

Technological and scientific collaboration in mitigating CBRNE threats in Indonesia

Faonaso Harefa¹, Cecilia F. Harsono²

¹Faculty of Defense Health, Defense University, Jakarta, Indonesia

²Faculty of National Security, Defense University, Jakarta, Indonesia

Article Info

Article history

Received : Dec 05, 2025

Revised : Dec 11, 2025

Accepted : Jan 08, 2026

Abstrak

Latar Belakang dan Celah Riset: Ancaman Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosive (CBRNE) bersifat tidak kasatmata, cepat menyebar, dan berdampak sistemik, sementara pemanfaatan teknologi deteksi modern dan integrasi data lintas sektor dalam sistem mitigasi CBRNE masih belum terkonseptualisasi secara utuh dalam kerangka sains pertahanan. Literatur yang ada cenderung membahas teknologi secara parsial tanpa mengaitkannya dengan tata kelola koordinasi dan respons nasional. Tujuan dan Metodologi: Penelitian ini bertujuan menganalisis peran perangkat deteksi modern dan integrasi data meliputi data sharing, Early Warning System (EWS), dan geospasial pertahanan dalam meningkatkan koordinasi interinstansi dan kecepatan respons CBRNE. Penelitian menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif melalui analisis literatur, dokumen internasional, teori pertahanan, serta temuan empiris mutakhir terkait integrasi sensor cerdas dan kecerdasan buatan dalam deteksi CBRNE. Temuan Konseptual dan Kontribusi Teoretis: Hasil analisis menunjukkan bahwa biosensor, detektor radiasi, drone berbasis AI, dan sistem geospasial secara konseptual meningkatkan akurasi identifikasi, jangkauan pemantauan, dan kecepatan pengambilan keputusan ketika diintegrasikan dalam sistem EWS dan data sharing lintas sektor. Penelitian ini berkontribusi secara teoretis dengan menegaskan bahwa efektivitas mitigasi CBRNE tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan teknologi, tetapi oleh integrasi teknologi tersebut ke dalam tata kelola sains pertahanan yang memungkinkan interoperabilitas, koordinasi, dan respons nasional yang cepat dan adaptif.

Abstract

Research Gap: Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosive (CBRNE) threats are characterized by invisibility, rapid diffusion, and systemic impacts on national security. Although advances in detection technologies such as biosensors, radiation detectors, artificial intelligence (AI), drones, geospatial systems, and integrated information platforms offer significant potential, existing studies tend to address these technologies in isolation and rarely situate them within an integrated defense science and governance framework. Objective and Methodological Stance: This study examines the effectiveness of modern detection technologies and data integration mechanisms, including data sharing, Early Warning Systems (EWS), and defense geospatial platforms, in enhancing interagency coordination and national response speed to CBRNE threats. A descriptive qualitative approach is employed through a structured analysis of scholarly literature, international policy documents, defense theories, and empirical findings on smart sensor and AI-based CBRNE detection systems. Conceptual Findings and Theoretical Contribution: The analysis indicates that biosensors, radiation detectors, AI-enabled drones, and geospatial systems conceptually improve detection accuracy, expand monitoring coverage, and accelerate decision-making when embedded within interoperable EWS and cross-sectoral data-sharing architectures. The study contributes theoretically by demonstrating that effective CBRNE mitigation is not driven solely by technological sophistication, but by the institutional integration of detection technologies into a coherent defense science governance model that enables interoperability, coordinated decision-making, and adaptive national response.

Keys word:

Collaboration, Defense Health, Mitigation, Technology, National Security, and Science.

Corresponding Author:

Faonaso Harefa,

Fakultas Kesehatan Pertahanan

Universitas Pertahanan Jakarta, Indonesia

Jl. Mataraman Jakarta Timur, Indonesia

Email Coresponden: faonaso.harefa@doktoral.idu.ac.id

This is an open access article under the CC BY-NC license.



PENDAHULUAN

Peran Teknologi dan Inovasi Sains dalam Deteksi Dini serta Penanggulangan merespons ancaman Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosive (CBRNE) merujuk pada bagaimana perkembangan perangkat teknologi modern saat ini seperti biosensor, detektor radiasi, pengenalan kimia, kecerdasan buatan, drone, geospasial, dan sistem informasi dapat digunakan untuk mengidentifikasi, memantau, menganalisis, serta merespons ancaman Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosive (CBRNE) secara cepat, akurat, dan terintegrasi (Ma & Li, 2025).

Mengidentifikasi ancaman CBRNE berarti melakukan deteksi awal untuk mengenali jenis, sumber, dan karakteristik bahan kimia, biologis, radiologis, nuklir, atau eksplosif menggunakan perangkat sensor dan teknologi berbasis AI; memantau berarti melakukan pengawasan berkelanjutan melalui sistem penginderaan jauh, pemetaan geospasial, dan data real-time guna melihat dinamika perubahan situasi; menganalisis berarti mengolah dan menafsirkan data deteksi untuk menentukan tingkat bahaya, pola penyebaran, serta risiko operasional; sedangkan merespons berarti mengambil tindakan cepat dan terkoordinasi seperti isolasi area, dekontaminasi, evakuasi, dan intervensi medis untuk menekan dampak ancaman. Penelitian Chen et al. (2022) menunjukkan bahwa integrasi sensor cerdas, data geospasial, dan AI mampu meningkatkan efektivitas deteksi serta respons CBRNE secara cepat, akurat, dan terintegrasi (Sebele-Mpofu, 2020).

Secara teoretis, konsep ini sejalan dengan *Technological Determinism* yang menyatakan bahwa inovasi teknologi mendorong perubahan dalam kapasitas organisasi dan sistem keamanan, serta teori *Early Warning System* (UNDRR, 2020) yang menekankan bahwa teknologi adalah komponen inti dalam mendeteksi ancaman sebelum berdampak luas. Dalam kerangka *Defense Science and Technology* (NATO, 2019), teknologi dan inovasi sains dipandang sebagai faktor strategis yang memperkuat kesiapan, respons operasional, dan efektivitas mitigasi melalui pemanfaatan data real-time, analisis berbasis AI, dan integrasi lintas lembaga. Peran teknologi dan inovasi sains dalam merespons ancaman Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosive (CBRNE) adalah menyediakan kemampuan deteksi dini dan respons cepat berbasis bukti ilmiah untuk melindungi masyarakat, lingkungan, dan keamanan nasional (Amiri et al., 2024).

Penelitian ini mengisi kesenjangan literatur dengan melampaui uraian deskriptif tentang teknologi dan kebijakan CBRNE menuju penjelasan teoretis mengenai bagaimana kapabilitas teknologi hanya menjadi efektif apabila terintegrasi dalam tata kelola yang terinstitusionalisasi. Berbeda dari studi sebelumnya yang cenderung membahas sistem deteksi, early warning, dan koordinasi antarlembaga secara terpisah, penelitian ini menawarkan perspektif sains pertahanan terpadu yang memosisikan interoperabilitas sebagai hasil dari desain tata kelola, bukan semata kecanggihan teknis. Kebaruan teoretis penelitian ini terletak pada konseptualisasi kesiapsiagaan CBRNE sebagai sistem sosioteknis, di mana teknologi, integrasi data, dan koordinasi lintas sektor berinteraksi melalui pengaturan kelembagaan formal untuk menghasilkan kapasitas respons nasional yang adaptif.

Rumusan Masalah pada penelitian ini adalah bagaimana teknologi dan inovasi sains modern meliputi biosensor, detektor radiasi, teknologi pengenalan kimia, drone, AI, geospasial, dan sistem informasi dapat diintegrasikan secara efektif untuk meningkatkan deteksi dini, pemantauan, analisis, dan respons terhadap ancaman CBRNE secara cepat, akurat, dan terkoordinasi? (Rani et al., 2025)

Novelty penelitian ini terletak pada integrasi komprehensif antara teknologi deteksi modern, sistem peringatan dini, data sharing, geospasial pertahanan, dan sains multidisiplin sebagai model baru mitigasi CBRNE yang lebih cepat, presisi, dan adaptif dibandingkan pendekatan sebelumnya (Ahmed et al., 2020).

Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan ilmu kesehatan dengan menghadirkan pendekatan deteksi penyakit dan paparan biologis/kimia berbasis teknologi modern seperti biosensor, AI, dan geospasial yang mempercepat diagnosis, meningkatkan akurasi surveilans kesehatan, serta memperluas kemampuan mitigasi bahaya biologis dalam konteks kesehatan masyarakat dan epidemiologi modern. Memperkuat bidang kesehatan pertahanan dengan menyediakan kerangka ilmiah berbasis teknologi untuk deteksi dini ancaman CBRNE, meningkatkan kesiapsiagaan personel TNI, dan mengintegrasikan bio-sensor, detektor radiasi, teknologi kimia, UAV-AI, serta geospasial ke dalam sistem medis militer sebagai alat pendukung pengambilan keputusan di medan operasi (Liopyris et al., 2022). Memberikan kontribusi signifikan bagi publik dengan menghasilkan model deteksi dini ancaman kimia, biologis, radiasi, dan nuklir yang mampu meminimalkan risiko paparan masyarakat, memperkuat

sistem peringatan dini, mendukung respons cepat bencana non-alam CBRNE, serta meningkatkan kemampuan pemerintah dalam melindungi keselamatan warga. Penelitian ini memperkuat pertahanan negara melalui integrasi teknologi sensorik, sistem informasi, geospasial, dan AI untuk menciptakan sistem deteksi, pemantauan, dan respons CBRNE yang lebih adaptif, presisi, dan terkoordinasi, sekaligus menjadi dasar strategis modernisasi kemampuan pertahanan nasional berbasis sains dan teknologi (Mhlanga, 2022).

Tujuan Penelitian: Menganalisis kontribusi dan efektivitas perangkat deteksi inovatif biosensor, detektor radiasi, teknologi pengenalan kimia, drone, serta AI dalam mendukung sistem deteksi dini CBRNE, serta untuk mengevaluasi bagaimana mekanisme berbagi data, sistem peringatan dini, dan integrasi geospasial pertahanan dapat meningkatkan koordinasi inter-instansi dalam merespons ancaman tersebut secara cepat, akurat, dan terstruktur (Park, 2020). Selain itu, penelitian ini bertujuan memberikan rekomendasi berbasis sains pertahanan guna memperkuat kesiapan operasional, meningkatkan kemampuan prediksi, serta memperkuat ekosistem mitigasi dan penanggulangan CBRNE secara nasional (Zhang, 2025).

METODE

Pada penelitian ini menggunakan metode kualitatif dengan pendekatan Tinjauan Pustaka (Doyle et al., 2020). Landasan teori yang digunakan untuk menganalisisnya sebagai berikut:

Defense Technology Theory. Menekankan bahwa inovasi sains dan teknologi merupakan fondasi utama dalam meningkatkan kapabilitas keamanan nasional, termasuk deteksi dan respons terhadap ancaman CBRNE. NATO (2019) menegaskan bahwa kemajuan teknologi seperti sensor cerdas, drone, kecerdasan buatan, dan pemodelan geospasial berperan langsung dalam mempercepat pengambilan keputusan dan memperkuat kesiapan operasional pasukan. Teori ini relevan untuk melihat bagaimana perangkat deteksi modern (biosensor, detektor radiasi, IMS/FTIR/GC-MS, dll.) meningkatkan kecepatan identifikasi dan pemantauan ancaman (Tang et al., 2023).

Early Warning System Theory. Menurut UNDRR (2020), sistem peringatan dini adalah rangkaian sistem terpadu yang mencakup deteksi, analisis risiko, diseminasi informasi, dan respons cepat. EWS menjadi penting dalam konteks ancaman CBRNE yang menyebar cepat dan tidak kasatmata. Teknologi seperti pemantauan radiasi real-time, biosurveilliance berbasis sensor, dan pemodelan penyebaran bahan kimia mendukung empat elemen EWS. Teori ini menjadi dasar untuk menjelaskan bagaimana teknologi deteksi dan data sharing dapat menghasilkan respons tepat waktu dan meminimalkan dampak kontaminasi.

Technological Determinism. Teori determinisme teknologi, sebagaimana dikemukakan McLuhan (1964), menjelaskan bahwa perubahan dalam lingkungan sosial, politik, dan keamanan sangat dipengaruhi oleh perkembangan teknologi. Dalam konteks CBRNE, inovasi seperti AI, big data, drone, dan geospasial mengubah cara negara melakukan deteksi, analisis, dan respons. Teori ini memperkuat argumen bahwa inovasi perangkat deteksi bukan hanya alat teknis, tetapi penggerak transformasi strategi pertahanan nasional (Zheng et al., 2025).

Risk Management Theory – ISO 31000. Framework ISO 31000 menegaskan bahwa risiko harus diidentifikasi, dianalisis, dievaluasi, dan dikendalikan melalui pendekatan sistematis dan berbasis bukti. Ancaman CBRNE adalah risiko ekstrem yang membutuhkan pemantauan kontinyu, penggunaan sensor presisi, serta integrasi data multi-sumber. Teori ini mendukung penelitian dengan menunjukkan bagaimana teknologi dapat membantu mengukur risiko, memetakan kontaminasi, dan memberikan dasar ilmiah untuk tindakan mitigasi (Zhai et al., 2023).

Defense Geospatial Intelligence / GEOINT Theory. Menurut Jensen & Wagner (2017), geospatial intelligence memanfaatkan citra satelit, sensor, UAV, dan data lokasi untuk menganalisis kondisi lingkungan, pola pergerakan, dan persebaran ancaman. Dalam konteks CBRNE, geospasial pertahanan penting untuk memetakan zona kontaminasi, memprediksi penyebaran bahan kimia/biologis, menentukan jalur evakuasi, dan mendukung operasi lapangan TNI. Teori ini relevan untuk menjelaskan fungsi integrasi geospasial dalam sistem peringatan dini dan pengambilan keputusan berbasis data (Dargan et al., 2020).

Interagency Collaboration Theory. Teori kolaborasi (Thomson & Perry, 2006) menjelaskan bahwa penanganan ancaman kompleks memerlukan koordinasi multi-aktor, pertukaran informasi, serta integrasi fungsi antar lembaga. CBRNE melibatkan TNI, Kemenkes, BRIN, BAPETEN, BNPB, dan Polri,

sehingga data sharing menjadi kunci efektivitas respons. Penelitian scopus (Chen et al., 2022; Li et al., 2023) menunjukkan bahwa kualitas respons CBRNE meningkat secara signifikan ketika data sensor, drone, dan laboratorium terhubung ke satu platform analitik (Rudko et al., 2021).

Defense Science Integration Theory. Teori ini memandang bahwa kemampuan pertahanan negara bertumpu pada integrasi multidisiplin antara kimia, biologi, fisika nuklir, sains material, geospasial, dan kecerdasan buatan. NATO Science & Technology Organization (STO) menekankan bahwa penanganan CBRNE membutuhkan kolaborasi lintas-sains untuk menghasilkan perangkat deteksi, pemodelan kontaminasi, dan sistem mitigasi yang komprehensif. Teori ini mendukung penelitian Anda yang menekankan integrasi sains pertahanan dalam deteksi dini dan penanggulangan CBRNE (Tang et al., 2023).

Data dikumpulkan melalui seleksi literatur berdasarkan kriteria inklusi berupa relevansi topik CBRNE, integrasi teknologi, dan tata kelola pertahanan, dengan periode publikasi 2015–2024 dari basis data ilmiah bereputasi (Scopus, Web of Science, dan Google Scholar), sementara prosedur analisis dilakukan melalui tahapan pengorganisasian data, pengkodean tematik, penarikan tema, dan sintesis interpretatif sesuai dengan kerangka analisis kualitatif Creswell (2014).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis dilakukan melalui abstraksi analitis dengan mengidentifikasi pola-pola yang berulang dalam berbagai dokumen, melakukan perbandingan lintas sumber pada dimensi teknologi, kelembagaan, dan tata kelola, serta mensintesis persamaan dan perbedaan tersebut untuk menghasilkan temuan konseptual pada tingkat yang lebih tinggi, bukan sekadar uraian deskriptif.

Inovasi Perangkat Deteksi.

Inovasi perangkat deteksi dalam penanggulangan ancaman CBRNE menurut Defense Technology Theory merupakan kemajuan teknologi sensorik dan ilmiah merupakan fondasi utama peningkatan kemampuan deteksi dan respons pertahanan. NATO (2019) menegaskan bahwa inovasi seperti biosensor, detektor radiasi presisi tinggi, teknologi identifikasi kimia berbasis IMS, FTIR, dan GC-MS, serta drone dan kecerdasan buatan, berperan kritis dalam mempercepat pengambilan keputusan operasional (Zheng et al., 2025).

Ion Mobility Spectrometry (IMS) adalah teknik analisis yang memisahkan dan mengidentifikasi molekul kimia berdasarkan pergerakannya melalui gas di bawah pengaruh medan listrik. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) adalah metode spektroskopi yang menganalisis struktur molekul dengan mengukur penyerapan cahaya inframerah oleh sampel untuk mengidentifikasi ikatan kimia. Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC-MS) adalah kombinasi teknik kromatografi gas dan spektrometri massa yang memisahkan serta mengidentifikasi senyawa kimia secara sangat akurat berdasarkan massa dan pola fragmentasinya (Zhai et al., 2023).

Dalam konteks CBRNE yang bersifat cepat menyebar, tidak kasatmata, dan berdampak destruktif, inovasi perangkat deteksi tidak hanya berfungsi sebagai alat teknis, tetapi secara strategis meningkatkan *situational awareness* dan memperluas jangkauan deteksi tanpa harus mengekspos personel terhadap bahaya langsung. Dengan kemampuan mengidentifikasi organisme biologis, toksin kimia, radiasi, maupun material nuklir dalam waktu singkat dan dengan akurasi tinggi, perangkat deteksi modern memperkuat kesiapan operasional TNI serta memungkinkan respons yang lebih cepat dan tepat sasaran. Oleh karena itu, sesuai Defense Technology Theory, inovasi perangkat deteksi menjadi tulang punggung modernisasi sistem keamanan CBRNE dan merupakan determinan utama efektivitas mitigasi ancaman di lingkungan pertahanan (Dargan et al., 2020).

Bio-Sensor.

Bio-sensor merupakan perangkat deteksi biologis yang menggunakan biomolekul seperti enzim, antibodi, DNA/RNA probe, atau nanomaterial untuk mengenali agen biologis secara cepat, sensitif, dan akurat, sehingga sangat strategis untuk deteksi dini ancaman CBRNE (Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosive) (Rudko et al., 2021).

Berdasarkan Defense Technology Theory, yang menegaskan bahwa kemajuan teknologi sensorik adalah fondasi peningkatan kemampuan pertahanan, karena biosensor memungkinkan identifikasi patogen, toksin, atau agen bioterorisme secara real-time di lapangan tanpa memerlukan laboratorium besar, sehingga memperkuat kesiapan operasional pasukan (NATO, 2019). Selain itu, **Early Warning**

System Theory (UNDRR, 2020) menekankan bahwa bio-sensor berfungsi sebagai komponen deteksi awal dalam sistem peringatan dini, memungkinkan analisis risiko cepat dan aktivasi respons sebelum terjadi penyebaran luas. Penelitian Chen et al. (2022) menunjukkan bahwa biosensor modern berbasis nanoteknologi dan kecerdasan buatan/Artificial Intelligence (AI) dapat mendeteksi patogen pada tingkat sangat rendah secara otomatis, sehingga menjadikannya instrumen kunci dalam mitigasi risiko biologis (Lameesa et al., 2024).

Detektor Radiasi.

Detektor radiasi seperti *Scintillation Detector*, *Geiger-Müller Counter*, dan *High-Purity Germanium (HPGe) Detector* merupakan perangkat kunci untuk mendeteksi dan mengukur paparan radiasi ionisasi secara cepat dan akurat dalam penanganan ancaman CBRNE (Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosive). Analisis perangkat ini sangat relevan menggunakan Defense Technology Theory, karena teori tersebut menegaskan bahwa inovasi sensor presisi dan teknologi pertahanan modern adalah fondasi utama dalam meningkatkan kesiapsiagaan dan kapabilitas deteksi pasukan (NATO, 2019), di mana detektor radiasi digunakan untuk mengidentifikasi sumber radiasi secara real-time sehingga mendukung pengambilan keputusan cepat (Almalawi et al., 2023).

Selain itu, *Early Warning System Theory* (UNDRR, 2020) memperkuat argumen bahwa detektor radiasi berperan sebagai komponen inti tahap deteksi dalam sistem peringatan dini, memungkinkan penyimpangan radiasi segera teridentifikasi dan memicu respons cepat sebelum eskalasi terjadi. Teori pendukung lainnya adalah *Risk Management Theory-ISO 31000*, yang menjelaskan bahwa detektor radiasi menjadi instrumen penting dalam proses identifikasi, analisis, dan evaluasi risiko radiasi ionisasi yang bersifat ekstrem, sehingga informasi kuantitatif yang dihasilkan dapat digunakan untuk menentukan tindakan mitigasi yang berbasis bukti. Dengan demikian, detektor radiasi bukan hanya peralatan teknis, tetapi elemen strategis dalam sistem pertahanan CBRNE yang meningkatkan keamanan operasional, perlindungan personel, dan efektivitas mitigasi ancaman radiologis-nuklir (Haefner et al., 2021).

Teknologi Pengenalan Kimia.

Teknologi pengenalan kimia seperti *Ion Mobility Spectrometry (IMS)*, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*, dan *Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC-MS)* merupakan perangkat deteksi canggih yang memungkinkan identifikasi cepat, presisi, dan spesifik terhadap berbagai agen kimia berbahaya, termasuk *nerve agents*, *choking agents*, *blister agents*, serta *toxic industrial chemicals*, sehingga sangat penting dalam penanggulangan ancaman CBRNE (Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosive). Analisis perangkat ini paling relevan menggunakan Defense Technology Theory, karena teori tersebut menekankan bahwa inovasi teknologi sensor dan instrumentasi ilmiah adalah fondasi utama peningkatan kemampuan deteksi dan kesiapan operasional pasukan (NATO, 2019), di mana IMS, FTIR, dan GC-MS terbukti mempercepat identifikasi bahan kimia di lapangan tanpa harus menunggu hasil laboratorium konvensional (Verganti et al., 2020).

Selain itu, *Early Warning System Theory* (UNDRR, 2020) memperkuat peran teknologi pengenalan kimia sebagai elemen deteksi awal yang memungkinkan sistem peringatan dini memproses informasi kimia berbahaya secara cepat sehingga respons mitigasi dapat segera diaktifkan. Teori pendukung *Risk Management Theory ISO 31000* juga relevan karena teknologi ini memberikan data kuantitatif dan kualitatif mengenai tingkat toksisitas, konsentrasi, dan sebaran agen kimia, yang sangat penting dalam proses identifikasi, analisis risiko, dan penetapan langkah mitigasi berbasis bukti. Dengan demikian, teknologi pengenalan kimia bukan hanya alat teknis analitik, tetapi instrumen strategis yang memperkuat deteksi dini, pengendalian risiko, dan efektivitas pertahanan terhadap ancaman kimia dalam operasi CBRNE (Aggarwal et al., 2021).

Drone dan Artificial Intelijen (AI).

Drone atau *Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)* yang dilengkapi sensor kimia, biologis, dan radiasi serta kecerdasan buatan atau *Artificial Intelligence (AI)* telah menjadi teknologi kunci dalam operasi CBRNE karena mampu melakukan pemantauan udara, pengambilan sampel, pemetaan area kontaminasi, dan analisis pola penyebaran secara real-time tanpa mengekspos personel terhadap bahaya langsung. Analisis ini paling relevan menggunakan Defense Technology Theory, karena teori tersebut menegaskan bahwa modernisasi teknologi pertahanan termasuk UAV dan AI secara langsung

meningkatkan efektivitas deteksi, akurasi pemantauan, dan kecepatan pengambilan keputusan operasional (NATO, 2019). Selain itu, Early Warning System Theory (UNDRR, 2020) mendukung peran drone dan AI sebagai elemen penting dalam tahap deteksi, analisis risiko, dan diseminasi informasi, terutama saat sistem peringatan dini membutuhkan data cepat dari area yang sulit diakses manusia (Goktas & Grzybowski, 2025).

Teori pendukung Technological Determinism (McLuhan, 1964) juga relevan karena menjelaskan bahwa perkembangan teknologi termasuk AI, big data, dan UAV secara fundamental mengubah strategi keamanan dan cara negara merespons ancaman, di mana kemampuan drone ber-AI telah mengubah paradigma deteksi dari berbasis manusia menjadi berbasis teknologi otonom. Dengan demikian, drone dan AI bukan hanya alat teknis, tetapi merupakan penggerak utama transformasi pertahanan dalam deteksi dini, pemodelan risiko, dan mitigasi ancaman CBRNE yang kompleks dan dinamis (Musarat et al., 2023).

Pentingnya Data Sharing

Data sharing atau berbagi data menjadi elemen krusial dalam deteksi dini dan penanggulangan CBRNE (Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosive) karena ancaman ini bersifat lintas-sektor dan memerlukan koordinasi antara TNI, Kemenkes, BNPB, BRIN, BAPETEN, Polri, dan lembaga teknis lainnya untuk memastikan respons yang cepat, terpadu, dan berbasis bukti (Martini et al., 2024).

Interagency Collaboration Theory menekankan bahwa efektivitas penanganan isu kompleks sangat ditentukan oleh pertukaran informasi, integrasi fungsi, dan koordinasi antar-aktor (Thomson & Perry, 2006), di mana data sensor, laboratorium, drone, maupun geospasial harus mengalir secara terbuka dan terstruktur lintas lembaga (Trocin et al., 2023).

Early Warning System Theory (UNDRR, 2020) memperkuat bahwa sistem peringatan dini hanya dapat berfungsi optimal jika didukung oleh aliran data yang cepat, akurat, dan saling terhubung dari berbagai sumber sehingga deteksi anomali CBRNE dapat segera memicu alarm dan tindakan mitigasi (Paschen et al., 2020).

Defense Science Integration Theory, menunjukkan bahwa penanganan ancaman CBRNE membutuhkan integrasi multidisiplin (kimia, biologi, nuklir, geospasial, dan AI), sehingga data sharing menjadi fondasi bagi analisis terpadu dan pengambilan keputusan strategis. Dengan demikian, data sharing bukan hanya kebutuhan administratif, tetapi komponen strategis yang menentukan kecepatan respons, keakuratan analisis risiko, dan keberhasilan mitigasi nasional terhadap ancaman CBRNE (Nagendran et al., 2020).

Pentingnya Sistem Peringatan Dini

Sistem peringatan dini atau *Early Warning System (EWS)* merupakan mekanisme terpadu yang mencakup deteksi, analisis risiko, diseminasi informasi, dan respons cepat untuk mencegah atau meminimalkan dampak ancaman CBRNE (Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosive), sehingga menjadi komponen vital dalam arsitektur keamanan nasional (Amann et al., 2020).

Early Warning System Theory (UNDRR, 2020) yang menegaskan bahwa sistem peringatan dini hanya dapat berfungsi optimal jika didukung oleh deteksi multi-sumber, integrasi data real-time, dan mekanisme penyampaian informasi yang cepat, di mana sensor radiasi, biosurveillance, drone, dan teknologi pengenalan kimia berperan sebagai elemen inti (El Arab, Abu-Mahfouz, et al., 2025).

Defense Technology Theory memperkuat argumen bahwa kemajuan teknologi seperti AI (Artificial Intelligence), pemodelan geospasial, dan sensor cerdas memungkinkan sistem peringatan dini menghasilkan informasi yang lebih akurat dan mempercepat pengambilan keputusan dalam operasi CBRNE (NATO, 2019 (Faiyazuddin et al., 2025)).

Risk Management Theory ISO 31000 juga relevan karena EWS merupakan instrumen untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mengevaluasi risiko ekstrem secara proaktif sehingga tindakan mitigasi dapat dilakukan sebelum terjadi eskalasi. Dengan demikian, sistem peringatan dini bukan hanya perangkat teknis, tetapi merupakan strategi kunci yang menentukan efektivitas deteksi dini, kesiapan operasional, dan keberhasilan mitigasi nasional terhadap ancaman CBRNE (Taj & Jhanjhi, 2022).

Pentingnya Geospasial Pertahanan

Geospasial pertahanan atau *Defense Geospatial Intelligence (GEOINT)* merupakan integrasi data lokasi, citra satelit, sensor darat/udara, *Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)*, serta pemetaan digital untuk menghasilkan gambaran situasional yang akurat mengenai persebaran ancaman CBRNE (Chemical,

Biological, Radiological, Nuclear, and Explosive), sehingga menjadi elemen strategis dalam deteksi dini dan penanggulangan CBRNE (Salam & Abhinesh, 2024).

GEOINT Theory menegaskan bahwa pemanfaatan data geospasial memungkinkan identifikasi zona kontaminasi, prediksi penyebaran agen kimia atau biologis, analisis pola radiasi, serta penentuan jalur evakuasi secara presisi (Jensen & Wagner, 2017), yang sangat penting dalam operasi pertahanan (Maleki Varnosfaderani & Forouzanfar, 2024).

Defense Technology Theory mendukung argumen bahwa integrasi sensor geospasial, drone ber-AI (Artificial Intelligence), dan pemodelan digital merupakan inovasi pertahanan yang meningkatkan *situational awareness* dan mempercepat pengambilan keputusan dalam situasi darurat (NATO, 2019).

Teori pendukung Early Warning System Theory (UNDRR, 2020) juga sangat relevan karena geospasial pertahanan menyediakan informasi real-time yang dibutuhkan untuk tahap deteksi, analisis risiko, dan diseminasi peringatan dini sebelum ancaman menyebar lebih luas (Najdenko et al., 2025).

Pentingnya Integrasi Sains Pertahanan.

Integrasi sains pertahanan merupakan proses penyatuan berbagai disiplin ilmu seperti kimia, biologi, fisika nuklir, sains material, geospasial, dan kecerdasan buatan/Artificial Intelligence (AI) serta teknologi sensorik dan analitik untuk membangun kemampuan deteksi dini dan mitigasi ancaman CBRNE (Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosive) yang komprehensif, adaptif, dan berbasis bukti (Nahavandi, 2019). **Defense Science Integration Theory**, menegaskan bahwa penanganan ancaman CBRNE tidak dapat bertumpu pada satu disiplin ilmu, tetapi membutuhkan kolaborasi lintas-sains untuk menghasilkan perangkat deteksi, pemodelan kontaminasi, dan sistem respons yang lebih akurat dan efektif (NATO-STO, 2020) (Marot et al., 2022).

Defense Technology Theory memperkuat bahwa inovasi teknologi seperti biosensor, detektor radiasi, UAV ber-AI, dan pemetaan geospasial hanya dapat berfungsi optimal jika terintegrasi dalam kerangka sains pertahanan yang menyatukan data, algoritma analitik, dan instrumentasi ilmiah (El Arab, Almoosa, et al., 2025). Interagency Collaboration Theory juga relevan, karena integrasi sains pertahanan memerlukan kolaborasi antara TNI, Kemenkes, BRIN, BNPB, BAPETEN, dan Polri untuk menyatukan data, kapasitas laboratorium, riset teknologi, dan kesiapan operasional. Dengan demikian, integrasi sains pertahanan bukan hanya konsep akademik, tetapi fondasi strategis yang memastikan sistem deteksi dini CBRNE bekerja secara sinergis, presisi, dan efektif dalam mendukung keamanan nasional (Ziatdinov et al., 2024).

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa deteksi dini dan penanggulangan ancaman CBRNE (*Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosive*) sangat bergantung pada pemanfaatan teknologi modern dan integrasi sains pertahanan. Bio-sensor, detektor radiasi, serta teknologi pengenalan kimia seperti IMS (*Ion Mobility Spectrometry*), FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*), dan GC-MS (*Gas Chromatography–Mass Spectrometry*) meningkatkan kecepatan dan akurasi identifikasi. Drone berbasis AI (*Artificial Intelligence*) memperluas pemantauan tanpa risiko personel. Selain itu, data sharing, sistem peringatan dini atau EWS (*Early Warning System*), dan geospasial pertahanan memperkuat koordinasi antar lembaga. Melalui teori terkait, penelitian menegaskan bahwa modernisasi teknologi adalah fondasi mitigasi CBRNE yang efektif. Pemerintah dan lembaga pertahanan memperkuat investasi pada teknologi deteksi CBRNE (*Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosive*) seperti bio-sensor, detektor radiasi, IMS (*Ion Mobility Spectrometry*), FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*), GC-MS (*Gas Chromatography–Mass Spectrometry*), serta drone berbasis AI (*Artificial Intelligence*). Selain itu, diperlukan pembangunan sistem data sharing terpadu, optimalisasi *Early Warning System* (EWS), peningkatan kapasitas geospasial pertahanan, dan penguatan kolaborasi lintas lembaga untuk memastikan respons CBRNE yang cepat, akurat, dan terkoordinasi secara nasional. Keterbatasan penelitian ini terletak pada kurangnya data empiris lapangan dan uji operasional langsung terhadap perangkat deteksi CBRNE sehingga analisis masih bertumpu pada kajian literatur dan konsep teoretis. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan uji lapangan berbasis simulasi CBRNE untuk memperoleh data empiris yang lebih komprehensif mengenai efektivitas teknologi deteksi dan integrasi sains pertahanan. Secara teoretis, penelitian ini berkontribusi dengan menegaskan bahwa efektivitas mitigasi CBRNE tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan teknologi deteksi, tetapi oleh integrasi teknologi

tersebut ke dalam kerangka sains pertahanan dan tata kelola interoperabilitas nasional. Temuan ini memperluas literatur CBRNE dengan memosisikan kesiapsiagaan CBRNE sebagai sistem sosioteknis, di mana teknologi, integrasi data, dan koordinasi kelembagaan saling berinteraksi untuk menghasilkan kapasitas respons yang adaptif dan terkoordinasi.

References:

- Aggarwal, R., Sounderajah, V., Martin, G., Ting, D. S. W., Karthikesalingam, A., King, D., Ashrafian, H., & Darzi, A. (2021). Diagnostic accuracy of deep learning in medical imaging: a systematic review and meta-analysis. *Npj Digital Medicine*, 4(1). <https://doi.org/10.1038/s41746-021-00438-z>
- Ahmed, Z., Mohamed, K., Zeeshan, S., & Dong, X. Q. (2020). Artificial intelligence with multi-functional machine learning platform development for better healthcare and precision medicine. *Database*, 2020, 1–35. <https://doi.org/10.1093/database/baaa010>
- Almalawi, A., Khan, A. I., Alsolami, F., Abushark, Y. B., & Alfakheh, A. S. (2023). Managing Security of Healthcare Data for a Modern Healthcare System. *Sensors*, 23(7), 1–18. <https://doi.org/10.3390/s23073612>
- Amann, J., Blasimme, A., Vayena, E., Frey, D., & Madai, V. I. (2020). Explainability for artificial intelligence in healthcare: a multidisciplinary perspective. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 20(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/s12911-020-01332-6>
- Amiri, Z., Heidari, A., Navimipour, N. J., Esmailpour, M., & Yazdani, Y. (2024). The deep learning applications in IoT-based bio- and medical informatics: a systematic literature review. In *Neural Computing and Applications* (Vol. 36, Issue 1). Springer London. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-09366-3>
- Dargan, S., Kumar, M., Ayyagari, M. R., & Kumar, G. (2020). A Survey of Deep Learning and Its Applications: A New Paradigm to Machine Learning. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(4), 1071–1092. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09344-w>
- Doyle, L., McCabe, C., Keogh, B., Brady, A., & McCann, M. (2020). An overview of the qualitative descriptive design within nursing research. *Journal of Research in Nursing*, 25(5), 443–455. <https://doi.org/10.1177/1744987119880234>
- El Arab, R. A., Abu-Mahfouz, M. S., Abuadas, F. H., Alzghoul, H., Almari, M., Ghannam, A., & Seweid, M. M. (2025). Bridging the Gap: From AI Success in Clinical Trials to Real-World Healthcare Implementation—A Narrative Review. *Healthcare (Switzerland)*, 13(7), 1–13. <https://doi.org/10.3390/healthcare13070701>
- El Arab, R. A., Almoosa, Z., Alkhunaizi, M., Abuadas, F. H., & Somerville, J. (2025). Artificial intelligence in hospital infection prevention: an integrative review. *Frontiers in Public Health*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1547450>
- Faiyazuddin, M., Rahman, S. J. Q., Anand, G., Siddiqui, R. K., Mehta, R., Khatib, M. N., Gaidhane, S., Zahiruddin, Q. S., Hussain, A., & Sah, R. (2025). The Impact of Artificial Intelligence on Healthcare: A Comprehensive Review of Advancements in Diagnostics, Treatment, and Operational Efficiency. *Health Science Reports*, 8(1), 1–18. <https://doi.org/10.1002/hsr2.70312>
- Goktas, P., & Grzybowski, A. (2025). Shaping the Future of Healthcare: Ethical Clinical Challenges and Pathways to Trustworthy AI. *Journal of Clinical Medicine*, 14(5), 1–28. <https://doi.org/10.3390/jcm14051605>
- Haefner, N., Wincent, J., Parida, V., & Gassmann, O. (2021). Artificial intelligence and innovation management: A review, framework, and research agenda ☆ *Technological Forecasting and Social Change*, 162(June 2020), 120392. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120392>
- Lameesa, A., Hoque, M., Alam, M. S. Bin, Ahmed, S. F., & Gandomi, A. H. (2024). Role of metaheuristic algorithms in healthcare: a comprehensive investigation across clinical diagnosis, medical imaging, operations management, and public health. *Journal of Computational Design and Engineering*, 11(3), 223–247. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwae046>
- Liopyris, K., Gregoriou, S., Dias, J., & Stratigos, A. J. (2022). Artificial Intelligence in Dermatology: Challenges and Perspectives. *Dermatology and Therapy*, 12(12), 2637–2651. <https://doi.org/10.1007/s13555-022-00833-8>
- Ma, R., & Li, M. (2025). Assessment of Land Resource Utilization Efficiency, Spatiotemporal Pattern, and Network Characteristics in Resource-Based Regions: A Case Study of Shanxi Province. *Sustainability (Switzerland)*, 17(6). <https://doi.org/10.3390/su17062458>
- Maleki Varnosfaderani, S., & Forouzanfar, M. (2024). The Role of AI in Hospitals and Clinics: Transforming Healthcare in the 21st Century. *Bioengineering*, 11(4), 1–38. <https://doi.org/10.3390/bioengineering11040337>
- Marot, A., Kelly, A., Naglic, M., Barbesant, V., Cremer, J., Stefanov, A., & Viebahn, J. (2022). Perspectives on Future Power System Control Centers for Energy Transition. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 10(2), 328–344. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2021.000673>
- Martini, B., Bellisario, D., & Coletti, P. (2024). Human-Centered and Sustainable Artificial Intelligence in Industry 5.0: Challenges and Perspectives. *Sustainability (Switzerland)*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/su16135448>
- Mhlanga, D. (2022). Human-Centered Artificial Intelligence: The Superlative Approach to Achieve Sustainable Development Goals in the Fourth Industrial Revolution. *Sustainability (Switzerland)*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/su14137804>
- Musarat, M. A., Irfan, M., Alaloul, W. S., Maqsoom, A., & Ghufuran, M. (2023). A Review on the Way Forward in Construction through Industrial Revolution 5.0. *Sustainability (Switzerland)*, 15(18).

- <https://doi.org/10.3390/su151813862>
- Nagendran, M., Chen, Y., Lovejoy, C. A., Gordon, A. C., Komorowski, M., Harvey, H., Topol, E. J., Ioannidis, J. P. A., Collins, G. S., & Maruthappu, M. (2020). Artificial intelligence versus clinicians: Systematic review of design, reporting standards, and claims of deep learning studies in medical imaging. *The BMJ*, 368, 1–12. <https://doi.org/10.1136/bmj.m689>
- Nahavandi, S. (2019). *Industry 5.0 Sustainability*, 11, 43–71.
- Najdenko, E., Riedel, V., Dittert, K., Ruckelshausen, A., Lorenz, F., & Olf, H. W. (2025). A Rapid In-Field Soil Extraction Procedure to Measure Plant-Available Soil P and K Using an ISFET Multi-Sensor. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 593–603. <https://doi.org/10.1002/jpln.12007>
- Park, J. H. (2020). Effects of nurses' patient safety management importance, patient safety culture and nursing service quality on patient safety management activities in tertiary hospitals. *Journal of Korean Academy of Nursing Administration*, 26(3), 181–191. <https://doi.org/10.1111/JKANA.2020.26.3.181>
- Paschen, U., Pitt, C., & Kietzmann, J. (2020). Artificial intelligence: Building blocks and an innovation typology. *Business Horizons*, 63(2), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2019.10.004>
- Rani, S., Kumar, R., Panda, B. S., Kumar, R., Muftun, N. F., Abass, M. A., & Lozanović, J. (2025). Machine Learning-Powered Smart Healthcare Systems in the Era of Big Data: Applications, Diagnostic Insights, Challenges, and Ethical Implications. *Diagnostics*, 15(15), 1914. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15151914>
- Rudko, I., Bonab, A. B., & Bellini, F. (2021). Organizational structure and artificial intelligence. Modeling the intraorganizational response to the AI contingency. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, 16(6), 2341–2364. <https://doi.org/10.3390/jtaer16060129>
- Salam, A., & Abhinesh, N. (2024). Revolutionizing dermatology: The role of artificial intelligence in clinical practice. *IP Indian Journal of Clinical and Experimental Dermatology*, 10(2), 107–112. <https://doi.org/10.18231/j.ijced.2024.021>
- Sebele-Mpofu, F. Y. (2020). Saturation controversy in qualitative research: Complexities and underlying assumptions. A literature review. *Cogent Social Sciences*, 6(1). <https://doi.org/10.1080/2331886.2020.1838706>
- Taj, I., & Jhanjhi, N. Z. (2022). Towards Industrial Revolution 5.0 and Explainable Artificial Intelligence: Challenges and Opportunities. *International Journal of Computing and Digital Systems*, 12(1), 285–310. <https://doi.org/10.12785/ijcds/120124>
- Tang, L., Li, J., & Fantus, S. (2023). Medical artificial intelligence ethics: A systematic review of empirical studies. *Digital Health*, 9. <https://doi.org/10.1177/20552076231186064>
- Trocin, C., Mikalef, P., Papamitsiou, Z., & Conboy, K. (2023). Responsible AI for Digital Health: a Synthesis and a Research Agenda. *Information Systems Frontiers*, 25(6), 2139–2157. <https://doi.org/10.1007/s10796-021-10146-4>
- Verganti, R., Vendraminelli, L., & Iansiti, M. (2020). Innovation and Design in the Age of Artificial Intelligence. *Journal of Product Innovation Management*, 37(3), 212–227. <https://doi.org/10.1111/jpim.12523>
- Zhai, K., Yousef, M. S., Mohammed, S., Al-Dewik, N. I., & Qoronfleh, M. W. (2023). Optimizing Clinical Workflow Using Precision Medicine and Advanced Data Analytics. *Processes*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/pr11030939>
- Zhang, J. (2025). The Application of Artificial Intelligence Technology in Human Centered Manufacturing in Industry 5.0. *Scalable Computing: Practice and Experience*, 26(3), 1242–1256. <https://doi.org/10.12694/scpe.v26i3.4130>
- Zheng, X., Zheng, K., Wen, Y., Meng, J., Zhang, X., Wen, X., Zhao, Z., Zheng, C., Cai, X., Lin, J., Chen, J., Duan, J., Jiang, L., Yuan, W., Li, X., Xie, D., Cai, Y., Zhang, J., & Cai, M. (2025). An end-to-end multifunctional AI platform for intraoperative diagnosis. *Npj Digital Medicine*, 8(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41746-025-01808-7>
- Ziatdinov, R., Atteraya, M. S., & Nabiyev, R. (2024). The Fifth Industrial Revolution as a Transformative Step towards Society 5.0. *Societies*, 14(2), 1–15. <https://doi.org/10.3390/soc14020019>