

Tinjauan Global Konstelasi Satelit Penginderaan Jauh dan Implikasinya bagi Kemandirian Teknologi Indonesia

Agustan^{a*}, Soni Darmawan^b, Oni Bibin Bintoro^a, Rubby Sidik Agustino^a, Ilham Alimuddin^c, Rika Hernawati^b

^aMasyarakat Ahli Penginderaan Jauh Indonesia (MAPIN), Jl. M.H. Thamrin No. 8, Jakarta, 10340, Indonesia

^bJurusan Teknik Geodesi, Institut Teknologi Nasional, Jl. PHH Mustafa, Bandung, Indonesia

^cJurusan Teknik Geologi, Universitas Hasanuddin, Jl. Poros Gowa, Makassar, Indonesia

*Korespondensi Penulis: agustan@ieee.org



Dikirim: 26 Desember 2025;

Diterima: 18 Februari 2026;

Diterbitkan: 18 Februari 2026.

Abstrak. Perkembangan teknologi satelit penginderaan jauh dalam dua dekade terakhir ditandai oleh pergeseran dari satelit tunggal menuju konstelasi satelit dengan frekuensi pengamatan tinggi. Konstelasi berbasis sensor optik dan *Synthetic Aperture Radar* (SAR) kini menjadi komponen penting infrastruktur observasi Bumi global untuk pemantauan lingkungan, ketahanan pangan, mitigasi bencana, dan keamanan maritim. Artikel ini bertujuan meninjau perkembangan teknologi konstelasi satelit, pola pengembangan, serta model aktor utama dalam ekosistem observasi bumi internasional, sekaligus mengkaji implikasinya bagi agenda kemandirian teknologi Indonesia. Metode yang digunakan adalah tinjauan literatur naratif melalui sintesis publikasi ilmiah, laporan institusional, dan dokumen kebijakan terkait penginderaan jauh serta ekonomi antariksa. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa efektivitas sistem penginderaan jauh tidak hanya ditentukan oleh kapabilitas satelit, tetapi juga oleh integrasi riset dan pengembangan, kapasitas industri, penguatan sumber daya manusia, serta tata kelola data. Temuan ini mengindikasikan bahwa strategi kemandirian perlu menekankan penguasaan rantai nilai teknologi dan integrasi optik-SAR guna menjamin kontinuitas observasi di wilayah tropis. Pendekatan adaptif dan kolaboratif direkomendasikan sebagai dasar perumusan strategi nasional yang berkelanjutan.

Kata kunci: Indonesia; Kapabilitas antariksa nasional; Kemandirian teknologi; Konstelasi satelit; Satelit penginderaan jauh; Sensor optik dan SAR.

Abstract. Over the past two decades, Earth Observation Satellite (EOS) technology has shifted from single large platforms toward distributed satellite constellation systems with high revisit frequency. Optical and Synthetic Aperture Radar (SAR) constellations have become critical components of the global Earth Observation infrastructure, supporting applications in environmental monitoring, food security, disaster mitigation, and maritime surveillance. This article aims to review the technological evolution of satellite constellations, development models, and dominant actors within the international Earth Observation ecosystem, while assessing their implications for Indonesia's technological independence agenda. The study adopts a narrative literature review approach through the synthesis of scientific publications, institutional reports, and policy documents related to remote sensing and the space economy. The findings indicate that the effectiveness of modern Earth observation systems depends not only on satellite capability, but also on the integration of research and development, industrial capacity, human resource development, and data governance frameworks. These insights suggest that achieving technological independence requires progressive mastery of the technology value chain and the integration of optical and SAR systems to ensure observation continuity in tropical environments. Adaptive and collaborative strategies are therefore essential for sustainable national development of Earth observation capabilities.

Keywords: Earth Observation Satellites; Indonesia; Optical and SAR sensors; Satellite constellations; Technology sovereignty.

I. PENDAHULUAN

Penginderaan jauh berbasis satelit telah menjadi salah satu infrastruktur data strategis dalam tata kelola pembangunan modern, terutama untuk negara kepulauan dan negara berkembang dengan wilayah yang luas serta keragaman lingkungan yang tinggi. Satelit penginderaan jauh, baik berbasis sensor optik maupun *Synthetic Aperture Radar* (SAR), menyediakan informasi spasial yang krusial untuk pemantauan sumber daya alam, ketahanan pangan, mitigasi bencana, keamanan maritim, perubahan iklim, serta perencanaan wilayah [1, 2]. Dalam dua dekade terakhir, peran satelit penginderaan jauh tidak lagi terbatas pada kepentingan ilmiah, tetapi semakin terintegrasi ke dalam pengambilan keputusan kebijakan publik dan kepentingan strategis nasional [3].

Secara global, lanskap teknologi satelit penginderaan jauh mengalami perubahan signifikan. Dominasi negara-negara maju, khususnya Amerika Serikat dan Eropa, yang sebelumnya bertumpu pada program pemerintah berskala besar seperti Landsat dan Copernicus Sentinel, kini dilengkapi oleh pertumbuhan pesat sektor komersial dan pendekatan NewSpace [4, 5]. Konstelasi satelit berukuran kecil dengan jumlah puluhan hingga ratusan unit memungkinkan frekuensi pengamatan yang tinggi (high revisit time) serta peningkatan aksesibilitas data penginderaan jauh bagi pengguna non-pemerintah [6]. Pada saat yang sama, Tiongkok muncul sebagai aktor utama baru dengan kemampuan manufaktur satelit skala besar dan pengembangan konstelasi optik serta SAR yang semakin kompetitif, baik dari sisi resolusi spasial maupun kapasitas operasional [7].

Perkembangan ini membentuk ekosistem global yang semakin kompleks, di mana penguasaan teknologi satelit penginderaan jauh tidak hanya ditentukan oleh kemampuan desain dan peluncuran satelit, tetapi juga oleh integrasi antara riset dan pengembangan (R&D), kapasitas industri, penguasaan sumber daya manusia, pengelolaan data, model bisnis, kapasitas industri, serta kerangka kebijakan dan tata kelola data yang menopang keberlanjutan sistem [6, 9]. Negara-negara yang berhasil membangun kemandirian teknologi umumnya mengombinasikan investasi jangka panjang dalam riset, kemitraan internasional yang selektif, dan strategi alih teknologi yang terstruktur [9]. Dengan demikian, konstelasi satelit penginderaan jauh global tidak hanya mencerminkan kemajuan teknologi, tetapi juga peta kekuatan geopolitik dan ekonomi berbasis data [10].

Dalam konteks Indonesia, kebutuhan akan satelit penginderaan jauh yang andal dan berkelanjutan bersifat strategis. Sebagai negara kepulauan tropis dengan tingkat tutupan awan yang tinggi, Indonesia membutuhkan kombinasi sensor optik resolusi tinggi dan SAR untuk menjamin kontinuitas pengamatan wilayah darat dan laut [11]. Ketergantungan yang tinggi terhadap data satelit asing, meskipun memberikan manfaat jangka pendek, menimbulkan tantangan jangka panjang terkait kedaulatan data, keamanan informasi, keberlanjutan layanan, serta

penguasaan teknologi inti. Oleh karena itu, agenda kemandirian teknologi satelit penginderaan jauh menjadi bagian penting dari upaya memperkuat ketahanan nasional berbasis sains dan teknologi.

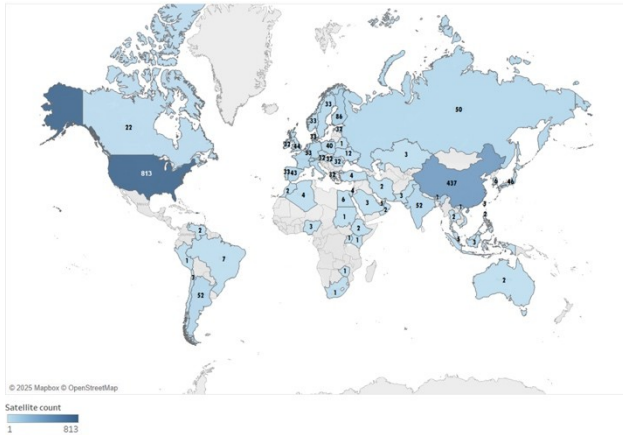
Berbagai inisiatif nasional telah menunjukkan komitmen Indonesia untuk bergerak menuju kemandirian tersebut, termasuk perumusan roadmap pengembangan konstelasi satelit nasional dan penguatan kapasitas sumber daya manusia melalui kerja sama internasional [12]. Namun, dinamika global yang cepat menuntut pemahaman yang lebih komprehensif mengenai posisi Indonesia dalam peta teknologi satelit dunia, termasuk peluang dan tantangan yang muncul dari berbagai model pengembangan yang ditempuh oleh negara lain. Hingga saat ini, kajian yang secara sistematis memetakan konstelasi global satelit penginderaan jauh, baik dari sisi aktor utama, fokus teknologi, kapasitas produksi, maupun implikasinya terhadap strategi kemandirian Indonesia, masih relatif terbatas dalam literatur ilmiah nasional.

Berdasarkan latar belakang tersebut, artikel ini bertujuan untuk menyajikan tinjauan global konstelasi satelit penginderaan jauh, mencakup sensor optik dan SAR, dengan fokus pada perkembangan teknologi, aktor utama, dan model pengembangan yang diterapkan di berbagai negara. Lebih lanjut, artikel ini menganalisis implikasi dari lanskap global tersebut terhadap upaya kemandirian teknologi satelit penginderaan jauh Indonesia, khususnya dalam konteks alih teknologi, penguatan industri nasional, dan perumusan strategi kolaborasi internasional yang berkelanjutan. Dengan pendekatan tinjauan ini, diharapkan artikel dapat menjadi referensi akademik sekaligus bahan pertimbangan strategis bagi pengambil kebijakan, peneliti, dan pemangku kepentingan di bidang penginderaan jauh dan keantariksaan.

II. TINJAUAN LITERATUR

2.1. Evolusi Konstelasi Satelit Penginderaan Jauh Global

Pengembangan satelit penginderaan jauh secara historis diawali oleh program pemerintah berskala besar yang bertujuan mendukung riset ilmiah dan pemantauan lingkungan global. Program Landsat yang dimulai pada tahun 1972 menjadi tonggak penting dalam penyediaan data penginderaan jauh jangka panjang dengan kebijakan data terbuka, yang kemudian menjadi rujukan global dalam studi perubahan tutupan lahan dan lingkungan [1, 4]. Di Eropa, peluncuran program Copernicus Sentinel oleh European Space Agency (ESA) memperkuat paradigma observasi Bumi berbasis layanan publik dengan cakupan global dan kontinuitas jangka panjang [5].



Gambar 1. Ilustrasi Negara-Negara Pemilik Satelit Pemantau Bumi.
(sumber: <https://www.usgs.gov/media/images/countries-earth-observing-satellites>) [4]

Memasuki dekade 2010-an, pendekatan pengembangan satelit penginderaan jauh mengalami pergeseran signifikan dengan munculnya konsep konstelasi satelit. Berbeda dengan paradigma satelit tunggal berukuran besar, konstelasi satelit, khususnya satelit kecil dan mikro, menawarkan frekuensi pengamatan yang tinggi, fleksibilitas operasional, serta efisiensi biaya [6]. Model ini memungkinkan pemantauan dinamis terhadap fenomena yang cepat berubah, seperti bencana alam, aktivitas maritim, dan perubahan tutupan lahan musiman.

Perkembangan ini juga dipercepat oleh kemajuan teknologi manufaktur satelit, miniaturisasi sensor, serta penurunan biaya peluncuran. Akibatnya, jumlah satelit penginderaan jauh di orbit meningkat secara signifikan, tidak hanya didominasi oleh lembaga pemerintah, tetapi juga oleh perusahaan komersial dan konsorsium industri [8]. Literatur menunjukkan bahwa konstelasi satelit kini menjadi pendekatan dominan dalam pengembangan sistem observasi Bumi modern [9].

2.2. Sensor Optik dan SAR: Karakteristik dan Peran Komplementer

Dalam sistem penginderaan jauh satelit, sensor optik dan SAR memiliki karakteristik yang saling melengkapi. Sensor optik bekerja pada spektrum tampak hingga inframerah dan sangat efektif untuk analisis visual, klasifikasi penutup lahan, serta pemantauan vegetasi dan perairan dangkal [1, 2]. Namun, keterbatasan utama sensor optik adalah ketergantungannya terhadap kondisi pencahayaan matahari dan bebas awan, yang menjadi tantangan signifikan di wilayah tropis [11].

Sebaliknya, sensor SAR bersifat aktif dan mampu melakukan pencitraan siang-malam serta menembus awan dan hujan. Hal ini menjadikan SAR sangat penting untuk pemantauan wilayah dengan tutupan awan tinggi, termasuk

kawasan Asia Tenggara dan Indonesia [11, 13]. Berbagai studi menunjukkan keunggulan SAR dalam aplikasi pemantauan deformasi tanah, banjir, hutan, dan dinamika pesisir [13, 14].

Literatur mutakhir menekankan bahwa integrasi sensor optik dan SAR dalam satu ekosistem konstelasi memberikan manfaat optimal melalui kelengkapan informasi dan kontinuitas observasi, khususnya ketika SAR menyediakan cakupan segala cuaca dan optik memperkaya informasi spektral [1, 2, 13, 14]. Oleh karena itu, banyak negara dan perusahaan kini mengembangkan portofolio konstelasi yang mencakup kedua jenis sensor tersebut, baik dalam bentuk satelit terpisah maupun sistem terkoordinasi.

2.3. Model Pengembangan: Negara, Industri, dan NewSpace

Kajian mengenai ekosistem penginderaan jauh global menunjukkan adanya tiga model utama pengembangan teknologi satelit, yaitu: model berbasis negara, model berbasis industri, dan model NewSpace [8, 9].

Model berbasis negara dicirikan oleh dominasi pendanaan dan pengelolaan oleh pemerintah, dengan tujuan utama mendukung kepentingan publik dan strategis nasional. Contoh klasik dari model ini adalah Landsat (AS) dan Sentinel (Uni Eropa), yang menyediakan data terbuka dan menjadi tulang punggung riset penginderaan jauh global [4, 5].

Model berbasis industri menekankan peran perusahaan besar sebagai integrator sistem dan penyedia layanan data, sering kali bekerja sama dengan pemerintah sebagai pengguna utama. Airbus Defence and Space dan Thales Alenia Space di Eropa merupakan contoh perusahaan yang mengombinasikan kontrak pemerintah dan pasar komersial untuk mengembangkan satelit penginderaan jauh beresolusi tinggi [9].

Sementara itu, pendekatan NewSpace ditandai oleh keterlibatan startup dan perusahaan rintisan yang mengadopsi prinsip produksi massal, iterasi cepat, dan orientasi pasar. Perusahaan seperti Planet Labs dan ICEYE menunjukkan bahwa konstelasi satelit kecil dapat bersaing secara fungsional dengan sistem tradisional, terutama dalam hal frekuensi pengamatan dan kecepatan layanan [6, 8]. Literatur menyoroti bahwa pendekatan NewSpace secara signifikan menurunkan hambatan masuk bagi negara dan aktor baru dalam ekosistem penginderaan jauh [10].

2.4 Peran Negara Berkembang dan Pergeseran Keseimbangan Global

Dalam dua dekade terakhir, negara berkembang mulai memainkan peran yang lebih aktif dalam pengembangan satelit penginderaan jauh. Tiongkok menjadi contoh paling menonjol dengan investasi besar dalam sistem observasi Bumi resolusi tinggi, baik untuk kepentingan nasional maupun pasar internasional [7]. Program satelit beresolusi tinggi Tiongkok menunjukkan pendekatan terintegrasi

antara kebijakan negara, kapasitas industri, dan pengembangan sumber daya manusia [7, 10].

India juga mengadopsi strategi bertahap dengan memulai dari pengembangan satelit nasional melalui ISRO, kemudian membuka ruang bagi sektor swasta dan startup untuk memperluas ekosistem penginderaan jauh domestik [9]. Pendekatan ini menunjukkan bahwa kemandirian teknologi tidak selalu dicapai melalui isolasi, melainkan melalui kombinasi kemitraan internasional, pembelajaran teknologi, dan penguatan industri dalam negeri.

Literatur menekankan bahwa negara berkembang yang berhasil membangun kapasitas penginderaan jauh umumnya memiliki visi jangka panjang, kerangka kebijakan yang konsisten, serta mekanisme alih teknologi yang jelas. Tanpa ketiga elemen tersebut, ketergantungan pada data dan sistem asing cenderung berlanjut meskipun investasi dalam satelit dilakukan.

III. PEMBAHASAN

3.1 Pemetaan Aktor Utama dan Pola Penguasaan Teknologi Global

Literatur menunjukkan bahwa penguasaan teknologi satelit penginderaan jauh global terkonsentrasi pada sejumlah kluster aktor utama dengan pola pengembangan yang relatif konsisten, yaitu: (i) negara dengan program observasi Bumi publik yang mapan, (ii) negara dengan integrasi kuat antara kebijakan negara dan kapasitas industri, serta (iii) aktor komersial berbasis pasar dengan pendekatan NewSpace [4-6, 8, 9]. Ketiga kluster ini membentuk ekosistem global yang saling berinteraksi melalui mekanisme kolaborasi, kompetisi, dan segmentasi pasar data.

Negara-negara dengan program publik mapan, seperti Amerika Serikat dan Uni Eropa, mempertahankan keunggulan melalui kebijakan data terbuka dan kesinambungan misi jangka panjang (misalnya Landsat dan Sentinel), yang menghasilkan standar teknis dan metodologis yang diadopsi secara luas dalam riset dan aplikasi operasional [4, 5]. Model ini menciptakan network effects yang kuat, di mana interoperabilitas data dan ekosistem pengguna berkembang secara organik [9].

Di sisi lain, sejumlah negara mengadopsi pendekatan yang lebih terintegrasi antara kebijakan negara, pengembangan industri, dan penguatan sumber daya manusia. Pendekatan ini memungkinkan percepatan siklus desain–produksi–peluncuran satelit serta pembentukan konstelasi berskala besar dalam waktu yang relatif singkat [7, 10]. Literatur mencatat bahwa model ini semakin berpengaruh dalam menggeser keseimbangan penguasaan teknologi penginderaan jauh global.

Berdasarkan sintesis literatur ilmiah, laporan institusional, serta dokumen kebijakan yang telah dibahas sebelumnya [4-10], Tabel 1 disusun sebagai ringkasan komparatif aktor utama dan proyek konstelasi satelit

penginderaan jauh global. Tabel ini tidak merepresentasikan satu sumber tunggal, melainkan merupakan hasil kompilasi dan kategorisasi penulis terhadap berbagai referensi yang relevan guna memetakan pola penguasaan teknologi dan model pengembangan di berbagai wilayah.

TABEL 1. RINGKASAN PENYEDIA TEKNOLOGI SATELIT INDERAJA

Wilayah/ Negara	Aktor Utama (Negara/ Perusahaan)	Proyek/ Konstelasi Aktif
Amerika Serikat	– Pemerintah: NASA/USGS (Landsat – optik), NOAA (cuaca), NRO (militer rahasia) – Swasta: Maxar (optik VHR), Planet Labs (optik medium-res), BlackSky (optik VHR), Capella Space (SAR), Umbra (SAR)	– Landsat series (30m optik, data terbuka) – Maxar WorldView /Legion (≤ 30cm optik) – PlanetScope & SkySat (± 3–5m optik, citra harian) – Capella (X-band SAR ~ 0.5m) – Umbra (X-band SAR ~ 16cm)
Uni Eropa	– Organisasi: ESA/UE – program Copernicus (Sentinel-1 SAR, Sentinel-2 optik, dll) – Nasional: CNES Prancis & DLR Jerman (misal: Pleiades optik, TerraSAR-X), ASI Italia (COSMO-SkyMed SAR) – Swasta: Airbus Defence & Space (optik & SAR), Thales Alenia Space (optik & SAR), ICEYE (Finlandia, SAR), e-GEOS (Italia, SAR), Surrey Satellite Tech Ltd/SSTL (Inggris)	– Copernicus Sentinel (C-band SAR & multispektral optik, resolusi menengah, data terbuka) – Pleiades & Pleiades Neo (optik sub-0,5m dan 0,3m oleh Airbus) – TerraSAR-X & TanDEM-X (X-band SAR Jerman ~ 1m) dan PAZ (Spanyol, SAR) – COSMO-SkyMed (4 satelit X-band SAR Italia ~ 1m) – ICEYE constellation (≥ 20 satelit SAR X-band $\sim 0,5$m, revisit tinggi)

Inggris (UK)	– Pemerintah: UK Space Agency (tidak memiliki satelit EO nasional besar; kontribusi ke ESA) – Swasta: Airbus/SSTL di Inggris (produsen satelit kecil, eks: Carbonite video-sat), Satellite Vu (rintisan satelit citra termal), Earth-i (pernah operasikan demonstrasi optik video), dst.	– Carbonite-2 (oleh SSTL, demonstrasi video Bumi 1m), NovaSAR-1 (S-band SAR eksperimen, kerjasama SSTL-India) – Rencana Satellite Vu: 8 satelit termal resolusi tinggi (peluncuran mulai 2023–2024)
India	– Pemerintah: ISRO (Indian Space Research Org) – satelit seri IRS (optik), Cartosat (optik resolusi tinggi), RISAT (SAR), Oceansat, dll. – Swasta: Pixxel (startup konstelasi hiperspektral), Delhi Satellite Systems/TASL (Tata – manufaktur satelit kecil optik), GalaxEye (startup kombinasi optik+SAR), Dhruva (platform satelit)	– Cartosat-3 (optik ~0,25m, militer/pertahanan) & rencana Cartosat-4 – RISAT-2B (X-band SAR, resolusi ~1m) dan RISAT-1A (C-band SAR) – Pixxel “Firefly” constellation (hiperspektral 5m, target global agriculture/forestry) – Skyroot & Bellatrix (rencana konstelasi optik swasta)
Tiongkok	– Badan: CASC/CAST (akademi teknologi ruang – bangun satelit Gaofen, Yaogan untuk pemerintah) – BUMN: China Spacesat Co., Ltd. (CASC unit – satelit	– Gaofen series (optik sub-meter hingga radar L/C/S-band untuk program China High-Resolution Earth Observation) – pemerintah, resolusi hingga 0,3m.

	- kecil), CASTCOMM (platform satelit komersial) – Swasta: Chang Guang Satellite Technology (CGST) – operator konstelasi Jilin-1 (optik; mulai ekspansi SAR); Spacety (Changsha Tianyi) – pionir SAR komersial C-band; Galaxy Space (SAR Ku-band); MinoSpace (optik kecil); PIESAT (software & konstelasi SAR ‘Nüwa’).	– Jilin-1 (±144 satelit optik komersial diluncurkan s.d. 2025, resolusi ≤0,5 m; multi-spektrum, video, inframerah; arah pengembangan menuju ultra-high resolution termasuk klaim 15-cm class imaging). – Hongtu-1 SAR (konstelasi 4 satelit X-band SAR, resolusi 0,5m); Haisi-1 (C-band SAR komersial pertama China); Jilin-1 SAR (Chang Guang mulai SAR 2024). – Banyak satelit komersial baru (misal optic <500 kg oleh MinoSpace, Jinan Sat.)
Lainnya (Jepang, Kanada, dll.)	– Jepang: JAXA (ALOS-2 L-band SAR, satelit optik IGS untuk pertahanan), NEC/Mitsubishi (manufaktur satelit, ekspor ke Asia) – contohnya LOTUSat-1 Vietnam hasil desain NEC ASNARO (X-band SAR); – Kanada: MDA (RadarSat Constellation Mission – 3 satelit C-band SAR); – Amerika Latin: Satellogic (Argentina, operator 30+ satelit optik ~1 m), Brazil (INPE kerjasama	– ALOS-2 (Daichi-2) JAXA – SAR L-band (1 m) untuk pemetaan & mitigasi bencana; ALOS-3 (optik 0,8 m) diluncurkan 2023. – RadarSat Constellation (RCM) – 3 satelit SAR C-band pemerintah Kanada. – Satellogic Aleph-1 – ~34 satelit optik ~1 m (citra komersial berbiaya rendah). – CBERS (China-Brazil) – 6 satelit optik medium-res bersama sejak 1999 (contoh kolaborasi transfer teknologi).

China – satelit CBERS),	
– Korea Selatan: Satrec Initiative (ekspor satelit optik <1 m ke UAE, Malaysia, dsb), Komsat (optik & SAR nasional);	
– Rusia: Roscosmos (satelit Resurs-P optik ~1 m, Kondor SAR), namun keterbatasan akses pasar global pasca sanksi.	

3.2 Konstelasi Satelit dan Dinamika Skala Produksi

Perkembangan konstelasi satelit penginderaan jauh modern ditandai oleh peningkatan skala produksi dan jumlah satelit di orbit. Konsep produksi massal (mass production) dan iterasi cepat memungkinkan peningkatan frekuensi pengamatan tanpa harus meningkatkan ukuran atau kompleksitas setiap unit satelit secara signifikan [6, 8]. Literatur menunjukkan bahwa pendekatan ini mengubah paradigma tradisional dari satelit tunggal berbiaya tinggi menjadi sistem terdistribusi dengan redundansi operasional yang lebih baik [9].

Dari perspektif teknologi, peningkatan skala konstelasi juga diikuti oleh diversifikasi sensor, termasuk multispektral, hiperspektral, video, dan radar. Arah pengembangan menuju resolusi spasial yang semakin tinggi mencerminkan persaingan global untuk memenuhi kebutuhan aplikasi yang lebih presisi, seperti pemantauan infrastruktur, keamanan maritim, dan analisis perubahan cepat di permukaan Bumi [10, 16]. Namun, literatur juga mengingatkan bahwa peningkatan resolusi harus diimbangi dengan kemampuan pengelolaan data, kapasitas komputasi, dan sistem distribusi informasi yang memadai [8].

3.3 Implikasi bagi Strategi Kemandirian Teknologi Indonesia

Bagi Indonesia, pembelajaran utama dari lanskap global adalah bahwa kemandirian teknologi satelit penginderaan jauh tidak semata-mata diukur dari kepemilikan satelit, tetapi dari penguasaan bertahap atas rantai nilai teknologi, mulai dari desain payload, integrasi sistem, operasi satelit, hingga pengolahan dan pemanfaatan data [12]. Ketergantungan jangka panjang pada data asing, meskipun efisien dalam jangka pendek, berpotensi membatasi kedaulatan data dan fleksibilitas kebijakan di masa depan.

Literatur internasional menunjukkan bahwa negara berkembang yang berhasil meningkatkan kapasitas penginderaan jauh umumnya menerapkan strategi kolaborasi selektif dan bertahap, dengan mengombinasikan pengadaan teknologi dari luar negeri dan program alih teknologi yang terencana [9]. Pendekatan bertahap, mulai dari pemanfaatan data, peningkatan kapasitas sumber daya manusia, hingga ko-pengembangan sistem, dipandang lebih realistis dibandingkan upaya lompatan langsung menuju kemandirian penuh.

Dalam konteks ini, kemitraan internasional perlu ditempatkan sebagai sarana pembelajaran dan akselerasi kapasitas nasional, bukan sebagai substitusi permanen terhadap pengembangan domestik. Literatur juga menekankan pentingnya kerangka regulasi yang jelas terkait kedaulatan data, keamanan sistem, dan kontrol operasional, khususnya untuk aplikasi strategis dan *dual-use* (yang memiliki aplikasi sipil sekaligus potensi penggunaan militer) [10].

3.4 Integrasi Sensor Optik dan SAR sebagai Kebutuhan Sistemik

Kajian literatur secara konsisten menempatkan integrasi sensor optik dan SAR sebagai elemen kunci dalam sistem penginderaan jauh yang andal, terutama bagi wilayah dengan karakteristik iklim tropis dan tutupan awan tinggi [11, 13]. Sensor optik menyediakan informasi spektral yang kaya dan intuitif untuk analisis visual dan tematik, sementara SAR menjamin kontinuitas pengamatan dalam segala kondisi cuaca dan waktu [13, 14].

Pengalaman berbagai negara menunjukkan bahwa sistem penginderaan jauh yang hanya mengandalkan satu jenis sensor cenderung memiliki keterbatasan operasional. Sebaliknya, portofolio konstelasi yang mengombinasikan sensor optik dan SAR memberikan ketahanan sistem (*system resilience*) yang lebih tinggi serta fleksibilitas aplikasi yang lebih luas [15]. Oleh karena itu, literatur menyarankan agar strategi nasional tidak memposisikan kedua jenis sensor tersebut secara dikotomis, melainkan sebagai komponen komplementer dalam satu ekosistem penginderaan jauh terpadu.

3.5 Dimensi Ekonomi dan Tata Kelola dalam Konstelasi Global

Keberlanjutan konstelasi satelit penginderaan jauh tidak ditentukan semata oleh kemajuan teknologi, melainkan oleh arsitektur ekonomi dan tata kelola yang menopangnya. Literatur menunjukkan bahwa struktur pembiayaan, model bisnis, serta pengaturan distribusi data strategis merupakan faktor penentu dalam mempertahankan daya saing dan keberlanjutan sistem observasi Bumi [9, 10]. Secara global, tiga model dominan dapat diidentifikasi.

Pertama, model publik berbasis pendanaan negara, sebagaimana ditunjukkan oleh Landsat dan Copernicus [4] 5], menempatkan negara sebagai aktor utama yang menjamin kontinuitas misi dan stabilitas data jangka

panjang. Model ini menghasilkan standar global dan efek jaringan (*network effects*) yang memperkuat posisi geopolitik dan ekonomi negara penyedia. Namun, model ini hanya dapat dijalankan oleh negara dengan kapasitas fiskal dan konsistensi kebijakan yang tinggi.

Kedua, model komersial berbasis pasar memindahkan risiko ke sektor swasta dan mendorong inovasi cepat melalui mekanisme kompetisi. Keunggulannya terletak pada fleksibilitas dan responsivitas terhadap kebutuhan pengguna. Akan tetapi, keberlanjutannya sangat bergantung pada dinamika investasi dan regulasi keamanan nasional.

Ketiga, model hibrida negara-industri menunjukkan bahwa sinergi kebijakan negara dan kapasitas manufaktur domestik mampu mempercepat skala produksi sekaligus mempertahankan orientasi strategis nasional [7, 10]. Model ini secara empiris terbukti lebih adaptif dalam membangun ekosistem industri antariksa yang terintegrasi.

Temuan ini mengindikasikan bahwa konstelasi satelit merupakan bagian dari sistem ekonomi-politik yang lebih luas, sehingga strategi teknologi tidak dapat dipisahkan dari desain kebijakan industri dan tata kelola data.

3.6 Dari Pemetaan Global ke Arah Kebijakan Nasional

Pemetaan global menunjukkan bahwa keberhasilan penguasaan teknologi satelit tidak pernah terjadi secara kebetulan, melainkan merupakan hasil konsistensi kebijakan jangka panjang, integrasi industri, dan investasi sumber daya manusia [9]. Tidak terdapat model universal yang dapat diadopsi secara langsung; setiap negara harus mengadaptasi praktik global sesuai konteks institusionalnya.

Implikasinya, kebijakan penginderaan jauh nasional tidak cukup berfokus pada pengadaan satelit, tetapi harus dirancang sebagai strategi industrial dan sistemik yang mencakup rantai nilai secara menyeluruh.

3.7 Konteks Indonesia: Tantangan Struktural dan Arah Penguatan Kapasitas

Indonesia berada pada tahap transisional dalam membangun kemandirian teknologi satelit penginderaan jauh. Kapasitas manufaktur dan integrasi sistem masih berkembang, sementara keterhubungan antara pengembangan satelit dan industri hilir berbasis data belum sepenuhnya terintegrasi.

Literatur ekonomi antariksa secara konsisten menegaskan bahwa kemandirian teknologi hanya tercapai apabila negara menguasai rantai nilai secara progresif—dari desain sensor, integrasi sistem, operasi misi, hingga pemanfaatan dan komersialisasi data [6, 9]. Dengan demikian, kepemilikan satelit tanpa penguatan industri dan tata kelola data berisiko menciptakan ketergantungan struktural baru [12].

Lebih lanjut, karakter *dual-use* teknologi penginderaan jauh memperkuat urgensi penguatan kedaulatan data dan

kontrol operasional [10]. Bagi Indonesia sebagai negara kepulauan tropis dengan kerentanan bencana tinggi, integrasi sensor optik dan SAR bukan sekadar pilihan teknis, melainkan kebutuhan sistemik untuk menjamin kontinuitas observasi nasional [13].

Oleh karena itu, strategi nasional tidak dapat berhenti pada tahap pengadaan, tetapi harus diarahkan pada transformasi kapasitas domestik melalui kolaborasi internasional selektif, alih teknologi terstruktur, dan pembangunan ekosistem industri berbasis data. Kemandirian teknologi dalam konteks ini merupakan agenda jangka panjang yang memerlukan kepemimpinan kebijakan, konsistensi institusional, dan investasi berkelanjutan dalam sumber daya manusia.

IV. KESIMPULAN

Artikel tinjauan ini menelaah perkembangan global konstelasi satelit penginderaan jauh, baik berbasis sensor optik maupun SAR, serta implikasinya bagi upaya kemandirian teknologi Indonesia. Literatur menunjukkan bahwa lanskap penginderaan jauh global telah bergeser dari paradigma satelit tunggal berukuran besar menuju sistem konstelasi satelit yang terdistribusi, dengan jumlah satelit yang semakin banyak dan frekuensi pengamatan yang tinggi. Pergeseran ini didorong oleh kemajuan teknologi manufaktur, miniaturisasi sensor, penurunan biaya peluncuran, serta perubahan model bisnis dalam ekosistem observasi Bumi.

Tinjauan ini mengidentifikasi bahwa penguasaan teknologi satelit penginderaan jauh secara global terkonsentrasi pada beberapa pola utama, yakni model berbasis program publik, model integrasi negara-industri, dan model komersial NewSpace. Ketiga pola tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan sistem penginderaan jauh tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan teknologi satelit, tetapi juga oleh kesinambungan kebijakan, kapasitas industri, pengelolaan sumber daya manusia, serta kemampuan mengelola dan memanfaatkan data secara efektif. Dengan demikian, konstelasi satelit penginderaan jauh merupakan bagian dari sistem sosio-teknis yang lebih luas, bukan sekadar artefak teknologi.

Dalam konteks Indonesia, temuan utama dari tinjauan ini adalah bahwa kemandirian teknologi satelit penginderaan jauh perlu dipahami sebagai proses bertahap dan evolutif. Kepemilikan satelit merupakan langkah penting, namun belum cukup tanpa penguasaan rantai nilai teknologi, mulai dari desain payload, integrasi sistem, operasi satelit, hingga pengolahan dan pemanfaatan data. Ketergantungan jangka panjang terhadap data dan sistem asing berpotensi menimbulkan risiko terkait kedaulatan data, keamanan informasi, dan keberlanjutan layanan penginderaan jauh nasional.

Literatur juga menegaskan pentingnya integrasi sensor optik dan SAR sebagai kebutuhan sistemik, khususnya bagi negara dengan karakteristik geografis dan klimatologis

seperti Indonesia. Kombinasi kedua jenis sensor tersebut memberikan ketahanan pengamatan yang lebih tinggi dan memperluas spektrum aplikasi, mulai dari pemantauan lingkungan dan sumber daya alam hingga mitigasi bencana dan keamanan maritim. Oleh karena itu, strategi pengembangan penginderaan jauh nasional sebaiknya tidak memposisikan sensor optik dan SAR secara terpisah, melainkan sebagai komponen komplementer dalam satu ekosistem terpadu.

Secara keseluruhan, artikel ini menegaskan bahwa pembelajaran dari lanskap global konstelasi satelit penginderaan jauh dapat menjadi dasar penting bagi perumusan strategi nasional Indonesia. Pendekatan yang adaptif, berbasis kolaborasi selektif, dan berorientasi pada penguatan kapasitas domestik menjadi kunci untuk mencapai kemandirian teknologi yang berkelanjutan. Ke depan, penelitian lanjutan dapat diarahkan pada kajian yang lebih spesifik mengenai model implementasi, evaluasi kebijakan, serta integrasi penginderaan jauh dengan sistem pengambilan keputusan nasional berbasis data.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada USGS serta NASA, ESA/Copernicus atas ketersediaan informasi dan materi publik yang mendukung penyusunan tinjauan ini. Juga kepada ECURS atas bahan-bahan yang disediakan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jensen, J. R. (2015). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective* (4th ed.). Pearson Education.
- [2] Schowengerdt, R. A. (2007). *Remote sensing: Models and methods for image processing* (3rd ed.). Academic Press.
- [3] Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>
- [4] U.S. Geological Survey (USGS). (2023). *Landsat missions overview*. <https://www.usgs.gov/landsat-missions>
- [5] European Space Agency (ESA). (2023). *Copernicus: Europe's Earth observation programme*. <https://www.copernicus.eu>
- [6] Song, Y., Gnyawali, D., & Qian, L. (2024). From early curiosity to space wide web: The emergence of the small satellite innovation ecosystem. *Research Policy*, 53(2), 104932. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2023.104932>
- [7] Li, D. R. (2022). China's high-resolution earth observation system (cheos): Advances and perspectives. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5(3), 583–590. <https://doi.org/10.5194/isprs-Annals-V-3-2022-583-2022>
- [8] Delmaire, C., & Maliswan, S. (2024). The New Space Economy: Innovations, Challenges, and Future Pathways. *Journal of Information Systems Engineering and Management*, 2025(17s), 2468–4376. <https://www.jisem-journal.com/>
- [9] OECD. (2014). *The space economy at a glance 2014*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264217294-en>
- [10] Gómez, P. M., Carrillo, O. J. J., Kuffer, M., Thomson, D. R., Quiroz, J. L. O., García, E. V., Vanhuysse, S., Abascal, Á., Oluoch, I., Nagenborg, M., Persello, C., & Brito, P. L. (2021). Earth observations and statistics: Unlocking sociodemographic knowledge through the power of satellite images. *Sustainability (Switzerland)*, 13(22). <https://doi.org/10.3390/su132212640>
- [11] Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry: Data interpretation and error analysis*. Kluwer Academic Publishers.
- [12] Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). (2023). *Roadmap pengembangan konstelasi satelit nasional untuk pembangunan berkelanjutan*. BRIN.
- [13] Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E., & Goldstein, R. M. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3), 333–382. <https://doi.org/10.1109/5.838084>
- [14] Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- [15] Zhu, Z., Woodcock, C. E., Holden, C., & Yang, Z. (2015). Generating synthetic Landsat images based on all available Landsat data: Predicting Landsat surface reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 157, 152–165. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.019>
- [16] Guo, H., Wang, L., & Liang, D. (2019). Big Earth data from space: A new engine for Earth science. *Science Bulletin*, 64(12), 829–834. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.04.019>