata, ia mencerminkan isyarat jelas bahawa keselamatan merupakan nilai bersama organisasi dan bukan sekadar keperluan. Bentuk penglibatan ini juga membina keselamatan psikologi, menggalakkan anggota untuk menyuarakan kebimbangan, memberikan maklum balas serta melaporkan sebarang tindakan tidak selamat tanpa rasa takut terhadap akibat.

Selain itu, peningkatan latihan dan pembangunan kompetensi turut disyorkan, khususnya dalam memperkukuh nilai keselamatan yang dihayati berbanding pematuhan prosedur semata-mata. Program latihan seharusnya merangkumi pembelajaran berasaskan senario, perbincangan reflektif serta simulasi praktikal yang membolehkan anggota menunjukkan pemilikan terhadap keselamatan tanpa kehadiran pihak berautoriti. Kaedah ini sejajar dengan objektif soal selidik yang menilai motivasi mendalam dan tanggungjawab anggota, sekali gus merapatkan perbezaan antara komitmen yang dinyatakan dengan amalan yang diperhatikan.

Di samping itu, sistem organisasi perlu diperhalusi bagi menyokong kebolehpercayaan tingkah laku yang berterusan, termasuk pelaksanaan pemeriksaan kualiti rutin terhadap proses keselamatan, menjalankan audit tingkah laku secara berkala serta memastikan maklum balas dapat diakses dan tidak bersifat menghukum [7]. Mekanisme ini berpotensi membantu mengenal pasti isu berulang seperti pemeriksaan keselamatan yang tidak konsisten serta membolehkan tindakan pembetulan diintegrasikan ke dalam perancangan operasi. Pengintegrasian penemuan ini ke dalam semakan prestasi keselamatan yang berterusan akan memastikan penambahbaikan budaya sentiasa dipantau.

Secara umum, cadangan ini bertujuan memperkukuh kekuatan sedia ada organisasi di samping menangani bidang yang masih dipengaruhi oleh tingkah laku berasaskan pematuhan. Dengan memperbaiki struktur penyeliaan, meningkatkan latihan berasaskan tingkah laku serta menginstitusikan mekanisme pemantauan yang kukuh, organisasi dapat memperteguh budaya keselamatan berasaskan komitmen dan memastikan keselarasan yang lebih konsisten antara sikap anggota dengan tingkah laku operasi.

RUJUKAN

- [1] Institute for Inner Leadership Safety Culture. The new language of safety: Creating a culture of care [Internet]. 2025. Available from: https://iilsc.com/wp-content/uploads/2025/05/The_New_Language_of_Safety_Creating_a_Culture_of_Care-op.pdf.
- [2] Kumar V. 5 steps to building a world-class safety culture [Internet]. LinkedIn; 2024. Available from: https://cairnrisk.com/knowledge_bank/decoding-the-safety-culture-ladder-part-1-five-levels-of-organisational-maturity/.
- [3] Cairn Risk Consulting. Decoding the Safety Culture Ladder: Five levels of organisational maturity [Internet]. 2023. Available from: https://cairnrisk.com/knowledge_bank/decoding-the-safety-culture-ladder-part-1-five-levels-of-organisational-maturity/.
- [4] Chong HY, Li X. From compliance to culture: Developing a holistic organizational safety scale for construction firms [Internet]. ResearchGate; 2024. Available from: https://www.researchgate.net/publication/389273540_From_Compliance_to_Culture_Developing_a_Holistic_Organizational_Safety_Scale_for_Construction_Firms.
- [5] Drillster. What is a tick-box culture? [Internet]. 2023. Available from: <https://drillster.com/news/what-is-a-tick-box-culture/>.
- [6] NKD. Safety culture, not safety tick boxes [Internet]. [date unknown] [cited 2025 Dec 01]. Available from: <https://nkd.co.uk/nkd-ideas/safety-culture-not-safety-tick-boxes/>.
- [7] Cydel Pte Ltd. Behavioural-based Safety [slide notes]. Singapore: Lifelong Learning Institute; 2025.

Mengenai Pengarang

► ***Muhammad Amirul Afiq bin Ramli***

Beliau adalah graduan kejuruteraan *Electrical & Electronic* daripada Universiti Teknologi Brunei (UTB) yang menyertai Pusat Penyelidikan dan Perkembangan Sains dan Teknologi (P3ST) pada tahun 2021 dan kini merupakan salah seorang pegawai penyelidik di *P3ST Research & Development* dibawah kluster *Sensor & Mechatronics*.

GAMBARAN KESELURUHAN TEKNOLOGI ADDITIVE MANUFACTURING (3D PRINTING) BAGI INDUSTRI KETENTERAAN

Muhammad Amirul Afiq bin Ramli

*Pusat Penyelidikan dan Perkembangan Sains dan Teknologi (P3ST)
Kementerian Pertahanan*

ABSTRAK

Kertas ini memberikan gambaran keseluruhan bagi 3 jenis teknologi yang sering digunakan bagi Additive Manufacturing (AM) iaitu Material Extrusion, Vat Photopolymerization dan Powder Bed Fusion. Kegunaan AM dalam bidang aeroangkasa (aerospace), angkasa (space), perubatan (medical), pembangunan (construction) dan ketenteraan juga dibincangkan dalam kertas ini. Walau bagaimanapun, ulasan yang mendalam diberikan kepada kegunaan teknologi ini dalam bidang ketenteraan khususnya sebagaimana yang telah digunakan oleh angkatan tentera Amerika Syarikat (AS) dan United Kingdom (UK). Selain daripada kegunaan, kertas ini juga memberikan pandangan terhadap cabaran yang berkaitan dengan teknologi AM, pandangan kearah masa depan (future outlook) dan potensi bagi penggunaan teknologi AM ini dalam Industrial Revolution 5.0.

Kata kunci:

Additive Manufacturing, 3D Printing, FDM, SLS, SLM, EBM, Military, Industrial Revolution 5.0, Customization

1.0 PENDAHULUAN

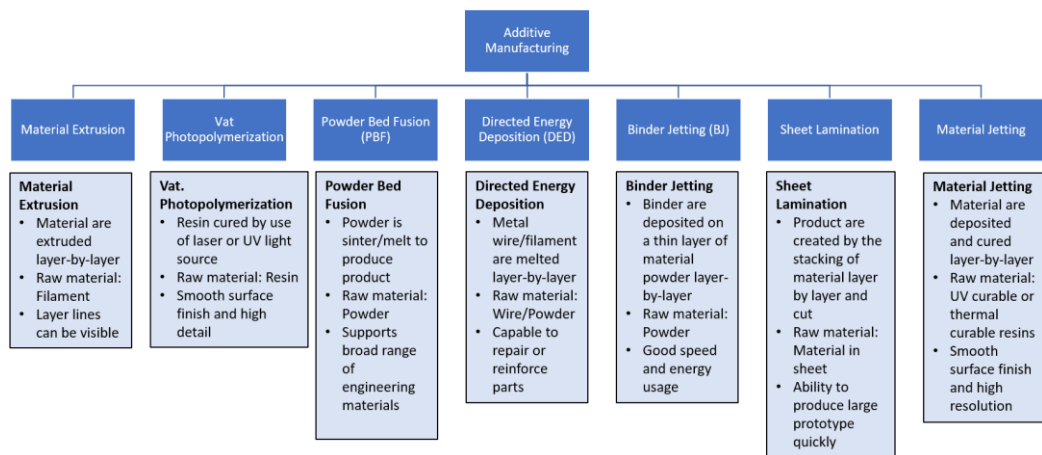
Teknologi AM ataupun juga dikenali dengan *3D Printing* bukanlah satu teknologi yang baharu. Walaupun Hideo Kodama (daripada Jepun) pertama kali menghuraikan *photopolymer-based rapid prototyping system* pada tahun 1980-1981 [1] tetapi ianya pertama kali dikomersialkan oleh Charles Hull pada tahun 1983 dan di-patenkan pada tahun 1986 [2]. Teknologi AM ini ialah berbentuk *Stereolithography (SLA)* dan ianya berdasarkan penggunaan *photosensitive UV resin*. Sehingga kini, terdapat berbagai macam bahan yang telah tersedia untuk digunakan sebagai bahan bagi teknologi AM yang meliputi bahan plastik hingga bahan besi dan bahan komposit [3]. Bahan-bahan ini juga meliputi kegunaan dari berbagai industri termasuk penggunaan biasa dan industri [4]. Penelitian yang mendalam diberikan khususnya dalam bidang ketenteraan khususnya dari segi kebolegunaan dan penerimaan teknologi AM ini. Perbincangan juga meliputi cabaran yang

datang bersama teknologi AM ini, pandangan masa hadapan and potensi kegunaan AM dalam industri.

2.0 TEKNOLOGI 3D PRINTING

Sejak 1980, industri AM mula bercabang dengan penambahan berbagai teknologi baharu seperti *Fused Deposition Modelling (FDM)* dicipta dan dipaten oleh Scott Crump pada 1989, dikomersialkan pada 1992 oleh Stratasys dan *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)* yang dipatenkan pada 1994 dan dikomersialkan pada 1995.

Sehingga hari ini, menurut *ASTM F42 Standard* [6], kategori AM ialah: *Material Extrusion*, *Vat Photopolymerization*, *Powder Bed Fusion (PBF)*, *Directed Energy Deposition (DED)*, *Binder Jetting (BJ)*, *Sheet Lamination* dan *Material Jetting*. Walau bagaimanapun, teknologi yang selalu digunakan pada masa ini ialah *Material Extrusion* bagi market *mainstream*, *Vat Photopolymerization* bagi market industri dan *mainstream* dan PBF bagi penghasilan gred industri yang dimana ianya menyumbang kepada lebih daripada 32.1% daripada keseluruhan pasaran AM [7].



Rajah 1. Gambaran keseluruhan teknologi *Additive Manufacturing*.

Material Extrusion

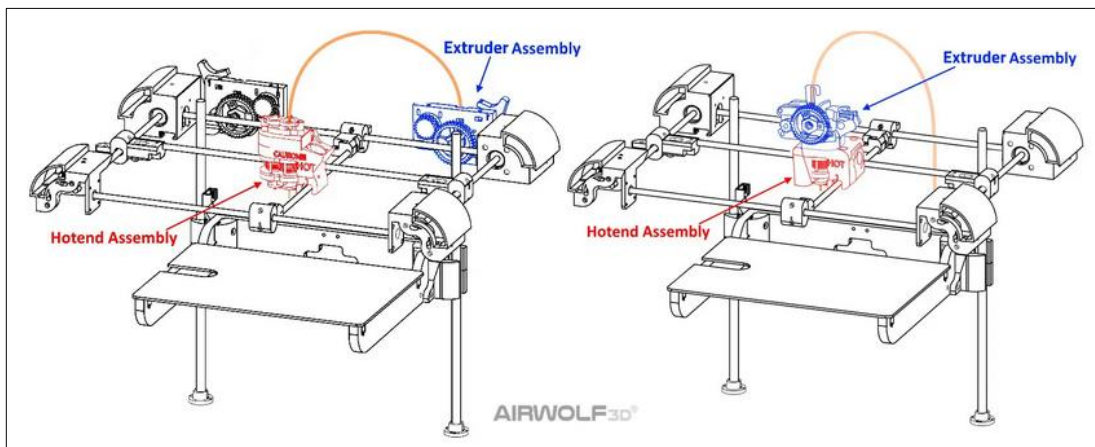
Teknologi *Material Extrusion* terutamanya *Fused Deposition Modelling (FDM)* ialah salah satu teknologi yang kos efektif dan mudah diakses bagi perbagai kegunaan.

Bagi FDM ataupun juga dikenali dengan *Filamen Fused Fabrication (FFF)*, bahan yang digunakan bagi *printing* tersebut ialah dalam bentuk *filament* yang dimana ianya akan disambungkan kepada *printer head* untuk dicairkan dan dikeluarkan melalui *nozzle* lapisan demi lapisan keatas *build plate*. Terdapat 2 jenis *FDM printer* iaitu *Bowden Type* dan *Direct Drive*. Ini merujuk kepada cara *filament* disambungkan ke *printer head*.

Printer jenis *Bowden* ialah salah satu jenis yang selau ditemukan. Printer jenis *Bowden* ini mempunyai *extruder motor* (motor yang akan menyambungkan *filament* kepada *print head*) ditempatkan diantara *printer feed line* dan tidak dipasang pada *print head* printer tersebut. Ini membolehkan *print head* tersebut untuk menjadi lebih ringan dan memerlukan *gantry* yang tidak seberapa kukuh dan menjadikan penyediaan yang mudah dan lebih murah. Ini bermaksud printer jenis *Bowden* akan memerlukan tiub *PTFE* yang lebih panjang daripada *extruder* menuju *print head* berbanding printer jenis *Direct Drive* [8,9].

Printer jenis *Direct Drive* pula ialah berlawanan daripada printer jenis *Bowden*. Printer jenis *Direct Drive* mempunyai *extruder motor* dipasangkan pada *print head*. Dengan itu, ianya menyebabkan printer tersebut untuk menjadi lebih berat dan lebih mahal [8,9]. Dengan jarak yang tidak seberapa jauh diantara *extruder motor* dan *print head*, printer jenis *Direct Drive* mempunyai kelebihan dengan mempunyai lebih banyak jenis bahan *printing* (*printing material*) yang dapat digunakan berbanding printer jenis *Bowden*. Jenis bahan ini berupa jenis *PLA* sehingga bahan gred industri seperti *PEEK*.

Bagi teknologi *Material Extrusion*, teknologi ini dianggap yang paling mudah dan memerlukan ruang minimum yang menyebabkan ianya digunakan secara meluas bagi industri dan pengguna. Dengan penyediaan yang mudah, jenis *printer* ini juga mempunyai kelemahan iaitu dari segi kekuatan bahagian yang dihasilkan yang dimana ianya mempunyai ciri-ciri *anisotropic*. Pengguna *printer* ini mestilah mengambil kira kedudukan bahagian yang di hasilkan (*printing orientation*) untuk memastikan kekuatan yang cukup bagi kegunaan [10]. Dengan *printing orientation* terdapat lagi satu isu yang dihadapi oleh teknologi *material extrusion* ini, iaitu keperluan untuk menggunakan/menghasilkan *support* bagi bahagian yang terapung. Penghasilan *support* ini boleh mengambil masa sehingga separuh ataupun lebih, daripada keseluruhan *printing time* tertakluk kepada bahagian yang dihasilkan dan orientasi bahagian tersebut [11].



Rajah 2. Perbezaan diantara *FDM printer* jenis *Bowden type* (kiri) dan *Direct Drive* (kanan) [8].

Vat Photopolymerization

Vat Photopolymerization ialah salah satu jenis teknologi AM yang juga kini digunakan. Vat Photopolymerization ini terbahagi kepada 3 jenis iaitu: Stereolithography (SLA), Digital Light Processing (DLP) dan Masked Stereolithography (MSLA) [12].

Vat Photopolymerization menggunakan sumber cahaya UV untuk membekukan resin yang sensitive kepada cahaya UV. Resin ini dibekukan lapisan demi lapisan untuk menghasilkan produk yang diinginkan.

SLA ialah teknologi yang terpanjang lama dan ianya menggunakan sumber laser untuk membekukan resin daripada resin pool dengan menjejak cross-section bahagian yang ingin dihasilkan lapisan demi lapisan. Ini menghasilkan bahagian yang mengambil masa yang lama berbanding jenis Vat Photopolymerization yang lain [13]. DLP pula menggunakan light projector untuk membekukan resin dan keseluruhan lapisan dapat dibekukan dalam satu masa menjadikan teknologi ini yang terpanjang diantara 3 jenis dalam Vat Photopolymerization. Kecepatan ini amat ketara bagi penghasilan bahagian yang mempunyai ukuran besar. MSLA pula menggunakan skrin LCD untuk menutup bahagian daripada cahaya UV bagi menjejak cross-section bahagian yang diinginkan. Membandingkan ketiga-tiga jenis teknologi ini, teknologi MSLA menawarkan perincian yang cemerlang dan ketepatan dalam XY beresolusi 25 ke 75 mikron bagi printer yang berkemampuan tinggi dan teknologi ini dari aspek kecepatan adalah diantara SLA dan DLP [14].

Bahagian yang dihasilkan dengan Vat Photopolymerization mempunyai kemas yang licin (smooth finish), garisan lapisan yang minimal dan juga boleh menghasilkan bahagian yang transparent. Teknologi ini berkebolehan untuk menghasilkan bahagian yang mempunyai butiran (details) yang tinggi disebabkan resolusinya yang tinggi dan juga menawarkan dimensional accuracy yang lebih baik berbanding FDM. Walaupun resin biasa biasanya rapuh (brittle), terdapat juga resin yang lebih baik dan malahan terdapat juga resin yang mempunyai gred industri yang menawarkan sifat mekanikal yang lebih baik. Akan tetapi, bahagian yang dihasilkan dengan teknologi ini akan memerlukan post-processing iaitu memerlukan pendedahan kepada cahaya UV secara berpanjangan untuk memperolehi stabiliti dan kekuatan sepenuhnya [15]. Resin UV ini juga akan mengalami kerosakan dalam jangka masa yang panjang. Resin ini mestilah dikendalikan dengan betul dan memerlukan pembuangan yang betul kerana cecair resin ini dapat menyebabkan iritasi [4,16].



Rajah 3. Contoh *transparent print* yang dihasilkan dengan *Vat Photopolymerization* [12].

Powder Bed Fusion

Teknologi AM yang lainnya ialah *Powder Bed Fusion (PBF)*. Teknologi PBF ini menggunakan bahan yang berbentuk serbuk (*powder*). Terdapat 3 jenis PBF iaitu: *Selective Laser Sintering (SLS)*, *Selective Laser Melting (SLM) / Direct Metal Laser Sintering (DMLS)* dan *Electron Beam Melting (EBM)*.

PBF berfungsi dengan menyediakan lapisan serbuk yang nipis pada *build plate* dan sumber tenaga akan menggabungkan secara selektif untuk menjejak bentuk yang diinginkan lapisan demi lapisan.

Untuk teknologi SLS, ianya menggunakan sumber laser untuk mengabungkan (*sinter*) serbuk yang biasanya berupa Nylon dalam persekitaran yang dipenuhi dengan Nitrogen [17]. Bagi penghasilan bahagian yang diperbuat daripada besi, teknologi SLM/DMLS menggunakan laser fiber yang berkuasa tinggi untuk mencairkan serbuk besi tersebut sepenuhnya dalam persekitaran yang dipenuhi dengan Argon atau Nitrogen. Serbuk besi yang selalu digunakan meliputi serbuk jenis reaktif seperti *Titanium* dan jenis tidak reaktif seperti *Aluminum* dan *Stainless Steel*. Bagi EBM pula, konsep yang sama dilakukan, akan tetapi, EBM menggunakan *high-powered electron beam* dan *build chamber* yang bersuhu tinggi dan dalam keadaan vakum. Dengan *build chamber* yang bersuhu tinggi dan keadaan vakum tersebut, ianya akan mengurangkan *residual stress* dan *thermal gradient* dalam bahagian yang dihasilkan. Ini menjadikan teknologi EBM untuk lebih sesuai bagi menghasilkan bahagian yang diperbuat daripada jenis besi yang reaktif seperti *Titanium* [18].

3.0 BAHAN TEKNOLOGI AM

Bahan mentah bagi teknologi AM adalah tertakluk kepada teknologi yang digunakan. Bahan mentah tersebut ialah *filament* bagi *Material Extrusion*, serbuk bagi PBF dan resin bagi Vat Photopolymerization.

Bahan gred pengguna (Consumer grade material)

Memandangkan teknologi FDM ialah teknologi yang digunakan secara meluas dalam gred pengguna [7], *filament* mewakili jenis bahan mentah yang selalu ditemukan dalam AM. *Filament* FDM terbahagi kepada 2 bahagian iaitu gred pengguna (*Consumer Grade*) dan gred kejuruteraan (*Engineering Grade*). *Filament* gred pengguna adalah mudah didapati, tersedia dan mudah untuk digunakan bagi penghasilan bahagian untuk kegunaan biasa. Gred kejuruteraan pula adalah lebih mahal dan memerlukan suhu yang tinggi akan tetapi menawarkan ciri-ciri mekanikal yang lebih baik seperti peningkatan dalam kekuatan bahan dan keupayaan untuk menempuhi suhu yang tinggi.

Bagi *filament* gred pengguna, jenis *filament* yang selalu digunakan ialah *Polylactic Acid (PLA)*, *Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG)* dan *Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)*. PLA menawarkan *printability* yang baik (*printing temperature 180°C to 220°C*) [19], kos efektif dan *biodegradable* dalam pelupusan industri [20]. *Filament* jenis ini sesuai bagi menghasilkan bahagian yang tidak memerlukan kekuatan dan tidak terdedah kepada suhu panas yang tinggi. Kegunaan ini termasuk bagi kegunaan perhiasan dalam rumah dan bahagian prototaip yang tidak berfungsi. PETG mempunyai persamaan dengan PLA dari aspek kemudahan untuk digunakan hanya dengan sedikit peningkatan pada suhu panas yang diperlukan untuk mencairkan *filament* tersebut iaitu 220°C ke 250°C [19]. PETG menawarkan peningkatan dalam *chemical resistance*, daya tahan, *temperature resistance*, dan kekuatan berbanding PLA. Bahan ini sesuai bagi menghasilkan bahagian yang berfungsi dan komponen mekanikal. Manakala bagi ABS pula, ianya memerlukan suhu panas yang lebih kurang sama dengan PETG (220°C ke 250°C) [19] akan tetapi memerlukan pengawalan suhu panas yang lebih teliti bagi mengelakkan/mengurangkan *warping* yang dimana bahagian yang dihasilkan tersebut tidak melekat pada *print bed*. Walaupun dengan keperluan tambahan tersebut, ABS menawarkan kekuatan mekanikal dan ketahanan panas yang lebih baik daripada kedua *filament* sebelumnya dan sememangnya sesuai bagi kegunaan bahagian yang berfungsi dan tahan.

Teknologi kedua yang digunakan secara meluas selain daripada FDM ialah Vat Photopolymerization. Vat Photopolymerization menggunakan resin sebagai bahan mentah [15]. Terdapat berbagai jenis resin yang selalu digunakan dan berbagai warna tersedia. Resin yang biasa ini sememangnya lebih rapuh dan selalunya digunakan untuk hiasan dalaman, patung-patung dan berbagai barangan lainnya yang memerlukan butiran yang tinggi dan tidak memerlukan kekuatan.

Bahan gred kejuruteraan (Engineering Grade Material)

Bagi FDM, terdapat beberapa jenis bahan gred kejuruteraan yang tersedia. Bahan yang selalu digunakan ialah *Polyamide (PA)* atau lebih dikenali dengan *Nylon*. *Filament Nylon* memerlukan suhu panas melebihi 250°C yang dimana ini kebanyakannya ialah had tertinggi bagi mesin *printer* jenis pengguna (*consumer grade printer*). *Filament* jenis *Nylon* ini khususnya PA6 ini mempunyai sifat lebih *hygroscopic* (menyerap kelembapan daripada persekitaran) [21] berbanding ABS dan

PETG yang bermaksud *filament* PA6 ini memerlukan tempat penyimpanan yang lebih ketat dengan penyerap lembab (*desiccation*) bagi mengurangkan *filament* tersebut menyerap kelembapan berlebihan. Dengan keperluan yang agak tinggi seperti suhu panas yang tinggi dan pengendalian yang betul, *filament Nylon* ini menawarkan ciri-ciri mekanikal yang lebih baik seperti kekerasan, ketahanan, fleksibiliti (*flexibility*) dan ketahanan daripada hentakan (*impact resistance*) dibandingkan ABS dan PETG.

Contoh lain bagi bahan gred jurutera (*engineering grade*) ialah *Polycarbonate (PC)*, *Polyether Ether Ketone (PEEK)* dan *Ultem 9085 (PEI:PC)*. *Filament* jenis PC ini hanya dapat dihasilkan dengan mesin (*printer*) gred pengguna yang dinaik taraf dan mesin gred industri. *Filament* jenis PC ini menawarkan *tensile strength* yang tinggi berbanding *filament* gred pengguna, *electrical insulation* yang cermerlang dan *impact resistance* yang tinggi. *Filament* jenis PEEK dan PEI:PC pula hanya dapat digunakan pada mesin yang ber-gred insustri memandangkan *printing temperature* yang diperlukan melebihi 350°C, *heated bed temperature* melebihi 120°C (tertakluk kepada bahan yang digunakan) dan memerlukan *heated enclosed chamber* [22]. Dibandingkan dengan *filament* gred pengguna, *filament* gred industri (PEEK & PEI:PC) ini sememangnya lebih sukar untuk digunakan akan tetapi, *filament* gred industri ini menawarkan *temperature resistance* yang tinggi (suhu 260°C yang berterusan bagi PEEK) ataupun *flame retardancy* bagi PEI:PC dan *strength-to-weight ratio* yang cermerlang yang menjadikan bahan-bahan ini sesuai untuk digunakan secara meluas di industri *aerospace* dan perubatan.

Bagi teknologi PBF, kesemua bahan yang digunakan adalah bahan gred kejuruteraan (*engineering grade material*). Sebagai contoh bagi SLS, bahan yang selalu digunakan ialah PA12, PA11 dan *Thermoplastic Polyurethane (TPU)*. Bahan-bahan ini ialah sejenis polimer yang menawarkan *strength* yang lebih baik, ketepatan dimensi (*dimensional accuracy*) yang baik, ketahanan, dan *flexibility* yang baik berbanding bahan gred pengguna. Ianya selalu digunakan dalam prototaip yang berfungsi (*functional prototupe*), komponen dron, alat pelindungan (*protective gear*), *gasket*, *seal* dan lain-lain lagi. Bagi penghasilan menggunakan bahan besi, SLM biasanya akan menggunakan *Titanium Alloy (Ti6Al4V)* [23], *316L Stainless Steel* dan *Aluminum Alloy (AlSi10Mg)*. Manakala bagi EBM pula, bahan yang biasanya digunakan ialah *Titanium Alloy (Ti6Al4V)*, *Cobalt Chrome* dan *Nickel Alloy (Inconell 718)*. Kesemua bahan ini biasanya dapat digunakan di industri *aerospace*, *automotive*, perubatan dan industri-industri lainnya.

Bagi *Vat Photopolymerization*, resin ber-gred kejututeraan (*Engineering grade resin*) juga tersedia seperti *tough resin*, *high temperature resin* dan *ceramic filled resins*. Resin ini telahpun digunakan dalam industri *aerospace* dan *automotive* khususnya bagi menghasilkan prototaip, *tooling* dan penghasilan berskala kecil. Salah satu contoh bagi penggunaan ini ialah penggunaan *high temperature resin* sebagai acuan untuk *injection molding*. Penghasilan berskala kecil kadang kala digunakan untuk menggantikan penghasilan secara tradisional di mana *customization* ialah satu keperluan dan bahagian ini biasanya digunakan pada tempat-tempat yang bukan kritikal.

4.0 LANGKAH UMUM BAGI TEKNOLOGI AM

Tanpa mengira jenis teknologi yang digunakan, aliran kerja (*workflow*) bagi proses penghasilan bahagian dengan menggunakan teknologi AM ini adalah sama. Secara umum, proses *printing* akan

memerlukan pembuatan reka bentuk melalui perisian *Computer Aided Design (CAD)*, *Slicing*, *Printing* dan *Post-Processing* [24,25].

Bagi reka bentuk melalui CAD, terdapat beberapa cara untuk menghasilkan model 3D tersebut. Cara pertama ialah dengan membuat reka bentuk menggunakan perisian CAD berdasarkan lukisan ataupun berdasarkan kegunaan bahagian tersebut. Terdapat banyak jenis perisian yang dapat digunakan untuk menghasilkan model 3D ini dan ini termasuk perisian Solidwork, Fusion 360 dan Sketch Up. Sebahagian daripada perisian CAD ini mempunyai fungsi *iterative optimization algorithm* yang berkeupayaan untuk mengurangkan bahan yang diperlukan dengan tetap mengekalkan kekuatan dan mengurangkan masa yang diperlukan untuk menghasilkan bahagian tersebut memandangkan bahan yang diperlukan adalah berkurang [26,27].

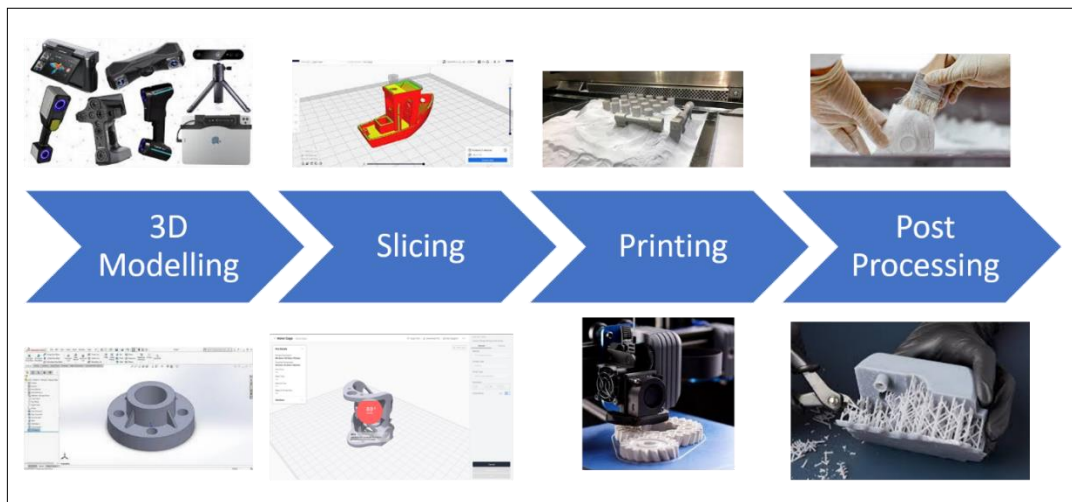
Cara lain yang kini digunakan secara meluas juga ialah dengan penggunaan khidmat Kecerdasan Buatan (*Artificial Intelligence*) untuk menukar gambar untuk menjadi model 3D. Contoh perkhidmatan ini ialah melalui *Meshy AI*, *3D AI Studio*, *Tripo AI* dan *Magic 3D*. Model 3D yang dihasilkan melalui perkhidmatan Kecerdasan Buatan akan memerlukan pengubahsuaian (*post processing*) ataupun *refinement* untuk memastikan ketepatan dan fungsi.

Cara terakhir bagi menghasilkan model 3D ini ialah dengan menggunakan *3D Scanner*. Peralatan ini mengimbas benda yang sedia ada dan akan menghasilkan fail 3D yang akan dapat dihasilkan semula dengan menggunakan *3D Printer* selepas pelaksanaan *post-processing*. Keperluan *post-processing* ini ialah untuk menghalusi dan menghasilkan fail *mesh* yang menyerupai barang yang di imbas. Secara tambahan, imbasan 3D juga dapat dihasilkan dengan menggunakan peralatan yang dilengkapi LIDAR dengan menggunakan perisian yang tertentu seperti telefon pintar (*smartphone*) yang dilengkapi dengan LIDAR. Walau bagaimanapun, ketepatan dan resolusi yang diperolehi daripada peralatan yang dilengkapi LIDAR ini tidaklah sama dengan hasil yang didapatkan melalui *3D Scanner* sebenar [28].

Slicing ialah perkataan yang digunakan dalam AM untuk mengubah fail model 3D untuk menjadi kod yang dapat difahami oleh mesin *printer*. Perisian *licer* ini akan menghasilkan keterangan lapisan demi lapisan untuk kegunaan mesin *printer* bagi menghasilkan bahagian yang ingin dihasilkan. *Printer* biasanya mempunyai perisian *licer* tersendiri dan terdapat *licer* yang *open-source* dan terdapat *licer* yang *proprietary*. Perisian *licer* yang *proprietary* kebiasaannya memerlukan lesen dan berkemungkinan memerlukan perhubungan dengan *internet* untuk *verification*. Terdapat juga perisian *licer* yang dioperasikan dalam talian (*cloud based slicer*) yang tidak memerlukan pemeroses model dalam komputer tempatan. Sebahagian daripada *cloud-based slicer* juga menawarkan fungsi pengawalan *printer* daripada dalam talian bagi memudahkan proses tersebut secara amnya.

Setelah proses *slicing*, fail/kod yang dihasilkan tersebut akan dipindahkan kepada *printer* dan ini boleh saja melalui berbagai cara iaitu USB, *internet* ataupun *cloud*. Jangka masa bagi menghasilkan bahagian tersebut (*printing time*) tertakluk kepada ukuran and kesulitan model tersebut. Setiap model *printer* mempunyai kebolehan tersendiri terutama pada kecepatan dan sebahagian bahan mentah (*raw material*) hanya dapat digunakan oleh *printer* tertentu dan pada kecepatan tertentu yang selalunya menghadkan kecepatan *printer* tersebut. Kebiasaannya, *printing* akan mengambil masa se-cepat beberapa menit sehingga beberapa jam tertakluk kepada bahagian yang dihasilkan.

Setelah *printing* selesai, *post-processing* selalunya akan diperlukan. Tertakluk kepada teknologi yang digunakan, pembuangan resin yang terpakai ataupun pembuangan serbuk bahan yang terpakai akan dapat dilaksanakan sejurus *printing* selesai dilaksanakan. Langkah selanjutnya ialah pembuangan *support*, *heat treatment/UV curing* dan *surface finish*. Pembuangan *support* dapat dilaksanakan dengan cara *tear away* daripada bahagian yang dihasilkan ataupun dengan menggunakan peralatan seperti *pliers*, *cutters* ataupun *grinder* khususnya bagi *prints* besi yang mempunyai *support* yang susah untuk dibuka. *Heat treatment* juga diperlukan bagi *print* besi bagi mencapai *mechanical properties* dan melepaskan *internal-stresses*. Bagi *print* yang menggunakan resin, *UV Curing* juga diperlukan untuk memastikan resin itu akan keras secara sepenuhnya. Bagi *surface finish*, bahagian yang dihasilkan kebiasaannya akan memerlukan *sanding*, *polishing* dan pengecatan ataupun dilapis (*coated*) bagi memperbaiki penampakan, kualiti permukaan ataupun tambahan *properties* seperti *wear resistance* ataupun *corrosion protection*.



Rajah 4. Langkah biasa dalam proses AM.

5.0 KEGUNAAN 3D PRINTING

Sehingga hari ini, teknologi AM telahpun di cuba dan digunakan dalam beberapa industri seperti *Aerospace*, pembinaan, angkasa, perubatan dan pertahanan.

Industri Aerospace

Sebagai contoh bagi kegunaan teknologi AM di dalam industri *aerospace* ialah penggunaan dalam penghasilan panel pesawat A320 oleh Airbus dimana panel ini menunjukkan 15% [29,30] lebih ringan berbanding panel biasanya. Commercial Aircraft Cooperation of China (COMAC) juga telah menggunakan teknologi *3D Printing* bagi penghasilan bahagian diperbuat daripada Titanium bagi pesawat C919 mereka [31]. Kedua syarikat ini melaporkan yang penggunaan *3D Printing* telah mengurangkan berat keseluruhan pesawat yang dimana ianya juga membantu dengan *fuel efficiency* pesawat tersebut.

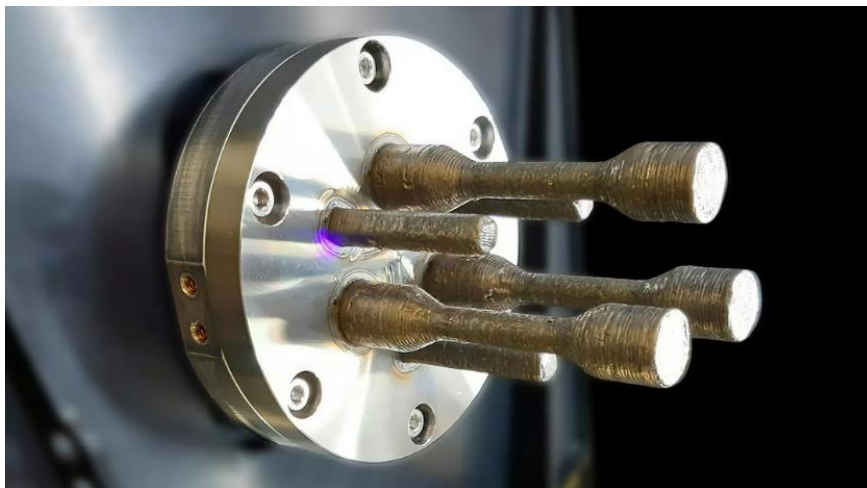
Airbus sekali lagi bersama Safran telah menggunakan *3D Printing* untuk mengumpulkan beberapa bahagian daripada roket Ariane 6 menjadi satu komponen yang dimana ianya membantu untuk mengurangkan masa pembuatan (*manufacturing time*) [32] dan Space X juga telah dilaporkan menggunakan teknologi DMLS bagi menghasilkan komponen untuk enjin Raptor [33] (sejenis enjin yang terasang di kapal angkasa Starship). Space X telah melaporkan yang berat enjin tersebut adalah 30% lebih ringan dan masa pembuatan yang lebih baik. Baru-baru ini, Boeing juga telah menggunakan teknologi AM ini untuk memperbaiki waktu pembuatan bagi satelit kecil termasuk komponen radio yang melebihi 1,000 komponen pada setiap satelit tentera (*Military Wideband Global Satcom*) dan kini merancang untuk menggunakan teknologi AM ini bagi penghasilan satelit besar yang termasuk satelit kelas-702 [34].

Selain daripada penghasilan (*manufacturing*), teknologi AM ini juga dapat digunakan bagi memperbaiki dalam industri *aerospace*. Bahagian yang rosak akan dapat diperbaiki daripada ianya dibuang (*scrapped*). Teknologi AM ini membolehkan kerja pembaikan pada bahagian yang rosak dimana ianya akan memberi impak positif kepada penjimatan kos [35].

Industri Angkasa

Bagi industri angkasa, terdapat juga beberapa kegunaan yang menggunakan *3D Printing*, seperti yang dinyatakan sebelumnya, ianya telah digunakan dalam pembinaan enjin bagi roket dan ianya dapat menghasilkan bahagian yang lebih ringan. Selain daripada itu, Airbus bersama European Space Agency (ESA) telah menghantar *3D Printer* besi ke *International Space Station (ISS)* dimana ianya telah berjaya menghasilkan bahagian yang berukuran 9cm x 5cm dengan menggunakan teknologi Direct Energy Deposition (DED) [36]. Demonstrasi teknologi ini akan membantu mencapai impian manusia untuk menerokai alam dalam perjalanan yang mengambil masa panjang dimana alat/bahan pengantian dapat dihasilkan secara *on-demand* tanpa memerlukan untuk menunggu pembekalan ulang.

Dengan teknologi ini, NASA juga menerokai bagi kegunaan untuk mengadakan keberadaan yang berpanjangan di bulan ataupun di planet lain. Redwire Regolith telah berjaya mendemonstrasikan penghasilan *printing* dengan menggunakan simulasi *moon dust* dalam keadaan *microgravity* [37] sebagai bahan binaan untuk habitat di bulan. Ini menunjukkan yang terdapat kemungkinan untuk membina habitat di bulan dengan hanya 10% daripada bahan tersebut dibawa daripada bumi dan selebih 90% dengan menggunakan bahan daripada bulan



Rajah 5. *Printing* menggunakan besi yang pertama dihasilkan di ISS [36].

Industri Perubatan

Dalam bidang perubatan, jenis bahan yang digunakan mestilah mempunyai *biocompatibility* bagi memastikan yang ianya dapat diterima oleh badan. Sebagai contoh bahan yang *biocompatible* yang sering digunakan ialah Ti6Al4V [38] yang dapat dihasilkan dengan menggunakan teknologi PBF.

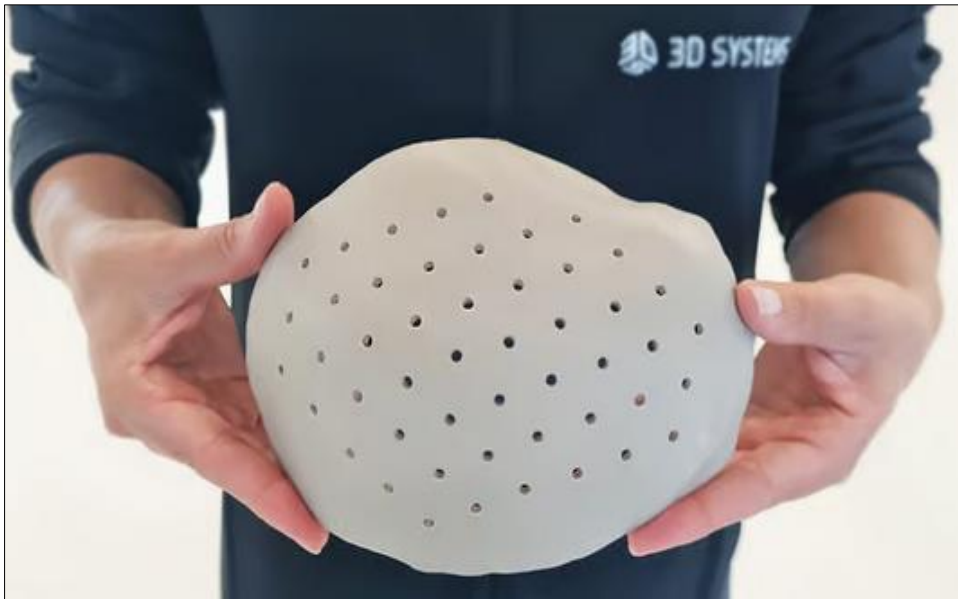
Baru-baru ini, Auxilium Biotechnologies telah menggunakan *3D Printer* di *ISS* untuk menghasilkan 8 peralatan perubatan yang dapat diimplan, sekaligus menjadikannya implan perubatan pertama yang dihasilkan secara berskala dalam keadaan *microgravity* [39]. Dalam kata lain, kulit dan *cartilage* juga telah berjaya dihasilkan di bumi [40] yang dijangka akan dapat mempercepat pemulihan luka dan memperbaiki rawatan yang sukar. Dalam aspek penghantaran ubat, SPRITAM telahpun mencipta sejenis pil dihasilkan dengan *3D-Printed* yang mudah hancur dalam masa 11 saat dengan menggunakan sedikit air. Ini dijangka akan membantu pesakit dengan masalah menelan. Pil ini telahpun diberikan kebenaran untuk digunakan oleh FDA.

3D Printing ini juga telah digunakan dalam industri perubatan bagi pembuatan implan khusus bagi pesakit sebagai contoh *VSP PEEK Cranial Implants* yang ianya ialah implan dicipta daripada bahan PEEK yang pertama di dunia untuk di berikan kebenaran oleh FDA. Implan ini digunakan bagi *cranioplasty procedure* dan sehingga hujung tahun ini, teknologi ini telah menyumbang kejayaan kepada 40 prosedur [42]. Dalam pergigian pula, teknologi *3D Printing* ini juga digunakan untuk membuat *crown* dan *bridges* [43]. Dalam *Orthopedic*, implan *Titanium* yang di *3D-Printed* telah digunakan untuk menggantikan tulang yang patah [44]. Dalam bidang prostetik, prostetik yang khusus dihasilkan dengan menggunakan *3D-Printing* mempunyai peningkatan dalam *fitting* dan telah menjadinya lebih kos efficient [45]. Sebagai contoh bagi penggunaan ini telah dilaksanakan oleh *Department of Veterans Affairs* dimana *3D Printing* telah digunakan untuk memberikan penjagaan prostetik lanjutan untuk memenuhi keperluan pesakit [46].

Baru-baru ini, Jerudong Park Medical Centre (JPMC), Brunei, telah mencatatkan peristiwa penting dalam bidang pergigian dengan pelancaran sistem *Computer Aided Design (CAD) / Computer Aided*

Manufacturing (CAM) dan *clear aligner treatment* yang menggunakan pengimbas alat digital, *computer aided design* dan *3D-Printing*. Ini bermaksud peningkatan dalam penjagaan gigi dan kemudahan dalam pilihan *orthodontic* [47].

3D Printing ini juga telah digunakan sebelumnya bagi membantu keperluan yang melonjak semasa pandemic. Semasa pandemik COVID-19 *3D-printing* digunakan bagi penghasilan alat perlindungan diri seperti *respirator*, *face shield* dan *face masks* [48]. *Fleet Readiness Centre SouthEast (FRCSE)*, Tentera Laut Amerika Syarikat pun turut terlibat dalam penghasilan *nasopharyngeal* bagi membantu pengekangan COVID-19 [49].



Rajah 6. Contoh bagi *Cranial Implants* yang dihasilkan dengan *3D Printing* [42].

Industri Pembinaan

Dari aspek industri binaan, teknologi *3D-Printing* telahpun digunapakai dalam beberapa projek seperti "Projek Milestone", dimana rumah seluas 94-meter persegi berjaya dibina dengan menggunakan teknologi *3D-printing* menggunakan bahan *structural concrete* [50]. Teknologi ini juga dijangka akan mengurangkan pembaziran dan kos buruh [51] sehingga 60% dan berpotensi untuk meningkatkan penghasilan sehingga 50% [52]. Menurut *Department of Defence*, Amerika Syarikat telah menggunakan teknologi *3D Printing* ini untuk membina berek berukuran 5,700 kaki persegi, satu di Fort Bliss, New Mexico (dibuka pada January 2025) dan dua di Pershing Heights, Pennsylvania. Setiap berek ini dijangka dapat menempatkan 56 tentera [53].



Rajah 7. Contoh berek yang dihasilkan dengan *3D-Printing* [53].

Kegunaan Ketenteraan

Tentera Amerika Syarikat dan beberapa angkatan tentera diseluruh dunia telah mengadoptasikan *3D Printing* bagi kegunaan tentera dan kebanyakannya kegunaan ini tertumpu bagi memperbaiki logistik, penghasilan yang lebih cepat, keupayaan tentera dan pembinaan prototaip.



Rajah 8. Tentera darat Australia memasang *wheel bearing cover* yang dihasilkan melalui XSPEE3D *3D-Printing* pada M113 *Armoured Personnel Carrier* [54].

Kegunaan AM dalam Operasi ketenteraan

Salah satu contoh bagi pembaikan dalam aspek logistik ialah dengan pelaksanaan *on-demand printing* bagi peralatan ganti. USS Somerset (LPD 25), sebuah kapal pengangkut dok amphibi (*Amphibious Transport Dock*) milik tentera laut Amerika Syarikat telah berjaya menghasilkan *gasket pump* menggunakan *3D printer* jenis besi bagi alat pengantian system *reverse osmosis* yang hanya mengambil masa beberapa jam [55] berbanding masa 14 hari yang diperlukan bagi menunggu alat pengantian untuk tiba. Baru-baru ini juga, dalam latihan *Talisman Sabre 2025*, Angkatan Tentera Laut Diraja Australia (*Royal Australian Navy, RAN*) telah menggunakan *3D-Printers* yang digelar *Deployable Additive Manufacturing and Repair Capability (DAMR)* yang di tempatkan didalam kontena penghantaran. Kontena ini mengandungi berbagai jenis *printer* seperti Prusa Core One, Ultimaker Factor 4, Markforged X7 dan pada masa akan datang, Fusion F3 [56]. RAN melaporkan yang mereka telah berjaya untuk menghasilkan beberapa bahagian dengan menggunakan *3D-printing* termasuk penghasilan suis peralatan komunikasi, alat kawalan jauh untuk dron, *fan bracket* dan pasak tanah (*ground pegs*) [56]. Menurut laporan, Angkatan tentera laut Amerika Syarikat, Angkatan tentera darat UK dan Angkatan tentera Australia kini sedang dalam proses menggunakan/mencoba *3D-Printer* jenama XSPEE3D bagi kegunaan di barisan hadapan untuk menghasilkan bahagian secara *on-demand* [54].

Penggunaan *3D-printer* ini tidaklah hanya terhad kepada tentera laut, akan tetapi *3D-printer* telahpun digunakan di *forward operating base* angkatan tentera darat bagi memperbaiki kenderaan yang rosak selepas pertempuran bagi memperpanjang kegunaan kenderaan tersebut [57]. Penghasilan alat ganti ini juga termasuk penghasilan alat ganti yang sukar untuk didapatkan khususnya yang tidak lagi dihasilkan oleh pembuat barangan asal tersebut (*OEM*) [58]. Penghasilan ini telahpun dilaksanakan oleh angkatan tentera darat Amerika Syarikat dan angkatan tentera darat UK.

Tentera Udara Amerika Syarikat juga telah berjaya membina *runway mat* dengan menggunakan *3D-printing* yang membolehkan pesawat tentera untuk mendarat dan berlepas daripada tanah yang licak [59]. Di Ukraine pula, *3D-printer* ini digunakan untuk menghasilkan berbagai bahagian bagi dron dan alat ketenteraan yang lain yang menyumbang kepada pemasangan yang pantas dan pembangunan system *unmanned* [60].



Rajah 9. Contoh *printer* yang terdapat dalam DAMR kepunyaan tentera laut Australia, *Prusa Core One* (kiri), *Ultimaker Factor 4* (tengah), *Markforged X7* (kanan).

Kegunaan AM dalam operasi bukan ketenteraan

Pengunaan *3D-printing* dalam pembuatan juga dapat dilihat dalam industri ketenteraan yang tidak beroperasi (*non-operational*) sebagai contoh, *3D Printing* ini telah digunakan bagi menghasilkan *valve manifold assembly* [61] berukuran 1.5 meter dan seberat 450 kg [62] yang dipasang diatas sebuah kapal induk Amerika Syarikat berkelas Gerald R. Ford terbaru iaitu CVN-80, USS Enterprise. Menurut laporan, dengan pengunaan *3D-printing* ini ianya akan mempercepat pembinaan dan penghantaran kapal induk tersebut kepada angkatan tentera laut Amerika Syarikat.

Bagi tentera darat Amerika Syarikat, *3D-printing* ini telah digunakan untuk menghasilkan bahagian bagi kenderaan darat dan bahagian tersebut dilaporkan mencecah sehingga 3 kaki persegi dihasilkan secara *on-demand*. Penghasilan ini boleh mengurangkan masa pembuatan daripada beberapa bulan ke hanya beberapa hari [61]. Babcock International Group dalam konteks yang sama juga telah menggunakan *3D-printer* jenis besi untuk menghasilkan bahagian daripada periskop bagi *British's Army Titan* dan *British's Army Trojan Fleet* dimana ianya adalah satu langkah kehadapan yang baik dalam penyerapan pengunaan teknologi AM dalam industri ketenteraan [63]. Menurut [64], pengunaan *3D-printer* dalam logistik dan pembaikan ketenteraan boleh memperbaiki prestasi tentera dan dengan penggunaannya yang meluas akan berpotensi untuk mengubah cara pengorganisasian pembaikan secara keluruhannya.



Figure 10. 3D Printed Valve Manifold Assembly for CVN-80 [62].

Penyelidikan dalam Ketenteraan

Penggunaan teknologi AM ini juga dapat dilihat dalam perbagai kajian yang berpotensi bagi kegunaan ketenteraan seperti kajian dalam reka bentuk *stab resistant armor* [65], penghasilan sistem UAV yang ringan [66], *embedded antenna* [67], peralatan anti dron [68] dan sebagainya. Ini disebabkan, dengan menggunakan teknologi AM ini, ianya adalah lebih murah berbanding menggunakan teknologi sedia ada dan teknologi AM ini menawarkan kemudahan akses bagi membina prototaip dan memudahkan pengubahan (*iteration*) prototaip tersebut dengan cepat.

Menurut [69], tentera Amerika Syarikat telah memperuntukkan USD70 juta pada tahun 2014 untuk pembangunan *powered exoskeleton suit* bagi kegunaan tentera Amerika Syarikat dan projek ini telah menggunakan fleksibiliti yang ditawarkan oleh *3D printing* untuk membolehkan pembinaan prototaip dengan masa yang singkat dan memperbaiki proses pengubahan. Projek ini juga selaras dengan *Industrial Revolution 5.0*.

6.0 POTENSI KEGUNAAN DALAM ANGKATAN BERSENJATA DIRAJA BRUNEI (ABDB)

Dalam konteks Angkatan Bersenjata Diraja Brunei (ABDB), teknologi AM ini dapat digunakan dalam kapal peronda Tentera Laut Diraja Brunei (TLDB). Penggunaan ini akan membolehkan TLDB untuk menghasilkan alat gantian sementara ataupun berterusan didalam kapal peronda itu sendiri. Dengan menghasilkan alat gantian ini dengan cara *on-demand*, pelaksanaan pembaikan semasa di dalam perjalanan akan dapat dilaksanakan tanpa memerlukan pulang ke pangkalan untuk pembaikan seperti yang telah dilaksanakan oleh USS Somerset [55]. Ini akan memberikan fleksibiliti kepada TLDB untuk membuat rondaan ataupun *deployment* yang lebih panjang.

Penggunaan teknologi AM diseluruh bengkel ABDB juga akan membawa faedah kerana teknologi AM ini akan dapat digunakan untuk memperbaiki bahagian besi yang rosak secara cekap (*efficient*). Selain itu, teknologi ini juga boleh digunakan untuk menghasilkan alat gantian yang tidak lagi

dihasilkan oleh pembekal sebenar (*OEM*) seperti [58] yang mungkin akan memberikan fleksibility kepada program yang sudah *obsolete*. Dengan keupayaan ini, ianya tidak hanya kos efektif, akan tetapi ianya juga akan meningkatkan keupayaan ABDB untuk melaksanakan pembaikan dan kesiapan ABDB secara keseluruhan.

Dari aspek perubatan pula, Pusat Khidmat Perubatan dan Kesihatan (MRS) dapat menggunakan teknologi AM bagi khidmat penjagaan gigi sebagaimana yang telah dilaksanakan oleh Jerudong Park Medical Centre. Selain daripada penjagaan pergigian, teknologi AM ini juga dapat digunakan untuk menghasilkan prostetik bagi anggota tentera yang cedera semasa bertugas. Secara keseluruhannya penggunaan teknologi AM ini akan meningkatkan lagi tahap perkhidmatan MRS, keupayaan dan membuatkan MRS akan lebih bersedia untuk menangani sebarang kes-kes kecemasan dan trauma.

Selain daripada konteks ABDB, penggunaan teknologi AM dalam pusat penyelidikan ketenteraan dalam Kementerian Pertahanan juga akan membolehkan para penyelidik untuk menghasilkan dan membuat pengubahan yang sepatutnya keatas prototaip dengan masa yang singkat. Contoh prototaip yang dapat dilaksanakan ialah reka bentuk bagi dron yang ringan, alat perlindungan yang lebih baik (*improved body armor*), *attachment* senjata yang lebih baik, *powered exoskeletons* dan lain-lain yang sememangnya akan memberikan impak positif kepada operasi dan keperluan ABDB.

7.0 CABARAN DENGAN 3D PRINTING

Dengan keupayaan dan fleksibiliti yang ditawarkan oleh *3D-Printing*, teknologi ini juga mempunyai keburukan.

Keburukan pertama teknologi ini ialah daripada kualiti dan konsistensi. Bahagian yang dihasilkan selalunya akan mempunyai permukaan yang kurang baik (*poor surface finish*). Ini akan memerlukan proses *post-processing* seperti *sanding* atau *polishing* dan ianya akan mengambil masa dan kos terutama kali bagi penghasilan yang berskala besar [70]. Bagi konsistensi, bahagian yang dihasilkan dengan *3D printing* ini tidak akan dihasilkan dengan tepat dan menurut laporan, teknologi *3D printing* pada masa kini hanya mempunyai ketepatan sekitar 20-50 mikron [71,72], di mana ini akan menjadi satu masalah bagi kegunaan yang memerlukan toleransi yang ketat seperti industri penerbangan.

Kedua, seperti yang dinyatakan sebelumnya, tidak semua bahan mentah dapat digunakan sebagai bahan mentah untuk *3D Printer*. Pembuat (*manufacturer*) barangan mungkin mempunyai keperluan khusus yang mungkin tidak dapat dipenuhi oleh bahan yang tersedia dengan *3D Printing*. Ini bermakna pilihan bahan adalah terhad bagi *3D printing* berbanding pembuatan dengan cara yang sedia ada.

Ketiga, kegunaan yang dibincangkan sebelumnya tertumpu kepada penggunaan bagi menghasilkan bahagian dalam skala kecil ataupun secara *customised*. Pada masa kini, *3D-Printing* ini hanya menyumbang 0.04% daripada pembuatan seluruh dunia [73]. Ini disebabkan penggunaan *3D-printing* bagi penghasilan berskala besar ialah tidak praktikal. Bagi penghasilan berskala besar, kos penghasilan dengan menggunakan *3D-printing* ialah agak tinggi [75] dan jangka masa untuk menghasilkan bahagian ini agak lama [64,74] berbanding teknologi pembuatan sedia ada. Sebagai

tambahan, untuk menghasilkan bahagian yang berukuran besar juga akan memerlukan bahagian tersebut untuk dibahagi dan memerlukan pergabungan setelah selesai dimana ianya akan mengambil masa dan kos yang besar [25].

Ke-empat, kos pembelian (*capital investment*) bagi menggunakan teknologi *3D printing* dan kos bagi *post processing* adalah tinggi dan mestilah dipertimbangkan selain daripada keperluan untuk penyelenggaraan berkala bagi mesin tersebut. Sebagai makluman tambahan juga, harga bahan yang digunakan untuk *3D-printing* ini selalunya lebih mahal berbanding bahan yang digunakan kini dan teknologi ini juga akan memerlukan pengguna untuk menjalani latihan khusus bagi pengendalian dan penyelenggaraan mesin tersebut [76].

Ke-lima, dengan aksesibility dan penerimaan teknologi yang meluas dalam berbagai industri seperti *aerospace* dan ketenteraan, dengan adanya *3D file* tersebut, bahagian itu akan dapat dihasilkan menggunakan mana-mana mesin *3D-printer*. Ini menimbulkan cabaran untuk melindungi fail tersebut terutama fail-fail ketenteraan yang sensitif. Mitigasi pada masa ini ialah dengan mengintegrasikan ciri-ciri keselamatan dalam fail-fail tersebut dengan *encryption* [77] yang berpatutan dan pengendalian yang teratur seperti penggunaan *private network* bagi memindahkan fail tersebut, penggunaan *digital rights management (DRM)* dan teknologi blockchain [78].

Terakhir, pelupusan *support structure* dan *failed print* mestilah dipertimbangan dimana sebahagian daripada bahan yang digunakan dalam *3D printing* ini berkemungkinan mengandungi *toxic* dan ianya *non-biodegradable* [75,79].

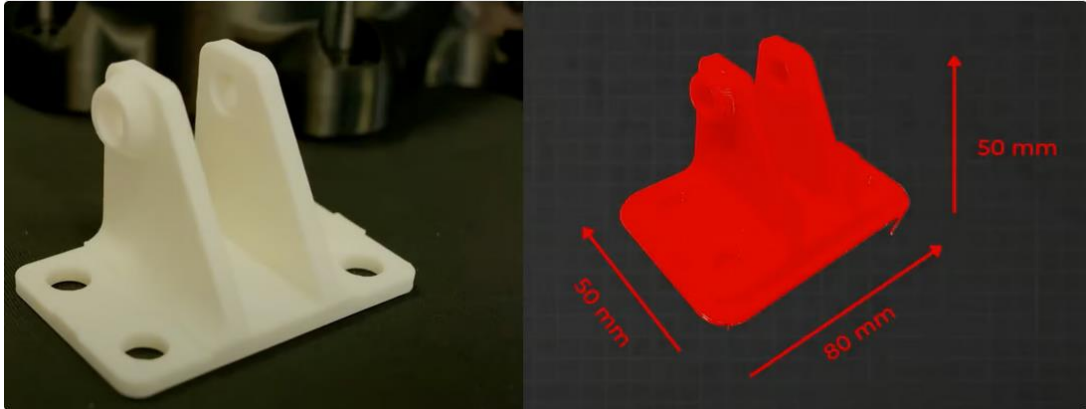
8.0 ANALISIS KOS-FAEDAH BAGI TEKNOLOGI AM

Sebagaimana yang diketahui, teknologi AM ini datang dengan cabarannya yang tersendiri. Dari segi *cost-benefit*, bahagian yang memerlukan *customisation* akan mendapat faedah yang terbaik memandangkan penghasilan tersebut hanya akan dihasilkan dalam kuantiti yang rendah, dibandingkan dengan cara penghasilan yang sedia ada, penghasilan menggunakan teknologi AM ini akan mengambil kos yang lebih murah.

Sebagai contoh, menurut [80] laporan ini menganalisa kos bagi menghasilkan 50-unit *simple bracket* seperti dalam **Rajah 11**. Dengan menggunakan teknologi pembuatan yang sedia ada, harga yang ditawarkan bagi menghasilkan dengan bahan aluminium menggunakan CNC akan memakan harga lebih kurang \$1,300 hingga \$1,990 dan bagi penghasilan dengan menggunakan *injection molding* dengan bahan ABS akan memakan harga lebih kurang \$5,000. Kedua pilihan yang ditawarkan ini akan mengambil masa 9 ke 14 hari. Jika dibandingkan dengan menggunakan teknologi AM, kos pembuatan yang ditawarkan adalah serendah \$140 (dengan menggunakan teknologi FDM) sehingga \$8,920 (dengan menggunakan teknologi PBF) tertakluk kepada jenis bahan yang digunakan. Jangka masa yang diperlukan bagi penghasilan dengan teknologi AM ini pula dijangka akan mengambil masa 3 ke 8 hari dengan teknologi FDM ataupun selama 21 hari bagi teknologi PBF.

Dengan ini, penggunaan teknologi AM ini boleh dilihat sebagai cara lebih murah dan lebih cepat (tertakluk kepada jenis bahan yang digunakan) dibandingkan penggunaan teknologi yang sedia ada. Teknologi AM ini menawarkan fleksibiliti untuk menghasilkan bahagian yang dikehendaki secara tempatan dan tidak memerlukan kawasan yang besar berbanding teknologi pembuatan

yang sedia ada. Keupayaan untuk menghasilkan secara tempatan (*in-house*) ini adalah merupakan faedah yang paling besar bagi penggunaan dimana pilihan untuk kembali ke pangkalan ataupun membawa kelengkapan untuk menghasilkan bahagian itu adalah tidak boleh dilaksanakan; sebagai contoh; *military deployment*, penerokaan angkasa dan sebagainya. Jangka masa yang dijimatkan tersebut bukanlah hanya dalam pembuatan, akan tetapi jangka masa yang dijimatkan dengan tidak memerlukan aset yang di-*deploy* untuk kembali ke pangkalan bagi pembaikan. Ini akan meningkatkan lagi keberkesanan tentera dalam misi *deployment* dan misi rondaan khususnya.



Rajah 11. Contoh *simple bracket* yang dihasilkan menggunakan *3D Printed* [80].

9.0 PANDANGAN KE-ARAH MASA DEPAN BAGI AM

Menurut laporan pasaran, pasaran teknologi AM ini dijangka akan berkembang dan akan mencapai anggaran \$53.84 billion pada tahun 2029 iaitu kadar pertumbuhan tahunan berkompoun (*Compounded Annual Growth Rate, CAGR*) sebanyak 25.7% [81]. Peningkatan ini dijangka disebabkan oleh faktor-faktor seperti peningkatan dalam penggunaan teknologi, peningkatan dalam pilihan bahan yang digunakan, beberapa penerimaan dalam *production lines* dan penerimaan secara meluas dalam industri-industri yang sedia ada seperti perubahan untuk menyokong *Industrial Revolution 5.0* [82].

Penggunaan kecerdasan buatan (*AI*) dalam teknologi AM juga dapat memastikan kawalan kualiti yang lebih baik bagi bahagian yang dihasilkan secara tidak langsung mengurangkan kegagalan dalam *printing* dan pembaziran bahan [83].

Kajian pada masa ini sedang dilaksanakan berkenaan dengan bahan yang digunakan untuk *3D-printing* dan jika kajian menemukan bahan tambahan yang dapat digunakan bagi *3D-printing* ini, ianya akan membolehkan teknologi ini untuk digunakan dalam bermacam jenis kegunaan lain lagi. Seperti yang dinyatakan sebelumnya, teknologi AM ini telah digunakan di berbagai jenis industri seperti *aerospace*, perubatan, pembinaan dan lain-lain. Industri-industri ini telah mendapati dengan menggunakan *3D-printing*, masa yang diperlukan dalam menghasilkan bahagian tersebut adalah lebih cepat, lebih ringan, mempunyai kesesuaian yang lebih baik dan penghasilan prototaip yang lebih cepat. Dengan pembangunan dalam penghasilan *3D-printer* berskala besar (*large scale printing*) digabungkan dengan penambahbaikan yang berterusan dalam kecepatan *3D-printing*

(*printing speed*) dan kos efektif-nya, teknologi AM ini akan berdaya saing dengan penghasilan berskala (*production scale*) terutama kali dalam penghasilan jumlah kecil ke sederhana yang juga akan meningkatkan penerimaan dalam industri.

Dalam konteks ketenteraan, penggunaan *3D-printing* membolehkan unit perubatan yang di tempatkan dengan unit ekspedisi (*expeditionary unit*) untuk menjadi unit yang berukuran kecil dan ringan tanpa menjejaskan keupayaan dan ketangkasan unit tersebut. Unit perubatan hanya perlu untuk membawa peralatan perubatan yang penting dan menghasilkan barangan lain dengan cara *on-demand* semasa dilapangan [84].

10.0 KESIMPULAN

Teknologi AM ini ialah sebuah teknologi yang transformatif dengan potensi untuk merevolusikan cara prototaip, logistik dan *manufacturing* akan dilaksanakan.

Penyelidikan yang berterusan berkenaan bahan AM [85] akan memperbaiki senarai bahan yang dapat digunakan dan digabungkan dengan penyelidikan yang kini dilaksanakan dalam teknologi ketenteraan, ianya akan menghasilkan *armor* yang lebih baik, dron yang lebih ringan dan kuat dan lain-lain lagi. Pengintegrasian AI dalam proses reka bentuk, proses AM dan pembangunan dalam *printing* berskala besar juga akan membuatkan AM salah satu pilihan yang menarik bagi penghasilan berjumlah kecil ke sederhana yang sesuai bagi kegunaan peringkat battalion. Dengan bahan yang efisien ditawarkan oleh teknologi AM berbanding teknologi sedia ada kini, keperluan bahan mentah untuk menghasilkan bahagian yang diperlukan juga akan menurun walau bagaimanapun ianya digantikan dengan jangka masa yang panjang untuk menghasilkan bahagian tersebut, akan tetapi, ini dapat diterima kerana ianya menawarkan dan membolehkan penghasilan dalam kumpulan yang kecil pada harga yang berpatutan berbanding dengan teknologi sedia ada. Keupayaan ini adalah selaras dengan *industrial revolution 5.0*.

Penerimaan tentera berkenaan teknologi AM ini juga amat ketara dengan penggunaan berbentuk penghasilan aset kepada penghasilan semasa di barisan hadapan (dalam operasi ataupun dalam latihan). Penggunaan teknologi dalam pembinaan berek [53] dan prostetik yang berfungsi [46] ialah di antara contoh dimana teknologi AM ini digunakan tidak hanya di dalam konteks ketenteraan tapi juga dalam konteks awam. Penggunaan teknologi secara meluas dalam dan diluar konteks ketenteraan juga akan mendatangkan faedah dalam impian untuk penerokaan, memberikan penjagaan kesihatan yang lebih baik dan kesediaan semasa bencana alam ataupun konflik.

Penggunaan teknologi AM ini mungkin bukan untuk menggantikan teknologi yang tersedia kini secara penuhnya, akan tetapi gabungan dalam penggunaan teknologi ini akan dapat dilaksanakan iaitu gabungan teknologi yang sedia ada dengan teknologi AM. Penggunaan AM mungkin dapat digunakan sebagai alat ganti sementara sambil menunggu alat ganti sebenar untuk tiba dan memastikan sistem akan sentiasa beroperasi.

RUJUKAN

- [1] K. H., "Automatic Method for Fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer," *Review of Scientific Instruments*, pp. 1770-1773, 1981.
- [2] C. W.Hull.Japan Patent US4575330A, 1986.
- [3] J. P. K. M. L. G. L. D. R. A. M. B. A. C. David Burell, "Materials for Additive Manufacturing," *CIRP Annals*, pp. 659-681, 2017.
- [4] A. K. G. I. K. T. N. D. H. Tuan D Ngo, "Additive Manufacturing (3D Printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Composites Part B: Engineering*, pp. 172-196, 2018.
- [5] S. S. Crump, "Apparatus and method for creating three-dimensional objects". United States Patent US5121329A, 1992.
- [6] M. A. J. V. G. A. S. RYANNE GAIL KIM, "A Survey of Image-based fault monitoring in additive manufacturing: Recent Development and Future direction," *MDPI, Sensors*, 2023.
- [7] market.us, "Global Additive Manufacturing Market By Component Analysis (Printers, Software, Materials, Services), By Technology Analysis (Material Extrusion, Powder Bed Fusion, Vat Polymerization, Direct Energy Deposition, Material Jetting, Sheet Lamination, Binder J," Market.us, 2025.
- [8] "AirWolf3D," [Online]. Available: <https://airwolf3d.com/comparing-bowden-vs-direct-drive-3d-printer/>. [Accessed 2025].
- [9] "3D Jake," [Online]. Available: <https://www.3djake.com/info/guide/direct-drive-extruder-vs-bowden-extruder/>. [Accessed 2025].
- [10] J. F. R. M. R. M. B. P. O.S. Es-Said, "Effects of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples," *Materials and Manufacturing Processes*, no. 1, pp. 107-122, 2000.
- [11] T. T. G. T. Blagovest Bankov, "A Functional Model Printing Approach Optimized for Cost-Efficiency Using FDM Technology," *The 14th International Scientific Conference TechSys 2025 - Engineering, Technologies and Systems*, 2025.
- [12] F. Labs, "Guide to Resin 3D Printers: SLA vs. DLP vs. MSLA vs. LCD," [Online]. Available: <https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>. [Accessed 2025].
- [13] Openelab, "3D Printer Comprehensive Comparison of SLA, DLP and MSLA Technologies," [Online]. Available: <https://openelab.io/blogs/learn/3d-printer-comprehensive-comparison>. [Accessed 2025].
- [14] LIQCREATE, "What is the difference between MSLA and SLA?," [Online]. Available: <https://www.liqcreate.com/supportarticles/difference-msla-sla-resin/>. [Accessed 2025].

- [15] J. H. Q.-P. M. L. J. J. J. P. S. J. M. Marek Pagac, "A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing," *Polymers (Basel)*, 2021.
- [16] A. J. K. N. M. A. B. Mark Ballentine, "Acute and Chronic Toxicity of Uncured Resin Feedstock for Vat Photopolymerization 3D Printing to a Cladoceran (*Ceriodaphnia Dubia*)," *Bulletin of Environment Contamination and Toxicology*, 2023.
- [17] "Selective Laser Sintering," materflow, [Online]. Available: <https://www.materflow.com/en/sls-selective-laser-sintering-2/>. [Accessed 2025].
- [18] Xometry, "EBM vs. SLM: Differences and Comparison," 15 August 2022. [Online]. Available: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/ebm-vs-slm-3d-printing/>. [Accessed 2025].
- [19] C.-J. L. S.-H. W. y.-S. Z. C.-H. H. C.-Y. P. W.-C. H. Ming-Hsien Hsueh, "Effects of Printing Parameters on the Thermal and Mechanical Properties of 3D-Printed PLA and PETG, Using Fused Deposition Modeling," *Polymers*, vol. 13, no. 11, 2021.
- [20] S. F. L. D. E. M. E. M. Z. V. L. O. A. B. V. H. M. M. J. F. J. B. R. P. P. A. M. R. e. a. Mária Fogašová, "PLA/PHB-Based Materials Fully Biodegradable under Both Industrial and Home-Composting Conditions," *Polymers*, vol. 14, no. 19, pp. 14-19, 2022.
- [21] C. Kitchen, "CNC Kitchen," 17 August 2025. [Online]. Available: <https://www.cnckitchen.com/blog/carbon-fiber-nylon-in-3d-printing-pa6-vs-pa12-tested>. [Accessed 2025].
- [22] AMFG, "AMFG Autonomous Manufacturing," 9 July 2018. [Online]. Available: <https://amfg.ai/2018/07/09/ultem-peek-high-performance-3d-printing-materials-guide/>. [Accessed 2025].
- [23] met3dp.com, "Advanced Materials," [Online]. Available: <https://met3dp.com/advanced-materials-202406255/>. [Accessed 2025].
- [24] J. G. G. A. N. E. P. Damir Godec, in *General Process Workflow in Additive Manufacturing*, Springer, 2022, pp. 45-57.
- [25] J. M. J. V. M. M. M. R. Q. J. Z. A. T. G. H. L. D. S. J. B. Longfei Zhou, "Additive Manufacturing: A Comprehensive Review," *Sensors*, vol. 24, no. 9, 2024.
- [26] Autodesk, "AI-Powered manufacturing starts with Autodesk Fusion," [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/ai-automation>. [Accessed 2025].
- [27] Solidworks, "Evolve Your Design Workflows with AI," [Online]. Available: <https://www.solidworks.com/lp/evolve-your-design-workflows-ai>. [Accessed 2025].
- [28] H. S. Cigdem Askar, "Use of Smartphone Lidar Technology for Low-Cost 3D Building Documentation with iPhone 13Pro: A Comparative Analysis of Mobile Scanning Applications," *Geomatics*, pp. 563-579, 2023.

- [29] S. Chapman, "Airbus saves 15% in material weight due to 3D Printing," *Manufacturing Digital*, 17 May 2020. [Online]. [Accessed 2025].
- [30] G. P. A. K. V. S. A. V. S. G. K. K. U. M. Sundarakannan Rajendran, "Metal and Polymer Based Composites Manufactured Using Additive Manufacturing - A Brief Review," *Polymers*, vol. 15, no. 11, 2023.
- [31] Admin, "Titanium in the use on the COMAC C919," *North Steel*, [Online]. Available: <https://www.northsteel.com/titanium-use-comac-c919/>.
- [32] C. Goulding, "From Nose Gear to Net Zero: Safran's 3D Printing Revolution in Aviation," *fabbaloo.com*, 30 April 2025. [Online]. Available: <https://www.fabbaloo.com/news/from-nose-gear-to-net-zero-safrans-3d-printing-revolution-in-aviation>. [Accessed 2025].
- [33] T. Team, "TCT Magazine," 5 August 2024. [Online]. Available: <https://www.tctmagazine.com/spacex-simplifies-raptor-rocket-engine-was-it-3d-printed-additive-manufacturing/>. [Accessed 2025].
- [34] S. Erwin, "Space News," 10 September 2025. [Online]. Available: <https://spacenews.com/boeing-turns-to-3d-printing-to-speed-production-of-satellite-solar-arrays/>. [Accessed 2025].
- [35] S. R. A. T. Joel C. Najmon, "Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry," *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, pp. 7-31, 2019.
- [36] Airbus, "The world's first metal 3D printer for space is on its way to the ISS," Airbus, 31 January 2024. [Online]. Available: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2024-01-the-worlds-first-metal-3d-printer-for-space-is-on-its-way-to-the-iss>. [Accessed 2025].
- [37] M. L. Gaskill, "3D Printing: Saving Weight and Space at Launch," NASA, 21 March 2025. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/missions/station/iss-research/3d-printing-saving-weight-and-space-at-launch/>. [Accessed 2025].
- [38] R. D. M. Denista D. Kiradzhyskya, "Overview of Biocompatible materials and their use in medicine," *Sciendo*, 2018.
- [39] B. Wire, "Auxilium Biotechnologies Successfully Prints Medical Devices for the First Time on the International Space Station," 5 February 2025. [Online]. Available: <https://www.businesswire.com/news/home/20250205806594/en/Auxilium-Biotechnologies-Successfully-Prints-Medical-Devices-for-the-First-Time-on-the-International-Space-Station>. [Accessed 2025].
- [40] L. S. O. H. M. Patrick Scott Thayer, "Bioprinting of Cartilage and Skin Tissue Analogs Utilizing a Novel Passive Mixing Unit Technique for Bioink Precellularization," 2018.
- [41] C. T. Arena, "Spritam (levetiracetam) for the Treatment of Epilepsy," 30 August 2016. [Online]. Available: <https://www.clinicaltrialsarena.com/projects/spritam-levetiracetam-epilepsy/>. [Accessed 2025].

- [42] 3. Systems, "3D Systems Announces FDA Clearance for World's First 3D-Printed PEEK Cranial Implants," 15 April 2024. [Online]. Available: <https://www.3dsystems.com/press-releases/3d-systems-announces-fda-clearance-worlds-first-3d-printed-peek-cranial-implants>. [Accessed 2025].
- [43] H. S. H. R. S. R. A. R. M. P. M. F. A. L. M. N. D. M. T. M. Marzieh Ebrahimi, "Additive Manufacturing for Density: A Comprehensive review of techniques and applications," *Progress in Materials Science*, vol. 157, 2026.
- [44] G. M.-K. A. K. G. D. E. S. A. K. J. R. Vladimir V. Popov Jr, "Design and 3D Printing of Titanium bone implants: Brief review of approach and clinical cases," *Biomedical Engineering Letters*, pp. 337-344, 2018.
- [45] P. P. Borthakur, "The role and future directions of 3D Printing in custom prosthetic design," *Engineering Proceedings*, vol. 81, no. 1, 2025.
- [46] A. Patterson, "VA Pioneering New Medical 3D Printing Uses for Prosthetics Care," GovCIO, 25 March 2022. [Online]. Available: <https://govciomedia.com/va-pioneering-new-medical-3d-printing-uses-for-prosthetics-care/>. [Accessed 2025].
- [47] J. P. M. Centre, "JPMC Leads the Way in Digital Dentistry with Latest Technology Launch," 5 December 2025. [Online]. Available: <https://jpmcbrunei.com/jpmc-leads-the-way-in-digital-dentistry-with-latest-technology-launch/>. [Accessed 2025].
- [48] S. G. C. S. K. R. V. A. R. K. D. G. M. S. S. K. Y C Niranjana, "The unprecedented role of 3D Printing Technology in Fighting the COVID-19 Pandemic: A Comprehensive Review," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 19, 2022.
- [49] A. Lombardo, "America's Navy," 1 March 2021. [Online]. Available: <https://www.navy.mil/Press-Office/News-Stories/display-news/Article/2519175/fleet-readiness-center-southeast-supports-covid-19-containment-efforts-through/>. [Accessed 2025].
- [50] D. B. T. S. Rob Wolfs, "Lessons learned of project milestone: The first 3D Printed concrete house in the Netherlands," in *Materials today: Proceedings*.
- [51] P. C. W. J. O. C. S. M. J. R. F. S. S. Daniel Delgado Camacho, "Applications of additive manufacturing in the construction industry - A forward looking review," *Automation in Construction* 89, pp. 110-119, 2018.
- [52] Y. C. K. Mehmet Sakin, "3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM," in *9th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB-17*, Chania, Crete, Greece, 2017.
- [53] D. Poe, "US Army," 4 February 2025. [Online]. Available: https://www.army.mil/article/282813/army_g_9_team_bliss_open_dods_first_3d_printed_barracks. [Accessed 2025].
- [54] SPEE3D, "XSPEE3D: The Next Generation of Expeditionary Metal 3D Printing," 9 November 2022. [Online]. [Accessed 2025].

- [55] L. Z. Anderson, "3D Printer solves engineering challenges onboard USS Somerset," 19 July 2024. [Online]. Available: <https://www.navy.mil/Press-Office/News-Stories/Article/3848806/3d-printer-solves-engineering-challenges-onboard-uss-somerset/>. [Accessed 2025].
- [56] C. M. Rogers, "Navy Prints solutions to operational problems," 8 August 2025. [Online]. Available: <https://www.defence.gov.au/news-events/news/2025-08-08/navy-prints-solutions-operational-problems>.
- [57] A. Tyrer, "From factory to foxhole: The future of 3D Printing at the UK Ministry of Defence," 3D Printing Industry, 11 June 2025. [Online]. Available: <https://3dprintingindustry.com/news/from-factory-to-foxhole-the-future-of-3d-printing-at-the-uk-ministry-of-defence-240569/>. [Accessed 2025].
- [58] Markforged, "How are different branches of the US military using additive?," [Online]. Available: <https://markforged.com/resources/blog/how-are-different-branches-of-the-us-military-using-additive>. [Accessed 2025].
- [59] P. FICZERE, "Additive Manufacturing in the military and defence industry," *Design of Machines and Structures*, vol. 12, no. 2, pp. 73-77, 2022.
- [60] A. Tyrer, "Ukraine Deploys 3D Printed Drones to Combat Russian Shahed swarms," 3D Printing Industry, 25 July 2025. [Online]. [Accessed 2025].
- [61] L. Lawson, "Application of 3D Printing In Modern Military Operations," 12 August 2025. [Online]. [Accessed 2025].
- [62] 3DPrinting.com, "HII Installs First 3D Printed Valve Assembly on Aircraft Carrier," 6 March 2025. [Online]. Available: <https://3dprinting.com/news/hii-installs-first-3d-printed-valve-assembly-on-aircraft-carrier/>. [Accessed 2025].
- [63] K. K. R. K. Grzegorz Stankiewicz, "Additive Manufacturing in military using," *Systemy Logistyczne Wojsk*, vol. 58, no. 1, pp. 129-148, 2023.
- [64] I. V. Samu Rautio, "Supporting military maintenance and repair with additive manufacturing," *Sciendo*, vol. 11, no. 1, pp. 23-36, 2022.
- [65] A. A. Johnson, *Establishing design characteristics for the development of stab resistant Laser Sintered Body Armour*, Loughborough: Loughborough University, 2014.
- [66] V. A. B. K. M. B. Pavol Pecho, "Introduction study of design and layout of UAVs 3D printed wings in relation to optimal lightweight and load distribution," *Transportation Research Procedia*, vol. 40, pp. 861-868, 2019.
- [67] C. Scott, "3DPRINT.COM," 7 October 2017. [Online]. Available: <https://3dprint.com/190220/3d-printed-wearable-antenna/>. [Accessed 2025].
- [68] 3Printr.com, "3Printr.com," 7 June 2023. [Online]. Available: <https://www.3printr.com/london-defense-rd-unveils-3d-printed-anti-drone-system-3162856/>. [Accessed 2025].

- [69] H. R. Mendoza, "3D Printing to be used to bring Iron Man to US Military," 3DPrinting.com, 8 July 2014. [Online]. Available: <https://3dprint.com/8441/3d-print-iron-man-military/>. [Accessed 2025].
- [70] C. C. L. G. H. M. S. C. L. T. R. C. A. John Ryan C Dizon, "Post-Processing of 3D-Printed Polymers," *Technologies*, vol. 9, no. 3, 2021.
- [71] P. G. N. M.-N. Ewelina Kluska, "The accuracy and the printing resolution comparison of different 3D printing technologies," *Transactions of the institute of aviation*, pp. 69-86, 2018.
- [72] S. D. A. K. X. Z. C. M. P. J. R. G. Andrey Vyatskikh, "Additive Manufacturing of 3D nano-architected metals," *Nature Communications*, 2018.
- [73] O. T. Y. T. C. T. Onuh Ojogba Spencer, "Additive Manufacturing Technology Development: A Trajectory Towards Industrial Revolution," *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 80-90, 2018.
- [74] D. Thomas, "Cost, Benifits, and Adoption of Additive Manufacturing: A Supply Chain Perspective," *The International Journal of Advance Manufacturing Technology*, vol. 85, pp. 1857-1876, 2015`.
- [75] L. B. K. Z. N. T. W. S. K. S. W. Sanjing Jung, "Is additive manufacturing an environmentally and economically prefered alternative for mass production?," *Environment Science & Technology*, vol. 57, no. 16, pp. 6373-6386, 2023.
- [76] S. W. G. Douglas S. Thomas, "Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing," *NIST Special Publication 1176*, 2014.
- [77] Peiling, "Military 3D Printing: How is additive manufacturing changing the defence industry," Raise3D, 20 January 2025. [Online]. Available: <https://www.raise3d.com/fr/blog/military-defense-3d-printing/>.
- [78] 3DPrinting.com, "Data Security in 3D Printing: How to Protect Intellectual Property and Ensure Safe Manufacturing," 3 October 2024. [Online]. Available: <https://3dprinting.com/news/data-security-in-3d-printing-how-to-protect-intellectual-property-and-ensure-safe-manufacturing/>. [Accessed 2025].
- [79] A. H. S. K. M. J. Mohd Suhaib, "Impact of 3D Printing on the environment: A literature-based study," *Suatainable Operations and Computers*, vol. 2, pp. 57-63, 2021.
- [80] N. Phalen, "All3DP," 27 August 2021. [Online]. Available: <https://all3dp.com/1/traditional-vs-additive-manufacturing-price-comparison/>. [Accessed 2026].
- [81] J. S. C. G. S. S. S. Sukhdeep Singh, "Future Trends and Technologies in Additive and Subtractive Manufacturing," in *Additive and Subtractive Manufacturing of Composites*, Springer, 2021, p. 240.
- [82] A. N. N. J. Madhan Jeyaraman, "Industru 5.0 in Orthopaedics," *Indian Journal of Orthopedics*, pp. 1694-1702, 2022.

- [83] N. R. H. F. G. L. P. M. S. B. S. S. Yaser Banadaki, "Automated Quality and Process Control for Additive Manufacturing using Deep Convolutional Neural Networks," *LIDSEN Publishing Inc*, 2022.
- [84] L. C. M. H. L. C. M. K. L. C. A. M. M. R. C. M. M. S. Lt. Col. Michael Browning, "3D Printing Solutions for Contested Medical Logistics," *Military Review*, 2024.
- [85] A. A. A. A. M. B. Syed Fouzan Iftekar, "Advancement and Limitations in 3D Printing Materials and Technologies: A Critical Review," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 11, p. 2519, 2023.

Mengenai Pengarang

► **Mejar (U) Muhd Nurhamizan bin Haji Mawardi**

Beliau merupakan seorang juruterbang *Combat Ready (CR) Blackhawk S-70i* dari Skuadron 11, Cawangan No. 1, Kumpulan Gerakan, Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB) yang mempunyai lebih daripada 800 jam penerbangan. Pengalaman beliau termasuk menjadi Perancang Latihan untuk Latihan Bersama (LATMA) Elang Brunesia, yang memberi tumpuan kepada *Humanitarian Assistance Disaster Relief (HADR)* di Brunei Darussalam pada 2020 dan di Pontianak, Indonesia pada 2024. Beliau memegang Sarjana Sains dalam bidang Kejuruteraan dengan Pengurusan Perniagaan dari King's College London (2013) dan telah berkhidmat dengan Angkatan Bersenjata Diraja Brunei (ABDB) sejak 2014.

► **Leftenan (U) Mohd Khalid Wassadi Salleh bin Haji Mahmud**

Beliau merupakan seorang juruterbang *Limited Combat Ready (LCR) Blackhawk S-70i* dari Skuadron 11. Beliau menerima ijazah Sarjana Muda (Kepujian) dalam bidang Pentadbiran Perniagaan dari Universiti Brunei Darussalam (UBD) dan telah berkhidmat dengan ABDB sejak 2020, dengan penglibatan aktif dalam perolehan keupayaan masa hadapan bagi Skuadron 11.

► **Leftenan (U) Muhd Dzulfadhli bin Bahrin**

Beliau merupakan seorang juruterbang *LCR Blackhawk S-70i* dari Skuadron 11. Beliau memperoleh ijazah Sarjana Muda (Kepujian) dalam bidang Psikologi dengan Psikologi Klinikal dari University of Kent dan telah pun berkhidmat dengan ABDB sejak 2020.

► **Leftenan (U) Muhd Amirul 'Azmi bin Haji Ali Amzah**

Beliau merupakan seorang juruterbang *LCR Blackhawk S-70i* dari Skuadron 11. Beliau memperoleh ijazah Diploma Kebangsaan Tinggi (HND) dalam bidang Kejuruteraan Mekanikal dari Universiti Teknologi Brunei dan telah berkhidmat bersama ABDB sejak 2020.

LATIHAN WINCH REALITI MAYA (VR): MELENGKAPKAN PENERBANGAN SECARA LANGSUNG UNTUK MENINGKATKAN KESEDIAAN TENTERA UDARA DIRAJA BRUNEI (TUDB) DALAM MENCARI DAN MENYELAMAT (CARILAMAT)

Mej (U) Muhd Nurhamizan Haji Mawardi, Lt (U) Mohd Khalid Wassadi Salleh Haji Mahmud, Lt (U) Muhd Dzulfadhli bin Bahrin, Lt (U) Muhd Amirul 'Azmi Haji Ali Amzah

Squadron 11, Cawangan No. 1, Kumpulan Gerakan
Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB)

ABSTRAK

Kajian kertas ini adalah mengenai integrasi realiti maya, ataupun Virtual Reality (VR) untuk latihan mencari dan menyelamat (CARILAMAT) bagi Skuadron 11. Pada masa kini, Skuadron 11 bertanggungjawab untuk keperluan CARILAMAT negara. Operasi CARILAMAT adalah sangat kompleks dan memerlukan latihan yang meluas untuk mahir dalam misi. Walaubagaimanapun, latihan CARILAMAT hanya mengambil sebahagian kecil daripada jumlah jam latihan tersedia yang telah diperuntukkan untuk setiap bulan. Tambahan lagi, beberapa cabaran telah pun dikenal pasti bagi latihan CARILAMAT, terutamanya waktu penerbangan yang terhad, kebolehhidmatan pesawat, cuaca, dan risiko keselamatan yang wujud dengan latihan secara langsung. Berdasarkan pengalaman Skuadron 11 dengan S-70i Full Flight Simulator (FFS) dan amalan latihan CARILAMAT antarabangsa yang berkaitan, kajian kertas ini menilai potensi pelatih winch dengan integrasi VR untuk pemindahan rutin dan senario latihan yang berisiko tinggi dari kapal terbang secara langsung ke persekitaran sintetik. Kajian ini mendapatkan bahawa latihan berasaskan VR adalah pelengkap yang berdaya maju dan berkesan kepada penerbangan secara langsung, dan berpotensi untuk menaikkan kekerapan latihan, meluaskan kepelbagaian senario, mempertingkatkan koordinasi kru dan kesedaran situasional, mengurangkan risiko operasi, dan mengurangkan tekanan kepada armada S-70i. Kajian ini membuat kesimpulan bahawa integrasi VR dapat menyediakan pelantar latihan yang teguh dan boleh disesuaikan diri dan boleh menyokong keupayaan CARILAMAT TUDB.

Kata kunci:

Realiti Maya, Latihan Winch, Mencari Dan Menyelamatkan, Latihan Sintetik, Kru Belakang, S-70i.

1.0 PENDAHULUAN

“Sebagai angkatan bersenjata dengan bilangan anggota yang terhad, Angkatan Bersenjata Diraja Brunei (ABDB) perlu menggunakan applikasi teknologi sebagai sebahagian langkah untuk menaikkan keupayaannya.”

— *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, Titah pada Hari Ulang Tahun ABDB yang ke 60, di Taman Sir Muda Haji Omar Ali Saifuddien, Bandar Seri Begawan.*

Skuadron 11, Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB), menyediakan pengawasan udara di sempadan darat dan maritim, dan penghantaran sokong udara ke pertahanan darat dan maritim di Brunei Darussalam [1]. Sebagai skuadron yang mempunyai pelbagai peranan, tugasnya merangkumi operasi khas, pengangkutan rutin tentera, beban gantung bawah, pemadaman kebakaran udara, dan baru-baru ini, liputan penuh operasi CARILAMAT Kebangsaan.

Inti kepada tanggungjawab yang diperluaskan ini ialah pengendalian operasi *winching*, salah satu daripada kecekapan yang paling menuntut dari segi teknikal dalam CARILAMAT [2]. Secara tradisional, program latihan *winching* telah dimajukan hampir secara eksklusif melalui penerbangan secara langsung. Walaupun berkesan, cara ini sememangnya dikekang oleh jam penerbangan yang terhad, kebolekhidmatan kapal, cuaca, dan risiko keselamatan yang tinggi yang berkaitan dengan latihan di senario yang berisiko tinggi.

TUDB sudah mengiktiraf nilai latihan sintetik dalam menangani kekangan ini dalam sistem latihan juruterbang. Susulan pengenalan Sikorsky S-70i Blackhawk ke dalam perkhidmatan, TUDB telah mengguna pakai simulasi lanjutan di CAE Brunei *Multi-Purpose Training Centre (MPTC)* sebagai pemudah latihan teras untuk menyokong kedua-dua peralihan pelantar dan latihan juruterbang yang baru [3].

Walaupun dengan kemajuan ini, masih terdapat jurang antara juruterbang dan kru belakang dalam domain CARILAMAT. Walaupun juruterbang mendapat manfaat daripada struktur latihan simulator yang berkaitan dengan CARILAMAT, latihan sintetik berdedikasi bagi kru belakang, khususnya untuk operasi *winching*, masih tidak ada.

Kajian ini meneliti sama ada integrasi VR untuk alat latihan *winch* dapat melengkapkan penerbangan secara langsung dengan pemindahan rutin dan senario latihan yang berisiko tinggi ke dalam persekitaran sintetik yang terkawal. Analisis ini mengambil kira implikasi untuk kekerapan latihan, kepelbagaian senario, koordinasi kru, keselamatan, dan kesediaan operasi, untuk menilai VR sebagai penyelesaian yang boleh diskala dan mampan demi meningkatkan keupayaan CARILAMAT di masa hadapan.

2.0 KAEDAH

Kajian ini menggunakan pendekatan kaedah campuran bagi mengkaji kebolehlaksanaan dan nilai operasi mengintegrasikan VR ke dalam latihan *winch* bagi Skuadron 11. Data diperoleh darida jam

penerbangan Skuadron 11 sepanjang masa tiga tahun, dilengkapkan dengan respons tinjauan yang dikumpul daripada para juruterbang dan kru belakang.

Bagi memberikan gambaran yang lebih luas, satu siri kajian kes turut dijalankan dengan meneliti amalan latihan *winch* CARILAMAT yang diguna pakai oleh tentera udara yang terpilih yang mempunyai keupayaan CARILAMAT yang mantap dan matang.

Disebabkan sifat sensitif sesetengah data yang digunakan dalam kajian ini, data empirikal dibentangkan dalam bentuk peratusan dan bukannya nilai mutlak untuk memelihara keselamatan operasi (*OpSec*).

3.0 CABARAN-CABARAN

Kekangan utama termasuklah jam penerbangan, kebolehhidmatan kapal dan sistem *hoist* (pengangkat penyelamatan helikopter) yang terhad, kebergantungan pada cuaca, dan risiko keselamatan sedia ada bagi latihan yang hanya berjalan secara langsung. Kekangan ini menghadkan kekerapan dan kepelbagaian senario latihan melalui latihan berasaskan pesawat sahaja [4].



Rajah 1. Operasi *Winching* di atas Air.

Keutamaan Operasi Pada Jam Penerbangan Yang Terhad

Jam latihan yang tersedia dihadkan oleh tuntutan bersaing bagi mengekalkan ketersediaan operasi dalam kalangan kru udara berpengalaman, sambil secara serentak menyokong perkembangan juruterbang muda dan kru belakang. Tekanan-tekanan ini diburukkan lagi oleh batasan kapal terbang, memandangkan kapal S-70i mencatatkan purata kebolehhidmatan sebanyak 60% pada tahun 2025, dengan bilangan kerangka udara yang terhad yang dikonfigurasi untuk operasi

hoist pada bila-bila masa, mengurangkan peluang-peluang latihan secara langsung, mempengaruhi jumlah latihan *winch* secara langsung [5].

Risiko Operasi

Operasi *winching* mempunyai risiko bahaya sedia ada, termasuk kemerosotan kabel, ayunan beban, kegagalan fungsi *hoist*, dan beban kerja yang tinggi berkaitan dengan pengurusan kru dan anggota-anggota yang tercedera. Peluang latihan secara langsung bagi mempraktikkan situasi kecemasan atau senario tidak normal adalah terhad, menyekat kru belakang untuk mendapatkan dan mengekalkan kompetensi kritikal dalam pengurusan kabel, pengendalian mangsa, dan tindak balas kecemasan.

Kekangan Persekitaran

Had minimum cuaca berkaitan dengan keterlihatan, pangkalan awan, dan keadaan laut kerap sekali menjejaskan *sorties* latihan yang dirancang. Walaupun latihan sudah dijalankan, jurulatih dimestikan untuk beroperasi dalam lingkungan margin keselamatan, mengehendkan realisme dan keamatan latihan.

Iklim khatulistiwa Negara Brunei Darussalam menguatkan lagi kekangan ini. Suhu yang tinggi, kelembapan, dan kekerapan aktiviti perolakan mengehendkan tempoh latihan yang stabil, yang sering kali mengurangkan waktu latihan berkesan bagi peruntukkan jam penerbangan [6].

Ketiadaan Latihan Sintetik Bagi Kru Belakang

Pengenalan Simulator S-70i Full Flight (*FFS*) telah mempertingkatkan latihan juruterbang dengan ketara. Akan tetapi, tidak ada kewujudan keupayaan latihan sintetik yang setara untuk latihan kru belakang [3]. Hal ini mewujudkan jurang kemahiran antara juruterbang dan kru belakang, terutamanya dalam *winching*, mewujudkan keperluan bagi kaedah alternatif untuk latihan CARILAMAT bagi kru.

4.0 PENYELASAAN POTENSI: INTEGRASI VR

Kajian ini mencadangkan pengenalan berperingkat bagi sistem pelatih *winch* dengan integrasi VR sebagai pelengkap keupayaan untuk penerbangan secara langsung dan latihan S-70i yang sedia ada. Tujuan ini bukan untuk menggantikan latihan berasaskan pesawat, tetapi untuk menangani cabaran-cabaran khas yang telah dikenal pasti dengan menyediakan persekitaran yang selamat untuk latihan bagi pengendali *winch* dan kru belakang.

Sistem kajian ini merangkumi bahagian *mock-up*, yang berintegrasikan dengan visualisasi yang mengasyikkan dan sistem fizikal yang berinteraksi. Komponen-komponen teras termasuk:

a) VR Ketepatan-Tinggi atau Set Kepala Realiti Terimbuh

Menyediakan persekitaran visual sebanyak 360° di atas tanah dan air, termasuk geladak kapal, pelantar luar pesisir dan kawasan hutan tebal yang terhad, selaras dengan arus sistem latihan CARILAMAT *winch* yang digunakan di peringkat antarabangsa [7].

b) Kabel Dinamik Hoist dengan Maklum Balas Haptik dan Daya

Kebolehan untuk meniru ciri-ciri beban, ketegangan dan hayunan, serupa dengan jurulatih *hoist* generasi baru seperti *Bluedrop's Hoist Mission Training System (HMTS)*. [8].

c) Konsol Pengajar

Sejenis alat yang membolehkan kawalan petunjuk sikap pesawat, keadaan persekitaran, kecemasan dan komunikasi kru, setanding dengan sistem latihan sintetik kru belakang yang digunakan oleh Korps Udara Irish dan pengendali-pengendali CARILAMAT yang lain [9].

Konfigurasi ini membolehkan pengendali *winch* dan kru belakang untuk berlatih segmen misi CARILAMAT secara penuh dalam persekitaran tiruan yang hampir sama dengan keperluan kognitif dan prosedural operasi secara langsung sambil masih mengekalkan ketidak bergantungan kepada ketersediaan kapal dan cuaca.

Selain itu, sesi-sesi VR boleh dijalankan berulang-kali tanpa mengambil jam penggunaan pesawat atau jangka hayat kerangka pesawat udara, membolehkan kekerapan latihan yang tinggi bagi kru belakang, termasuk *ab initios*. Pengendali antarabangsa menunjukkan bahawa latihan *winch* tiruan boleh mengurangkan masa penerbangan langsung untuk kru teknikal sebanyak 50%, membebaskan pesawat untuk operasi sambil mengekalkan atau meningkatkan tahap kemahiran [10].

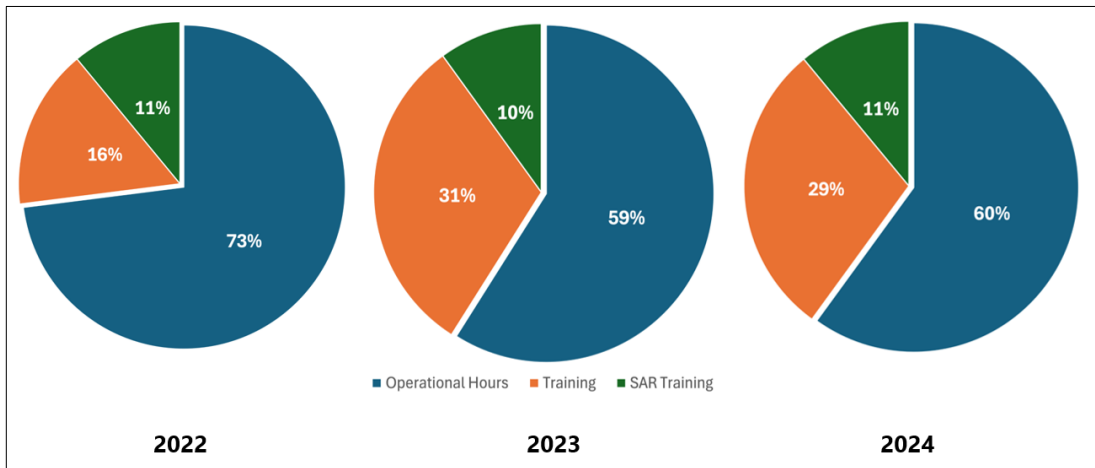
Persekitaran VR boleh meniru keadaan berisiko tinggi, operasi malam, cuaca tidak menentu, keadaan laut bergelora, dan kapal kompleks atau geladak pelantar yang jarang diterima untuk latihan secara langsung. Ini membolehkan mereka mengalami dan melatih latihan berfrekuensi rendah dan berakibat tinggi dengan mendalam sebelum menghadapi misi CARILAMAT sebenar [4].

Kecemasan *winching* seperti kemerosotan kabel, pemotongan kabel, kegagalan fungsi *hoist*, kegagalan penggantung, dan ayunan beban secara tiba-tiba boleh dilatihkan di dalam VR tanpa membahayakan pesawat ataupun anggota tentera, termasuk senario yang tidak boleh ditiru secara selamat dan realistik semasa penerbangan. Kecemasan berkaitan enjin atau kerosakan kawalan penerbangan semasa operasi *hoist*, yang pada masa kini tidak sesuai untuk latihan seraca langsung di atas asbab-asbab keselamatan, walau bagaimanapun, boleh dilatihkan secara tiruan, membolehkan kru belakang untuk membina kelancaran prosedur dan membuat keputusan dibawah tekanan dalam persekitaran yang terkawal [4].

Dengan mengasingkan sebahagian besar daripada pemerolehan kemahiran dari kesediaan pesawat hingga jendela cuaca, VR menyediakan mekanisme latihan yang menyokong kesediaan CARILAMAT yang lebih tinggi tanpa peningkatan jam penerbangan secara langsung yang sepadan, konsisten dengan objektif kemampunan jangka panjang yang ditetapkan dalam *Defence White Paper (DWP)* pada tahun 2021 [11].

5.0 PERBINCANGAN

Analisis pengagihan jam penerbangan dari tahun 2022 hingga 2024 menunjukkan trend yang tetap antara output operasi dan keperluan latihan kru belakang CARILAMAT dalam Skuadron 11. Secara purata, kira-kira 30% daripada jumlah keseluruhan jam penerbangan diperuntukkan kepada aktiviti latihan. Walau bagaimanapun, latihan *winch* kru belakang khusus CARILAMAT hanya merangkumi kira-kira 10% daripada jumlah keseluruhan jam penerbangan setiap tahun.



Rajah 2. Purata Tahunan Pengagihan Jam Penerbangan 2022-2024 [12].

Rajah 2 menunjukkan bahawa pada tahun 2020, hanya 11% daripada jumlah keseluruhan jam penerbangan yang diperuntukkan untuk latihan CARILAMAT kru belakang. Sementara itu, aktiviti latihan lain merangkumi 16% daripada jumlah jam, dengan majoriti sebanyak 73% diperuntukkan kepada misi operasi harian. Data menunjukkan konsistensi bagi latihan CARILAMAT pada tahun 2023, dengan julat kekal sekitar 10% [12]. Kestabilan jam latihan CARILAMAT bagi kru belakang, walaupun tugas operasi semakin meningkat, menunjukkan had yang dikenakan oleh ketersediaan pesawat yang terhad, kekangan kebolegunaan, dan keutamaan misi yang bersaing. Ini menyokong keperluan bagi kaedah latihan alternatif.

Selain itu, dapatan daripada soal selidik berstruktur dalam talian telah dilengkapkan oleh 64 anggota tentera, yang terdiri daripada juruterbang dan kru belakang [13]. Beberapa trend utama telah muncul berkaitan dengan jurang latihan yang ditanggapi, kekangan dalam latihan *winch* secara langsung, dan peranan potensi VR sebagai latihan tambahan. Seramai 62% daripada peserta telah mengenal pasti pelbagai senario tidak mencukupi, terutamanya operasi malam dan kapal, yang merangkumi keadaan laut bergelora, menunjukkan pendedahan terhadap kepada kondisi operasi yang kompleks [13].

Sokongan terhadap integrasi VR secara amnya positif, dengan 65% daripada peserta bersetuju bahawa simulasi atau VR boleh memberi latihan berkesan terhadap latihan tiruan *winch*. Pertimbangan pengurusan risiko telah pun dikenal pasti sebagai faktor pengehad utama, dengan 75% setuju bahawa kekangan sedemikian menghalang latihan senario realistik semasa latihan secara langsung [13].

Walaupun maklum balas tinjauan ini menunjukkan sikap yang sebahagian besarnya positif terhadap penggunaan VR dalam latihan, ia hanya mencerminkan keberkesanan yang ditanggapi dan bukannya keberkesanan yang diukur secara empirikal, selain maklum balas tersebut dipengaruhi oleh kebiasaan dengan simulator berasaskan latihan untuk juruterbang.

Bagi menyokong perkara ini dengan lebih lanjut, temu bual yang dijalankan menyatakan bahawa pengenalan FFS untuk Skuadron 11 di Brunei memberikan kelebihan yang ketara dan menghasilkan peningkatan yang nyata dalam hasil latihan. Kesemua lima orang juruterbang senior yang terlibat dalam temu bual ini menyatakan konsensus yang jelas bahawa pengenalan latihan simulator ini membolehkan latihan yang lebih konsisten, memperkukuh pengetahuan prosedur dan mengurangkan kemerosotan kemahiran [14].

Kapten (U) Azhar Mahathir, Komander Operasi Penerbangan, *Flight Komander Operations* (FCO) Skuadron 11, menekankan bahawa kesediaan simulator telah menambah baik tempo latihan secara asas, mencatat bahawa, "*la telah mengubah sepenuhnya cara kita melihat kekerapan latihan. Kami juga sekarang boleh mengintegrasikan simulasi ke dalam jadual mingguan dengan lancar, membolehkan kami untuk mengumpulkan jumlah jam latihan yang kebiasannya tidak dapat dicapai secara fizikal sekiranya hanya bergantung semata-mata pada penerbangan secara langsung.*" [14].

Walaupun pengalaman tempatan menunjukkan manfaat ketara daripada kebolehcapaian dan penggunaan simulator, pendekatan latihan yang serupa pun juga telah berjaya diguna pakai oleh tentera udara yang mempunyai program latihan CARILAMAT dan *hoist* yang telah lama ditubuhkan.

Tentera Udara Diraja (RAF), yang dikenali dengani kualiti latihan dan profesionalisme mereka, menggunakan FFS, yang diintegrasikan dengan perkakasan pesawat *hoist* melalui Sistem Latihan Misi *Hoist* (*Hoist Mission Training System (HMTS)*) yang dicipta oleh *Bluedrop Training and Simulation*, seperti dalam **Rajah 3**. Sistem berketepatan tinggi (*high-fidelity*) ini membolehkan juruterbang dan kru belakang mempraktikkan prosedur kecemasan, memperkukuh koordinasi kru, dan menjalankan senario menyelamatkan dalam persekitaran yang terkawal, sekali gus mengurangkan risiko operasi [8].



Rajah 3. Penggunaan RAF HMTS Bluedrop untuk kru belakang.

Alat latihan RAF adalah seperti berikut:

a) HMTS

Mereka menggunakan *HMTS* yang serba canggih bagi membolehkan latihan kecemasan yang komprehensif merentasi pelbagai senario untuk meningkatkan kesiapsiagaan kru belakang dalam menangani situasi kecemasan. Ia juga berfungsi seiring dengan *FFS* juruterbang mereka, sebarang input daripada juruterbang kemudian akan ditunjukkan pada sesi simulator kru belakang dalam masa nyata. Simulator ini digunakan terutamanya untuk raptai misi, Pengurusan Sumber Kru (*Crew Resource Management (CRM)*) dan pemantapan kemahiran [8].

b) Simulator Penerbangan dan Cermin Mata VR

Selain daripada *HMTS*, mereka menggunakan perisian simulator penerbangan asas dengan profil penerbangan yang di pra-programkan, serta dilengkapi dengan cermin mata VR yang membina semula persekitaran kabin tersebut. Persediaan ini membolehkan latihan raptai sebelum misi penerbangan yang sebenar, mengoptimumkan penggunaan pesawat dengan memastikan semua jurulatih mahir dalam prosedur terlebih dahulu [8,15].



Rajah 4. Sistem simulasi VR Tentera US bagi peranan *winching* dan udara-ke-darat kru belakang

Sama seperti itu, Tentera Amerika Syarikat (US) menggunakan *Blackhawk Aircrew Trainer* (BAT) untuk 60 UH- kru bagi menyediakan simulasi kokpit dan kabin secara menyeluruh. BAT membolehkan kru berlatih prosedur standard dan kecemasan, termasuk menyelamatkan anggota tentera dan *hoist* kargo, yang seterusnya meningkatkan kecekapan prosedur dan CRM sambil mengurangkan kebergantungan pada penerbangan secara langsung. Selain memberi peluang untuk latihan yang terancang dan mengikut kesesuaian masa dengan waktu berehat untuk sesi taklimat, simulator juga berfungsi sebagai langkah penjimatan kos. Tentera US menggunakan pelbagai pelantar simulator yang khas untuk pelbagai peranan, termasuk *winching* dan latihan penembakan udara-ke-darat. Pelantar ini membolehkan latihan berulang dan pemantapan kemahiran dalam persekitaran terkawal, sekali gus memastikan kesediaan tanpa beban kos dan kekangan logistik yang berkaitan dengan operasi penerbangan secara langsung [16].

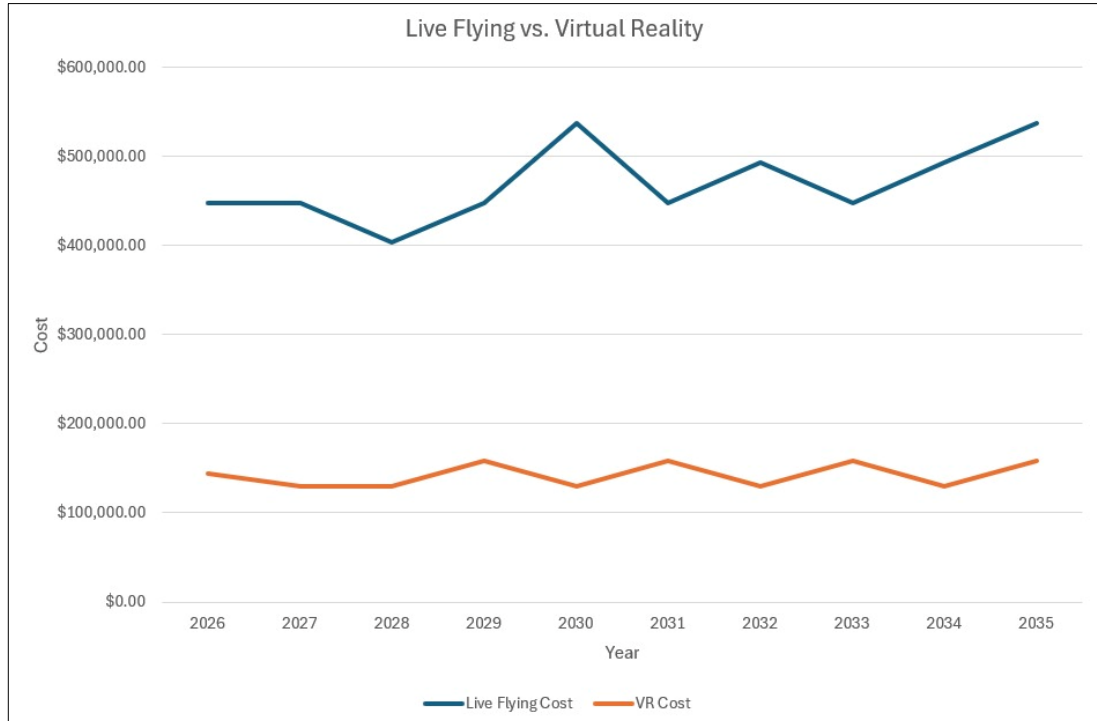


Rajah 5. Simulator VS Angkat Tentera Udara Republik Singapura.

RSAF mempunyai Simulator VR *Hoist* khususnya direka untuk meningkatkan kecekapan *winching* mereka, mengiktirafkannya sebagai salah satu peranan yang paling berisiko tinggi [17]. Simulator ini menawarkan persekitaran terkawal di mana kru belakang boleh berlatih dengan teliti dan memantapkan teknik mereka, sekali gus mengurangkan risiko sedia ada dan had operasi yang dikaitkan dengan senario dunia sebenar. Dengan mengutamakan kecekapan dalam operasi *winching*, mereka memastikan kru belakang bersedia sepenuhnya untuk melaksanakan misi penting menyelamatkan dan operasi dengan ketepatan dan keselamatan yang tertinggi.

Walaupun struktur dan skala angkatan berbeza, ciri-ciri kognitif, prosedur, dan risiko operasi *winching* adalah bersifat agnostik-platform (tidak bergantung pada jenis platform tertentu), sekali gus menyokong perkaitan sistem-sistem ini sebagai penanda aras dan bukannya sebagai templat langsung.

Tambahan pula, selaras dengan perspektif keberkesanan kos seperti yang digambarkan oleh Tentera AS, keseluruhan kos operasi VR adalah jauh lebih rendah berbanding kos latihan secara langsung pada masa hadapan, walaupun kos permulaan awal yang diperlukan adalah lebih kurang USD 1 juta [16]. Perbelanjaan ini dibandingkan dengan kos operasi latihan secara langsung yang melibatkan perbelanjaan bahan api, penyelenggaraan, dan kebolehhidmatan *hoist*. **Rajah 6** membandingkan perbelanjaan tahunan (berasaskan bahapn api) bagi latihan khusus selama 10 tahun, mengunjurkan Pulangan Pelaburan (*Return on Investment (ROI)*) yang pantas bagi penggunaan VR. Perlu dicatatkan bahawa kos bahan api hanyalah anggaran berdasarkan harga pasaran semasa bagi Jet A-1 berdasarkan purata jam bagi sesi latihan khusus *winch* setiap tahunan.



Rajah 6. Bayaran Operasi Antara Penerbangan Secara Langsung dan VR.

Dalam tempoh 10 tahun, anggaran penjimatan kos boleh mencecah USD 2 juta, yang merupakan jumlah yang amat besar dalam konteks pembangunan angkatan tentera jangka masa panjang dan pengoptimuman sumber. Penjimatan ini boleh diperuntukkan semula terhadap pembangunan keupayaan yang lain.

Walapun melibatkan pelaburan modal awal yang sangat tinggi, latihan VR membuktikan penyelesaian kewangan yang mampan yang melengkapkan latihan secara langsung dengan mengurangkan kos operasi berulang sambil mempertahankan kesinambungan dan keberkesanan latihan. Unjuran ROI ini mengukuhkan VR sebagai pemungkin latihan yang bijak dan berpandangan jauh, dan bukannya sebagai pengganti sepenuhnya.

Secara keseluruhannya, contoh-contoh ini menunjukkan bahawa latihan *winch* berasaskan VR semakin meluas digunakan untuk membina kecekapan kru belakang melalui amalan prosedur berisiko tinggi yang selamat, berulang dan piawai pada kos dan risiko yang jauh lebih rendah. Sebagai penanda aras, ia menyokong integrasi VR dalam simulasi *hoist VR* dalam kesinambungan latihan untuk meningkatkan teknik, pembuatan keputusan, dan koordinasi kru, sambil mengurangkan risiko operasi yang boleh dielakkan serta kebergantungan pada sorties latihan secara langsung.

6.0 KESIMPULAN

Modenisasi latihan *winching* dan CARILAMAT bagi kru belakang melalui VR merupakan tindak balas yang logik dan perlu bagi menangani cabaran yang dihadapi oleh Skuadron 11, memandangkan ia memegang peranan yang penting dalam CARILAMAT negara. Selaras dengan Titah Kebawah Duli untuk memanfaatkan aplikasi teknologi untuk meningkatkan keupayaan dalam struktur angkatan yang kecil, kajian ini membuktikan bahawa jurulatih *winch* dengan integrasi VR adalah munasabah dan boleh dipercayai dari segi operasi untuk Skuadron 11.

Berasaskan kejayaan yang telah sedia ada dalam latihan S-70i FFS ketepatan tinggi bagi juruterbang, VR juga menawarkan cara untuk memperluaskan faedah latihan sintetik kepada juruterbang, sekali gus menangani ketidakseimbangan semasa ini antara simulasi berfokuskan kokpit dan tugas CARILAMAT yang berasaskan kabin.

Oleh itu, latihan *winch* integrasi VR muncul sebagai penambahbaikan yang berdaya maju dan sejajar secara strategik dengan sistem latihan CARILAMAT TUDB, Ia menyediakan asas yang kukuh untuk mengekalkan kesediaan CARILAMAT jangka panjang dalam Skuadron 11, serta menawarkan titik permulaan yang logik dan kaedah kos efektif untuk integrasi latihan sintetik yang lebih luas bagi menyokong keperluan operasi pada masa hadapan untuk keseluruhan ABDB.

RUJUKAN

- [1] Royal Brunei Air Force. Vision, Mission and Roles [Internet]. Bandar Seri Begawan: MINDEF; [cited 2025 Dec 27]. Available from: <https://www.mindef.gov.bn/airforce/SitePages/Vision%20and%20Mission.aspx>
- [2] Michael King, Stephen Lenser, D. Rogers and H. Carnahan. "Helicopter Hoist Performance in Novice and Experienced Hoist Operators." *Aerospace medicine and human performance*, 91 6 (2020): 496-500. <https://doi.org/10.3357/amhp.5516.2020>.
- [3] Brunei MPTC CAE Brunei Multi-Purpose Training Centre (MPTC) | CAE [Internet]. CAE. 2023 [cited 2025 Dec 28]. Available from: <https://www.cae.com/defense-security/what-we-do/training-centres/cae-brunei-multi-purpose-training-centre-mptc/>
- [4] Gauldie R. Virtual worlds: synthetic training for SAR winch operators [Internet]. Bristol (UK): AirMed&Rescue; 2024 May 2 [cited 2025 Dec 27]. Available from:
- [5] <https://www.airmedandrescue.com/latest/long-read/virtual-worlds-synthetic-training-sar-winch-operators>
- [6] Zailani AF. Interview with Engineering Officer 51 Squadron - Serviceability of Blackhawk S70i of Royal Brunei Air Force. 2025.
- [7] Meteorological Department BD. Home - Climate MET [Internet]. Met.gov.bn. 2019 [cited 2025 Dec 21]. Available from:
- [8] <https://www.met.gov.bn/SitePages/climate.aspx>
- [9] T. Loetscher, A. M. Barrett, M. Billinghamurst, B. Lange, Twitter Tobias and Orcid iD. "Immersive medical virtual reality: still a novelty or already a necessity?" *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 94 (2023): 499 - 501. <https://doi.org/10.1136/jnnp-2022-330207>
- [10] Blue Drop Training & Simulations. Hoist Mission Training System (HMTS) - Bluedrop Training and Simulation [Internet]. Bluedrop Training and Simulation. 2025 [cited 2025 Dec 28]. Available from: <https://www.bluedropts.com/hoist-mission-training-system/>
- [11] VRAI Simulation. The Irish Air Corps - Search and Rescue Rear Crew Trainer [Internet]. Dublin (Ireland): VRAI Simulation; [date unknown; cited 2025 Dec 27]. Available from: <https://www.vraisimulation.com/case-studies/the-irish-air-corps---search-and-rescue-rear-crew-trainer>
- [12] Drwiega A. Brunei Air Force Pilots "Cool" with S-70i Simulator Training - Asian Military Review [Internet]. Asian Military Review. 2018 [cited 2025 Dec 28]. Available from: <https://www.asianmilitaryreview.com/2018/06/brunei-air-force-pilots-cool-with-s-70i-simulator-training/>
- [13] Key Defence and Security Implications. In: Defence White Paper 2021 [Internet]. Ministry of Defence Brunei Darussalam; 2021 [cited 2025 Dec 27]. p. 41. Available from: <https://www.mindef.gov.bn/Defence%20White%20Paper/DWP%202021.pdf>
- [14] Royal Brunei Air Force. 11 Squadron Yearly Operational Hours (2022 - 2024). Flight Commander Training; 2024.
- [15] Training without Limits: VR Integration 11 Squadron Rear Crew Survey. 2025.

- [16] 11 Squadron Senior Pilots. Introduction of Full Flight Simulator for Blackhawk S70i at CAE MPTC Brunei Darussalam. 2025.
- [17] Defence Equipment & Support. "Immersive" VR tech boosting RAF helicopter trainees' skills [Internet]. Bristol (UK): DE&S; 2024 Jan 19 [cited 2025 Dec 27]. Available from: <https://des.mod.uk/immersive-vr-tech-boosting-raf-helicopter-trainees-skills/>
- [18] Government Accountability Office (US). Military readiness: actions needed to further improve physical and virtual training integration. Washington, DC: GAO; 2022. (GAO-22-104730).
- [19] Cong Joshua LW, Wee AC, Wei Qiang AL, Kheng Frederick TL, Christopher Mark DR. Simulator-based, Machine Learning-modelled, Psychophysiological Measurement-augmented, Pilot Screening in the Republic of Singapore Air Force. *Transportation Research Procedia*. 2025 May 19; 88:149–56.

Mengenai Pengarang

► *Kapten (U) Fathin 'Athifah binti Haji Abidin*

Beliau merupakan seorang pegawai Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB) yang kini berkhidmat sebagai Penolong Pegawai Memerintah Skwadron dan Pemangku Pegawai Memerintah Skwadron bagi Skwadron 41, Cawangan No. 4, Kumpulan Bantu, TUDB. Beliau telah berkhidmat dalam unit ini sejak tahun 2020, dengan memegang pelbagai jawatan progresif dalam kepimpinan pentadbiran dan logistik. Beliau memulakan kerjayanya sebagai Pegawai Pentadbir di Cawangan No. 4, dan seterusnya berkhidmat di Skwadron Bekalan Teknikal, yang kemudian dikenali sebagai Skwadron 43, dimana beliau bertanggungjawab sebagai Pegawai Menjaga Stor Hadapan dan kemudiannya sebagai Pegawai Menjaga Stor Utama. Pengalaman ini telah memberikan beliau pendedahan operasi yang komprehensif dalam pelaksanaan rantaian bekalan, pengurusan stor dan tadbir urus logistik di peringkat unit.

Beliau memiliki Sarjana Sains dalam Pengurusan dan Kewangan dari Universiti Birmingham City, United Kingdom, yang menjadi asas kepada pendekatan beliau dalam perancangan logistik, kawalan kos, dan pengoptimuman prestasi. Beliau telah memainkan peranan aktif dalam pembentukan *Air Force Domestic Logistics System (ADLS)* – sebuah platform digital dalaman yang memusatkan segala data inventori, meningkatkan akauntabiliti dan kebolehkesanan, serta memperkemas aliran kerja logistik dengan mengurangkan proses manual. Usaha beliau menyumbang secara langsung kepada peningkatan kecekapan logistik, pembuatan keputusan yang lebih baik, dan pengukuhan keupayaan kelestarian bagi menyokong operasi TUDB.

PAKAIAN TENTERA DAN PERALATAN INOVATIF BAGI ANGKATAN BERSENJATA DIRAJA BRUNEI (ABDB): MENINGKATKAN KETAHANAN HABA, KESELAMATAN, DAN KEBERKESANAN OPERASI

Kpt (U) Fathin 'Athifah binti Haji Abidin

Squadron 41, Cawangan No. 4, Kumpulan Bantu

Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB)

ABSTRAK

Satu penilaian terhadap keperluan pakaian tentera dan peralatan pelindungan diri (PPE) dalam Angkatan Bersenjata Diraja Brunei (ABDB) telah dijalankan dalam kertas kerja ini bagi membolehkan penambahbaikan dalam aspek keselamatan, ketahanan haba, dan keberkesanan operasi dilakukan dalam persekitaran tropika Brunei. Dapatan yang diperolehi daripada kajian ini menekankan bahawa terdapat kekangan yang dikaitkan dengan pakaian seragam semasa, termasuk modulariti yang terhad, kawalan haba yang terhad, agihan berat yang tidak mencukupi, dan reka bentuk responsif jantina yang kurang memadai. Potensi besar bagi penambahbaikan telah dikenal pasti melalui penandaan terhadap maklum balas awal pengguna dan angkatan tentera antarabangsa melalui teknologi boleh pakai pintar, fabrik canggih, dan sistem galas beban modular. Terdapat kepentingan yang signifikan dalam memodenkan pakaian dan peralatan TUDB bagi mengurangkan risiko kecederaan, memperkukuh prestasi operasi, dan menyokong pembangunan keupayaan tri-service (tiga perkhidmatan) secara berkesan.

Kata Kunci:

Peralatan Pelindungan Diri Tentera; Ketahanan Haba; Teknologi Boleh Pakai Pintar; Sistem Galas Beban Modular; Keberkesanan Operasi Logistik Tentera; Pendigitalan Logistik; Sistem Pertahanan Logistik; Pengurusan Aset; Kesediaan Operasi

1.0 PENDAHULUAN

Operasi Angkatan Bersenjata Diraja Brunei (ABDB) adalah berada dalam salah satu persekitaran tropika di Asia Tenggara yang paling mencabar, yang disifatkan oleh beberapa faktor seperti haba yang kuat, kelembapan tinggi, dan kekerapan hujan yang lebat sepanjang tahun. Purata suhu siang hari kebiasaannya antara 24°C dan 36°C dan tahap kelembapan kekal 80% secara konsisten. Ada beberapa keadaan persekitaran yang ekstrem dimana askar-askara akan terdedah secara rutin semasa pelaksanaan operasi, latihan, bantuan kemanusiaan, aktiviti maritim, dan operasi bantuan bencana. Terdapat pengaruh yang ketara daripada keadaan iklim ini pada kebolehan dalam

membuat keputusan, ketahanan fizikal, tempo operasi, terutamanya semasa beroperasi di bawah bebanan peralatan yang berat dan misi yang berpanjangan.

Seiring dengan agenda transformasi strategik yang konsisten dari ABDB, peralatan pelindung diri (*Personal Protective Equipment (PPE)*) dan pemodenan sistem pakaian telah menjadi keperluan kritikal. Tambahan pula, agenda transformasi ini juga selaras dengan pembangunan keupayaan, keutamaan pertahanan negara, dan inisiatif digital yang sedang berlangsung dalam Kementerian Pertahanan. Terdapat peningkatan permintaan terhadap kerjasama *tri-service* (tiga perkhidmatan), kebolehkendalian, dan integrasi teknologi baru dalam evolusi sifat operasi ketenteraan. Ini meningkatkan daya kemandirian, kesedaran situasi, dan ketangkasan operasi sistem tentera. Selari dengan itu, terdapat peningkatan dalam penggunaan peranti boleh pakai pintar, tekstil canggih, peralatan responsif jantung, dan sistem gear modular oleh pasukan pertahanan global. Oleh itu, keperluan bagi ABDB untuk menyemak semula dan menaik tarak *PPE* serta pakaian modennya diperkukuhkan lagi oleh trend global supaya ABDB kekal cekap dari segi teknikal dan berdaya tahan secara operasi.

Walaubagaimanapun, walaupun beberapa penambahbaikan telah pun dibuat, ada beberapa kekangan yang dihadapi oleh pakaian seragam ABDB dan alat pelindung semasa yang mempengaruhi prestasi optimum dalam persekitaran tropika. Ada beberapa aspek yang termasuk dalam perkara ini seperti keupayaan menyerap lembapan yang terhad, ketahanan haba yang kurang dalam teknologi kain, jurang dalam keselesaan dan kesesuaian untuk angkatan tentera wanita, serta pengagihan berat yang tidak optimum untuk peralatan gelas beban. Tambahan pula, ada terdapat kapasiti penyepaduan terhad dalam komponen teknologi pintar dalam sistem semasa, yang juga termasuk pemantauan alam sekitar, sensor biometrik, serta sokongan komunikasi masa nyata. Ada pengaruh yang signifikan terhadap kekangan ini yang menyumbangkan kepada kekurangan kecekapan ergonomik, meningkatkan keletihan, menaikkan risiko kecederaan berkaitan dengan haba, serta kekurangan dalam ketahanan misi. Oleh itu, pengurusan yang betul untuk kekangan ini perlu dilakukan supaya cabaran-cabaran ini boleh dikurangkan dengan berkesan.

Tujuan utama kajian ini adalah untuk menilai peralatan perlindungan diri dan pakaian tentera inovatif sama ada ianya selaras dengan keperluan operasi dan matlamat pemodenan ABDB. Ini termasuk penilaian sistem beban gear modular, bahan canggih yang direka untuk pengurusan haba, teknologi peranti boleh pakai pintar, dan perlindungan kalis api yang lebih baik. Tambahan lagi, potensi cara pembangunan kolaboratif dan pelaksanaan berperingkat akan dikenal pasti dalam kertas kerja ini melalui perkongsian industri, penyelidik sains pertahanan, dan penilaian maklum balas pengguna dalam persekitaran *tri-service*.

Kajian ini mempunyai kepentingan yang signifikan kerana melalui pelaksanaan yang betul, peningkatan keselamatan, prestasi operasi, dan daya tahan anggota ABDB dapat dilakukan dengan memperkukuh daya kemandirian, mengurakan tekanan fisiologi, dan meningkatkan kesediaan misi. Bagi Tentera Darat Diraja Brunei (TDDB), Tentera Laut Diraja Brunei (TLDB), dan Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB), daya sedia masa hadapan boleh dicapai melalui pemodenan pakaian dan peralatan, bagi memastikan tindak balas yang betul dan berkesan terhadap cabaran yang telah dikenal pasti.

2.0 KAJIAN LITERATUR

Pakaian moden tentera dan peralatan perlindungan diri (*PPE*) telahpun berkembang secara eksponen semenjak 20 tahun yang lalu disebabkan oleh perkembangan sains tekstil, ergonomik, dan teknologi di medan perang. Pasukan pertahanan dunia menjadi lebih sedar ke akan fakta bahawa pakaian seragam dan peralatan pelindung bukan sekadar pakaian isu standard lagi, malahan adalah bahagian penting untuk daya kemandiran, prestasi fizikal dan keberkesanan misi tentera [1]. Ia telah dinyatakan dalam kajian bahawa pakaian operasi perlu memenuhi beberapa keperluan seperti pengurusan haba, ketahanan, mobiliti, perlindungan balistik dan kesesuaian dengan bebanan operasi tentera. Keperluan tersebut meningkat dalam kawasan tropika seperti Asia Tenggara dimana kelembapan dan pendedahan pada haba memberikan masalah fisiologi yang ketara kepada anggota tentera.

2.1 | Fabrik Termaju untuk Ketahanan Haba dan Pengurusan Kelembapan

Terdapat banyak kajian terkini yang telah dijalankan yang menekankan kepentingan kain berprestasi tinggi yang mempunyai mekanisme aktif dalam mengawal suhu badan dan menggalakkan keselesaan terma dibawah keadaan cuaca yang ekstrem. Penerapan tekstil yang menyerap kelembapan dan cepat kering, sistem pengudaraan jejaring teledup pun dilaksanakan dalam tentera moden seperti Angkatan Tentera Singapura (SAF) dan Angkatan Pertahanan Australia (ADF) untuk mengurangkan pembentukan haba dan meningkatkan penyejukan penyejukan daya para tentera [2]. Kajian menunjukkan bahawa tekanan terma dan kecederaan haba ada kesan buruk yang ketara terhadap pemprosesan kognitif, masa tindak balas, dan pembuatan keputusan, yang mana boleh memberi kesan kepada hasil misi dan keselamatan [3]. Teknologi tekstil yang baru seperti bahan ubah fasa (*phase-change materials (PCM)*), rawatan anti-mikrob dan kemasan tahan UV telah dikenalkan untuk menghentikan pengumpulan haba dan pembiakan bakteria di bawah kondisi medan berpanjangan [4]. Dalam pasukan operasi tropika di persekitaran hutan, jenis bahan ini boleh membantu dalam ketahanan dan mengurangkan kemungkinan gangguan operasi.

2.2 | Integrasi Sensor dan Sistem Bahan Pakai Pintar

Inovasi dalam teknologi pertahanan yang terkini telah memperkenalkan sistem bahan pakai elektronik yang dapat menunjukkan informasi masa nyata pada status kesihatan, penghidratan, keletihan dan persekitaran tentera. Terdapat beberapa eksperimen yang telah dilaksanakan oleh Tentera Amerika Syarikat dan Angkatan Tentera British mengenai penggunaan *integrated-sensor* fisiologi sebagai salah satu bahagian pakaian seragam dan perisai badan untuk meningkatkan kesedaran situasi dan memberikan sokongan untuk membuat keputusan arahan [5]. Sistem ini membolehkan pengesanan awal keletihan haba, kekurangan hidrasi dan keterlaluan banyak kerja supaya dapat mengurangkan jumlah kecederaan yang boleh dielakkan. Kecenderungan kajian masa hadapan adalah terhadap antena berasaskan tekstil, pengagihan kuasa, dan ketersambungan paparan awal untuk membolehkan aliran komunikasi tanpa menambah berat kepada beban atau menghadkan mobiliti manusia. Tambahan lagi, terdapat beberapa isu juga yang berkaitan dengan hayat bateri, kemampuan alam sekitar dan keperluan perlindungan keselamatan siber.

2.3 | Peralatan Galas Beban Modular dan Prestasi Ergonomik

Kajian telah menunjukkan bahawa bebanan berat terhadap tentera adalah salah satu punca utama kecederaan muskuloskeletal, keletihan, mobiliti rendah dan kapasiti operasi yang terjejas [6]. Sistem beban moden seperti sistem MOLLE (Peralatan Pembawa Beban Ringan Modular) yang digunakan oleh Tentera NATO dan Sistem Askar Bersepadu Tentera Darat Kanada menggambarkan bagaimana modulariti boleh berguna untuk mengagihkan semula berat dan menyediakan rekabentuk yang berfokus kepada misi. Sistem gear modular membolehkan kakitangan untuk mengubah peralatan mengikut rupa bumi, tugas atau tahap ancaman, yang mana boleh mengurangkan ketegangan yang tidak perlu [7]. Peningkatan pengendalian beban adalah amat membimbangkan terutamanya misi maritim dan aeroangkasa dimana pintu kecemasan dan kelajuan pergerakan memerlukan tahap ketangkasan yang tinggi.

2.4 | Rekabentuk Pakaian Seragam Responsif Jantina dan PPE

Inisiatif untuk mengintegrasikan wanita pada barisan hadapan dan jawatan pakar pada kebanyakan tentera telahpun meningkatkan keperluan untuk membuat *PPE* dan pakaian seragam yang direka bentuk untuk memenuhi saiz antropometrik wanita. Didapati bahawa perisai yang tidak sesuai dan pakaian yang merosot gerakan boleh meningkatkan risiko kecederaan dan mengurangkan keberkesanan operasi [8]. MoD UK dan Korp AS Marin juga telah melancarkan perisai badan dan pakaian seragam boleh suai untuk wanita bagi meningkatkan prestasi dan keselesaan anggota wanita. Semakin ramai wanita menyertai perkhidmatan ABDB, semakin banyak peralatan responsif jantina yang patut dipertimbangkan untuk mencapai tahap seimbang antara keselamatan dan kriteria keupayaan.

2.5 | Relevansi Terhadap Angkatan Bersenjata Diraja Brunei

Dalam ABDB, pakaian seragam dan *PPE* semasa telah pun mengalami satu siri peningkatan minor, yang mana pengalaman haba optimum, sistem pengurusan beban modular, teknologi pintar, serta kesesuaian-inklusiviti belum disediakan [9]. Memandangankan persekitaran operasi yang mencabar misi *tri-service* dengan suhu tinggi dan pelbagai keperluan misi, kebolehan mengintegrasikan amalan terbaik dari peringkat antarabangsa serta pengajaran dari penyelidikan dalam memudahkan dorongan terhadap pemodenan pertahanan dan transformasi digital adalah amat penting.

3.0 KAEDAH

Dalam kajian ini, penandaarasan perbandingan dan metodologi analisis keperluan pengguna adalah digunakan untuk menganalisis peluang untuk menambah baik pakaian seragam tentera dan *PPE* bagi ABDB. Metodologi ini melibatkan gabungan kajian sekunder, analisis daripada amalan terbaik seluruh dunia, dan wawasan terhadap pengguna baris hadapan untuk mengenal pasti jurang kebolehan serta keperluan yang mungkin dapat digunakan dalam persekitaran operasi ABDB.

3.1 | Penanda Aras Perbandingan

Analisis penandaarasan telah dilaksanakan berdasarkan perbandingan antara angkatan tentera global terpilih yang telah menjalankan usaha pemodenan pakaian tempur dan peralatan pertahanan [10]. Pilihan daya rujukan adalah berdasarkan keserupaan persekitaran operasi di kawasan tropika, tahap pembangunan teknologi, serta kesesuaian untuk interoperabiliti dan kerjasama latihan. Pasukan tersebut ialah Angkatan Bersenjata Singapura (SAF), Angkatan Tentera Malaysia (MAF), Angkatan Pertahanan Australia (ADF), Tentera Amerika Syarikat dan Kementerian Pertahanan United Kingdom. Artikel penyelidikan, penerbitan pertahanan dan kajian kes yang tersedia kepada umum telah diteliti bagi membandingkan kemajuan dalam prestasi fabrik, sistem gelas beban modular, perlindungan balistik serta integrasi sensor boleh pakai. Tatacara penandaarasan ini membantu dalam mengenal pasti inovasi sedia ada yang boleh disesuaikan oleh ABDB, dengan mengambil kira saiz organisasi, iklim serta profil misi [12].

3.2 | Penilaian Keperluan Pengguna

Pakaian dan kelengkapan ketenteraan kebanyakannya digunakan oleh anggota operasi, maka adalah penting untuk memahami pengalaman sebenar mereka bagi menentukan kecekapan sistem sedia ada. Reka bentuk tinjauan konseptual yang menyerupai kajian *Air Force Domestic Logistics System (ADLS)* dilihat sebagai alat yang sesuai untuk menentukan persepsi dan keperluan anggota terhadap prestasi haba, keselesaan, mobiliti, ketahanan serta kesesuaian jantina bagi uniform dan PPE sedia ada. Walaupun hasil tinjauan masih pada peringkat penerokaan awal, maklum balas pengguna telah dikenal pasti sebagai amat penting dalam menetapkan keutamaan yang realistik serta mengesahkan andaian penyelidikan [11]. Input yang diperolehi dibahagikan kepada kekangan prestasi, ergonomik, kebimbangan keselamatan dan jangkaan penambahbaikan masa hadapan.

3.3 | Kriteria Penilaian

Satu rangka kerja penilaian pelbagai kriteria yang merangkumi lima dimensi utama telah dibangunkan untuk menilai inovasi berpotensi:

1. Kesesuaian iklim, seperti rintangan haba, kebolehnafasan, rawatan kelembapan dan kawalan suhu;
2. Prestasi keselamatan dan perlindungan, termasuk rintangan balistik dan api, penyerapan hentakan serta mitigasi kejutan;
3. Keupayaan integrasi, yang melibatkan integrasi peralatan modular, integrasi sensor dan sistem pengagihan beban;
4. Keupayaan integrasi, yang melibatkan integrasi peralatan modular, integrasi sensor dan sistem pengagihan beban;
5. Kos dan kebolehlaksanaan, meliputi sumber perolehan, penyelenggaraan, kebolehskalaan serta kemungkinan pelaksanaan secara berfasa.

3.4 | Analisis Data

Pengumpulan data telah dilaksanakan melalui penanda aras dan maklum balas pengguna, dan analisis kualitatifnya dilakukan dengan membandingkan dapatan terhadap rangka kerja penilaian bagi mengenal pasti jurang keupayaan serta bidang keutamaan untuk penambahbaikan. Hasil analisis juga menjadi asas kepada bahagian Keputusan dan Perbincangan yang menghuraikan inovasi yang dicadangkan bagi pemodenan pakaian dan *PPE* ABDB selaras dengan matlamat transformasi strategik.

4.0 HASIL DAPATAN

Penandaarasan perbandingan dan tindak balas pengguna awal menunjukkan bahawa kedua-dua jurang keupayaan utama dalam pakaian tentera dan *PPE* ABDB sedia ada dan kawasan tumpuan yang memerlukan penambahbaikan. Satu pendedahan yang penting telah didapati daripada keputusan bahawa pakaian seragam dan peralatan semasa adalah sangat ringkas dan tidak menyesuaikan diri dengan iklim serta cekap secara ergonomik dengan keperluan untuk berfungsi dalam jangka panjang di bawah keadaan iklim Brunei. Kawalan terma, kelembapan dan pengudaraan didapati terhad secara kerap dan disebut sebagai faktor menyebabkan ketidakselesaian dan tekanan haba, terutamanya apabila terlibat dalam latihan padang yang lama serta operasi hutan. Masalah dengan pengagihan berat semasa mengangkat peralatan menanggung beban juga telah dilaporkan oleh pengguna, dimana pengguna menjadi lebih letih dan perlahan ketika membawa peralatan tersebut.

Selain itu, semakan ini juga mendapati integrasi terhad secara rasmi bagi teknologi pintar yang sedang muncul, termasuk, sensor pemantauan fisiologi, elemen ketersambungan digital, atau sistem maklum balas prestasi berasaskan keadaan, yang menjadi standard sekiranya berlaku angkatan pertahanan moden. Kekurangan modulariti dalam peralatan yang sedia ada adalah menjadi satu halangan kepada konfigurasi khusus misi, dan penambahan kakitangan wanita telah menunjukkan potensi untuk mereka bentuk pakaian seragam secara khusus bagi memenuhi keperluan setiap jantina, membolehkan kesesuaian, keselamatan dan kecekapan yang lebih baik.

Jadual 1. Jurang Keupayaan dan Keutamaan Inovasi yang Dikenalpasti.

Bahagian Yang Dikenal pasti	Isu Semasa	Keutamaan Penambahbaikan Yang Diperlukan
Ketahanan haba & kesesuaian terma	Pengudaraan yang lemah dan tekanan haba	Teknologi penyejukan integrasi, tekstil penyerap kelembapan, dan fabrik bernafas yang termaju.
Integrasi teknologi pintar	Tiada sokongan sambungan digital atau sensor	Keserasian komunikasi dan sistem pemantauan boleh pakai
Ekonomik menanggung beban	Pengagihan berat yang tidak sekata	Penggunaan yang lebih baik, sokongan keseimbangan dan sistem modular

Perlindungan dan ketahanan	Penilaian balistik standard	Dipertingkatkan nyalaan, pemotongan dan ketahanan hentaman
Reka bentuk responsif jantina	Kesesuaian dan saiz wanita terhad	Penyelarasan reka bentuk ergonomik dengan dimensi badan

Oleh itu, keperluan untuk memodenkan *PPE* dan pakaian ABDB adalah disokong oleh keputusan, dengan tekanan terhadap kejuruteraan faktor manusia, bahan termaju, integrasi teknologi, dan modulariti. Sehubungan dengan itu, dengan keputusan ini, asas bagi laluan pelaksanaan strategik telah diwujudkan.

5.0 PERBINCANGAN

Ia menunjukkan bahawa terdapat keperluan yang pasti untuk memodenkan pakaian tentera dan peralatan perlindungan untuk Angkatan Bersenjata Diraja Brunei untuk menambahbaik prestasi operasi, keselamatan, dan ketahanan dalam tetapan *tri-service*. Jurang keupayaan yang dikenal pasti, terutamanya yang berkaitan dengan ketahanan haba, pengagihan beban ergonomik, keterangkuman jantina, dan kekurangan integrasi teknologi, mewakili isu-isu yang dihadapi oleh tentera. Ini perlu dikendalikan dalam iklim panas dan lembap yang biasanya dihadapi. Tekanan haba dan keletihan fizikal adalah risiko operasi yang amat penting, yang memberi kesan kepada daya tahan, prestasi kognitif serta kesediaan misi [13]. Justeru, penggunaan teknologi tekstil berteknologi tinggi, termasuk gentian penyerap kelembapan, bahan pengawalan haba perubahan fasa, dan rawatan antimikrob, adalah peluang yang berdaya maju untuk mengurangkan fisiologi beban semasa tugas lapangan yang dilanjutkan.

Semakan penandaarasan mendedahkan bahawa peralihan yang ketara dikalangan pasukan pertahanan telah menuju ke sistem galas beban modular dan sistem pemantauan bahan pakai pintar untuk meningkatkan fleksibiliti, keselamatan dan responsif dalam arahan. Dengan menggabungkan inovasi ke dalam ABDB, akan ada kemungkinan untuk menganjurkan peralatan yang lebih cekap, peningkatan mobiliti, dan membantu mengenalpasti kecederaan yang berkaitan dengan haba atau yang berlebihan pada peringkat awal. Begitu juga, reka bentuk seragam dan perisai akan kekal renponsif jantina untuk menyediakan perlindungan dan keselesaan yang adil dan meliputi peningkatan bilangan kakitangan wanita dalam tugas khusus [14].

Usaha pemodenan seperti yang disediakan mempunyai kelebihan yang ketara, tetapi pelaksanaan boleh dijalankan melalui proses pengambilan secara baransur-ansur kerana faktor kewangan dan perolehan. Kerjasama dengan pengeluar industri pertahanan, sokongan dari kajian *DSTG*, dan ujian pengguna rasmi adalah penting bagi memastikan ianya adalah sesuai untuk misi di Brunei dan iklim tropiknya. Lebih-lebih lagi, peralihan ke pakaian berinovasi dan penyelesaian *PPE* berkolerasi dengan matlamat strategik pemodenan dan pendigitalan ABDB, yang meningkatkan kesediaan dan menjadikan kerja lebih cekap dalam bidang operasi darat, maritim, dan udara.

6.0 KESIMPULAN DAN CADANGAN

Secara kesimpulannya, boleh dikatakan ada kepentingan yang ketara untuk memodenkan pakaian tentera dan peralatan pelindung diri Angkatan Senjata Diraja Brunei untuk menjadikannya sesuai dengan keperluan dan keadaan operasi kontemporari. Pakaian seragam dan peralatan yang sedia ada, walaupun praktikal, tidak tahan haba secara maksimum, ergonomik, neutral jantina, atau serasi dengan sistem pintar masa hadapan. Terdapat beberapa kesan daripada kekangan ini seperti kurang mobiliti, keletihan, dan menambah kecedederaan yang berkaitan dengan haba, yang mana boleh mempengaruhi ketahanan dan keselamatan misi sepanjang persikikan balas *tri-service*. Kejayaan trend pakaian dan *PPE* dengan pertolongan bahan inovatif, mekanisme pembawa beban boleh laras, lebih banyak kain pelindung, dan teknologi bahan pakai akan pergi jauh dalam meningkatkan prestasi fizikal, daya kemandirian, dan kesediaan operasi.

Terdapat beberapa cadangan yang boleh diberikan yang mana pelaksanaan sistem pemodenan yang berkesan dapat dilakukan. Ini boleh dimulakan dengan strategi perolehan berperingkat dan berasaskan percubaan adalah untuk dipertimbangkan, dan ia perlu dimulakan dengan ujian prototaip dengan kerjasama pengguna akhir dari tentera darat, tentera laut dan tentera udara. Kedua, pelaksanaan ini harus membentuk perkongsian dengan organisasi penyelidikan pertahanan, pakar dalam bidang teknologi tekstil, dan pengilang dalam industri untuk memudahkan inovasi yang lebih pantas [15]. Ketiga, kesesuaian ergonomik dan saiz responsif jantina patut diutamakan bagi memastikan semua orang sesuai. Akhir sekali, ulasan sistematik dan sistem maklum balas pengguna mesti disepadukan untuk sentiasa menambahbaik hasil prestasi. Pelaburan yang berpandangan ke hadapan dalam pakaian dan peralatan baru adalah penting bagi membantu transformasi tentera di ABDB dan mampu mempunyai pasukan tentera yang berdaya tahan dan bersedia untuk masa hadapan.

RUJUKAN

- [1] Armstrong, N. C., Rodrigues, S. A., Gruevski, K. M., Mitchell, K. B., Fogarty, A., Saunders, S., & Bossi, L. (2025). Clothing and individual equipment for the female soldier: developing a framework to improve the evidence base which informs future design and evaluation. *BMJ Mil Health*, 171(5), 397-401. <https://militaryhealth.bmj.com/content/jramc/171/5/397.full.pdf>
- [2] Shahzad, A. (2023). Study of liquid and moisture management properties of fabrics by using a novel sweating simulator. <https://theses.lib.polyu.edu.hk/bitstream/200/12534/3/6981.pdf>
- [3] Thompson, C., Ferrie, L., Pearson, S. J., Highlands, B., & Matthews, M. J. (2024). Do extreme temperatures affect cognition? A short review of the impact of acute heat stress on cognitive performance of firefighters. *Frontiers in psychology*, 14, 1270898. <https://www.frontiersin.org/journals/psychology/articles/10.3389/fpsyg.2023.1270898/pdf>
- [4] Pattanaik, P., Venkatraman, P. D., Tripathy, H. P., Butler, J. A., Mishra, D. K., & Holderbaum, W. (2024). Next Generation Self-Sanitising Face Coverings: Nanomaterials and Smart Thermo-Regulation Systems. *Textiles*, 5(1), 1. <https://www.mdpi.com/2673-7248/5/1/1>
- [5] Shaw, D. M., & Harrell, J. W. (2023). Integrating physiological monitoring systems in military aviation: a brief narrative review of its importance, opportunities, and risks. *Ergonomics*, 66(12), 2242-2254. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00140139.2023.2194592>

- [6] Orr, R., Pope, R., Lopes, T. J. A., Leyk, D., Blacker, S., Bustillo-Aguirre, B. S., & Knapik, J. J. (2021). Soldier load carriage, injuries, rehabilitation and physical conditioning: an international approach. *International journal of environmental research and public health*, 18(8), 4010. <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/8/4010>
- [7] Nguyen, H. A., & Ha, Q. P. (2023). Robotic autonomous systems for earthmoving equipment operating in volatile conditions and teaming capacity: a survey. *Robotica*, 41(2), 486-510. <https://opus.lib.uts.edu.au/bitstream/10453/156179/2/Robotica-21-205-R1.pdf>
- [8] Tamjid, M. I., Abteew, M. A., & Kopot, C. (2025). Lightweight Textile and Fiber-Reinforced Composites for Soft Body Armor (SBA): Advances in Panel Design, Materials, and Testing Standards. *Journal of Composites Science*, 9(7), 337. https://research-repository.rmit.edu.au/articles/thesis/Comfort_and_stab-resistant_performance_of_body_armour_fabrics_and_female_vests/27581337/1/files/50753943.pdf
- [9] Dolez, P. I., Marsha, S., & McQueen, R. H. (2022). Fibers and textiles for personal protective equipment: review of recent progress and perspectives on future developments. *Textiles*, 2(2), 349-381. <https://www.mdpi.com/2673-7248/2/2/20>
- [10] Avila-Nieto, A. (2025). The Military Aerospace Supremacy Index: A Comprehensive Score of America's and China's Multirole and Fighter Aircraft Based On Quantity, Performance, Cost, and Strategic Effectiveness. https://www.polisci.uci.edu/files/docs/theses/2024-25/2025_angel_avila-nieto.pdf
- [11] Paulus, D., Fathi, R., Fiedrich, F., de Walle, B. V., & Comes, T. (2024). On the interplay of data and cognitive bias in crisis information management: An exploratory study on epidemic response. *Information Systems Frontiers*, 26(2), 391-415. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10796-022-10241-0.pdf>
- [12] Denkler, T. (2021). Accreditation in Europe: benchmarking the operations of European accreditation bodies using an innovative management tool. *Accreditation and Quality Assurance*, 26(1), 47-57. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00769-021-01459-7.pdf>
- [13] Ojanen, T., Margolis, L., Van Der Sanden, K., Haman, F., Kingma, B., & Simonelli, G. (2025). Cold operational readiness in the military: from science to practice. *BMJ Mil Health*, 171(5), 428-432. <https://militaryhealth.bmj.com/content/jramc/171/5/428.full.pdf>
- [14] Armstrong, N. C., Rodrigues, S. A., Gruevski, K. M., Mitchell, K. B., Fogarty, A., Saunders, S., & Bossi, L. (2025). Clothing and individual equipment for the female soldier: developing a framework to improve the evidence base which informs future design and evaluation. *BMJ Mil Health*, 171(5), 397-401. https://research-repository.rmit.edu.au/articles/thesis/Development_of_firefighters_protective_jacket_for_female_firefighters_offering_improved_thermal_comfort_through_modification_of_materials_garment_design_construction_and_fit/27590721/1/files/50760906.pdf
- [15] Reis, J., Melão, N., Costa, J., & Pernica, B. (2022). Defence industries and open innovation: ways to increase military capabilities of the Portuguese ground forces. *Defence Studies*, 22(3), 354-377. https://drive.google.com/file/d/1fwBy4_5hEB4gg0ZGynyszJABQZ8GnYxv/view

Mengenai Pengarang

► *Leftenan Kolonel (U) Malcolm Craig*

Beliau merupakan Ketua Keselamatan Penerbangan, TUDB, yang menyertai Angkatan Bersenjata Diraja Brunei (ABDB) setelah berkhidmat selama 4 tahun sebagai Penyiasat Kemalangan Pesawat dan satu-satunya Pengurus Tapak Nahas (*Crash Site Manager*) bagi Kementerian Pertahanan United Kingdom. Beliau memiliki kelulusan pasca-ijazah dalam Penyiasatan Kemalangan Udara dan telah terlibat dalam siasatan beberapa kehilangan pesawat secara bencana, sama ada melibatkan kematian atau tidak, termasuk insiden kehilangan, pencarian dan kerja-kerja pengambilan semula pesawat F-35 dari kapal induk HMS Queen Elizabeth. Selain itu, beliau juga mempunyai kelayakan dalam Pengurusan Pasca-Nahas Pesawat (termasuk operasi udara), Pengenalpastian Mangsa Bencana, Penyiasatan Kemalangan Maritim, Fasilitasi Latihan Faktor Manusia serta Fotografi Forensik.

► *Mejar (U) Azhar @ Reamy bin Hj Jumat*

Beliau mempunyai latar belakang akademik dalam bidang Perniagaan dan Kewangan [Perbankan], telah berkhidmat sejak tahun 2008 melalui Pengambilan OCS Siri 1. Beliau pernah menerbangkan pesawat Bell 212 dan seterusnya Blackhawk S70i, dengan jumlah pengalaman penerbangan lebih kurang 1,700 jam, dan kini memegang jawatan sebagai Timbalan Pegawai Turus Keselamatan Penerbangan, TUDB.

► *Kapten (U) Norasiah bin Hussin*

Beliau kini sedang berkhidmat sebagai Penolong Timbalan Pegawai Turus Keselamatan Penerbangan, TUDB dan merupakan juruterbang wanita kedua dalam TUDB. Sebagai seorang juruterbang yang cekap dan berdedikasi, beliau telah mengumpulkan lebih kurang 1,000 jam penerbangan dan terus memberikan sumbangan yang signifikan dalam usaha memperkukuh serta memajukan aspek keselamatan penerbangan dalam organisasi.

FAKTOR MANUSIA DAN ERGONOMIK DALAM TENTERA UDARA DIRAJA BRUNEI (TUDB)

Lt Kol (U) Malcolm Craig, Mej (U) Reamy bin Hj Jumat, Kpt (U) Norasiah bin Hussin
Keselamatan Penerbangan
Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB)

ABSTRAK

Artikel ini meneliti Faktor Manusia dan Ergonomik (HFE) berkaitan dua platform utama Tentera Udara Diraja Brunei (TUDB), iaitu pesawat S-70i Blackhawk dan C295MW. Perbincangan memberi tumpuan kepada reka bentuk kokpit, tekanan persekitaran, kesan misi berdurasi panjang, serta kepentingan pengintegrasian HFE dalam perolehan pesawat pada masa hadapan. Iklim tropika Negara Brunei Darussalam menimbulkan cabaran fisiologi tersendiri yang memberi kesan langsung terhadap daya tahan anak kapal udara, prestasi kognitif serta pembuatan keputusan operasi. Justeru, perkara ini menekankan keperluan TUDB untuk sentiasa menyesuaikan prosedur, latihan dan keperluan platform bagi memastikan keselamatan serta keberkesanan misi sentiasa terpelihara.

Kata kunci:

Faktor manusia, keselamatan penerbangan, prestasi.

1.0 SEMAKAN LITERATUR

Sebilangan besar penyelidikan dalam bidang Faktor Manusia dan Ergonomik (*Human Factors and Ergonomics (HFE)*) menyediakan asas penting untuk memahami bagaimana kru udara melaksanakan tugas dalam persekitaran operasi yang mencabar. Kajian oleh Bahagian Faktor Manusia NASA menunjukkan bahawa tekanan haba boleh menjejaskan pemprosesan kognitif, melambatkan masa tindak balas serta mengurangkan ketepatan kemahiran motor halus, iaitu faktor-faktor yang memberi kesan langsung terhadap pengendalian pesawat, khususnya bagi platform yang tidak dilengkapi sistem penyaman udara seperti S-70i Blackhawk [1]. Kajian oleh Wickens serta Agensi Keselamatan Penerbangan Kesatuan Eropah (EASA) turut menekankan kepentingan susun atur kokpit yang intuitif, reka bentuk antropometrik yang sesuai, serta paparan maklumat yang tersusun dengan baik dalam mengurangkan beban kerja juruterbang dan mencegah kejenuhan tugas [2,3].

Selain itu, kajian penerbangan berdurasi panjang yang dibincangkan dalam literatur ergonomik secara umum menunjukkan bahawa keletihan akan terkumpul akibat tempoh duduk yang

berpanjangan, tahap kewaspadaan yang berterusan, serta kesan gabungan getaran dan pendedahan bunyi, yang seterusnya mempengaruhi prestasi misi dalam pesawat seperti C295MW [4]. Secara keseluruhan, hasil kajian ini boleh dijadikan rujukan untuk memahami bagaimana tekanan persekitaran dan ergonomik yang terhad boleh memberi kesan yang jelas terhadap keberkesanan operasi dan keselamatan dalam TUDB. Perkara ini menegaskan keperluan terhadap reka bentuk platform dan prosedur operasi mengambil kira sepenuhnya tuntutan fisiologi dan kognitif yang dihadapi oleh kru udara. Penemuan kajian ini seterusnya menyediakan asas untuk meneliti bagaimana faktor manusia dizahirkan dalam platform TUDB yang sedia ada, bermula dengan reka bentuk ergonomik kokpit.

Berdasarkan dengan hasil kajian tersebut, literatur ergonomik yang berfokuskan ketenteraan turut menekankan kepentingan Integrasi Manusia–Sistem (*Human-System Integration (HSI)*) yang berkesan dalam perolehan pesawat. Kajian secara konsisten menunjukkan bahawa ketidakselarasan antara keupayaan manusia dan reka bentuk sistem boleh menyumbang kepada kadar kesilapan yang lebih tinggi, kitaran pembuatan keputusan yang lebih perlahan, serta peningkatan risiko kecederaan semasa operasi yang kompleks [4,5]. Keputusan ini selari dengan trend keselamatan penerbangan global yang menekankan keperluan untuk mereka bentuk sistem berdasarkan perbatasan manusia, dan bukannya mengharap individu untuk menyesuaikan diri dengan peralatan yang tidak sepadan.

Bagi TUDB, bukti ini menekankan keperluan operasi untuk memastikan bahawa platform masa hadapan dipilih dan dikonfigurasi dengan (*HFE*) serta Integrasi Manusia–Sistem (*Human-System Integration (HSI)*) sebagai kriteria teras, dan bukannya pertimbangan sampingan. Pengintegrasian prinsip-prinsip ini secara langsung menyokong pelaksanaan misi yang lebih selamat, mengurangkan potensi kesilapan manusia, serta meningkatkan prestasi dan kesejahteraan jangka panjang kru udara. Asas ini seterusnya membuka ruang untuk menilai bagaimana prinsip ergonomik diaplikasikan dalam platform TUDB yang sedia ada, bermula dengan aspek reka bentuk kokpit dan pertimbangan antara muka fizikal.

2.0 PENDAHULUAN

Keselamatan penerbangan amat dipengaruhi oleh elemen manusia. Oleh itu, sistem pesawat, keperluan misi, dan keadaan persekitaran mestilah diselaraskan dengan keupayaan serta had kemampuan manusia. Bagi mengoptimumkan peranan manusia dalam persekitaran kerja yang kompleks, ia melibatkan semua aspek prestasi dan tingkah laku manusia seperti Pemprosesan Maklumat, Kesedaran Situasi dan Pembuatan Keputusan, Keletihan, Stres dan Prestasi, Dinamik Kumpulan [Kepimpinan dan Kepengikutan], serta komunikasi.

Secara konseptual, Faktor Manusia boleh didefinisikan sebagai interaksi antara:

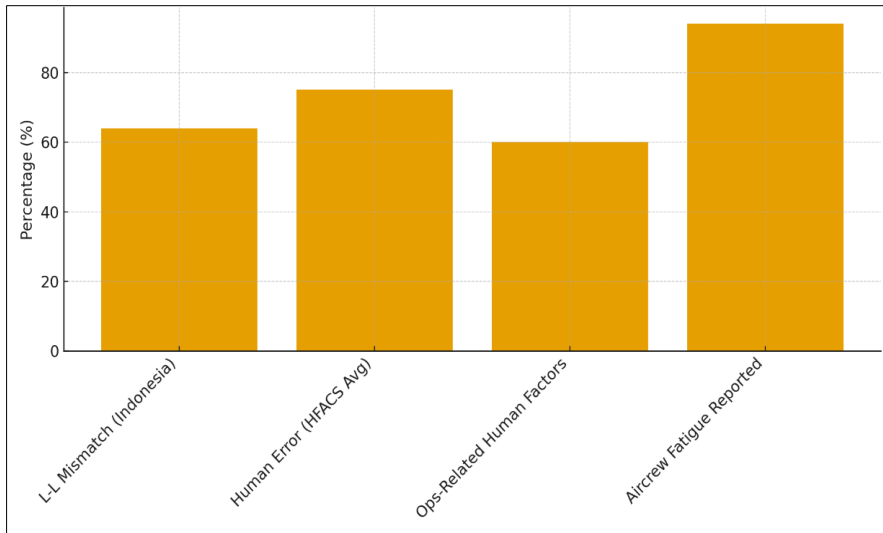
1. Manusia dengan Manusia
2. Manusia dengan Mesin
3. Manusia dengan Prosedur
4. Manusia dengan Persekitaran

2.1 | Model SHELL

Model konseptual ini boleh diwakili oleh model *SHELL*, yang asalnya dibina oleh Edwards pada tahun 1972 dan kemudiannya diadaptasi oleh Hawkins. Model ini menggunakan blok untuk mewakili pelbagai komponen dalam Faktor Manusia. Blok-blok bagi model tersebut adalah:

1. **Software** (Perisian) - Antara muka di antara manusia dan perisian; termasuk prosedur serta dokumen bertulis yang merupakan sebahagian daripada Prosedur Operasi Standard (*Standard Operating Procedures (SOP)*).
2. **Hardware** (Perkakasan) – Antara muka di antara manusia dan perkakasan; peralatan, kawalan, paparan serta sistem berfungsi.
3. **Environment** (Persekitaran) – Antara muka di antara manusia dan persekitaran; iaitu situasi di mana manusia perlu beroperasi dengan persekitaran semula jadi.
4. **Liveware** (Faktor Manusia) – Antara muka di antara manusia dengan manusia; melibatkan proses bekerja dan berinteraksi dalam pasukan.

Model konseptual ini meletakkan komponen Liveware tambahan di bahagian tengah bagi mewakili antara muka di antara empat blok model yang lain. Nilai praktikal model *SHELL* ini disokong oleh analisis kuantitatif terhadap kemalangan di dunia sebenar. Satu kajian mengenai kemalangan dan insiden serius penerbangan awam di Indonesia dari tahun 2015–2019 telah menggunakan rangka kerja *SHELL* untuk mengekod faktor-faktor punca, dan mendapati bahawa 64% daripada kejadian tersebut dipacu terutamanya oleh ketidakpadanan *Liveware–Liveware*. Ini lazimnya dikaitkan dengan penyeliaan pengurusan yang tidak mencukupi (74%), kekurangan peraturan (22%), atau koordinasi yang lemah (4%) [8]. Pendekatan berasaskan sistem yang serupa, seperti Sistem Analisis dan Klasifikasi Faktor Manusia (*Human Factors Analysis and Classification System (HFACS)*), secara konsisten menunjukkan bahawa kira-kira 70–80% kemalangan penerbangan awam dan tentera melibatkan ralat manusia berbanding kegagalan teknikal semata-mata [9–11]. Tinjauan yang lebih luas juga melaporkan bahawa lebih daripada separuh kemalangan pesawat yang disiasat dan lebih 60% daripada kemalangan yang direkodkan mengandungi faktor punca manusia yang berkaitan dengan operasi [12]. Secara selari, kajian berfokuskan kelesuan dalam operasi angkatan udara dan syarikat penerbangan menunjukkan bahawa sehingga 94% kru udara melaporkan simptom kelesuan yang merosotkan prestasi, sekali gus dikaitkan dengan pengurangan kesedaran situasi dan peningkatan ralat kecil [13]. Secara kolektif, penemuan ini menunjukkan bahawa majoriti risiko penerbangan timbul pada antara muka yang diterangkan oleh model *SHELL*, sekali gus memperkukuh relevansinya sebagai alat berstruktur untuk menganalisis kejadian-kejadian di TUDB, mengutamakan intervensi keselamatan, serta memaklumkan keputusan perolehan platform masa hadapan.



Rajah 1. Kesan Faktor Manusia.

Iklim panas dan lembap di Negara Brunei Darussalam menimbulkan faktor tekanan yang tersendiri dan memberi kesan langsung terhadap prestasi operasi kru udara dari aspek fizikal, fisiologi dan psikologi. Suhu kokpit yang tinggi dalam platform yang tidak dilengkapi dengan sistem penyaman udara seperti Blackhawk S-70i memperburuk tekanan haba, yang terbukti boleh menjejaskan pemrosesan kognitif, melambatkan masa tindak balas serta mengurangkan ketepatan kemahiran motor halus [2]. Keadaan persekitaran ini juga mempercepatkan pengumpulan keletihan, selaras dengan pendapatan kajian yang melaporkan bahawa sehingga 94% kru udara ketenteraan dan penerbangan awam mengalami simptom keletihan yang menjejaskan prestasi semasa operasi berdurasi panjang [13,14]. Selain itu, ketidakpadanan antara keperluan alam sekitar dan antara muka manusia–sistem, seperti yang digariskan dalam model *SHELL*[L], mencerminkan penemuan kajian yang menunjukkan bahawa 64% insiden penerbangan dalam kajian *SHELL* di Indonesia didorong oleh ketidakpadanan *Liveware*–Persekitaran dan *Liveware*–*Liveware* [8]. Oleh yang demikian, pemahaman terhadap bagaimana persekitaran operasi di Brunei memperkukuh kerentanan faktor manusia adalah amat penting bagi mempertingkatkan tahap kesedaran dan pengukuhan keselamatan penerbangan dalam TUDB, melalui penyesuaian latihan serta penyelarasan prosedur operasi, di samping menjadi panduan dalam membuat keputusan perolehan platform pada masa hadapan.

3.0 REKA BENTUK ERGONOMIK DALAM PLATFORM MODEN TUDB

Teras utama dalam Faktor Manusia ialah individu, iaitu komponen yang paling kritikal dan paling mudah menyesuaikan diri dalam sistem penerbangan. Prestasi manusia berbeza-beza disebabkan oleh batasan fizikal, fisiologi dan kognitif, yang kebanyakannya boleh diramal dan mesti diambil kira dalam reka bentuk serta pengoperasian mana-mana pesawat. Atas sebab ini, semua elemen lain dalam sistem perlu distrukturkan dengan cara yang tidak mengenakan tekanan terhadap kru

udara, khususnya dalam persekitaran yang mencabar seperti di Brunei. Memahami pengendali manusia memerlukan pertimbangan terhadap beberapa ciri utama yang penting.

3.1 | Saiz dan bentuk fizikal

Ukuran tubuh badan serta keupayaan pergerakan, secara signifikan, adalah berbeza merentasi pelbagai kumpulan umur, etnik, serta jantina. Oleh itu, reka bentuk kokpit hendaklah menampung julat antropometrik yang luas bagi memastikan akses kawalan, postur, dan kejelasan penglihatan yang selamat.

3.2 | Keperluan fizikal

Keperluan manusia terhadap penghidratan, pemakanan, dan oksigen memberi kesan langsung terhadap daya tahan serta keberkesanan operasi, terutamanya semasa misi berdurasi panjang.

3.3 | Ciri-ciri input

Anak kapal udara bergantung kepada sistem deria penglihatan, pendengaran, dan sentuhan untuk mentafsir persekitaran serta mengendalikan pesawat. Deria ini boleh terjejas akibat faktor haba, getaran, kelembapan, dan bunyi — keadaan yang sering dihadapi semasa operasi TUDB.

3.4 | Pemprosesan Maklumat

Memori jangka pendek dan jangka panjang, kapasiti beban kerja, serta kepekaan terhadap tekanan fizikal atau psikologi mempengaruhi kesedaran situasi. Penurunan tahap kesedaran situasi meningkatkan kemungkinan pengambilan keputusan yang kurang tepat semasa fasa kritikal penerbangan.

3.5 | Toleransi Persekitaran

Prestasi manusia dipengaruhi oleh suhu, tekanan, kelembapan, bunyi, tahap cahaya, serta kekangan ruang. Tekanan persekitaran yang melampau atau berpanjangan boleh menjejaskan pertimbangan, koordinasi, dan kesejahteraan keseluruhan.

Ciri-ciri ini menunjukkan mengapa reka bentuk ergonomik adalah penting dalam mengurangkan keterbatasan manusia serta mengoptimumkan prestasi operasi. Ergonomik kokpit moden bertujuan untuk mengurangkan beban kerja, menyokong postur semula jadi manusia, dan meminimumkan tekanan fizikal. Dalam kedua-dua pesawat S-70i dan C295MW, sistem tempat duduk direka untuk mengekalkan kestabilan tulang belakang semasa operasi jangka panjang; penempatan kawalan membolehkan juruterbang berinteraksi dengan pesawat tanpa perlu meregangkan atau berusaha secara berlebihan; dan paparan instrumen disusun untuk memudahkan imbasan maklumat dengan cepat. Sudut penglihatan yang luas turut meningkatkan kesedaran situasi semasa tugas mencabar seperti manuver hover, pendekatan pendaratan, dan operasi menggunakan Cermin Mata Penglihatan Malam (*Night Vision Goggles (NVG)*).

Kesemua elemen ini menunjukkan bahawa pengintegrasian prinsip ergonomik dalam reka bentuk platform bukanlah pilihan tetapi merupakan keperluan asas — terutamanya bagi TUDB, di mana pesawatnya perlu menyokong pelbagai kru udara yang beroperasi dalam keadaan persekitaran yang mencabar di Brunei.

4.0 TEKANAN HABA DALAM S-70i BLACKHAWK

Varian S-70i milik TUDB tidak dilengkapi dengan sistem penyaman udara, dan dalam iklim tropika Brunei hal ini menimbulkan cabaran operasi yang ketara serta berkait rapat dengan batasan faktor manusia yang telah diuraikan sebelum ini. Suhu kokpit meningkat dengan cepat semasa keadaan hover, operasi di darat, dan tugas SAR, sekali gus menaikkan suhu teras badan serta mempercepatkan proses dehidrasi. Apabila haba terkumpul, kejelasan kognitif menurun dan masa tindak balas menjadi lebih perlahan, mengurangkan ketepatan motor halus yang diperlukan bagi tugas berpresisi seperti pendaratan di kawasan terhad dan operasi hoist. Kesan ini selaras dengan kajian NASA mengenai tekanan haba, yang menunjukkan bahawa peningkatan suhu sederhana sekalipun boleh menjejaskan keupayaan membuat keputusan dan koordinasi motor [2]. Jika ditinjau melalui model *SHEL[L]*, keadaan ini jelas menggambarkan ketidakpadanan antara faktor manusia (*liveware*) dan persekitaran (*environment*), yang meningkatkan kerentanan manusia serta menambah risiko operasi. Perkara ini mengukuhkan hujah utama jurnal: bahawa tekanan persekitaran di Brunei mesti dijadikan pertimbangan utama dalam reka bentuk kokpit, pemilihan platform, dan perolehan pesawat masa hadapan, khususnya bagi helikopter berintensiti kerja tinggi seperti S-70i.



Rajah 2. S-70i Blackhawk beroperasi dalam keadaan tropika.

5.0 KESAN PENERBANGAN JANGKA PANJANG [C295MW]

C295MW secara rutin melaksanakan misi jangka panjang termasuk rondaan maritim, penerbangan pengangkutan, dan operasi pengawasan berpanjangan, menjadikannya sebuah platform di mana kesan kumulatif Faktor Manusia amat ketara. Walaupun dilengkapi dengan sistem kawalan

persekitaran, kru udara tetap terdedah kepada duduk berpanjangan, keperluan kewaspadaan berterusan, serta tempoh pemantauan paparan yang panjang. Dari masa ke masa, keadaan ini membawa kepada ketidakselesaan muskuloskeletal, keletihan kognitif, penurunan tumpuan, dan ketegangan visual. Faktor-faktor ini telah diterangkan dalam kajian penerbangan jangka panjang dan hasil tinjauan keletihan, di mana sehingga 94% kru udara melaporkan simptom keletihan yang menjejaskan prestasi [13,14]. Kesan ini menjadi paling ketara semasa fasa akhir penerbangan, apabila beban kerja meningkat dan keperluan membuat keputusan berada pada tahap puncak, sekali gus mewujudkan cabaran klasik antara antaramuka *Liveware–Environment* dan *Liveware–Hardware* dalam model *SHELL*[L]. Hal ini mengukuhkan pandangan yang lebih menyeluruh bahawa pengurusan keletihan, reka bentuk tempat duduk ergonomik, dan pengagihan beban kerja merupakan pertimbangan penting bagi operasi TUDB, khususnya kerana misi jangka panjang terus menjadi komponen teras dalam profil operasi C295MW.

6.0 PENYATUAN PENEMUAN FAKTOR MANUSIA

Kajian antarabangsa mengenai Faktor Manusia mengukuhkan tema utama yang muncul daripada analisis terdahulu terhadap operasi TUDB. Tekanan haba yang diketengahkan dalam konteks S-70i kekal sebagai salah satu ancaman paling signifikan terhadap prestasi kognitif, khususnya pada platform tanpa sistem penyejukan persekitaran, di mana peningkatan suhu kokpit secara langsung menjejaskan keupayaan membuat keputusan dan ketepatan motor halus [2]. Begitu juga, penemuan daripada kajian penerbangan jangka panjang sejajar dengan cabaran yang diperhatikan pada C295MW, menunjukkan bahawa keletihan terkumpul dengan cepat semasa kewaspadaan berterusan dan duduk berpanjangan, dengan sehingga 94% kru udara melaporkan simptom keletihan yang menjejaskan prestasi [13,14]. Oleh itu, ergonomik kokpit yang berkesan menjadi elemen penting dalam mengurangkan kesilapan manusia dengan meminimumkan tekanan fizikal, meningkatkan capaian dan keterlihatan, serta menyokong aliran beban kerja semula jadi yang merupakan aspek teras dalam antaramuka *Liveware–Hardware*. Pada masa yang sama, tekanan persekitaran dan fisiologi yang dihuraikan sebelum ini menekankan kepentingan pengurusan hidrasi, pengoptimuman aliran udara, perancangan rehat, dan kawalan persekitaran merentas semua jenis misi. Secara keseluruhannya, pertimbangan ini menegaskan bahawa cabaran Faktor Manusia yang dihadapi oleh TUDB adalah konsisten dengan trend kajian global dan mesti dijadikan teras dalam perancangan operasi masa hadapan, latihan, serta keputusan perolehan platform.

7.0 IMPLIKASI PEROLEHAN TERHADAP TUDB

Bukti yang dibentangkan sepanjang artikel ini menunjukkan bahawa Faktor Manusia dan Ergonomik mesti diletakkan sebagai pusat pertimbangan dalam keputusan perolehan pesawat di masa hadapan bagi TUDB. Cabaran tekanan haba yang dikenal pasti pada S-70i, kesan keletihan kumulatif yang diperhatikan dalam misi jangka panjang C295MW, serta kajian global yang menunjukkan sehingga 70–80% kemalangan penerbangan berpunca daripada ketidakpadanan antara manusia dan sistem, secara kolektif menonjolkan kos operasi akibat mengabaikan keterbatasan manusia [8–11]. Bagi persekitaran tropika seperti Brunei, sistem penyejukan yang berkesan dan aliran udara kokpit adalah penting untuk mengekalkan fisiologi kru udara serta prestasi kognitif. Reka bentuk tempat duduk, sokongan postur, dan keupayaan antropometrik mesti mencerminkan kepelbagaian profil fizikal anggota TUDB, manakala susun atur kokpit, tahap automasi, dan pengagihan beban kerja harus meminimumkan ketepuan tugas serta mengukuhkan

keupayaan membuat keputusan di bawah tekanan. Selain itu, konfigurasi kabin perlu menyokong koordinasi kru misi, manakala teknologi peredam getaran dan pengurangan keletihan diperlukan untuk mengurangkan kesan jangka panjang daripada operasi berterusan. Platform yang mengutamakan prestasi manusia bukan sahaja meningkatkan keselesaan, malah secara langsung memperbaiki keselamatan operasi, keberkesanan misi, dan kelestarian jangka panjang bagi TUDB.

8.0 KESIMPULAN

Blackhawk S-70i dan C295MW kekal sebagai platform penting serta mempunyai permintaan tinggi dalam armada TUDB. Walau bagaimanapun, analisis yang dibentangkan dalam artikel ini menunjukkan bahawa keberkesanan kedua-dua pesawat tersebut tidak dapat dipisahkan daripada pertimbangan Faktor Manusia dan Ergonomik yang membentuk prestasi kru udara. Tekanan haba dalam S-70i tanpa penyaman udara, keletihan kumulatif semasa misi jangka panjang C295MW, serta kajian antarabangsa yang menunjukkan bahawa majoriti risiko penerbangan berpunca daripada ketidakpadanan antara manusia dan sistem, secara kolektif menekankan keperluan untuk mengutamakan elemen manusia dalam semua aspek keselamatan penerbangan.

REFERENCES

- [1] Salvendy G. Handbook of Human Factors and Ergonomics. New York: Wiley; 2012.
- [2] NASA Human Factors Division. Heat Stress Studies. Washington [DC]: NASA; year unknown.
- [3] European Aviation Safety Agency [EASA]. Cockpit Ergonomics. Cologne: EASA; year unknown.
- [4] Wickens CD. Engineering Psychology and Human Performance. 4th ed. Boston: Pearson; 2014.
- [5] Federal Aviation Administration [FAA]. Human Factors Analysis and Classification System [HFACS]. Washington [DC]: FAA; year unknown.
- [6] Edwards E. Man and Machine—Systems for Safety. In: Outlook on Safety: Proceedings of the Thirteenth Annual Technical Symposium. London: British Airline Pilots Association; 1972 Nov 14–16.
- [7] Hawkins FK. Human Factors in Flight. 2nd ed. Aldershot: Ashgate; 2017.
- [8] Aswia L, Isnaini I, Zufahair Z, Nugroho SAP. An analysis on serious incidents and accidents in aviation using SHELL model. INCITEST Conf.; 2022. p.131–140.
- [9] Wiegmann DA, Shappell SA. A human error approach to aviation accident analysis: HFACS. Aldershot: Ashgate; 2003.
- [10] Shappell SA, Wiegmann DA. Applying the HFACS to commercial aviation accident data. DOT/FAA/AM-03/3. 2003.
- [11] Li W-C, Harris D, Yu C-S. Routes to failure. Aviat Space Environ Med. 2008;79[1]:11–16.
- [12] Daramola AY. Air accidents in Nigeria using HFACS. J Air Transp Manag. 2014;35:39–50.
- [13] Wingelaar-Jagt YV et al. Fatigue among RNLAf aircrew. Aerosp Med Hum Perform. 2022;93[4]:300–6.
- [14] Bourgeois-Bougrine S et al. Perceived fatigue in airline pilots. Aviat Space Environ Med. 2003;74[2]:107–17.

FRONTIER JILID 7

*Memajukan Keupayaan Pertahanan melalui Teknologi, Faktor
Manusia dan Inovasi Operasi*

Hak Cipta Terpelihara © 2026

Kementerian Pertahanan Brunei Darussalam