

ANALISIS SEJARAH PRODUKSI, PENGGUNAAN, DAN PERKEMBANGAN CHAFF SEBAGAI ALAT COUNTER MEASURE PERSENJATAAN UDARA

HISTORICAL ANALYSIS OF THE PRODUCTION, USE, AND DEVELOPMENT OF CHAFF AS A COUNTERMEASURE TO AIR WEAPONS

Muhammad Fajar Fauzan Almahdy¹, Novky Asmoro²

UNIVERSITAS PERTAHANAN REPUBLIK INDONESIA
(muhammad.almahdy@tp.idu.ac.id, novky.asmoro@idu.ac.id)

Abstrak – Penelitian ini melakukan analisis terhadap sejarah produksi, penggunaan, dan perkembangan *chaff* sebagai alat *countermeasure* dalam konteks perang udara dengan pendekatan kualitatif serta studi literatur sistematis. *Chaff*, yang pertama kali diterapkan pada Perang Dunia II, telah mengalami evolusi yang signifikan dalam hal material, teknologi produksi, dan taktik penggunaan untuk menghadapi sistem radar musuh yang semakin canggih. Studi ini mengeksplorasi komposisi modern *chaff* yang berbasis serat kaca berlapis aluminium dengan diameter mikron, proses produksi yang menggunakan teknologi tinggi seperti chemical etching, serta sistem dispenser canggih seperti AN/ALE-47 yang mampu mengintegrasikan kecerdasan buatan untuk pengoperasian yang adaptif. Selain itu, analisis mendalam mengenai taktik penyebaran *chaff*, seperti force screening dan self-protection, serta koordinasi dengan electronic countermeasures (ECM) dijelaskan untuk meningkatkan efektivitas perlindungan pesawat. Penelitian ini juga membahas teknik electronic counter-countermeasures (ECCM) yang dikembangkan oleh radar modern dan strategi counter-ECCM yang terus berinovasi. Perkembangan material nanoteknologi, seperti carbon nanotube dan quantum metamaterial, serta integrasi artificial intelligence dan machine learning membuka arah baru dalam pengembangan *chaff* sebagai sistem *countermeasure* yang prediktif dan adaptif. Hasil pengujian radar cross section (RCS) menunjukkan adanya trade-off antara performa material dan karakteristik operasional *chaff*. Implementasi *chaff* yang kompatibel dengan berbagai platform udara dan laut serta standar internasional juga menjadi sorotan. Kesimpulannya, *chaff* tetap menjadi teknologi fundamental dalam *electronic warfare*, dengan inovasi material dan sistem cerdas yang mempersiapkan efektivitasnya dalam menghadapi lanskap ancaman udara modern yang semakin kompleks dan dinamis. Studi ini memberikan wawasan strategis mengenai evolusi *chaff* yang menekankan pentingnya inovasi berkelanjutan dan adaptabilitas untuk mempertahankan keunggulan pertahanan udara di masa depan.

Kata Kunci: *Chaff*, countermeasure, inovasi, sejarah, teknologi

Abstract – This study analyzes the history of the production, use, and development of *chaff* as a countermeasure in the context of aerial warfare using a qualitative approach and systematic literature review. *Chaff*, which was first used in World War II, has undergone significant evolution in terms of materials, production technology, and tactics of use to counter increasingly sophisticated enemy radar systems. This study explores the modern composition of *chaff*, which is based on aluminum-coated glass fibers with a micron diameter, production processes that use high technology such as chemical etching, and advanced dispenser systems such as AN/ALE-47, which are capable of integrating artificial intelligence for adaptive operation. In addition, an in-depth analysis of *chaff* deployment tactics, such as force screening and self-protection, as well as coordination with electronic countermeasures (ECM) is described to improve aircraft protection effectiveness. This study also discusses electronic counter-countermeasures (ECCM) techniques developed by modern radars and continuously innovating counter-ECCM strategies. Advances in nanotechnology materials, such as carbon nanotubes and

quantum metamaterials, as well as the integration of artificial intelligence and machine learning, are opening up new avenues in the development of chaff as a predictive and adaptive countermeasure system. Radar cross section (RCS) test results show a trade-off between material performance and chaff operational characteristics. The implementation of chaff that is compatible with various air and sea platforms and international standards is also in the spotlight. In conclusion, chaff remains a fundamental technology in electronic warfare, with material and intelligent system innovations preparing its effectiveness in facing an increasingly complex and dynamic modern air threat landscape. This study provides strategic insights into the evolution of chaff, emphasizing the importance of continuous innovation and adaptability to maintain air defense superiority in the future.

Keywords: Chaff, countermeasure, innovation, history, technology

Pendahuluan

Dinamika Perang Dingin mempercepat pengembangan *electronic warfare* secara dramatis, dengan Amerika Serikat dan Uni Soviet berinvestasi besar-besaran dalam sistem yang semakin canggih (Pryluk et al., 2016). Era ini melahirkan konsep modern *electronic countermeasures* (ECM) dan *electronic counter-countermeasures* (ECCM) yang menjadi blueprint bagi perkembangan teknologi pertahanan kontemporer (N. Li et al., 2023). Perang Vietnam kemudian menjadi testing ground pertama untuk aplikasi ECM skala besar dalam pertempuran, dengan pesawat seperti EA-6B Prowler yang dirancang khusus untuk misi radar jamming (Boord & Hoffman, 2016).

Analisis historis menunjukkan bahwa setiap konflik besar telah menghasilkan lompatan teknologi *countermeasure* yang signifikan, mulai dari penggunaan passive radar oleh

pasukan Serbia untuk mendeteksi F-117 Nighthawk hingga pengembangan *cognitive electronic warfare* berbasis AI pada masa kini (J. Li et al., 2017).

Studi sejarah pengembangan *countermeasure* mengungkapkan pola fundamental dalam evolusi teknologi pertahanan yang memberikan dasar kuat bagi inovasi masa depan (Gao et al., 2019). Sejak Perang Dunia II dengan pengenalan chaff "Window" oleh Inggris pada serangan Hamburg 24 Juli 1943, dunia militer telah menyaksikan spiral teknologi yang tak terputus antara ancaman dan *countermeasure* (Ma et al., 2024). Pengalaman awal ini menunjukkan bahwa setiap terobosan teknologi militer segera memicu pengembangan *countermeasure* sebagai respons, menciptakan siklus aksi-reaksi yang menggerakkan inovasi teknologi pertahanan hingga saat ini (ZHANG et al., 2018). Pembelajaran dari sejarah penggunaan pertama chaff di Hamburg, dimana teknologi sederhana

berupa potongan aluminium dapat melumpuhkan sistem radar Jerman yang canggih, membuktikan bahwa solusi *countermeasure* yang efektif tidak selalu memerlukan teknologi yang kompleks, melainkan pemahaman mendalam terhadap kelemahan fundamental sistem lawan (Ran et al., 2019).

Perjalanan sejarah *countermeasure* memperlihatkan pentingnya adaptabilitas dalam menghadapi ancaman yang terus berevolusi, dimana sistem yang dominan pada satu era dapat menjadi usang dalam hitungan tahun atau bahkan bulan (Nantogma et al., 2021). Pengalaman Perang Teluk 1991 mendemonstrasikan efektivitas devastating dari operasi EW terintegrasi, ketika pasukan koalisi secara sistematis membongkar pertahanan udara Irak melalui electronic attack sebelum serangan konvensional (S. Zhang et al., 2023). Hal ini mengajarkan bahwa *countermeasure* modern memerlukan pendekatan holistik yang mengintegrasikan multiple domain dan platform, bukan lagi sistem standalone yang terisolasi (Farlik, 2015). Studi historis juga mengungkapkan bahwa investasi dalam *countermeasure* seringkali menghasilkan dual-use technologies yang memberikan manfaat sipil jangka panjang, sebagaimana teknologi radar

dan GPS yang awalnya dikembangkan untuk keperluan militer kini menjadi foundation bagi teknologi komunikasi dan navigasi modern (CIEŚLAK, 2020).

Lessons learned dari sejarah pengembangan *countermeasure* menekankan bahwa keunggulan teknologi bersifat temporal dan memerlukan continuous innovation untuk mempertahankan efektivitas (Duan et al., 2023). Analisis pattern historis mengungkapkan bahwa negara atau organisasi yang mampu mengantisipasi tren teknologi dan mengembangkan *countermeasure* proaktif memiliki keunggulan strategis yang signifikan dalam konflik masa depan (T. Zhang et al., 2019). Era modern dengan integrasi AI dan *machine learning* dalam sistem EW menandai transformasi paradigmatis dimana *countermeasure* tidak lagi bersifat reaktif melainkan predictive dan adaptive (Shi et al., 2017). Pemahaman terhadap evolution pattern ini menjadi crucial bagi pengembangan defense technology strategy yang mampu menghadapi threat landscape yang semakin complex dan dinamis, dimana adversaries dapat menggunakan commercially available components untuk mengembangkan capabilities yang sophisticated dalam waktu singkat (LI, 2020).

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kualitatif dengan pendekatan studi literatur sistematis yang dirancang khusus untuk menganalisis perkembangan teknologi *countermeasure chaff* dalam konteks sejarah peperangan.

Metode kualitatif dipilih karena relevansinya dengan objek penelitian yang bersifat multidimensional, meliputi aspek teknologi, sejarah militer, dan evolusi strategi pertahanan yang memerlukan deskripsi mendalam dan analisis interpretatif.

Pendekatan studi literatur sistematis dalam penelitian ini mengadopsi kerangka metodologi yang telah digunakan dalam penelitian pertahanan dan teknologi militer, dimana data dikumpulkan dalam bentuk kata-kata, dokumen teknis, dan analisis historis untuk menghasilkan pemahaman komprehensif terkait isu-isu teknologi pertahanan. Peneliti berperan sebagai instrumen utama dalam mengumpulkan dan menganalisis data terkait pengembangan *countermeasure chaff*, dengan memanfaatkan wawasan teoritis dan pemahaman mendalam untuk melakukan observasi dan analisis yang mendetail.

Teknik pengumpulan data primer menggunakan studi pustaka sistematis dengan fokus pada dokumen-dokumen ilmiah, laporan teknis, publikasi militer, dan arsip sejarah yang berkaitan dengan teknologi *chaff*. Data dan informasi diperoleh melalui pengumpulan dan analisis jurnal-jurnal ilmiah internasional, buku-buku referensi teknik militer, laporan pemerintah, manual operasional, dan publikasi terkait lainnya yang berkaitan dengan pengembangan *countermeasure* dalam peperangan.

Sumber data meliputi database akademik seperti Scopus, IEEE Xplore, dan Defense Technical Information Center (DTIC), serta publikasi dari organisasi pertahanan internasional seperti NATO Science and Technology Organization (STO). Pencarian literatur dilakukan dengan menggunakan kata kunci yang relevan dalam bahasa Inggris dan Indonesia, termasuk "*chaff countermeasures*", "*electronic warfare*", "*radar deception*", "*military technology history*", dan variasi terminologi terkait.

Penelitian ini menggunakan analisis dokumen teknis sebagai metode utama untuk mengekstrak informasi dari spesifikasi teknis, manual operasional, dan laporan penelitian pengembangan. Dokumen-dokumen yang dianalisis

meliputi standar militer (MIL-STD), spesifikasi teknis produk, laporan uji coba, dan dokumentasi sistem seperti yang terdapat dalam publikasi *Jane's Defence Weekly*, *Aviation Week*, dan jurnal teknologi pertahanan lainnya.

Analisis dokumen dilakukan secara sistematis dengan mengidentifikasi parameter teknis, evolusi material, dan perubahan spesifikasi operasional dari masa ke masa. Data teknis yang diekstrak meliputi komposisi material, dimensi fisik, karakteristik elektromagnetik, dan parameter kinerja operasional *chaff* dari berbagai generasi teknologi.

Teknik Analisis Data

Analisis Historis Kronologis

Penelitian ini menggunakan metode analisis historis dengan pendekatan kronologis untuk menelusuri perkembangan teknologi *chaff* dari masa Perang Dunia II hingga era modern. Analisis historis melibatkan dua metode utama: analisis dan sintesis. Analisis berarti menguraikan peristiwa sejarah menjadi komponen-komponen yang dapat dipahami, sedangkan sintesis berarti menggabungkan temuan-temuan tersebut menjadi narasi yang koheren. Metode ini mengikuti langkah-langkah penelitian sejarah yang meliputi heuristik

(pencarian dan pengumpulan sumber), kritik sumber (verifikasi dan validasi), interpretasi (penafsiran data), dan historiografi (penulisan hasil). Dalam konteks teknologi *chaff*, analisis historis memungkinkan identifikasi pola evolusi, faktor-faktor pendorong perubahan, dan hubungan kausal antara perkembangan teknologi dengan kebutuhan operasional.

Analisis Konten dan Kategorisasi

Analisis konten sistematis digunakan untuk mengkategorikan dan mengklasifikasikan informasi yang diperoleh dari berbagai sumber literatur. Proses ini melibatkan pengkodean data berdasarkan tema-tema utama seperti jenis material, metode produksi, aplikasi operasional, dan efektivitas sistem. Kategorisasi dilakukan secara induktif, dimana tema-tema muncul dari data, dan secara deduktif berdasarkan kerangka teoretis yang telah ditetapkan.

Analisis konten juga mencakup identifikasi tren teknologi, pola pengembangan, dan faktor-faktor yang mempengaruhi evolusi *chaff*. Data dikategorikan berdasarkan periode historis, jenis platform (udara, laut, darat), dan karakteristik teknis untuk memungkinkan analisis komparatif yang mendalam.

Secondary Analysis dan Meta-Synthesis

Penelitian ini menggunakan teknik secondary analysis untuk memberikan gambaran berbagai praktik analisis dengan menggunakan data yang sudah ada, baik data yang dikumpulkan oleh peneliti lain maupun yang dikumpulkan oleh instansi-instansi militer dan pemerintah. Teknik ini memungkinkan penelitian pertanyaan baru dan verifikasi temuan sebelumnya dalam konteks yang lebih luas.

Meta-synthesis dilakukan untuk mengintegrasikan temuan dari berbagai studi dan sumber yang berbeda, menciptakan pemahaman yang lebih komprehensif tentang perkembangan teknologi *chaff*. Proses ini melibatkan perbandingan dan kontras antara berbagai pendekatan, identifikasi konsensus dan kontradiksi dalam literatur, serta sintesis temuan untuk menghasilkan wawasan baru tentang tren dan pola perkembangan teknologi.

Validitas dan Reliabilitas

Triangulasi Sumber

Untuk memastikan validitas temuan, penelitian ini menggunakan triangulasi sumber dengan membandingkan informasi dari berbagai jenis dokumen dan publikasi. Triangulasi

dilakukan dengan mengombinasikan sumber akademik, dokumen teknis militer, laporan industri, dan publikasi sejarah untuk memverifikasi konsistensi informasi dan mengidentifikasi potensi bias atau ketidakakuratan.

Validitas konstruk diperkuat melalui penggunaan multiple sources of evidence dan establishment of chain of evidence yang memungkinkan peneliti untuk melacak jalur analisis dari data mentah hingga kesimpulan akhir. Reliabilitas dipastikan melalui dokumentasi prosedur analisis yang detail dan penggunaan protokol penelitian yang konsisten.

Hasil dan Diskusi

Teknologi Pembuatan dan Material

Komposisi dan Struktur Material

Chaff modern terdiri dari serat kaca berlapis aluminium (*aluminised glass fiber*) dengan spesifikasi yang sangat presisi untuk mengoptimalkan radar cross section (RCS) (C. Li et al., 2015). Material dasar berupa serat kaca dengan diameter sekitar 25 mikron yang dilapisi aluminium untuk menciptakan dipole yang resonan dengan frekuensi radar target (BORISOVA & NIKOLOV, 2023). Proses pembuatan melibatkan teknologi pelapisan logam pada serat kaca melalui metode *chemical etching* dimana kawat

aluminium 115 mikron direduksi secara kimia menjadi serat dengan diameter 25±4 mikron (Druzin et al., 2019).

Proses produksi *chaff* melibatkan beberapa tahap kritis, yaitu:

Tabel 1. Tahap Proses Produksi *Chaff*

Tahap	Penjelasan
Multiple Wire Winding	Kawat aluminium 115 mikron digulung dari spool tunggal menjadi spool multi-kawat
Chemical Etching	Kawat diproses melalui <i>chemical etching bath</i> untuk mereduksi diameter hingga 25±4 mikron
Post Treatment	Permukaan serat diperbaiki melalui <i>slip coating treatment</i> untuk mencegah <i>end-welding</i> dan mengurangi penggumpalan saat keluar
Cutting & Packing	Serat dipotong sesuai panjang target dan dikemas dalam <i>kraft paper</i> membentuk <i>chaff</i>

Sumber: Shu et al., 2020

Spesifikasi Teknis Modern *Chaff* kontemporer memiliki karakteristik yang sangat spesifik untuk memaksimalkan efektivitas, yaitu:

Tabel 2. Spesifikasi *Chaff* Kontemporer

Karateristik	Keterangan
Diameter serat	0.7-1 mil (0.018-0.025 mm) untuk superfine <i>chaff</i>
Panjang serat	0.3 inci hingga 2+ inci (7.6-51+ mm) bergantung frekuensi target
Jumlah serat per cartridge	3-5 juta serat individual
Material coating	Aluminium dengan slip coating fatty acid untuk mencegah adhesi

Sumber: Hao Hu et al. 2020

Chaff cartridge standar seperti CCM RR129 A/AL memiliki spesifikasi operasional sebagai berikut:

Tabel 3. Spesifikasi *Chaff Cartridge*

Karateristik	Keterangan
--------------	------------

Berat total	230g nominal dengan ejected weight 156g
Dimensi	148mm panjang × 36mm diameter
Temperatur Operasi	-46°C hingga +71°C
Lama Penyimpanan	10 tahun dengan air carriage life 1 tahun

Sumber: Hao Hu et al. 2020)

Sistem Dispenser dan Implementasi Platform

AN/ALE-47 Countermeasures Dispenser System

AN/ALE-47 merupakan sistem dispenser *chaff*/flare generasi terbaru yang digunakan pada berbagai platform militer (Marquiz et al., 2025). Sistem ini merupakan evolusi dari ALE-40 dengan penambahan autonomi dan perangkat lunak yang signifikan. Komponen utama meliputi:

Tabel 4. Komponen Utama Sistem AN/ALE-47

Komponen	Keterangan
Cockpit Control Unit	Interface pilot dengan sistem
Sequencer Unit	Mengatur timing dan sequence deployment
Countermeasure Dispenser Optional Programmer	Mekanisme fisik untuk ejection Untuk customization mission-specific

Sumber: Marquiz et al. 2025

Mode operasi ALE-47 memberikan fleksibilitas taktis, yaitu:

Tabel 5. Mode Operasi ALE-47

Mode	Keterangan
Fully Automatic	Sistem menerima threat data dari RWR dan secara otomatis memilih respons optimal
Semi-Automatic	Sistem menganalisis ancaman dan memberikan sinyal ready kepada pilot
Manual Operation	Pilot memilih salah satu dari enam pre-programmed response

Sumber: (Rojdev et al., 2020)

Mekanisme Ejection dan Deployment

Chaff cartridge menggunakan impulse cartridge (IC) dengan pyrotechnic squib charge untuk menghasilkan tekanan gas yang mengejeksi payload dengan kecepatan 25-50 m/s. Spesifikasi teknis IC meliputi:

Tabel 6. Spesifikasi IC

Spesifikasi	Keterangan
No Fire Current	1 Amp/1 Watt selama 5 menit
All Fire Current	>4.25 Amps
Resistance	1.00 ± 0.15 Ohms
Peak Pressure	3.1-5.2 MPa dalam 45 cc closed bomb

Sumber: Khan, 2017

Taktik Pemakaian dan Implementasi Operasional

Strategi Deployment

Pemakaian chaff dalam pertahanan udara melibatkan dua pendekatan utama:

a. *Force Screening Tactics*, terdiri dari:

- 1) *Area Saturation*, yaitu menciptakan *multiple false targets* untuk menjenuhkan sistem radar musuh melalui *random chaff dispensing*
- 2) *Corridor Operation*, yaitu pembentukan koridor chaff melalui *dispersal steady rate* untuk menyembunyikan pesawat yang mengikuti

b. *Self-Protection Tactics* terdiri dari:

- 1) *Reactive Employment*, yaitu deployment chaff sebagai respons terhadap deteksi ancaman untuk menciptakan *corner reflector deception*
- 2) *Pre-emptive Release*, yaitu dispersal proaktif untuk

memecah pola *seeker* pada rudal pencari gambar

Koordinasi dengan Electronic Countermeasures

Efektivitas *chaff* dapat ditingkatkan melalui koordinasi dengan teknik ECM (Smirnov, 2019). Teknik-teknik tersebut adalah sebagai berikut:

- a. *Range Gate Pull-Off* (RGPO) yaitu menginduksi *victim seeker* untuk mentransfer *range tracking* dari pesawat ke *chaff*.
- b. *Velocity Gate Pull-Off* (VGPO), yaitu manipulasi *velocity tracking seeker*.
- c. *Coordinated Range/Velocity Gate Pull-Off* (CRVGPO), yaitu kombinasi RGPO dan VGPO untuk memaksimalkan *deception*.

Keterbatasan dan Counter-Countermeasures Electronic Counter-Countermeasures (ECCM)

Radar modern mengembangkan berbagai teknik ECCM untuk mengatasi *chaff* (Khanh, 2021). Teknik-teknik yang dapat dilakukan adalah sebagai berikut:

- a. *Doppler Discrimination*, yaitu radar dapat membedakan *chaff* dari target sesungguhnya melalui analisis *Doppler effect*, karena *chaff*

kehilangan kecepatan dengan cepat setelah deployment

- b. *Burn-Through Technique*, peningkatan daya transmisi radar untuk "membakar" interferensi *chaff*, memanfaatkan fakta bahwa kekuatan radar return turun dengan pangkat empat jarak sementara jamming turun dengan pangkat dua.
- c. *Frequency Hopping*, radar mengubah frekuensi transmisi beberapa kali per detik, membuat spot jamming tidak efektif.

Teknik Counter-ECCM

Untuk mengatasi ECCM, dikembangkan teknik lanjutan (Jianxing et al., 2022). Teknik-teknik yang dapat dilakukan adalah sebagai berikut:

- a. *JAFF* (*Jammer plus Chaff*), yaitu kombinasi *chaff* dengan jamming signal yang terkoreksi Doppler
- b. *CHILL* (*Chaff-Illuminated*), yaitu awan *chaff* diterangi dengan sinyal yang telah dikoreksi Doppler untuk mempertahankan karakteristik target bergerak

Perkembangan Teknologi Masa Depan Material Advanced dan Nanotechnology

Pengembangan *chaff* generasi mendatang memanfaatkan kemajuan dalam nanomaterial dan metamaterial (Deng et al., 2015). Jenis material yang dapat digunakan adalah sebagai berikut:

a. *Carbon Nanotube Chaff*: Penelitian menunjukkan potensi penggunaan *carbon nanotube* untuk *chaff* gelombang pita millimeter (30-40 GHz). Keunggulan material ini meliputi:

- 1) Diameter yang sangat kecil memungkinkan *packing density* tinggi.
- 2) Konduktivitas superior untuk aplikasi frekuensi tinggi.
- 3) Kemampuan untuk dipotong dalam panjang presisi untuk resonansi spesifik.

b. *Copper-Coated Carbon (CuC) Fiber*: Studi komparatif menunjukkan CuC fiber memiliki RCS mendekati aluminium fiber namun dengan keunggulan:

- 1) Diameter lebih tipis meningkatkan *packing density* dalam *cartridge*.
- 2) *Terminal velocity* lebih rendah meningkatkan persistent time *chaff cloud*.

- 3) *Dynamic RCS threshold* lebih tinggi karena jumlah dipole per *payload* yang lebih besar.

Quantum Metamaterial Integration

Perkembangan quantum metamaterial membuka kemungkinan revolutionary dalam teknologi *chaff* (Arfan et al., 2024). Material yang dapat direkayasa pada level quantum memungkinkan:

- a. Manipulasi presisi terhadap sifat elektromagnetik.
- b. *Tunability real-time* terhadap respon frekuensi.
- c. *Enhanced radar absorption characteristics*.

Artificial Intelligence dan Machine Learning

Integrasi AI dan ML dalam sistem *chaff* deployment menawarkan kemampuan adaptive yang signifikan (Costa et al., 2025). Metode integrasi yang dapat dilakukan adalah sebagai berikut:

- a. *Cognitive Electronic warfare*, sistem berbasis AI dapat:
 - 1) Menganalisis *threat environment* secara *real-time*
 - 2) Menentukan *chaff deployment pattern* optimal berdasarkan ML

- 3) Memprediksi perilaku sistem radar musuh untuk *preemptive countermeasures*
- b. *Adaptive Deployment Systems*: ML memungkinkan:
 - 1) *Automatic mission data reprogramming* berdasarkan analisis ancaman
 - 2) *Real-time optimization chaff dispersal sequence*
 - 3) *Predictive threat classification* untuk *enhanced situational awareness*

Pengujian dan Validasi Kinerja

Radar Cross Section Measurement

Pengujian efektivitas *chaff* melibatkan RCS measurement yang mutakhir (Priyanka & B.Aashritha J.Rakshana, 2025). Metode *free space test* menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) dengan *rotating turntable* memungkinkan pengukuran RCS single dipole element pada rentang frekuensi 5-11 GHz (Jiang, 2015).

Comparative Material Studies

Studi komparatif antara berbagai material *chaff* menunjukkan trade-off antara RCS performance dan operational characteristics. Perbandingan material yang digunakan adalah sebagai berikut:

- a. Aluminium fiber memiliki RCS tinggi, proven reliability
- b. *Copper-coated carbon* memiliki RCS comparable, improved packing density
- c. *Advanced nanomaterials* memiliki potensial untuk meningkatkan performa pada pita frekuensi spesifik

Implementasi dan Integrasi Platform

Multi-Platform Compatibility

Sistem *chaff* modern dirancang untuk kompatibilitas *multi-platform* (Jiandong & Xiaofeng, 2017). Misalkan pada pesawat tempur dengan jenis F-16 dan F/A-18, dengan ALE-47 integration. Selain itu pada pesawat angkut dengan jenis C-17 dengan *customized dispenser configuration*. Kemudian pada helikopter dengan jenis CH-47 dan UH-60 dengan *lightweight dispenser systems*. Selain pada pesawat dapat juga digunakan dalam Kapal Perang yaitu *Shipboard chaff launcher systems* dengan *automated deployment*.

Standar Internasional

Pengembangan *chaff* mengikuti standar internasional seperti MIL-C-85699(AS) yang mengatur kriteria-kriteria berikut:

- a. *Design requirements* untuk *air launch chaff countermeasures*
- b. *Performance specifications* untuk *radar reflector components*
- c. *Manufacturing standards* untuk *quality assurance*
- d. *Testing protocols* untuk *acceptance criteria*

Kesimpulan, Hasil, dan Pembatasan

Hasil pembahasan menunjukkan bahwa chaff masih menjadi salah satu teknologi penangkal yang digunakan dalam electronic warfare, meskipun perkembangan sistem radar menghadirkan tantangan baru. Pengembangan material, dari strip aluminium konvensional hingga material yang lebih maju, menunjukkan adanya upaya untuk menyesuaikan teknologi chaff dengan perubahan ancaman. Efektivitasnya tidak hanya ditentukan oleh material yang digunakan, tetapi juga oleh prinsip kerja radar, sistem peluncuran, dan kondisi operasional.

Perkembangan teknologi chaff mencakup penyempurnaan proses produksi, sistem peluncuran, dan penelitian material baru, seperti carbon nanotubes dan metamaterial. Integrasi dengan kecerdasan buatan juga berpotensi mendukung penggunaan

chaff dalam operasi peperangan elektronik yang lebih kompleks. Namun, penerapan teknologi tersebut masih perlu dikaji lebih lanjut untuk memastikan manfaat dan efektivitasnya dalam kondisi operasional yang berbeda.

Secara keseluruhan, chaff masih relevan sebagai bagian dari sistem penangkal dalam peperangan elektronik. Namun, penggunaannya perlu disesuaikan dengan perkembangan teknologi radar dan karakteristik ancaman yang dihadapi. Bagi praktisi pertahanan udara, pemahaman tentang prinsip fisika, perkembangan material, dan integrasi sistem penting untuk menilai kemampuan chaff dalam mendukung operasi pertahanan. Pengembangan selanjutnya juga perlu mempertimbangkan keterpaduan chaff dengan sistem pertahanan lain untuk menghadapi ancaman yang semakin kompleks.

Penelitian ini memiliki keterbatasan dalam menilai efektivitas chaff jika hanya mengandalkan kajian literatur tanpa pengujian atau simulasi. Tanpa data kinerja yang terukur, efektivitas material baru dan integrasi kecerdasan buatan belum dapat dipastikan secara kuantitatif. Selain itu, perbedaan karakteristik radar dan kondisi

operasional dapat memengaruhi hasil penggunaannya. Penelitian selanjutnya perlu membandingkan kinerja berbagai material dan pendekatan penggunaan chaff melalui pengujian atau simulasi yang sesuai dengan karakteristik ancaman yang diteliti.

Daftar Pustaka

- Arfan, M., Ghaffar, A., Alkanhal, M. A. S., Khan, Y., Alqahtani, A. H., & Shakir, I. (2024). Correction: Extinction efficiency and scattering asymmetry of a PEMC sphere illuminated by vortex electromagnetic waves. *Optical and Quantum Electronics*, 56(1), 93. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-05837-y>
- Boord, W. J., & Hoffman, J. B. (2016). *Air and Missile Defense Systems Engineering*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19671>
- BORISOVA, A. R., & NIKOLOV, L. G. (2023). Systems With Artificial Intelligence for Defense and Security. *Scientific Research and Education In The Air Force*, 24, 53–58. <https://doi.org/10.19062/2247-3173.2023.24.7>
- CIEŚLAK, E. (2020). The Development of Poland's Air Defense System: The Operational Context. *Safety & Defense*, 1–10. <https://doi.org/10.37105/sd.44>
- Costa, A. N., Dantas, J. P. A., Scukins, E., Medeiros, F. L. L., & Ögren, P. (2025). Simulation and Machine Learning in Beyond Visual Range Air Combat: A Survey. *IEEE Access*, 13, 76755–76774. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3563811>
- Deng, J. J., Wu, D., & Liu, L. (2015). Research on Modeling in CGF System of Air Defense Missile. *Applied Mechanics and Materials*, 734, 350–353. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.734.350>
- Druzin, S. V., Mayorov, V. V., & Gorevich, B. N. (2019). An advanced new-look tactical air defense armament system. *Journal of «Almaz – Antey» Air and Space Defence Corporation*, 4, 7–18. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2019-4-7-18>
- Duan, L., Du, S., Quan, Y., Lv, Q., Li, S., & Xing, M. (2023). Interference Countermeasure System Based on Time–Frequency Domain Characteristics. *IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems*, 4(1), 76–84. <https://doi.org/10.1109/jmass.2022.3229499>
- Farlik, J. (2015). Conceptual operational architecture of the air force simulator: Simulation of air defense operations. *International Conference on Military Technologies (ICMT) 2015*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/miltechs.2015.7153723>
- Gao, S.-Y., Li, X.-H., & Ma, M.-D. (2019). A Malicious Behavior Awareness and Defense Countermeasure Based on LoRaWAN Protocol. *Sensors*, 19(23), 5122. <https://doi.org/10.3390/s19235122>
- Hao Hu, Jing Liu, Jinglei Tan, & Jiang Liu. (2020). SOCMTD: Selecting Optimal Countermeasure for Moving Target Defense Using Dynamic Game. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 14(10). <https://doi.org/10.3837/tiis.2020.10.013>

- Jiandong, Q., & Xiaofeng, W. (2017). Modeling and simulation on the compatibility of ship-to-air missile and chaff centroid jamming in cooperative air-defense. 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), 679–682. <https://doi.org/10.1109/IAEAC.2017.8054102>
- Jiang, Q. (2015). Introduction to Network Radar Countermeasure Systems. *Network Radar Countermeasure Systems*, 1–66. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48471-5_1
- Jianxing, G., Peiyuan, D., Jiarui, Z., Quan, L., & Yushan, G. (2022). A Network Structure Optimization Method for Key Place Air Defense System. *IFAC-PapersOnLine*, 55(3), 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.05.037>
- Khan, A. (2017). Development and Study of High Energy Igniter/Booster Pyrotechnic Compositions for Impulse Cartridges. *Central European Journal of Energetic Materials*, 14(4), 933–951. <https://doi.org/10.22211/cejem/76881>
- Khanh, H. T. (2021). Research on the weapon target assignment problem in the combined air defense missile system for training simulation. *Journal of Military Science and Technology*, 83–92. <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.csce5.2021.83-92>
- Li, C., Huang, S., Wei, D., Zhong, Y., & Gong, K. Y. (2015). Detection Range of Airborne Magnetometers in Magnetic Anomaly Detection. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 8(4), 105–110. <https://doi.org/10.25103/jestr.084.17>
- Li, J., He, S., Feng, C., & Wang, Y. (2017). Method for compensating translational motion of rotationally symmetric target based on local symmetry cancellation. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 28(1), 36–39. <https://doi.org/10.21629/jsee.2017.01.05>
- LI, L. (2020). Optimal index shooting policy for layered missile defense system. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 118–129. <https://doi.org/10.21629/jsee.2020.01.13>
- Li, N., Su, Z., Ling, H., Karatas, M., & Zheng, Y. (2023). Optimization of Air Defense System Deployment Against Reconnaissance Drone Swarms. *Complex System Modeling and Simulation*, 3(2), 102–117. <https://doi.org/10.23919/csms.2023.0003>
- Ma, J., Guo, Y., Fang, C., & Zhang, Q. (2024). Digital-Twin-Based CPS Anomaly Diagnosis and Security Defense Countermeasure Recommendation. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(10), 18726–18738. <https://doi.org/10.1109/jiot.2024.3366904>
- Marquiz, K., White, E. D., Lucas, B. M., Fass, R. D., Ritschel, J. D., & Valentine, S. M. (2025). Distribution Comparisons of EAC Cost Growth for Aircraft Work Breakdown Structure Elements. *Defense Acquisition Research Journal*, 32(108), 30–53. <https://doi.org/10.22594/dau.24-925.32.01>
- Nantogma, S., Xu, Y., & Ran, W. (2021). A Coordinated Air Defense Learning System Based on Immunized

- Classifier Systems. *Symmetry*, 13(2), 271.
<https://doi.org/10.3390/sym13020271>
- Priyanka, Mrs. T. S., & B.Aashritha J.Rakshana, K. K. K. R. (2025). Air Defense Mechanism Using Radar System. *International Journal of Information Technology and Computer Engineering*, 13(2), 1439–1445.
<https://doi.org/10.62647/ijitce2025v13i2pp1439-1445>
- Pryluk, R., Shima, T., & Golan, O. M. (2016). Shoot–Shoot–Look for an Air Defense System. *IEEE Systems Journal*, 10(1), 151–161.
<https://doi.org/10.1109/jsyst.2014.2344755>
- Ran, J., Li, X., & Shen, Y. (2019). A jamming method against bistatic SAR based on modulation theory. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 30(3), 504–510.
<https://doi.org/10.21629/jsee.2019.03.08>
- Rojdev, K., Hagen, J., Burlone, M., Petri, D., Jackowski, A., Obregon, R., Oelke, L., Wilkins, J., Grace, M., Povolotskaya, P., Vineyard, E., & Moxey, L. (2020). An Ejectable Data Recorder Subsystem for the Ascent Abort-2 Test Flight of the Orion Launch Abort System. 2020 *IEEE Aerospace Conference*, 1–14.
<https://doi.org/10.1109/AERO47225.2020.9172597>
- Shi, J., Hu, G., & Zhou, H. (2017). Entropy-based multipath detection model for MIMO radar. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 28(1), 51–57.
<https://doi.org/10.21629/jsee.2017.01.07>
- Shu, F., Chen, S., Li, F., Zhang, J., & Chen, J. (2020). Research and implementation of network attack and defense countermeasure technology based on artificial intelligence technology. 2020 *IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, 475–478.
<https://doi.org/10.1109/itoec49072.2020.9141751>
- Smirnov, M. A. (2019). Methodology for evaluating effectiveness of air defense missile system (ADMS) information resources when detecting a hypersonic cruise missile, with account for the dynamic target scattering crossover. *Journal of «Almaz – Antey» Air and Space Defence Corporation*, 1, 18–23.
<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2019-1-18-23>
- ZHANG, H., XIE, J., ZHANG, Z., ZONG, B., & SHENG, C. (2018). Pulse interleaving scheduling algorithm for digital array radar. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 29(1), 67–73.
<https://doi.org/10.21629/jsee.2018.01.07>
- Zhang, S., Du, T., Shi, P., Su, X., & Han, Y. (2023). Early Detection and Defense Countermeasure Inference of Ransomware based on API Sequence. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 14(10).
<https://doi.org/10.14569/ijacsa.2023.0141067>
- Zhang, T., Li, J., Li, W., Wang, H., & Lei, H. (2019). Prescribed performance neural control to guarantee tracking quality for near space kinetic kill vehicle. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 30(3), 573–586.
<https://doi.org/10.21629/jsee.2019.03.15>