

POTENSI KENDALI SWARM DRONE MENGGUNAKAN KEKUATAN PIKIRAN DENGAN BRAIN-COMPUTER INTERFACES : TANTANGAN, PELUANG DAN ANCAMAN BAGI INDONESIA

Oleh : Gede Priana Dwipratama, S.E., M.M.

Penata Tk. I III/d / e-mail : dwipratama0986@gmail.com

Analisis Pertahanan Negara Ahli Muda Dit Tekindhan Ditjen Potan Kemhan

I. Pendahuluan.

Perkembangan teknologi sektor pertahanan subsektor Industri Pertahanan telah menghadirkan medan perang baru, salah satunya dengan menggunakan pesawat terbang tanpa awak (*Drone Warfare*). *Drone* telah banyak digunakan oleh berbagai negara di dunia, baik dalam medan perang maupun untuk mengatasi ancaman hibrida. Menurut *SP's Land Forces India* (2021), Amerika Serikat telah menggunakan *drone* dalam perang di Afghanistan yang menargetkan para pejuang dan pemimpin Al-Qaeda serta Taliban. Sejarah mencatat penggunaan *drone* yang paling fenomenal terjadi pada 3 Januari 2020 yang menewaskan Komandan Pasukan Elit Quds Mayor Jenderal Qasem Soleimani di Baghdad. Beberapa negara yang juga telah menggunakan *drone* seperti Turki yang melawan Partai Pekerja Kurdistan, Nigeria melawan Boko Haram, Irak melawan ISIS, dan Arab Saudi di Libya dan Yaman. Serangan *drone* telah berkembang dalam bentuk kawanan (*swarm drone*), hal ini membuat medan perang *drone* semakin mematikan. *SP's Land Forces India* juga menyatakan bahwa contoh penggunaan *drone swarm* dilakukan oleh pemberontak Houthi Yaman pada 14 September 2019. Serangan tersebut dilakukan terhadap 2 (dua) instalasi Aramco milik perusahaan minyak Arab Saudi dengan menggunakan 18 (delapan belas) *drone* dan 3 (tiga) rudal. Dikutip dari laman VoA Indonesia tanggal 10 November 2024, Kementerian Pertahanan Rusia melaporkan bahwa pertahanan udara mereka berhasil menghancurkan 36 (tiga puluh enam) *drone* Ukraina di wilayah Rusia Barat, dan dikutip dari laman VoA Indonesia tanggal 26 Desember 2024, pihak militer Ukraina menyatakan telah menembak jatuh sebanyak 20 (dua puluh) dari 31 (tiga puluh satu) *drone* yang diluncurkan oleh pasukan Rusia dalam serangan di wilayah Chernihiv, Dnipropetrovsk, Kharkiv dan Kyiv. Selain itu, menurut laporan media *the Epoch Times Indonesia* (2024), pasukan *drone* "*Black Swan*" dari Batalyon Serangan Independen ke-255 Ukraina berhasil dikerahkan di wilayah Kursk, dan ada dugaan bahwa sebanyak 270 (dua ratus tujuh puluh) *swarm drone* menyerang Moskow dan bandara militer di sekitarnya. Beberapa contoh tersebut menunjukkan bahwa *Swarm drone* telah menjadi pilihan senjata baru yang efektif dan mematikan dalam medan perang saat ini.

A. Latar Belakang Masalah.

Menurut Jeong, Lee, Ahn & Whan Lee (2024), teknologi *Brain-Computer Interfaces* (BCI) atau Antarmuka Otak Komputer dapat menganalisis sinyal otak untuk memahami maksud dan status manusia, sehingga dapat dimanfaatkan untuk mengendalikan berbagai mesin (hal 1). Sinyal otak mengandung informasi penting tentang status manusia. Berbagai penelitian di bidang BCI telah mencoba memahami sinyal otak manusia, dimana metode invasif seperti *Electrocorticography* (ECoG) yang menempatkan elektroda di otak manusia secara langsung dapat memperoleh kualitas sinyal otak yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode non-invasif seperti *Electroencephalography* (EEG), *functional near-infrared spectroscopy* (fNIRS), dan *functional magnetic resonance imaging* (fMRI).

BCI yang menggunakan ECoG memiliki tingkat risiko lebih tinggi dibandingkan dengan metode non-invasif karena memerlukan tindakan operasi/bedah untuk meng-*implant* elektroda di otak manusia. EEG yang berbasis BCI memiliki beberapa paradigma dalam mengakuisisi sinyal seperti *Motor Imagery* (IM), *Event-Related Potential* (ERP), *Movement-Related Cortical Potential* (MRCP). Beberapa contoh pengaplikasian EEG berbasis BCI yang telah diaplikasikan seperti tangan robot, pengeja, kursi roda dan *drone*. Pengaplikasian tersebut telah menjadi jembatan komunikasi antara manusia dengan mesin. Wang, R. Lee, R. Zhang. G. Lee & D. Zhang (2018) merancang sistem BCI yang dapat digunakan berdasarkan *Steady-State Visual Evoked Potential* (SSVEP) yang memungkinkan navigasi 3 (tiga) dimensi penebangan *quadcopter* dengan visual umpan balik menggunakan perangkat yang dipasangkan di kepala. Selain Korea Selatan, berbagai negara-negara di dunia juga terus melakukan riset dan pengembangan dalam kontrol *drone* menggunakan kekuatan pikiran menggunakan teknologi BCI. *Swarm drone* saat ini telah terbukti efektif, efisien dan murah untuk digunakan di berbagai konflik atau medan perang. Kendali *swarm drone* dengan kekuatan pikiran manusia tanpa perlu sentuhan fisik sama sekali dapat semakin meningkatkan risiko ancamannya. Indonesia perlu mengantisipasi potensi pengembangan dan penggunaan teknologi ini kedepannya baik oleh *state* maupun *non-state actor*.

B. Rumusan Masalah.

Apakah pengembangan kendali *swarm drone* dengan kekuatan pikiran manusia telah benar terjadi dan memungkinkan untuk digunakan baik oleh *state* maupun *non-state actor*?

C. Tujuan Penulisan Artikel.

Menganalisis pengembangan dan kemungkinan penggunaan kendali *swarm drone* dengan kekuatan pikiran manusia tanpa sentuhan fisik sama sekali baik oleh *state* maupun *non-state actor*.

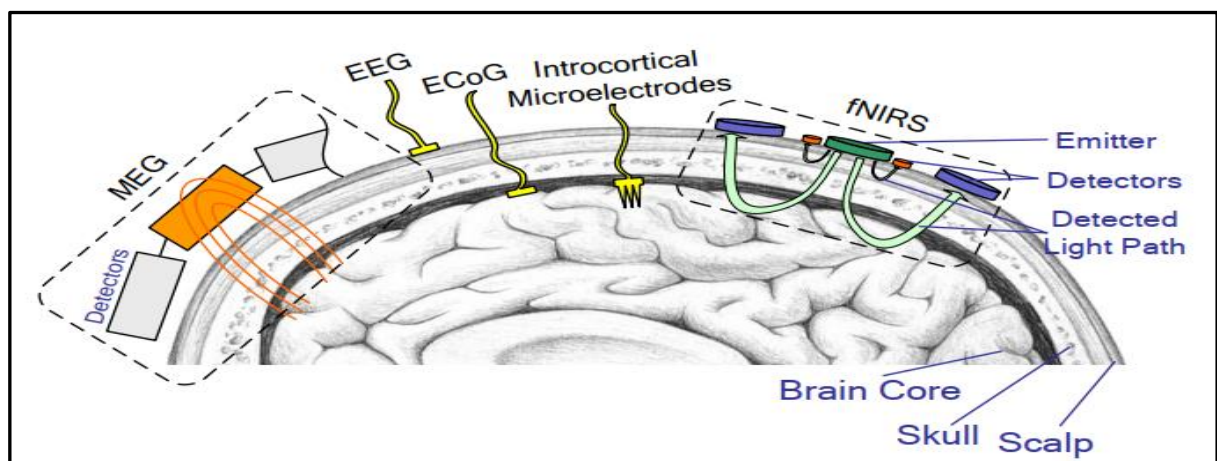
II. Tinjauan Pustaka.

Menurut Jehuda (2019), *swarm drone* adalah suatu teknologi kendaraan udara tak berawak yang tidak hanya terdiri dari satu kendaraan udara tak berawak tetapi terdapat lebih dari satu kendaraan udara tak berawak yang dapat bergerak dan berkomunikasi secara bersamaan yang pada umumnya modelnya sama dengan spesies hewan saat membentuk suatu formasi. Menurut Damanik (2023), kawanan pesawat nirawak atau *swarm drone* adalah kumpulan robot terbang yang bekerja bersama untuk mencapai tujuan tertentu, salah satunya adalah perencanaan lintasan untuk bergerak ke posisi tujuan tanpa mengenai penghalang. Menurut Garg (2020), *swarm drone* merupakan sekumpulan robot udara yang mampu melaksanakan misi kolektif tertentu dan dapat dikendalikan dari jarak jauh atau dikendalikan dengan algoritma otonom. *Swarm drone* dapat didefinisikan sebagai kawanan atau pasukan pesawat terbang tanpa awak yang memenuhi fungsi intelijen, pengawasan, akuisisi, pengintaian hingga menyerang dan melumpuhkan target dengan kemampuan berkomunikasi, bekerja sama dalam kelompok, terkoordinasi, dan bergerak bersama-sama membentuk formasi tertentu.

Dikutip dari laman resmi siloamhospitals, *Electroencephalography* (EEG) atau elektroensefalografi adalah tes yang digunakan untuk memeriksa aktivitas listrik pada otak. Pemeriksaan EEG menggunakan elektroda atau cakram logam kecil yang dipasang pada kulit kepala pasien. Elektroda tersebut kemudian bekerja dengan mengukur fluktuasi tegangan yang timbul dari arus listrik dalam otak. Menurut Jeong, Lee, Ahn & Whan Lee (2024), *Brain-Computer Interfaces* (BCI) atau Antarmuka Otak Komputer merupakan teknologi yang dapat menganalisis sinyal otak untuk memahami maksud dan status manusia, sehingga dapat dimanfaatkan untuk mengendalikan berbagai mesin (hal 1). Menurut Krohn & Ribe (2018), BCI merupakan teknologi yang dapat menghubungkan komunikasi antara otak manusia secara nirkabel (*wired brain*) dengan suatu perangkat eksternal dengan menggunakan elektroda yang ditempatkan di otak manusia. Selain *swarm drone*, teknologi ini juga telah diterapkan pada berbagai perangkat eksternal lainnya seperti tangan, kaki, dan/atau bagian tubuh robotik manusia lainnya.

III. Analisis Data atau Pembahasan.

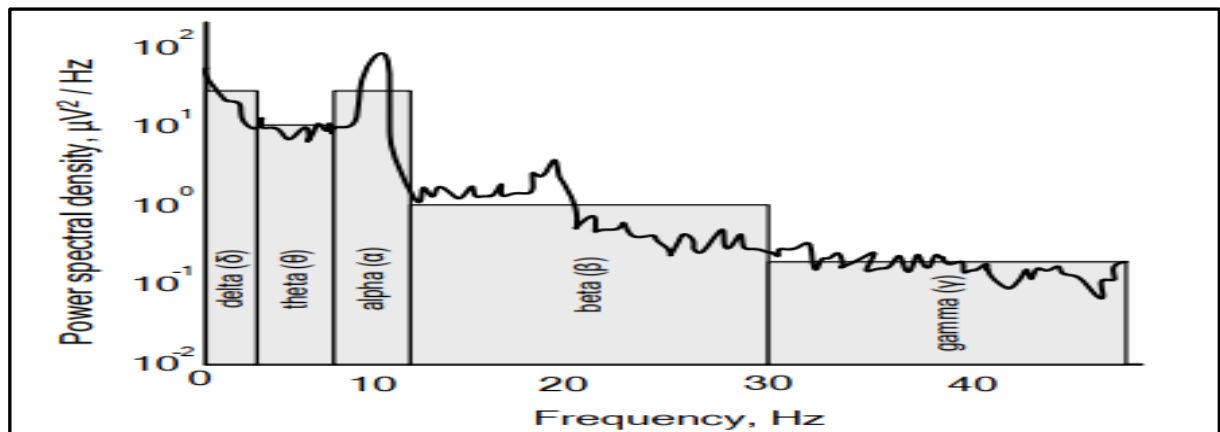
BCI merupakan teknologi berbasis sistem komputer yang menganalisis dan memanfaatkan sinyal *Electroencephalography* (EEG). Teknologi tersebut kemudian dikembangkan untuk dapat digunakan sebagai kendali beberapa perangkat eksternal. BCI bekerja dengan memproses sinyal melalui elektroda yang telah ditanamkan pada otak manusia dan menerjemahkan aktivitas otak menjadi sinyal kontrol untuk suatu perangkat eksternal tertentu. Contoh perangkat eksternal tersebut dapat berupa tangan robotik hingga *swarm drone*. Sensor BCI dibagi menjadi 3 tipe berdasarkan tingkat invasifnya yaitu *Invasive* (IM), *Semi-Invasive* (EcoG), dan *Non-Invasive* (MEG, EEG, dan fNIRS). Sensor BCI *Invasive* memerlukan implantasi langsung dari *Intracortical Microelectrodes* (IM) kedalam otak manusia, sehingga dapat menghasilkan sinyal dengan akurasi yang lebih tinggi namun sekaligus juga meningkatkan tingkat risikonya karena ditanam dalam kepala manusia. Sensor BCI *Semi-Invasive* menggunakan elektroda yang berlokasi di bagian bawah tengkorak pada permukaan otak manusia seperti *Electrocorticography* (EcoG). Sensor BCI *Non-Invasive* menganalisa aktivitas otak dari bagian permukaan kepala menggunakan *Electroencephalography* (EEG), *Magnetoencephalography* (MEG), *functional near-infrared spectroscopy* (fNIRS), dan *functional magnetic resonance imaging* (fMRI).



Sumber: *State of the Art on Brain-Computer Interface Technology*

Gambar 1 - Tipe Sensor BCI: *Invasive* (IM), *Semi-Invasive* (EcoG), dan *Non-Invasive* (MEG, EEG, fNIRS)

EEG paling umum digunakan secara luas khususnya dalam bidang medis sebagai alat untuk monitoring aktivitas elektrik otak. Sinyal EEG merupakan representasi visual dari frekuensi yang dihasilkan oleh aktivitas otak manusia. Sensor EEG menangkap aktivitas elektrik yang dihasilkan dari jaringan neuron otak menggunakan elektroda yang ditempelkan pada kepala atau bagian tubuh manusia lainnya. Medis dapat memonitor dan mendeteksi berbagai perubahan yang berkaitan dengan kondisi mental pasien dan beberapa tipe aktivitas abnormal otak pasien juga dapat dideteksi menggunakan EEG. Menurut Peksa & Mamchur (2023), terdapat 4 (empat) “*rhythms*” dari otak manusia yang dikategorikan berdasarkan frekuensinya, yaitu δ delta (0,1 - 4 Hz), θ theta (4 - 7,5 Hz), α alpha (7,5 - 12 Hz), β beta (12 - 30 Hz), dan γ gamma (diatas 30 Hz).



Sumber: *State of the Art on Brain-Computer Interface Technology*

Gambar II - Contoh Spektrum Frekuensi dari Otak Manusia Menggunakan EEG

Penelitian yang dilakukan oleh *Departement of Brain and Cognitive Engineering* dan *Departement of Artificial Intelligence, Korea University, Seoul - Korea Selatan* merupakan salah satu contoh dari banyaknya penelitian yang sama di bidang BCI khususnya dalam kendali *drone* menggunakan kekuatan pikiran. Penelitian tersebut menggunakan sensor BCI *Non-Invasive* dengan menggunakan *Electroencephalography (EEG)*. *University of Calgary - Kanada* menggambarkan secara sederhana perbedaan proses eksekusi motorik manusia (*motor control*) dengan proses eksekusi menggunakan BCI *Control*, dicontohkan subjek akan menyalakan lampu. Secara normal dengan *motor control*, subjek mengeksekusi rencana menyalakan lampu dengan menggunakan tangan dan menyentuh saklar sehingga lampu menyala. Sedangkan dengan BCI *control*, komputer menganalisa aktivitas otak subjek, mengidentifikasi keinginan subjek kemudian mengirimkan sinyal dan instruksi kepada lampu agar menyala. Lampu menangkap sinyal tersebut dan secara otomatis akan menyala. Menurut Glavas, Tzimourta, Angelidis, Bibi & Tsipouras dari *Departement of Electrical and Computer Engineering, University of Western Macedonia, Greece* (2024), rekomendasi hasil penelitian terkait kendali *drone* menggunakan BCI dengan 42 (empat puluh dua) total artikel eksperimen penelitian dari tahun 2010 hingga 2023 menyatakan bahwa tren yang akan datang akan melibatkan pengintegrasian antarmuka *Augmented Reality (AR)* untuk pengalaman kendali yang lebih baik dan menggabungkan BCI dengan berbagai metode masukan.

Selain itu, para peneliti dari IEEE Access itu juga menyatakan bahwa kemajuan pemrosesan sinyal EEG dan ekstraksi fitur dapat meningkatkan akurasi sistem, serta perlunya penggunaan BCI Hibrida yang menggabungkan beberapa teknologi BCI agar dapat meningkatkan kemampuan kendali, khususnya dalam mengelola *swarm drone*. Pemrosesan sinyal untuk data EEG masih menjadi tantangan untuk disempurnakan, dan teknik kalibrasi yang efektif serta efisien juga perlu ditingkatkan agar sistem BCI semakin mudah digunakan.

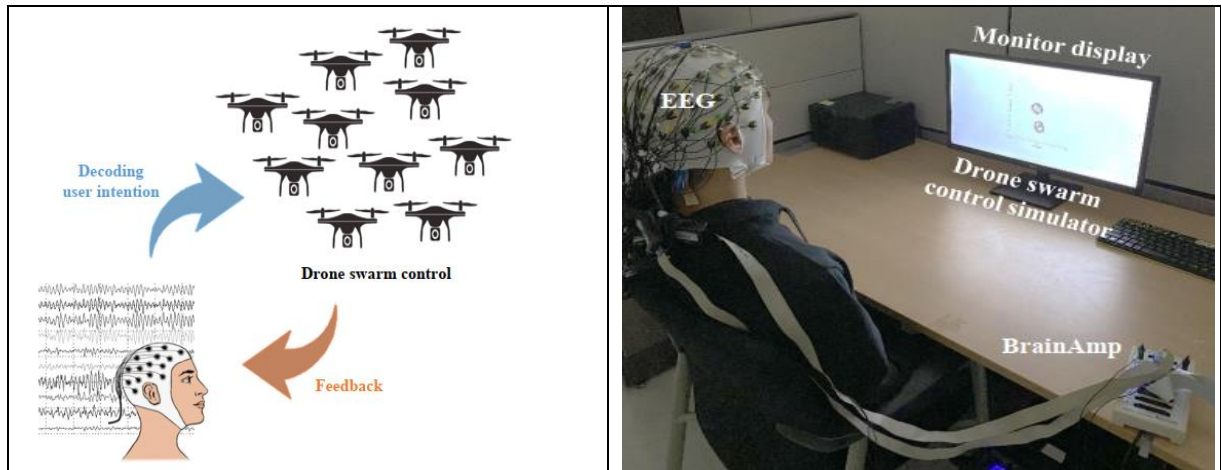
Kolonel Adm Romson Sintong Sianturi, S.E., M.Strat. HRM selaku Kabag Datin Set Ditjen Pothan Kemhan membagi sensor BCI kedalam 7 (tujuh) parameter yang terdiri dari Kekuatan Sinyal, *Noise Sensitivity*, *Anti-Jamming*, Mobilitas di Medan Perang, Keamanan dan Enkripsi, Kecepatan Respon dan Resolusi Spasial. Sensor BCI *Non-Invasive* seperti EEG memiliki *Noise Sensitivity* yang tinggi dan rentan *jamming*, MEG memiliki *Noise Sensitivity* yang sangat tinggi dan sangat rentan *jamming*, NIRS memiliki *Noise Sensitivity* yang rendah terhadap Noise EM dan relatif tahan *jamming* karena berbasis cahaya, serta Transmisi EM Konvensional memiliki *Noise Sensitivity* rendah, *frequency hopping jamming*, dan *spread spectrum*. Kolonel Adm Romson Sintong Sianturi, S.E., M.Strat. HRM juga menyampaikan bahwa BCI kendali *swarm drone* tidak *feasible* untuk komunikasi *drone* atau jarak jauh, karena rentan di-*jammed* dan diperkirakan memiliki efektifitas antar personel hanya pada jarak kurang dari 1 Km. Parameter 7 (tujuh) sensor BCI *Non-Invasive* digambarkan pada tabel sebagai berikut:

No	Parameter	EEG	MEG	NIRS	Transmisi EM Konvensional
1.	Kekuatan Sinyal	Lemah (μV)	Sangat lemah (femtotesla)	Cahaya inframerah (700-900 nm)	Kuat (Watt atau dBm)
2.	<i>Noise Sensitivity</i>	Tinggi	Sangat Tinggi	Rendah terhadap <i>noise</i> EM	Rendah dengan teknologi <i>anti-</i>
3.	<i>Anti-Jamming</i>	Tidak tersedia (rentan)	Tidak tersedia (sangat rentan)	Relatif tahan (karena berbasis cahaya)	<i>Frequency hopping, spread spectrum</i>
4.	Mobilitas di Medan Perang	Tinggi, tetapi rawan <i>noise</i>	Rendah, memerlukan ruang	Tinggi, portabel, dan fleksibel	Tinggi, dirancang untuk kondisi
5.	Keamanan dan Enkripsi	Lemah	Lemah	Lemah (perlu pengembangan lebih lanjut)	Kuat dan adaptif
6.	Kecepatan Respon	Cepat (milidetik)	Cepat (milidetik)	Lambat (detik)	Cepat (<i>real-time</i>)
7.	Resolusi Spasial	Rendah	Tinggi	Rendah (terbatas pada korteks otak)	Bervariasi (tergantung teknologi)

Sumber: Wawancara Narasumber (Kolonel Adm Romson Sintong Sianturi, S.E., M.Strat. HRM)

Tabel I - Parameter Sensor BCI *Non-Invasive*

Gambar ...



Sumber: *Towards BCI for Drone Swarm Control*

Gambar III - Penggambaran Proses Akuisisi Sinyal pada BCI kontrol *drone* dan Eksperimennya pada manusia

Menurut Raheja, Pawar, Safar & Maiti dari BE, Departement of EXTC, Vivekanand Society's Institute of Technology, Mumbai, India (2018), hasil penelitian tentang *Mind Controlled Assistive Quadrotor Drone* menyatakan bahwa pengembangan *Mind-Controlled Drone* telah membawa umat manusia selangkah lebih maju dalam *booming domain* BCI, dan merekomendasikan perlunya perluasan *platform* untuk penelitian lebih lanjut, serta penerapan praktisnya di bidang militer. Menurut *International Centre for Counter-Terrorism* (ICCT) dalam artikel tentang *Tower 22: Innovations in Drone Attacks by Non-State Actors* tanggal 1 Februari 2024, kelompok teroris seringkali menunjukkan inovasi yang luar biasa dalam taktik dan penyerangan. Hasil studi ICCT menyatakan bahwa program drone kelompok teroris mencerminkan kapasitas dan kemauan yang luar biasa dalam berinovasi. Kelompok teroris yang berhasil menggunakan *drone* tidak hanya memperoleh *drone* dengan jumlah yang lebih banyak dan kualitas yang lebih baik. Kelompok ini telah menunjukkan kemampuan untuk beradaptasi terhadap perubahan postur pertahanan dan meresponnya melalui tindakan teknis dan taktis yang baru. Menurut Dr. James Rogers dari the Centre for War Studies Yale University yang sekaligus juga *expert adviser to the UK Parliament's All-Party Parliamentary Group on Drones* dalam artikelnya tentang *Domestic Threat of Drones Inquiry* menyatakan bahwa pada tahun 2018, ISIS merilis propaganda yang menyatakan bahwa kota di negara - negara barat akan menjadi target berikutnya dalam daftar target *drone* mereka, hal ini mengakibatkan kekhawatiran Eropa dan Amerika terhadap *drone* mulai meningkat. Dr. James Rogers juga menyatakan bahwa meskipun belum ada konfirmasi penggunaan *drone* oleh teroris di negara - negara barat, namun ada kelemahan dalam hal keamanan yang dianggap cukup mengkhawatirkan.

Pada tahun 2024 ini, Amerika Serikat dihebohkan dengan berbagai pemberitaan akan adanya *drone* yang tak dikenal di atas instalasi militer, hal ini memicu kekhawatiran keamanan di seluruh wilayah Amerika Serikat. Sejumlah penampakan yang diduga *drone* dilaporkan berada di kawasan pemukiman warga, area terlarang, dan berbagai infrastruktur penting termasuk waduk, jalur transmisi listrik, stasiun kereta api, departemen kepolisian hingga pangkalan militer. Insiden - insiden tersebut mendorong badan - badan federal untuk menyelidiki dan mengatasi meningkatnya kekhawatiran masyarakat.

Dikutip dari *gpsworld.com* tanggal 17 Desember 2024, Pemerintah Amerika Serikat menyatakan bahwa lebih dari 5.000 penampakan *drone* telah dilaporkan minggu ini, namun hanya sekitar 100 *drone* yang memerlukan investigasi lebih lanjut.

IV. Kesimpulan.

- a. Pengembangan *swarm drone* oleh berbagai negara termasuk penggunaannya sebagai senjata pada konflik - konflik internasional saat ini merupakan hal yang nyata terjadi. *Swarm drone* yang berada di wilayah *dual-use* juga dapat berpotensi menjadi ancaman khususnya jika disalahgunakan oleh *non-state actor* atau terorisme.
- b. Penelitian *swarm drone* dengan kekuatan pikiran manusia yang dipublikasikan masih terbatas pada sensor *Non-Invasive* (MEG, EEG, dan NIRS), dimana kendali *swarm drone* masih memerlukan perangkat elektroda seperti helm yang ditempelkan di kepala, namun beberapa industri BCI secara luas telah mengiklankan dan menawarkan metode sensor secara *Invasive* yang memerlukan implantasi langsung dari *Intracortical Microelectrodes* (IM) kedalam otak manusia agar dapat menghasilkan sinyal dengan akurasi yang lebih tinggi dan tidak perlu menggunakan helm atau perangkat tambahan.
- c. Kendali *swarm drone* dengan kekuatan pikiran manusia telah benar terjadi meskipun masih dalam lingkup penelitian, sehingga belum memungkinkan untuk digunakan baik oleh *state* maupun *non-state actor*. Implementasi BCI dalam kendali *swarm drone* masih terus dikembangkan oleh para peneliti dunia. Jika metode sensor secara *Invasive* yang memerlukan implantasi langsung dari *Intracortical Microelectrodes* (IM) kedalam otak manusia telah banyak dilakukan, *swarm drone* yang tak dikenal dikhawatirkan akan semakin banyak digunakan khususnya pada pertempuran jarak pendek (kurang dari 1 Km), dan dengan pengendali yang sulit dilacak, serta dapat bersifat anonim.
- d. Indonesia sebagai negara bebas aktif diharapkan tetap mengikuti setiap perkembangan dan kemajuan teknologi persenjataan global. BCI kendali *swarm drone* tidak *feasible* untuk komunikasi *drone* atau jarak jauh, karena rentan di-*jammed* dan diperkirakan memiliki efektifitas antar personel hanya pada jarak kurang dari 1 Km. Namun demikian, penguasaan teknologi BCI secara mandiri diharapkan dapat turut meningkatkan kemampuan dan daya tangkal dalam menghadapi kemungkinan penggunaannya oleh *state* maupun *non-state actor*.

V. Rekomendasi.

a. Rekomendasi bagi Dewan Pertahanan Nasional (DPN):

- 1) Pengembangan Teknologi dan Riset Strategis:
 - a) Membangun pusat penelitian dan pengembangan teknologi *Brain-Computer Interface* (BCI) dan *swarm drone* yang terintegrasi dengan kecerdasan buatan (AI) dan enkripsi kuantum untuk memperkuat keamanan data.
 - b) Mengadopsi teknologi *anti-jamming* dan komunikasi *laser-based* (FSO) sebagai langkah mitigasi terhadap gangguan elektromagnetik di medan perang.

2) Kolaborasi ...

- 2) Kolaborasi dan Sinergi Lintas Sektor dalam Kerangka Dewan Pertahanan Nasional:
 - a) Menjalin kerja sama dengan perguruan tinggi, lembaga penelitian, dan industri teknologi untuk mempercepat pengembangan teknologi pertahanan canggih.
 - b) Meningkatkan kerja sama dengan mitra internasional untuk berbagi pengetahuan dan teknologi terbaru dalam sistem kontrol *drone* dan AI.
- 3) Peningkatan Kapasitas dan Pelatihan:
 - a) Melatih personel militer dan teknisi untuk mengoperasikan dan memelihara sistem BCI dan *swarm drone* secara efektif.
 - b) Mengembangkan simulasi medan perang berbasis teknologi BCI untuk meningkatkan kesiapan operasional.
- 4) Regulasi dan Kebijakan Pertahanan Negara:
 - a) Menyusun regulasi yang ketat terkait penggunaan teknologi BCI untuk mencegah penyalahgunaan oleh *non-state actor*.
 - b) Mengembangkan kebijakan *anti-drone* untuk melindungi instalasi vital negara dari serangan *swarm drone*.
- 5) Penguatan Sistem Pertahanan Siber:
 - a) Meningkatkan kemampuan *cybersecurity* untuk melindungi sistem BCI dari peretasan dan serangan *jamming*.
 - b) Mengintegrasikan teknologi *AI-based anomaly detection* untuk memperkuat sistem pemantauan dan deteksi dini terhadap ancaman elektronik.

b. Rekomendasi bagi Komunitas Peneliti dan Penggiat *Drone*:

- 1) Penelitian Lanjutan tentang Teknologi BCI:
 - a) Melanjutkan riset pada sensor invasif dan non-invasif yang lebih tahan terhadap gangguan elektromagnetik dan memiliki resolusi temporal yang tinggi.
 - b) Mengembangkan BCI *hybrid systems* yang menggabungkan EEG, MEG, dan NIRS untuk meningkatkan akurasi dan responsivitas kontrol.
- 2) Eksplorasi Algoritma AI dan *Machine Learning*:
 - a) Mengintegrasikan teknologi *AI-driven signal processing* untuk meningkatkan ketahanan terhadap *noise* dan *jamming* di lingkungan perang.
 - b) Mengembangkan algoritma AI untuk membangun formasi dan manuver *swarm drone* yang otonom dan adaptif.
- 3) Pengujian Lapangan dan Simulasi *Real-Time*:
 - a) Melakukan uji coba langsung di lapangan untuk mengukur efektivitas dan ketahanan sistem BCI dan *swarm drone* dalam kondisi ekstrem.
 - b) Mengembangkan ...

- b) Mengembangkan simulasi berbasis *Virtual Reality* (VR) dan *Augmented Reality* (AR) untuk menguji sistem tanpa risiko kerusakan nyata.
- 4) Standarisasi dan Protokol Keamanan:
 - a) Menyusun standar keamanan dan protokol operasional untuk penggunaan teknologi BCI dan *swarm drone* di medan perang.
 - b) Mengembangkan sistem enkripsi kuantum untuk memastikan keamanan transmisi data.
- 5) Publikasi dan Diseminasi Ilmiah:
 - a) Memperbanyak publikasi hasil penelitian di jurnal internasional untuk memperkuat reputasi akademik dan pengakuan global.
 - b) Mengadakan seminar dan lokakarya untuk meningkatkan pemahaman dan kolaborasi antar peneliti di bidang ini.

Rekomendasi ini bertujuan untuk memperkuat kapasitas pertahanan Negara dan mendorong inovasi di bidang teknologi *swarm drone* dan *Brain-Computer Interface* (BCI). Implementasi strategi ini diharapkan dapat meningkatkan daya tangkal Indonesia terhadap ancaman modern dan memanfaatkan peluang teknologi mutakhir untuk keamanan nasional, berpotensi memberikan keuntungan secara mikro ekonomi bagi Indonesia, serta demi mewujudkan Industri Pertahanan Nasional yang maju, kuat, mandiri dan berdaya saing.

DAFTAR PUSTAKA

Office of the Director of national Intelligence (2024). "Annual Threat Assessment of the U.S. Intelligence Community".

Policy Horizons Canada (2024). "Disruptions on the Horizon 2024 Report".

Ji-Hoon Jeong, Dae-Hyeok Lee, Hyung-Ju Ahn & Seong-Whan Lee, Departement of Brain and Cognitive Engineering & Departement of Artificial Intelligence, Korea University, Seoul, Republic of Korea (2020). "Towards Brain-Computer Interfaces for Drone Swarm Control".

M. Wang, R. Lee, R. Zhang. G. Lee & D. Zhang (2018). "A Wearable SSVEP-based BCI system for quadcopter control using head-mounted device". IEEE Access, vol. 6, pp. 26789-26789.

<https://committees.parliament.uk/writtenevidence/103872/html/>

<https://icct.nl/publication/tower-22-innovations-drone-attacks-non-state-actors>

<https://neuralink.com/>

<https://itb.ac.id/berita/brain-computing-penggunaan-gelombang-otak-dalam-teknologi-kesehatan/4402>

K. LaFleur, K. Cassady, A. Doud, K. Shades, E. Rogin & B. He (2013), "Quadcopter control in three-dimensional space using a noninvasive motor imagery-based brain-computer interface". J. Neural Eng., vol. 1, no. 4, pp. 046003.

[https://cumming.ucalgary.ca/research/pediatric-bci/bci-program/what-bci#:~:text=A%20brain%20computer%20interface%20\(BCI,device%20using%20only%20your%20mind.](https://cumming.ucalgary.ca/research/pediatric-bci/bci-program/what-bci#:~:text=A%20brain%20computer%20interface%20(BCI,device%20using%20only%20your%20mind.)

<https://www.siloamhospitals.com/en/informasi-siloam/artikel/apa-itu-electroencephalogram>

<https://etindonesia.com/2024/08/16/serangan-drone-swarm-hantam-3-bandara-militer-rusia-bahkan-air-force-one-putin-ikut-terserang-pasukan-black-swan-pukul-telak-angkatan-udara-rusia/>

<https://www.voaindonesia.com/a/ukraina-serang-moskow-dengan-34-drone-terbesar-sejak-perang-pecah/7858699.html>

<https://www.voaindonesia.com/a/ukraina-tembak-jatuh-20-drone-rusia/7914440.html>

<https://www.spslandforces.com/story/?id=747&h=Swarm-Drones---New-Frontier-of-Warfare>

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2024/11/21/pengembangan-senjata-neuro-neuropharmacology-directed-energy-weapons-dan-brain-computer-interfaces-tantangan-peluang-dan-ancaman-bagi-indonesia.html>

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2024/09/30/pentingnya-sinergitas-kelembagaan-industri-pertahanan-dalam-menghadapi-perubahan-paradigma-belanja-pertahanan-menjadi-investasi-pertahanan.html>

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2024/09/05/clustered-regularly-interspaced-short-palindromic-repeats-crispr-tantangan-peluang-dan-ancaman-bagi-indonesia.html>

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2024/08/15/peran-industri-pertahanan-dalam-mitigasi-perubahan-iklim-melalui-reforestasi-hutan-mangrove-lessons-learned-melalui-indo-pasific-environmental-security-forum-ipesf-2024.html>

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2024/07/03/pengembangan-senjata-biologi-sintetik-menggunakan-kecerdasan-buatan-sebagai-potensi-ancaman-aktual-non-militer-terhadap-pertahanan-negara.html>

<https://forkominhan.id/wp-content/Inhan/edisi03apr2024/mobile/index.html>

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2024/05/22/pengembangan-teknologi-rekayasa-kebumian-tantangan-peluang-dan-ancaman-bagi-indonesia.html>

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2024/04/25/swarm-drone-tantangan-peluang-dan-ancaman-bagi-indonesia.html>

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2024/03/20/implikasi-kecerdasan-buatan-dalam-industri-pertahanan-tantangan-dan-peluang-bagi-indonesia.html>

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2024/02/23/pengembangan-teknologi-semikonduktor-nasional-dan-kemandirian-industri-pertahanan.html>

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2024/01/12/integrasi-lintas-medan-dan-pengembangan-industri-pertahanan-nasional-agar-dapat-maju-kuat-mandiri-dan-berdaya-saing.html>

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2023/11/22/pengembangan-nanoteknologi-dan-manfaatnya-bagi-sektor-pertahanan-sub-sektor-industri-pertahanan.html>

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2023/10/05/dampak-revolutions-in-military-affairs-rma-terhadap-pengembangan-senjata-gelombang-mikro-berdaya-tinggi.html>

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2023/09/08/potensi-dual-use-disrupsi-teknologi-dalam-mewujudkan-industri-pertahanan-yang-maju-kuat-mandiri-dan-berdaya-saing.html>

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2023/07/25/potensi-triple-helix-model-dalam-pengembangan-directed-energy-weapons-dewi-demi-kemandirian-industri-pertahanan-nasional.html>

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2023/06/21/potensi-dwiguna-rare-earth-elements-rees-dalam-pengembangan-sistem-c6isr-dan-interoperabilitas-trimatra-terpadu-produk-industri-pertahanan-indonesia.html>

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2023/05/25/sifat-dual-use-agensi-biologi-sebagai-potensi-ancaman-aktual-non-militer-terhadap-pertahanan-negara.html>

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2023/05/10/strategi-copying-from-dalam-memperkuat-pertahanan-negara-pada-domain-military-aviation.html>

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2023/05/02/strategi-five-interdependent-goals-departemen-pertahanan-amerika-serikat-untuk-meraih-freedom-of-action-dalam-spektrum-elektromagnetik.html>.

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2023/04/14/naskah-karya-tulis-ilmiah-esai-sishankamrata-dual-use-aspek-militer-dan-sipil-sebagai-upaya-penguatan-pertahanan-dan-ekonomi-menggunakan-strategi-military-civil-fusion-mcf.html>.

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2023/02/04/analisis-swot-terhadap-pembentukan-holding-bumn-industri-pertahanan-dalam-rangka-memperkuat-pertahanan-negara.html>.

<https://forkominhan.id/wp-content/Inhan/edisifebapr2023/mobile/index.html>.

<https://www.kemhan.go.id/pothan/2023/02/06/potensi-kerja-sama-industri-pertahanan-indonesia-dengan-jepang-dalam-new-domains-of-warfare-studi-pustaka-pada-kebijakan-pertahanan-indonesia-dan-the-defense-of-japan-white-paper-2022.html>.

<https://bisnisindonesia.id/article/ri-pursuing-a-dual-approach-strategy-in-the-development-of-semiconductor-ecosystem>

<https://indonesia.jakartadaily.id/ekonomi-bisnis/69312434611/joe-biden-umumkan-bangun-pabrik-semikonduktor-senilai-rp-640-triliun-gandeng-korsel>

<https://theglobal-review.com/artificial-intelligence-sangat-potensial-dimanfaatkan-untuk-pengembangan-program-laboratorium-bio-militer/>

<https://papua.tribunnews.com/2024/05/30/intip-kekuatan-udara-tni-au-drone-game-changer?page=2>