

Review: Nanoteknologi dalam Desain dan Pengembangan Komponen Ringan untuk Pesawat Terbang

Riny Yolandha Parapat ¹, Mario kiyosaki Putra Sumarli ², Riki Rudyanto ², Muhammad Ridwan Ihza Taryana ¹, Putra Fajar Dwi Aprilian ², Muhammad Syahrul Mubarak ²

¹Program Studi Teknik Kimia, Institut Teknologi Nasional Bandung

²Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Bandung

Jl. PHH. Mustopa No. 23, Bandung 40124

Email: rinyyolandha@itenas.ac.id

Abstract

Nanotechnology presents a revolutionary potential in the design and development of lightweight aircraft components, primarily aiming to reduce weight and enhance material strength. This study reviews various nanomaterials, such as carbon nanotubes, graphene, and metal nanoparticles, which contribute to improving the mechanical and thermal properties of aircraft structural components. Manufacturing methods, including nano-compaction and sol-gel techniques, are utilized to ensure uniform particle distribution, thereby enhancing structural integrity. This review highlights the role of nanotechnology in improving aerodynamic efficiency and resistance to extreme conditions. The combination of various nanofillers in nanocomposites such as graphene, silicon oxide, and titanium dioxide enables significant enhancements in mechanical strength and material durability. The findings of this review provide new insights into the use of nanotechnology to enhance fuel efficiency and aircraft performance.

Article History

Submitted: 16 Januari 2025

Accepted: 22 Januari 2025

Published: 23 Januari 2025

Key Words

NanoTechnology, nano material, aerospace

Abstrak

Nanoteknologi menghadirkan potensi revolusioner dalam desain dan pengembangan komponen pesawat ringan, yang utamanya bertujuan untuk mengurangi bobot dan meningkatkan kekuatan material. Penelitian ini mengulas berbagai bahan nano, seperti karbon nanotube, graphene, dan nanopartikel logam, yang berkontribusi dalam meningkatkan sifat mekanik dan termal komponen struktur pesawat. Kajian ini menyoroti peran nanoteknologi dalam meningkatkan efisiensi aerodinamis dan ketahanan terhadap kondisi ekstrim. Kombinasi berbagai nanofiller dalam nanokomposit seperti graphene, silikon oksida, dan titanium dioksida memungkinkan peningkatan signifikan dalam kekuatan mekanik dan daya tahan material. Temuan kajian ini memberikan wawasan baru mengenai penggunaan nanoteknologi untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar dan kinerja pesawat.

Sejarah Artikel

Submitted: 16 Januari 2025

Accepted: 22 Januari 2025

Published: 23 Januari 2025

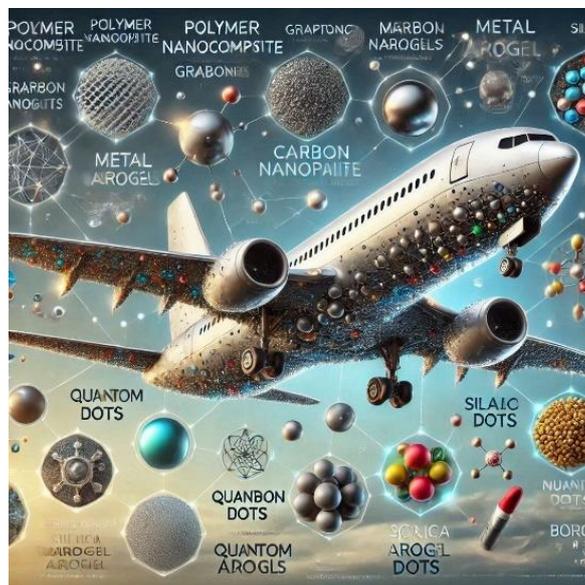
Kata Kunci

Nanoteknologi, Material Nano, Pesawat Terbang, Aerospace, Nano komposit

Pendahuluan

Dalam industri penerbangan, efisiensi dan keamanan adalah dua faktor utama yang selalu menjadi perhatian. Seiring perkembangan teknologi, kebutuhan akan material yang lebih ringan, kuat, dan tahan terhadap kondisi ekstrim terus meningkat. Salah satu inovasi yang menjanjikan untuk memenuhi kebutuhan ini adalah penerapan nanoteknologi. Dengan memanfaatkan sifat unik material pada skala nano, nanoteknologi membuka peluang baru dalam pengembangan material untuk pesawat terbang yang mampu meningkatkan kinerja sekaligus mengurangi biaya operasional. Nanoteknologi memungkinkan penciptaan material dengan sifat mekanis, termal, dan listrik yang lebih baik dibandingkan material konvensional (Surahman et al. 2025; Riny Yolandha Parapat et al. 2023; Setiawan et al. 2025). Contohnya, penggunaan nanokomposit berbasis carbon nanotube (CNT) dan graphene dapat meningkatkan kekuatan, ketahanan aus, dan kemampuan konduktivitas termal material pesawat. Material ini tidak hanya memperkuat struktur pesawat tetapi juga berkontribusi pada pengurangan bobot pesawat, yang berimplikasi langsung pada efisiensi konsumsi bahan bakar. Nanoteknologi

dapat diaplikasikan pada beberapa komponen pesawat dengan menggunakan berbagai nanomaterial sesuai dengan kegunaan dan kebutuhannya masing masing dengan menggunakan berbagai jenis nano material (Gambar 1).



Gambar 1. Nanomaterial dalam industri aerospace

Material berbasis nanoteknologi menawarkan ketahanan terhadap kelelahan dan korosi yang lebih baik, aspek yang sangat penting untuk memastikan umur panjang dan keandalan pesawat terbang. Dalam konteks ini, polimer nanokomposit telah terbukti menjadi kandidat ideal untuk aplikasi pada badan pesawat dan komponen interior. Peningkatan sifat material ini juga memungkinkan desain yang lebih aerodinamis, membuka jalan bagi inovasi desain pesawat masa depan. Namun, penerapan nanoteknologi dalam desain dan pengembangan material pesawat terbang tidak lepas dari tantangan. Biaya produksi yang tinggi, keterbatasan dalam proses manufaktur, serta kurangnya pemahaman tentang dampak lingkungan dari material berbasis nano menjadi beberapa hambatan yang perlu diatasi. Oleh karena itu, penelitian dan pengembangan lebih lanjut sangat diperlukan untuk memastikan bahwa manfaat nanoteknologi dapat diimplementasikan secara optimal dan berkelanjutan (Ferdiansyah et al. 2025; Riny Yolandha Parapat, Zamaludin, et al. 2024).

Dengan potensi yang dimilikinya, nanoteknologi tidak hanya merevolusi industri penerbangan tetapi juga memberikan kontribusi signifikan terhadap pencapaian target keberlanjutan global. Oleh karena itu, studi mengenai penerapan nanoteknologi dalam desain dan pengembangan material pesawat terbang menjadi sangat relevan, tidak hanya untuk memenuhi kebutuhan industri saat ini tetapi juga untuk mendukung inovasi di masa depan. Selain pengaruhnya terhadap performa teknis pesawat, penerapan nanoteknologi juga berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon, sejalan dengan upaya global untuk mencapai keberlanjutan. Material yang lebih ringan memungkinkan pengurangan konsumsi bahan bakar, yang berarti emisi gas rumah kaca dari pesawat dapat ditekan secara signifikan. Hal ini tidak hanya bermanfaat bagi lingkungan, tetapi juga memperkuat posisi industri penerbangan dalam memenuhi regulasi ketat terkait keberlanjutan.

1. Jenis-jenis nanomaterial yang digunakan dalam industri aerospace

Nanomaterial telah menjadi elemen kunci dalam kemajuan teknologi industri dirgantara, menawarkan solusi inovatif untuk meningkatkan kinerja, efisiensi, dan keberlanjutan (Riny

Yolandha Parapat, Maulani, et al. 2024). Berbagai jenis nanomaterial kini digunakan dalam industri ini, dengan masing-masing memiliki karakteristik unik yang mendukung kebutuhan akan material yang lebih ringan, kuat, dan tahan terhadap kondisi ekstrem. Berikut adalah jenis-jenis nanomaterial yang berperan penting dalam sektor aerospace. Jenis-jenis nanomaterial yang digunakan dalam industri aerospace beserta fungsinya:

A. Material berbasis nano karbon

Material berbasis nano karbon merupakan kelas material yang terdiri dari struktur karbon pada skala nanometer, yang memiliki sifat unik dan serbaguna dibandingkan material karbon konvensional. Pada skala nano, atom-atom karbon dapat disusun dalam berbagai konfigurasi, seperti lapisan dua dimensi, tabung berdinding tipis, atau struktur bola yang simetris. Material ini dikenal karena kombinasi sifat mekanis, termal, listrik, dan kimia yang luar biasa, seperti kekuatan tinggi, konduktivitas termal dan listrik yang baik, serta stabilitas kimia yang tinggi. Keberagaman sifat dan struktur ini memungkinkan material nano karbon diaplikasikan dalam berbagai bidang, mulai dari elektronik, energi, hingga aerospace, menjadikannya komponen penting dalam inovasi teknologi modern [7].

- Grafena

Grafena merupakan salah satu nanomaterial paling inovatif yang digunakan dalam industri aerospace karena memiliki sifat mekanik, termal, dan listrik yang unggul. Salah satu fungsi utama grafena adalah meningkatkan konduktivitas termal dan listrik pada material yang digunakan dalam pesawat. Dengan sifat ini, grafena mampu mendistribusikan panas secara efisien, sehingga mencegah terjadinya penumpukan panas yang dapat merusak komponen pesawat [8]. Grafena digunakan pada badan pesawat udara sebagai lapisan pelindung pada permukaan material untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi dan gesekan, terutama pada lingkungan ekstrem yang sering dihadapi oleh pesawat selama penerbangan (Gambar 2).

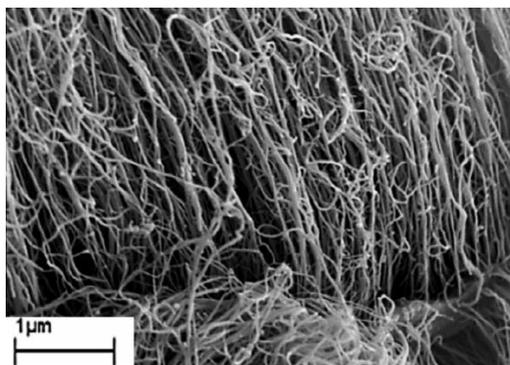


Gambar 2. Komponen grafena dalam badan pesawat [9]

Dalam pesawat udara juga grafena dimanfaatkan untuk sensor suhu yang lebih sensitif dan presisi, lapisan tahan panas yang melindungi struktur pesawat dari suhu tinggi, serta memperkuat komposit struktural sehingga komponen menjadi lebih kuat namun tetap ringan. Kombinasi sifat unggul ini menjadikan grafena material yang sangat menjanjikan dalam meningkatkan efisiensi, daya tahan, dan performa pesawat di masa depan [9].

- Nanotube karbon (CNT - Carbon Nanotube)

Nanokomposit berbasis *carbon nanotubes* (CNTs) telah menjadi salah satu pilihan utama dalam industri *aerospace* karena sifat mekanik dan fungsionalnya yang cukup memadai. Dapat dilihat pada **Gambar 3** di bawah contoh produk jadi yang memanfaatkan penggunaan material *carbon nanotube*. Menurut sebuah studi oleh [10], CNTs memberikan peningkatan signifikan pada sifat mekanik komposit polimer, terutama kekuatan tarik dan modulus elastisitasnya. CNTs juga memiliki kemampuan untuk memperbaiki sifat termal dan elektrik dalam penerapan *aerospace* [10].



Gambar 3. SEM *Carbon nanotube* [11]

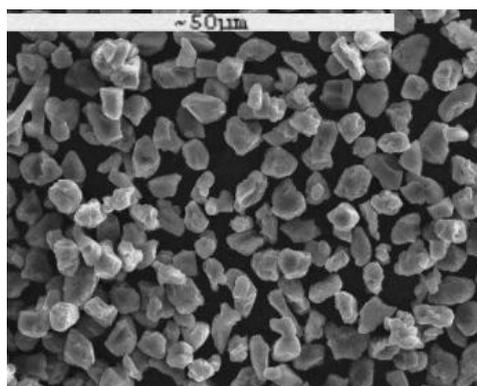
CNT-Nanokomposit digunakan untuk memperkuat struktur badan pesawat, yang membutuhkan kekuatan tinggi namun tetap ringan. Hal ini membantu mengurangi berat total pesawat tanpa mengurangi ketahanan strukturalnya. Sama halnya dengan sayap pesawat [12]. Nanokomposit berbasis CNT juga diterapkan pada sayap pesawat untuk memberikan kekuatan tambahan sambil menjaga desain yang ringan, memungkinkan peningkatan efisiensi aerodinamis. Dengan konduktivitas listriknya yang tinggi, CNTs juga digunakan dalam pelindung petir untuk melindungi pesawat dari sambaran petir. CNT Nanokomposit dapat menyalurkan arus listrik dari sambaran petir tanpa merusak struktur pesawat [13].

B. Keramik nano (Nano-ceramics)

Keramik nano merupakan salah satu jenis dari nano teknologi yang digunakan di bidang *aerospace* yang memiliki efisiensi yang tinggi untuk pesawat, keramik nano memiliki beberapa jenis yang dapat dijelaskan sebagai berikut :

- Nanopartikel Silicon Carbide (SiC)

Nanopartikel Silicon Carbide (SiC) merupakan material berbasis keramik dengan sifat mekanis dan termal yang unggul, menjadikannya sangat penting dalam aplikasi *aerospace*. Partikel ini memiliki kekerasan yang sangat tinggi, tahan aus, serta mampu bertahan dalam suhu ekstrem hingga lebih dari 2000°C [14]. Nanoceramics memiliki struktur nano seperti butiran butiran yang dapat dilihat pada Gambar 4. Struktur seperti ini sangat bermanfaat bagi kebutuhan pesawat terbang karena sifatnya yang kuat dan tahan panas terutama pada sparepart engine pesawat.

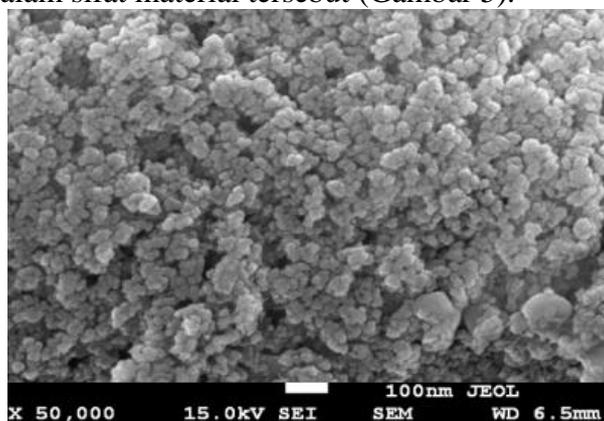


Gambar 4. SEM *nano-ceramics Silicon Carbide* (SiC) [15]

Dalam bidang aerospace, nanopartikel SiC digunakan sebagai penguat dalam komposit matriks logam atau keramik untuk meningkatkan kekuatan mekanis, ketahanan panas, dan stabilitas termal. Komposit ini digunakan dalam pembuatan bagian mesin jet, seperti bilah turbin dan nosel pembuangan, yang harus mampu bertahan dalam kondisi kerja yang ekstrem dengan efisiensi tinggi [16]. Selain itu, nanopartikel SiC memiliki sifat konduktivitas termal yang baik, sehingga dapat digunakan untuk sistem pembuangan panas dalam pesawat dan satelit. Material ini juga menunjukkan ketahanan tinggi terhadap oksidasi dan korosi, yang penting dalam lingkungan operasional pesawat, termasuk ruang angkasa dengan tekanan rendah dan atmosfer korosif. SiC juga digunakan dalam pelindung termal untuk kendaraan ruang angkasa dan pelapisan pelindung pada komponen pesawat hipersonik, yang membutuhkan material ringan namun sangat tahan terhadap tegangan termal [16].

- Nanomaterial Aluminium Oxide (Al_2O_3)

Nanomaterial Aluminium Oxide (Al_2O_3) telah menjadi salah satu material unggulan di bidang aerospace berkat sifat mekanik, termal, dan kimia yang luar biasa pada skala nano. Dalam bentuk nanopartikel, Al_2O_3 menawarkan kekuatan mekanik tinggi, tahan terhadap suhu ekstrem, serta kemampuan insulasi listrik yang sangat baik, yang menjadikannya ideal untuk komponen pesawat terbang dan roket yang harus bekerja dalam kondisi ekstrem [17]. Selain itu, sifatnya yang ringan dan kuat memberikan kontribusi signifikan pada pengurangan bobot pesawat tanpa mengorbankan kinerja struktural, bentuk struktur dari nanomaterial Al_2O_3 menjadi peran penting dalam sifat material tersebut (Gambar 5).



Gambar 5. SEM [18,19]

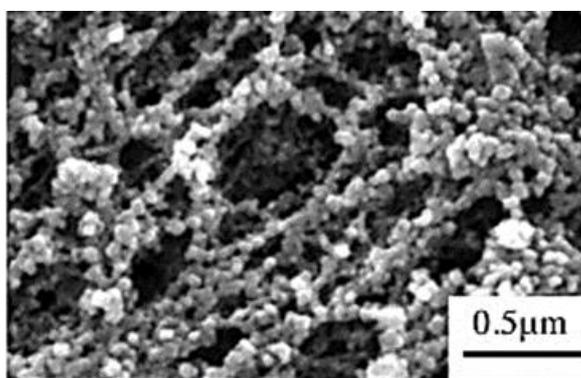
Salah satu aplikasi utama nanomaterial Al_2O_3 di bidang aerospace adalah sebagai pelapis pelindung pada komponen mesin dan permukaan pesawat. Lapisan berbasis

- Al₂O₃ nano mampu melindungi material dasar dari korosi, oksidasi, dan abrasi, sehingga memperpanjang masa pakai komponen dalam lingkungan operasional yang keras (Riny Y. Parapat et al. 2014). Selain itu, Al₂O₃ juga digunakan dalam pembuatan komposit keramik yang diterapkan pada nozzle roket atau sistem pelindung panas untuk wahana ruang angkasa, berkat ketahanannya terhadap suhu tinggi dan stabilitas termal [14]

Di bidang sensor dan elektronik penerbangan, Al₂O₃ berbasis nano sering digunakan sebagai bahan substrat insulator atau lapisan pelindung karena kemampuannya dalam menahan tegangan tinggi dan isolasi listrik yang baik. Selain itu, dalam teknologi baterai dan superkapasitor untuk aplikasi penerbangan, nanopartikel Al₂O₃ dapat meningkatkan efisiensi dan umur pakai perangkat penyimpanan energi. Dengan kemajuan teknologi manufaktur dan penelitian lanjutan, nanomaterial Al₂O₃ terus membuka peluang baru untuk meningkatkan efisiensi, keamanan, dan keberlanjutan dalam bidang aerospace. [20]

C. Nanomaterial aerogel silica

Aerogel silica dikenal sebagai material dengan densitas sangat rendah dan kekuatan mekanik yang tinggi, menjadikannya sangat cocok untuk berbagai aplikasi di industri penerbangan. Struktur pori-pori yang unik pada aerogel silica memberikan rasio luas permukaan yang sangat besar dan kemampuan isolasi termal yang sangat baik, sehingga dapat mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan efisiensi termal pada komponen pesawat terbang [21]. Salah satu keunggulan utama aerogel silica adalah kemampuannya untuk mengurangi bobot tanpa mengorbankan kinerja struktural, aspek yang sangat krusial dalam desain pesawat terbang modern. Gambar 6 memperlihatkan bahwa densitas dari nano partikel sangat rendah. Dengan densitas yang sangat rendah, aerogel silica dapat digunakan sebagai material insulasi di berbagai bagian pesawat, termasuk pada struktur internal, komponen mesin, dan sistem pelindung termal.



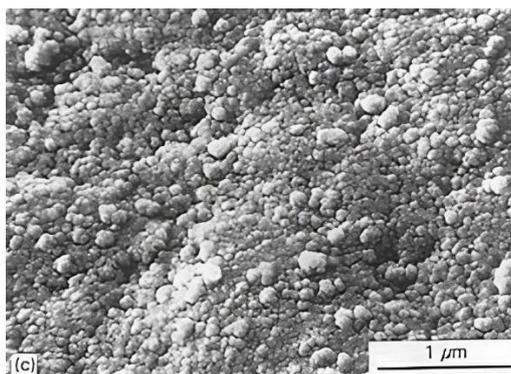
Gambar 6. SEM nanomaterial *aerogel silica* [22]

Struktur berpori-pori aerogel silica memungkinkan material ini digunakan sebagai substrat untuk sensor canggih yang memerlukan kestabilan termal dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem. Sifat transparansi aerogel silica juga memberikan manfaat untuk aplikasi optik, seperti lensa dan panel surya fleksibel pada pesawat terbang [22]. Aerogel Silica dapat dijelaskan dalam beberapa jenis, yaitu:

- Aerogel silika murni

Aerogel silika murni merupakan material canggih yang memiliki kepadatan sangat rendah dengan sifat isolasi termal unggul. Material ini terdiri dari matriks silika (SiO₂) yang memiliki struktur berpori ultra-tinggi, memungkinkan udara terperangkap di dalamnya sehingga memberikan konduktivitas termal yang sangat rendah. Karakteristik ini menjadikan aerogel silika murni sebagai kandidat utama untuk aplikasi dirgantara

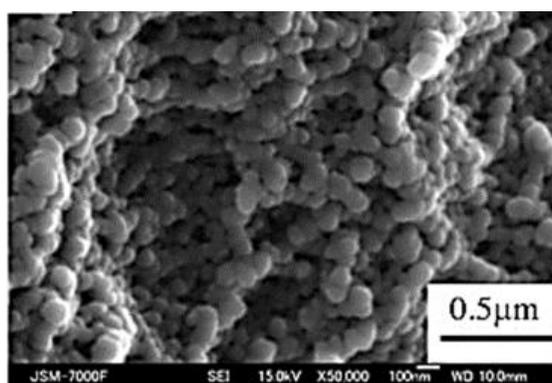
- yang memerlukan material ringan dan hemat energi. Namun demikian, sifat rapuh dari aerogel silika murni membatasi penggunaannya dalam aplikasi struktural. Untuk mengatasi keterbatasan ini, pendekatan inovatif seperti penguatan dengan bahan komposit sering digunakan dalam pengembangan material pesawat terbang guna meningkatkan ketahanan terhadap tekanan mekanis. Aerogel silika murni, sering disebut "asap beku", adalah material teringan di dunia. Dengan struktur berpori (Gambar 7) nanonya, material ini memiliki sifat isolasi panas dan suara yang luar biasa. Translusen dan lembut seperti busa, aerogel ini memiliki potensi besar dalam berbagai aplikasi, mulai dari isolasi bangunan hingga eksplorasi luar angkasa.



Gambar 7. SEM aerogel silika murni [23]

- Aerogel silika nano komposit

Aerogel silika nanokomposit adalah material yang diperoleh melalui integrasi partikel nano ke dalam matriks aerogel silika. Kombinasi ini dirancang untuk meningkatkan stabilitas mekanis, ketahanan termal, dan fleksibilitas material. Penambahan bahan penguat seperti nanopartikel logam atau serat karbon memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan performa material. Dalam industri penerbangan, aerogel ini digunakan pada pelindung termal, isolasi akustik, dan elemen struktural pesawat. Teknologi ini memungkinkan pengurangan bobot pesawat secara substansial, yang berkontribusi pada efisiensi bahan bakar dan pengurangan emisi gas rumah kaca. Gambar 8 menggambarkan struktur nano pada aerogel silika komposit.



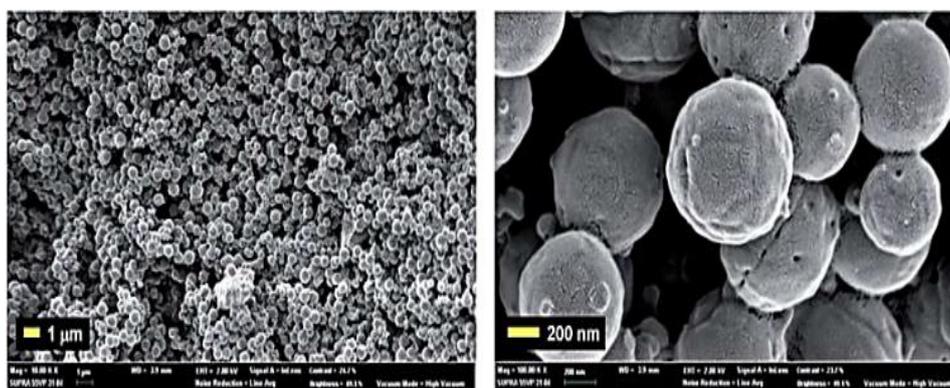
Gambar 8. SEM aerogel silika nano komposit [22]

D. Quantum dots

Nanomaterial quantum dots (QDs) merupakan material berbasis nanopartikel semikonduktor yang menunjukkan sifat optik dan elektronik unik berkat efek kuantum yang terjadi pada skala nanometer. Partikel ini memiliki dimensi yang cukup kecil, biasanya antara 2-10 nm, sehingga dapat menunjukkan perilaku seperti atom individual dengan energi bandgap yang dapat disesuaikan berdasarkan ukuran dan komposisinya. Di bidang

kedirgantaraan, sifat ini menjadikan quantum dots ideal untuk aplikasi yang memerlukan sensor canggih, sistem pencitraan, dan teknologi pemantauan di lingkungan ekstrem, seperti di ruang angkasa (*Alivisatos, A. P., 1996*), n.d.)

◆ Keunggulan utama quantum dots adalah kemampuannya untuk memancarkan cahaya dengan panjang gelombang tertentu yang dapat dikontrol, yang membuatnya sangat berguna untuk aplikasi optoelektronik dan sensor. Dalam konteks pesawat terbang, QDs dapat digunakan sebagai komponen dalam sistem pencitraan canggih, sensor suhu, dan detektor radiasi, berkat sifatnya yang sensitif terhadap perubahan lingkungan. Quantum dots juga memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi sel surya pada pesawat terbang dengan mengoptimalkan penyerapan cahaya dan konversi energi, yang dapat membantu mengurangi konsumsi bahan bakar dan meningkatkan efisiensi operasional [25]. Titik kuantum memiliki potensi besar dalam berbagai aplikasi, mulai dari layar dengan warna lebih hidup hingga teknologi medis. Gambar 9 dibawah ini menunjukkan berbagai ukuran dan warna titik kuantum yang dapat disesuaikan untuk kebutuhan spesifik.



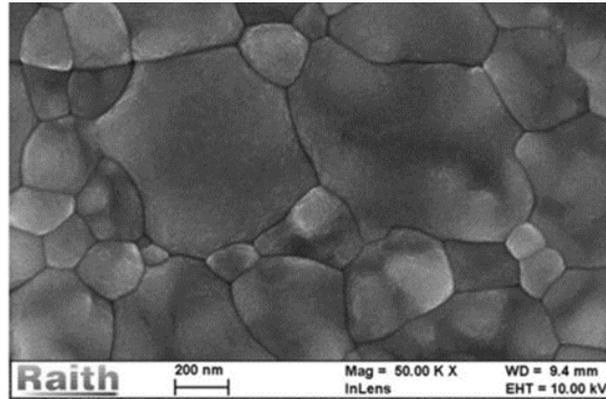
Gambar 9. Quantum dots SEM images [26]

Selain aplikasi optik dan sensor, nanomaterial quantum dots juga dapat digunakan dalam pengembangan teknologi display fleksibel dan layar transparan untuk pesawat terbang. Berkat kemampuan QDs untuk menghasilkan warna cerah dan kontras tinggi, material ini dapat diaplikasikan pada layar kontrol dan panel informasi di kokpit, meningkatkan visibilitas dan kenyamanan bagi pilot. [25]

Dengan terus berkembangnya penelitian dan kemajuan dalam teknologi manufaktur, quantum dots diharapkan dapat memainkan peran penting dalam inovasi desain pesawat terbang yang lebih efisien, fungsional, dan canggih. Quantum dots memiliki beberapa jenis yang bisa dibagi menjadi beberapa klasifikasi diantaranya sebagai berikut:

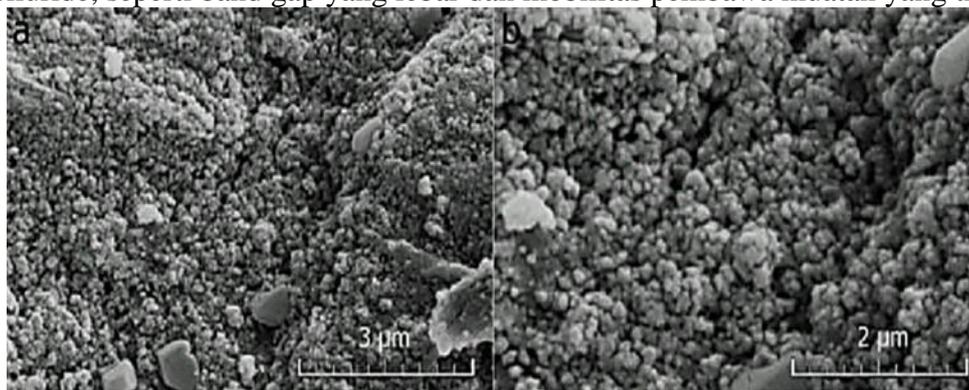
- Cadmium Selenide (CdSe)

CdSe adalah salah satu quantum dot yang paling banyak dipelajari. Mereka memiliki aplikasi luas dalam tampilan, fotovoltaik, dan biomedis. Quantum dots Cadmium Selenide (CdSe) dikenal dengan sifat fotoluminesen yang cemerlang dan kestabilan optiknya yang baik. namun toksisitasnya perlu diperhatikan [27]. Gambar 10 menampilkan kristal Cadmium Selenide (CdSe) dengan warna yang bervariasi, mulai dari kuning hingga merah tua. Perbedaan warna ini disebabkan oleh variasi ukuran partikel nanonya, yang mempengaruhi sifat optik material. CdSe dengan sifat optik yang dapat disesuaikan ini memiliki potensi besar dalam aplikasi layar dan sensor.

Gambar 10. SEM *Cadmium Selenide* (CdSe) [27]

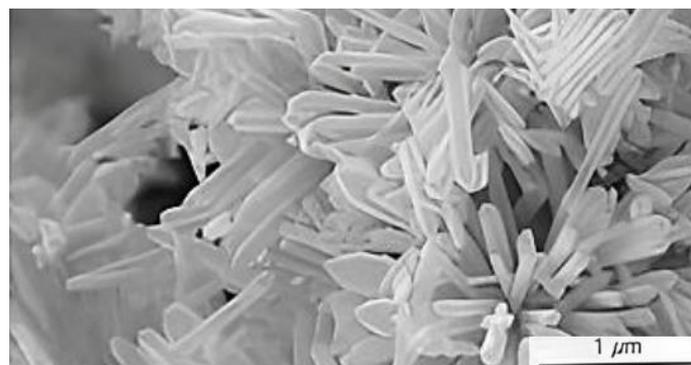
- Cadmium Telluride (CdTe)

Seperti CdSe, CdTe adalah quantum dots berbasis Cadmium yang digunakan dalam aplikasi fotovoltaik dan tampilan. CdTe menawarkan keunggulan dalam efisiensi energi dan biaya produksi, namun juga memiliki isu terkait toksisitas [28]. Gambar 11 memperlihatkan struktur kristal Zinc Blende dari Cadmium Telluride. Atom Cadmium (Cd) dan Tellurium (Te) tersusun secara bergantian dalam kisi kristal yang teratur. Struktur ini memberikan kontribusi pada sifat semikonduktor yang unik dari Cadmium Telluride, seperti band gap yang lebar dan mobilitas pembawa muatan yang tinggi.

Gambar 11. SEM *Cadmium Telluride* (CdTe) [28]

- Zinc Selenide (ZnSe)

ZnSe adalah semikonduktor yang digunakan untuk aplikasi optoelektronik dan optik. Quantum dots berbasis ZnSe menawarkan keuntungan dalam efisiensi konversi cahaya dan stabilitas termal yang lebih baik dibandingkan CdSe [29]. Pada Gambar 12 menunjukkan SEM struktur nano dari ZnSe yang berbeda dengan struktur yang lainnya.



Gambar 12. SEM Zinc Selenide (ZnSe) [27]

- Jenis ini menggabungkan inti quantum dots (seperti CdSe atau InP) dengan lapisan shell yang lebih besar dan lebih stabil, seperti ZnSe. Lapisan shell membantu meningkatkan kestabilan, meningkatkan efisiensi fotoluminesen, dan mengurangi toksisitas, menjadikannya lebih aman.

E. Pelapis nano (nanocoatings)

Nanomaterial nano coating merupakan teknologi pelapisan berbasis material nano skal yang dirancang untuk meningkatkan kinerja permukaan melalui modifikasi sifat fisik, kimia, dan mekanis. Dengan memanfaatkan partikel nano seperti karbon nanotube (CNT), grafena, nanopartikel logam, dan oksida logam, nano coating mampu memberikan perlindungan yang lebih baik terhadap korosi, aus, dan oksidasi. Pelapisan ini digunakan secara luas dalam berbagai industri, termasuk penerbangan, otomotif, dan medis, karena kemampuannya untuk meningkatkan ketahanan termal, kekuatan mekanik, serta sifat hidrofobik atau antimikroba.[30]

Prinsip kerja nano coating melibatkan pembentukan lapisan tipis yang menempel pada permukaan substrat melalui proses deposisi fisika atau kimia, seperti chemical vapor deposition (CVD), physical vapor deposition (PVD), dan pelapisan semprot. Sifat unggul yang dihasilkan berasal dari interaksi unik antara partikel nano dan substrat, menciptakan permukaan yang seragam dengan daya tahan tinggi. Dalam industri penerbangan, nano coating digunakan untuk melindungi permukaan pesawat dari suhu ekstrem, kelembaban tinggi, serta kerusakan akibat gesekan dan tekanan aerodinamis.

Meskipun menawarkan berbagai keunggulan, penerapan nano coating masih menghadapi tantangan dalam proses fabrikasi yang kompleks dan biaya produksi yang tinggi. Selain itu, kontrol distribusi partikel nano dalam matriks pelapis memerlukan teknologi canggih untuk memastikan kinerja optimal. Namun, dengan perkembangan teknologi manufaktur dan penelitian berkelanjutan, nano coating diharapkan dapat menjadi solusi utama dalam menciptakan material yang lebih tahan lama, efisien, dan ramah lingkungan untuk berbagai aplikasi industri.

- Nano coating perlindungan terhadap Korosi

Nano coating berbasis nanopartikel logam, seperti nanopartikel aluminium atau titanium, digunakan untuk melindungi permukaan pesawat dari korosi yang disebabkan oleh kelembaban dan kondisi lingkungan yang keras. Coating ini memberikan lapisan pelindung yang sangat tipis namun efektif dalam mengurangi keausan dan korosi pada struktur pesawat [31]

- Nanocoating pelapisan hidrofobik

Nano coating berbasis grafena atau silika digunakan untuk menciptakan permukaan hidrofobik pada pesawat. Lapisan ini membantu mencegah akumulasi air hujan atau es pada permukaan pesawat, yang bisa mengganggu aerodinamika dan meningkatkan beban. Coating hidrofobik juga mengurangi pembentukan es pada sayap dan komponen pesawat lainnya [32]

- Nano coating perlindungan terhadap suhu ekstrem

Nano coating berbasis keramik atau karbon nanotube (CNT) digunakan untuk melindungi pesawat dari suhu ekstrem yang dialami selama penerbangan. Coating ini mampu menahan suhu tinggi dan menurunkan risiko kerusakan pada permukaan pesawat akibat radiasi termal atau gesekan dengan udara pada kecepatan tinggi. [8]

- Nano coating perlindungan terhadap kerusakan abrasi dan gesek

Nano coating berbasis diamond like carbon (DLC) atau lapisan keramik lainnya dapat meningkatkan ketahanan terhadap abrasi dan gesekan, terutama pada bagian

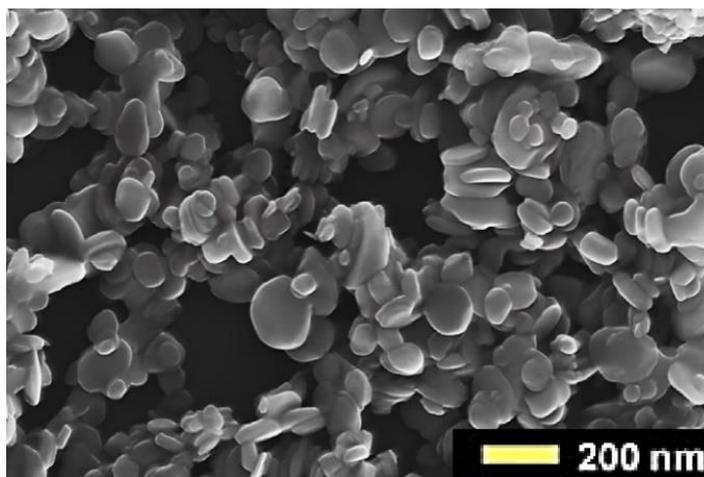
pesawat yang sering terpapar tekanan tinggi, seperti roda pendaratan dan mesin. Coating ini membantu menjaga integritas struktural komponen pesawat.

F. Material berbasis boron nitride (BN)

Boron nitride (BN) adalah material keramik yang terkenal karena ketahanan panas ekstrem dan isolasi listrik yang sangat baik, menjadikannya bahan ideal untuk aplikasi di industri aerospace, terutama pada mesin jet. Struktur atomiknya yang terdiri dari ikatan kovalen kuat antara atom boron dan nitrogen memberikan stabilitas termal yang luar biasa, memungkinkan BN bertahan pada suhu lebih dari 3.000°C tanpa degradasi. Selain ketahanan panas, BN juga memiliki resistivitas listrik yang sangat tinggi dan konstanta dielektrik rendah, sehingga efektif mencegah aliran arus listrik yang tidak diinginkan. Hal ini memberikan perlindungan pada komponen elektronik dan perangkat tegangan tinggi di mesin jet, di mana pengendalian interferensi listrik sangat penting untuk menjaga kinerja dan keselamatan. BN juga tahan terhadap oksidasi dan bahan kimia, memungkinkan material ini bertahan dalam lingkungan ekstrem yang melibatkan bahan bakar jet atau paparan korosif. Selain itu, BN memiliki bobot yang ringan namun tetap kuat secara mekanis, menjadikannya ideal untuk pengembangan komponen aerospace yang lebih ringan dan efisien dalam penggunaan bahan bakar [33]. Berikut jenis-jenis Boron nitride yang umum digunakan.

- Hexagonal Boron Nitride (h-BN)

Hexagonal Boron Nitride (h-BN) adalah bentuk BN yang paling umum dan memiliki struktur berlapis mirip grafit. Lapisan-lapisan atom boron dan nitrogen terikat kuat secara kovalen dalam satu bidang, tetapi antar lapisan hanya terhubung oleh gaya van der Waals, yang memungkinkan mereka meluncur satu sama lain dengan mudah. Struktur ini memberikan sifat pelumas alami yang membuatnya sangat berguna dalam aplikasi pelumasan padat, terutama di lingkungan bersuhu tinggi [34]. Gambar 13 menunjukkan struktur kristal heksagonal dari Hexagonal Boron Nitride (h-BN), yang terdiri dari lapisan-lapisan atom boron dan nitrogen yang terikat secara kovalen. Struktur ini memberikan sifat unik seperti konduktivitas termal tinggi, kekerasan, dan stabilitas termal yang baik, membuatnya potensial untuk berbagai aplikasi industri dan elektronik.

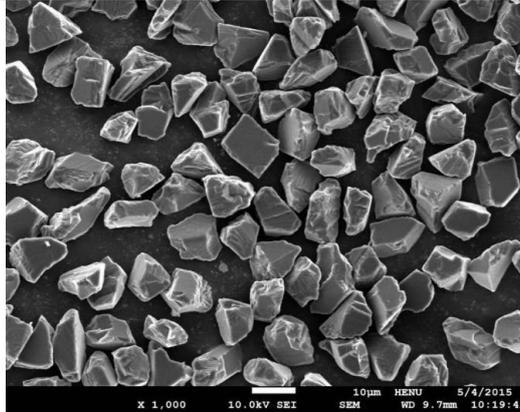


Gambar 13. SEM of Hexagonal Boron Nitride [34]

- Cubic Boron Nitride (c-BN)

Cubic Boron Nitride (c-BN) memiliki struktur kristal kubik yang menyerupai berlian, menjadikannya salah satu material terkeras di dunia setelah berlian. Kekerasan luar biasa ini membuatnya ideal sebagai bahan abrasif dalam alat pemotong dan

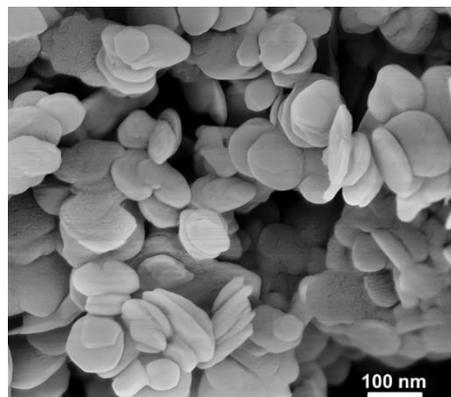
pengasah, terutama untuk memproses logam keras seperti baja. Selain kekerasannya, c-BN juga memiliki stabilitas termal dan kimia yang unggul dibandingkan berlian, terutama dalam lingkungan reaktif dan dapat bereaksi dengan berlian. [35]



Gambar 14. SEM *Cubic Boron Nitride (c-BN)* [35]

- Amorphous Boron Nitride (a-BN)

Amorphous Boron Nitride (a-BN) adalah bentuk BN tanpa struktur kristal yang teratur. Biasanya ditemukan dalam bentuk lapisan tipis, a-BN sangat efektif sebagai bahan pelapis untuk melindungi permukaan dari oksidasi, korosi, dan keausan. Sifatnya sebagai isolator listrik yang sangat baik membuatnya menarik untuk aplikasi dalam teknologi mikroelektronika, di mana perlindungan terhadap arus listrik dan stabilitas suhu tinggi sangat penting. Selain itu, a-BN digunakan dalam sistem vakum dan lingkungan industri lainnya yang membutuhkan perlindungan terhadap kerusakan kimia dan mekanik [36]. Pada Gambar 15 merupakan gambar SEM Dari struktur nano yang dapat berfungsi sebagai pelindung dari material dan juga dapat difungsikan sebagai nano coating.



Gambar 15 SEM image of *Amorphous Boron Nitride* [37]

G. Material berbasis nanokomposit polimer

Fungsi nanokomposit polimer digunakan untuk pembuatan komponen struktural yang ringan tetapi kuat, seperti badan pesawat dan sayap. Contoh: Serat carbon-nanotube dalam matriks polimer untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan.

- Nanokomposit polimer dengan campuran nanopartikel anorganik

Nanokomposit berbasis polimer yang mengandung nanopartikel anorganik seperti silika (SiO_2), titanium dioksida (TiO_2), zinc oxide (ZnO), dan nanopartikel logam (Ag, Au, Cu) merupakan salah satu jenis material yang paling sering digunakan. Silika (SiO_2) biasanya ditambahkan untuk meningkatkan kekuatan mekanik, ketahanan abrasi, dan stabilitas termal pada polimer. Kombinasi silika dengan titanium dioksida (TiO_2)

- memberikan kemampuan fotokatalitik dan perlindungan UV, menjadikannya ideal untuk aplikasi pelapis pelindung dan komponen luar ruangan. Selain itu, ZnO menambahkan sifat antimikroba yang berguna dalam kemasan makanan dan tekstil. [38]
- Aplikasi nanokomposit dengan campuran nanopartikel anorganik mencakup industri pesawat terbang, di mana material ini digunakan untuk melapisi bagian luar pesawat agar tahan terhadap radiasi UV dan abrasi. Dalam biomedis, material ini diterapkan untuk membuat perangkat medis antimikroba. Sementara itu, dalam bidang elektronik, material ini membantu meningkatkan sensitivitas sensor dan efisiensi konduksi pada perangkat kecil. [38]
- Nanokomposit polimer dengan campuran nanoplatelet dan nanoserat
 - Nanokomposit polimer dengan pengisi nano platelet seperti clay (montmorillonite atau kaolinit) dan hexagonal boron nitride (h-BN), dikombinasikan dengan nano serat karbon atau polimer, menawarkan peningkatan signifikan pada sifat mekanik, penghalang gas, dan ketahanan termal. Clay nano platelet biasanya digunakan untuk meningkatkan kemampuan penghalang gas dan kekuatan struktural, membuatnya ideal untuk aplikasi pada kemasan dan struktur ringan. Ketika digabungkan dengan nano serat karbon, material ini menjadi sangat kuat dan ringan, cocok untuk industri pesawat terbang. Penggunaan nanomaterial ini membantu industri aerospace mengurangi berat pesawat, meningkatkan efisiensi bahan bakar, memperbaiki ketahanan terhadap lingkungan ekstrem, serta meningkatkan performa dan umur pakai komponen[39].

2. Keuntungan nanokomposit pada pesawat terbang

Penggunaan nanokomposit tidak hanya berperan dalam meningkatkan performa struktural, tetapi juga menawarkan solusi signifikan dalam hal efisiensi, ketahanan, dan keselamatan pesawat terbang di industri pesawat terbang, lebih detailnya adalah berikut ini.

A. Pengurangan berat dan peningkatan efisiensi bahan bakar

Nanokomposit yang diperkuat dengan CNTs dan graphene dapat mengurangi berat total pesawat tanpa mengorbankan kekuatan. Pengurangan berat tersebut secara langsung berkontribusi pada peningkatan efisiensi bahan bakar dan mengurangi emisi karbon. Pengurangan berat juga memungkinkan pesawat untuk membawa muatan lebih banyak atau menempuh jarak yang lebih jauh tanpa harus menambah konsumsi bahan bakar.

B. Peningkatan ketahanan terhadap suhu ekstrim

Nanokomposit, terutama yang mengandung graphene dan nanoclay, memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap suhu tinggi. Hal ini cukup penting untuk komponen pesawat yang beroperasi di lingkungan yang sangat panas, seperti mesin jet. Ketahanan terhadap suhu ekstrem ini memungkinkan komponen bertahan lebih lama dan mengurangi risiko kerusakan akibat panas.

C. Konduktivitas listrik dan termal yang baik

CNTs dan graphene dalam nanokomposit memberikan konduktivitas listrik dan termal yang tinggi, yang sangat bermanfaat untuk pelindung petir, sistem elektronik, dan sistem pendingin pesawat. Hal ini meningkatkan keamanan dan keandalan sistem pesawat selama penerbangan, terutama dalam kondisi cuaca yang buruk.

D. Sensor struktural untuk pemantauan kesehatan pesawat

Nanokomposit yang mengandung sensor nano dapat digunakan untuk mendeteksi kerusakan mikro dan perubahan tekanan struktural secara real-time. Hal ini meningkatkan kemampuan pesawat untuk melakukan pemeliharaan prediktif, mengurangi risiko kegagalan struktural yang tidak terduga, dan meningkatkan keselamatan penerbangan.

E. Ketahanan terhadap korosi dan keausan

Nanokomposit juga menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap korosi dan keausan dibandingkan dengan material konvensional. Ini sangat penting untuk komponen pesawat yang terpapar elemen-elemen lingkungan yang keras, seperti kelembaban tinggi dan atmosfer korosif. Penggunaan nanokomposit dapat memperpanjang umur komponen dan mengurangi frekuensi perawatan.

3. Aplikasi nanoteknologi dalam desain dan pengembangan komponen ringan untuk pesawat terbang

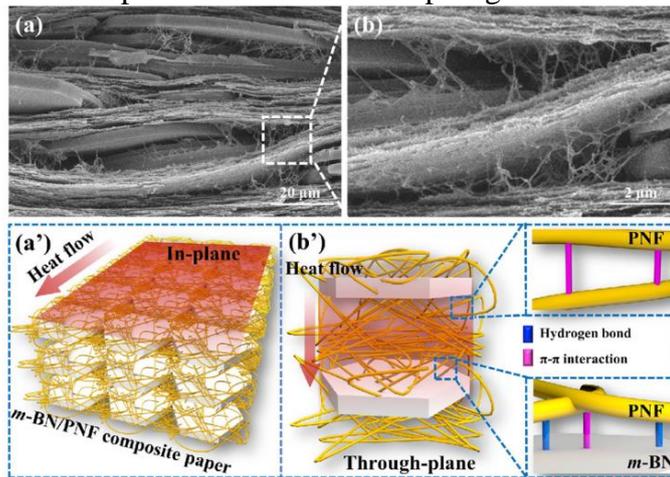
Nanokomposit, hasil dari perkembangan teknologi dan ilmu material, merupakan inovasi material yang memanfaatkan partikel nano sebagai penguat dalam matriks komposit. Material ini telah menarik perhatian luas dalam berbagai sektor, termasuk otomotif, elektronik, kesehatan, dan khususnya industri penerbangan. Nanokomposit dirancang dengan dua komponen utama matriks, yang berfungsi untuk menyatukan dan melindungi penguat, serta partikel nano yang bertindak sebagai penguat untuk meningkatkan kekuatan, kekakuan, dan daya tahan material. Pendekatan nanoteknologi memungkinkan kontrol yang lebih besar terhadap sifat dan struktur material. Penggunaan partikel nano, yang berukuran 1 hingga 100 nanometer, memperkuat material secara signifikan melalui peningkatan interaksi antar komponen pada tingkat atom atau molekul. Ini mengarah pada sifat mekanik, termal, dan listrik yang jauh lebih unggul dibandingkan material komposit konvensional. Contohnya, nanokomposit berbasis carbon nanotubes (CNT) telah digunakan dalam desain komponen pesawat terbang karena kekuatannya yang luar biasa dengan bobot yang jauh lebih ringan, yang sangat penting untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar dan kinerja pesawat.

Beberapa komponen pesawat terbang yang telah menggunakan nanokomposit memberikan keuntungan signifikan dalam hal pengurangan berat tanpa mengorbankan kekuatan dan kinerja[40]. Salah satu contoh adalah tangki tekanan composite overwrapped pressure vessels (COPVs), yang digunakan untuk menyimpan bahan bakar atau gas bertekanan tinggi. Dalam aplikasi ini, nanokomposit yang diperkuat dengan carbon nanotubes (CNT) memberikan kekuatan yang jauh lebih besar dibandingkan serat karbon konvensional, sekaligus mengurangi bobot secara signifikan, yang mendukung efisiensi penerbangan. Selain itu, komponen struktur utama seperti sayap dan badan pesawat juga mulai memanfaatkan nanokomposit, terutama pada pesawat eksperimental. Penggunaan nanokomposit memungkinkan pengurangan massa tanpa mengurangi kekuatan struktural, sehingga meningkatkan efisiensi bahan bakar dan mengurangi beban mekanis pesawat. Komponen struktur utama contohnya seperti sayap dan badan pesawat yang menggunakan bahan nanocomposite dapat dilihat pada Gambar 16.



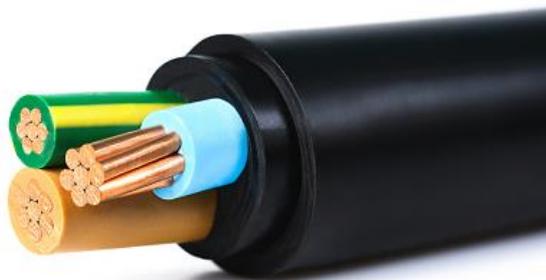
Gambar 16 *Nanocomposite* pada sayap pesawat [41]

Komponen lain yang menggunakan nanokomposit adalah panel pelindung panas (Thermal Protection Systems), yang dibuat dari nanopartikel khusus untuk menahan suhu tinggi, seperti pada mesin pesawat dan saluran gas panas (Gambar 17). Material ini menawarkan ketahanan terhadap suhu ekstrem dan tetap ringan dan tahan lama.



Gambar 17 *Nanocomposite* pelindung panas pada pesawat ulang-alik [42]

Terakhir, kabel konduktor listrik dalam sistem propulsi listrik pesawat menggunakan nanokomposit untuk mengurangi bobot kabel, tetapi tetap mampu menangani arus listrik tinggi. Pengurangan berat pada kabel ini secara langsung berkontribusi pada pengurangan berat total sistem, mendukung efisiensi keseluruhan pesawat. Untuk kabel konduktor listrik dalam sistem propulsi listrik pesawat dapat dilihat pada Gambar 18.



Gambar 18 Aplikasi nanokomposit pada kabel konduktor listrik pesawat [43]

Revolusi dalam industri aerospace telah mencapai babak baru dengan hadirnya teknologi nanokomposit. Transformasi paling mendasar terlihat pada material struktural, di mana penggunaan bahan konvensional seperti aluminium alloy, titanium, dan steel yang memiliki keterbatasan kinerja, telah digantikan oleh material inovatif berbasis CNT, grafena, dan nanopartikel. Inovasi ini menghasilkan komponen yang 30% lebih ringan dengan kekuatan tensile meningkat hingga 200%, sekaligus menawarkan ketahanan superior terhadap fatigue dan korosi, yang berujung pada pengurangan frekuensi perawatan secara signifikan.

Terobosan teknologi nanokomposit juga memberikan dampak revolusioner pada sistem propulsi dengan peningkatan efisiensi bahan bakar hingga 20%. Keunggulan material nanokomposit terlihat dari kemampuannya menahan suhu ekstrem, yang didukung sistem pendinginan yang lebih kompak dan efisien, menghasilkan pengurangan berat total hingga 30%. Sistem proteksi termal mengalami lompatan teknologi dengan kemampuan menahan suhu mencapai 2000°C, melampaui batas 1500°C era sebelumnya, sembari menawarkan struktur 40% lebih ringan dengan masa pakai yang berlipat ganda.

Implementasi nanokomposit dalam sistem elektrikal menghadirkan terobosan baru dengan peningkatan konduktivitas hingga 50% dibanding sistem konvensional berbasis tembaga. Penggunaan teknologi ini menghasilkan reduksi berat kabel hingga 60% dan efisiensi transmisi yang meningkat 30-40%, ditambah dengan heat generation yang minimal, berkontribusi pada optimalisasi kinerja sistem secara keseluruhan. Dari perspektif operasional, teknologi nanokomposit memberikan sejumlah keunggulan kompetitif yang signifikan. Jangkauan pesawat bertambah hingga 20%, kapasitas muatan meningkat 15%, dan efisiensi bahan bakar terdongkrak hingga 25%. Lebih menguntungkan lagi, biaya perawatan berkurang drastis hingga 40%. Meskipun biaya produksi awal lebih tinggi 30-40%, investasi ini terbayar melalui penurunan biaya operasional hingga 25% dan peningkatan ROI jangka panjang yang substansial. Perhitungan total biaya sepanjang masa pakai menunjukkan penghematan yang signifikan, mengkompensasi investasi awal yang lebih besar. Pergeseran paradigma ini membuka era baru dalam teknologi aerospace, menghadirkan keseimbangan optimal antara performa unggul dan efisiensi ekonomi. Melalui integrasi teknologi nanokomposit, industri penerbangan tidak hanya mencapai standar kinerja yang lebih tinggi, tetapi juga membuka berbagai kemungkinan inovatif dalam pengembangan dan pengoperasian pesawat terbang di masa depan. Transformasi ini menjadi katalis bagi evolusi berkelanjutan dalam industri penerbangan, mendorong terciptanya solusi yang lebih efisien, aman, dan ekonomis.

4. Tantangan nanoteknologi dalam desain dan pengembangan komponen ringan untuk pesawat terbang

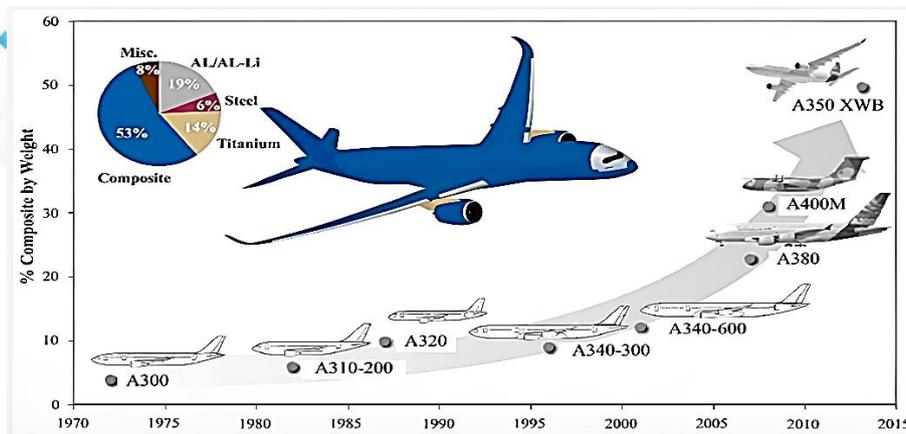
Tantangan penggunaan nanokomposit dalam desain dan pengembangan komponen ringan untuk pesawat terbang melibatkan berbagai faktor teknis dan operasional. Salah satu tantangan utama adalah proses manufaktur yang kompleks. Teknologi produksi nanokomposit seperti casting ultrasonik atau metode deposisi langsung sering kali sulit untuk diimplementasikan pada skala industri, karena memerlukan kontrol presisi tinggi untuk mencapai distribusi partikel nano yang seragam di dalam matriks. Selain itu, proses ini membutuhkan alat yang canggih dan mahal, serta pengawasan ketat terhadap suhu dan tekanan selama produksi. Ketidaktepatan dalam mengontrol parameter-parameter ini dapat mengakibatkan aglomerasi partikel nano, yang berpotensi menurunkan kekuatan material dan menyebabkan ketidakteraturan dalam struktur material. Kompleksitas manufaktur ini menghambat proses produksi massal dan membuat biaya produksi nanokomposit jauh lebih tinggi dibandingkan material konvensional. Selain itu, nanokomposit cenderung memiliki isu kompatibilitas material. Sebagai contoh, partikel nano seperti karbon nanotube (CNT) mungkin tidak terdispersi secara optimal di dalam matriks material tertentu, seperti magnesium atau aluminium, yang digunakan secara luas

dalam komponen pesawat. Karbon nanotube (CNT), misalnya, sulit terdispersi secara merata dalam logam karena adanya perbedaan sifat kimiawi antara CNT dan logam yang digunakan. Masalah dispersi ini dapat mengakibatkan pengendapan atau pembentukan oksida yang tidak diinginkan di dalam struktur material, yang pada gilirannya dapat mengurangi sifat mekanik, seperti kekuatan tarik dan ketangguhan, serta mengurangi ketahanan material terhadap kondisi lingkungan ekstrem yang biasa dihadapi pesawat terbang, seperti suhu tinggi dan korosi. Upaya untuk meningkatkan kompatibilitas, seperti penggunaan surfaktan dan teknik dispersi khusus, namun teknik ini meningkatkan kompleksitas produksi dan biaya material.

Dalam industri penerbangan, setiap material baru harus memenuhi standar regulasi yang ketat sebelum dapat digunakan dalam pesawat terbang, mengingat standar keselamatan yang tinggi dalam industri ini. Federal aviation administration (FAA) serta otoritas penerbangan lainnya mensyaratkan serangkaian uji ketahanan material terhadap berbagai kondisi ekstrem, seperti tekanan tinggi, suhu bervariasi, dan lingkungan korosif. Nanokomposit, sebagai material yang relatif baru, menghadapi tantangan tambahan dalam memenuhi standar ini, terutama karena potensi sifat nano yang berubah di bawah kondisi ekstrem. Misalnya, partikel nano dalam nanokomposit dapat menunjukkan reaksi tak terduga terhadap suhu tinggi yang dapat mempengaruhi stabilitas material. Pengujian tambahan untuk memastikan keamanan dan ketahanan material memerlukan biaya dan waktu yang signifikan, sehingga memperpanjang proses sertifikasi nanokomposit sebagai material yang layak dalam penerbangan [44]. Selain tantangan teknis dan regulasi, hambatan ekonomi juga menjadi faktor penghambat dalam penerapan nanokomposit secara luas di industri penerbangan. Biaya produksi nanokomposit umumnya jauh lebih tinggi dibandingkan material konvensional seperti serat karbon, karena proses produksinya memerlukan peralatan khusus dan metode manufaktur yang rumit [45]. Selain itu, produksi nanokomposit dalam skala besar masih terbatas, mengingat teknik-teknik yang ada belum sepenuhnya dioptimalkan untuk mencapai efisiensi biaya yang diharapkan. Hanya perusahaan besar dengan kapasitas finansial yang mampu untuk berinvestasi dalam teknologi ini, yang mengakibatkan perlambatan adopsi nanokomposit dalam industri. Dalam jangka panjang, penelitian dan pengembangan yang berkelanjutan diperlukan untuk menurunkan biaya produksi nanokomposit, serta pengembangan metode manufaktur yang lebih sederhana dan efisien agar teknologi ini.

5. Revolusi penerapan nanoteknologi pada pesawat terbang

Nanoteknologi dengan kemampuannya untuk memanipulasi materi pada skala atom dan molekul, telah membuka cakrawala baru dalam berbagai industri, termasuk industri penerbangan. Potensi nanoteknologi dalam merancang dan mengembangkan komponen pesawat terbang semakin menjanjikan, membawa kita menuju masa depan penerbangan yang lebih efisien, aman, dan berkelanjutan. Prospek masa depan nano komposit pada industri penerbangan dapat dilihat pada Gambar 19.



Gambar 19 Nanokomposit pada industri penerbangan [46]

Lapisan nanomaterial memberikan kekuatan dan kekakuan yang tinggi pada sayap, sekaligus mengurangi bobot. Prospek nanoteknologi dalam industri penerbangan ada sebagai berikut:

A. Material baru

Carbon nanotubes (CNTs) telah ditunjukkan sebagai material yang sangat prominen dalam industri penerbangan. Mereka memiliki sifat-sifat unik seperti kekuatan yang tinggi, konduktivitas termal yang baik, dan berat yang sangat ringan. Penggunaan CNTs telah menghasilkan pesawat yang lebih ringan, lebih efisien, dan lebih tahan lama.

B. Pelapisan permukaan yang lebih tahan lama

Pelapisan permukaan komponen pesawat dengan lapisan nano akan semakin canggih, menawarkan perlindungan yang lebih baik terhadap korosi, aus, dan suhu ekstrem.

C. Sensor nano untuk deteksi kerusakan dini

Sensor nano akan terintegrasi ke dalam struktur pesawat, memungkinkan deteksi dini kerusakan bahkan pada tingkat molekuler. Hal ini akan meningkatkan keselamatan penerbangan dan mengurangi biaya perawatan. Sensor nano akan memberikan data real-time kondisi pesawat, memungkinkan tindakan pencegahan sebelum terjadi kegagalan.

D. Sistem pendinginan yang lebih efisien

Penggunaan nanofluida sebagai pendingin akan terus dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi pendinginan komponen pesawat, terutama pada komponen elektronik yang menghasilkan panas tinggi.

E. Pesawat yang lebih ramah lingkungan

Nanoteknologi dapat berkontribusi dalam pengembangan bahan bakar pesawat yang lebih ramah lingkungan, seperti bahan bakar hidrogen yang dihasilkan melalui elektrolisis menggunakan katalis nano. Nanomaterial dapat digunakan untuk mengembangkan filter udara yang lebih efisien, mengurangi emisi polutan dari mesin pesawat.

F. Keselamatan tinggi

Selain efisiensi energi tinggi, nanoteknologi juga meningkatkan keselamatan dengan menggunakan sensor gas, sensor suhu, dan sensor tekanan yang lebih akurat. Sensor-semikonduktor dari nanopartikel logam digunakan untuk pemantauan kontrol kualitas udara, mendeteksi polutan rendah seperti CO, NO, NO₂, dan O₃ secara efektif.

6. Efek lingkungan penggunaan *nano composite* pada pesawat terbang

Penggunaan nanokomposit dalam pesawat terbang memberikan efek lingkungan yang cukup positif, terutama dalam mendukung keberlanjutan dan efisiensi energi. Berikut adalah beberapa efek lingkungan utama dari penggunaan nanokomposit di industri penerbangan:

1. Pengurangan emisi karbon

- Nanokomposit memungkinkan pengurangan bobot pesawat secara signifikan tanpa mengorbankan kekuatan struktural. Dengan bobot yang lebih ringan, pesawat membutuhkan lebih sedikit bahan bakar, yang langsung berdampak pada penurunan emisi karbon dioksida (CO₂). Hal ini sejalan dengan upaya global untuk mengurangi jejak karbon industri penerbangan. Penggunaan nano komposit mempengaruhi emisi karbon dunia pada tahun ketahun. Penggunaan nano composite pada pesawat terbang telah terbukti mengurangi emisi CO₂ karena material ini lebih ringan dan kuat, meningkatkan efisiensi bahan bakar dan performa penerbangan[47].
2. Peningkatan efisiensi bahan bakar
Nanokomposit seperti yang diperkuat dengan serat karbon atau graphene, meningkatkan efisiensi aerodinamis pesawat. Efisiensi ini membantu mengurangi konsumsi bahan bakar, sehingga memperpanjang jangkauan terbang tanpa meningkatkan polusi udara.
 3. Ketahanan terhadap korosi dan panas
Banyak nanokomposit memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi dan suhu ekstrem, yang membuat komponen pesawat lebih tahan lama dan memperpanjang umur pemakaian. Dengan umur pakai yang lebih lama, kebutuhan akan penggantian dan perawatan berkurang, mengurangi jumlah limbah industri yang dihasilkan.
 4. Pengurangan bahan beracun
Penggunaan nanomaterial dalam pelapisan permukaan pesawat dapat menggantikan bahan berbahaya atau beracun, seperti kromium, yang biasa digunakan untuk perlindungan korosi. Berikut bahaya yang ada dalam kromium. Hal ini berkontribusi pada pengurangan limbah berbahaya dalam proses produksi dan pemeliharaan pesawat.
 5. Pengembangan bahan bakar alternatif
Beberapa penelitian juga mengembangkan katalis nano dalam bahan bakar pesawat yang lebih ramah lingkungan, seperti hidrogen. Meski teknologi ini masih berkembang, adanya nanoteknologi berpotensi membuka jalan bagi bahan bakar yang lebih bersih dan rendah emisi. Efek-efek ini menunjukkan bahwa nanokomposit memiliki kontribusi signifikan dalam mewujudkan penerbangan yang lebih hijau, terutama dengan pengurangan emisi dan efisiensi energi yang lebih baik, yang mendukung target keberlanjutan global.

Kesimpulan

Nanokomposit berbasis *carbon nanotubes* (CNT) dan graphene menawarkan kekuatan mekanik tinggi dengan bobot ringan, meningkatkan efisiensi bahan bakar dan ketahanan terhadap kelelahan material. Nanopartikel logam dan oksidanya seperti dari titanium dan aluminium memberikan ketahanan korosi serta perlindungan terhadap suhu ekstrem, sementara nanokeramik seperti silicon carbide (SiC) memperkuat komponen pesawat yang beroperasi di lingkungan bersuhu tinggi. Selain itu, nanokomposit polimer memberikan fleksibilitas dan daya tahan yang lebih baik, menjadikannya ideal untuk struktur pesawat yang memerlukan kombinasi ringan dan kuat. Meskipun material ini menghadirkan keunggulan signifikan dalam efisiensi aerodinamis, ketahanan struktural, dan pengurangan emisi karbon, tantangan seperti biaya produksi tinggi dan kompleksitas manufaktur masih menjadi hambatan utama. Oleh karena itu, riset dan inovasi lanjutan diperlukan untuk mengoptimalkan proses fabrikasi serta memastikan penerapan nanokomposit secara luas dalam industri penerbangan. Dengan terus berkembangnya teknologi, material nanokomposit berpotensi menjadi solusi utama dalam menciptakan pesawat yang lebih ringan, efisien, dan berkelanjutan di masa depan.

Daftar Pustaka

- ‘(Alivisatos, A. P., 1996)’. n.d. Accessed 22 January 2025. <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.271.5251.933>.
- ‘Aluminium Oxide Nanoparticles’. n.d. (Naresh Singh, n.d., 2007). Accessed 22 January 2025. <https://www.indiamart.com/proddetail/aluminium-oxide-nanoparticles-6399589155.html>.
- ‘Behrang Bahgeri (2019)’. 2024. *ResearchGate*, December. <https://doi.org/10.1063/1.5124881>.
- Bhat, Aayush, Sejal Budholiya, Sakthivel Aravind Raj, Mohamed Thariq Hameed Sultan, David Hui, Ain Umaira Md Shah, and Syafiqah Nur Azrie Safri. 2021. ‘Review on Nanocomposites Based on Aerospace Applications’. *Nanotechnology Reviews* 10 (1): 237–53. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2021-0018>.
- ‘David Hinojosa-Romero (2022)’. n.d. Accessed 22 January 2025. https://www.researchgate.net/publication/359079847_Amorphous_Boron_Nitride_Ab_i_nitio_Study_of_its_vibrational_properties.
- ‘Erlina F. Santika, 2023’. n.d. Accessed 22 January 2025. <https://databoks.katadata.co.id/energi/statistik/83ca523ecf26669/ini-tren-sumbangan-emisi-co2-dari-penerbangan-pesawat-di-dunia-sempat-turun-drastis-saat-pandemi-covid-19>.
- Fahanani, Agwin Fahmi, and Leonardo Kamajaya. 2023. *Leonardo Kamajaya, 2023*. Universitas Brawijaya Press.
- Fahmi, Mochamad Zakki. 2020. *Nanoteknologi dalam Perspektif Kesehatan*. Airlangga University Press.
- ‘Faizah Yasin, 2008’. 2024. *ResearchGate*, October. https://www.researchgate.net/publication/49593893_SYNTHESIS_OF_CARBON_NA_NOTUBES_FOR_ACETYLENE_DETECTION.
- ‘Farzana Hussain 2006’. n.d. Accessed 7 January 2025. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0021998306067321>.
- Ferdiansyah, Devaldi, Dimas Seto Wardana, Sony Aguspihana, Yoki Rizkyawan, and Riny Yolanda Parapat. 2025. ‘NANOSTRUKTUR DALAM BATERAI LITHIUM: INOVASI DAN ARAH MASA DEPAN’. *Scientica: Jurnal Ilmiah Sains Dan Teknologi* 3 (3): 153–68.
- ‘(Gerard Marcel Pajonk, 1996)’. 2024. *ResearchGate*, October. <https://doi.org/10.1007/BF01160815>.
- ‘Guo-Dong., et al., 2002’. n.d. Accessed 22 January 2025. <https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/83/6/1228/329419/Electrical-properties-of-nanoceramics-reinforced>.
- Hoffmann, Joachim E., Martin-T. Schmitt, Dietmar Eifler, Tilmann Beck, Patrick Klär, and Monika Saumer. 2018. ‘Bending Deformation and Indentation Hardness of Electrochemically Deposited Nanocrystalline Nickel-Iron Alloys’. *Materials Testing* 60 (11): 1041–49. <https://doi.org/10.3139/120.111259>.
- ‘Hongwu (2002)’. n.d. Accessed 7 January 2025. <https://www.hwnanoparticles.com/5um-silicon-carbide-powder-beta-sic-micron-particles-product/>.
- Hrubesh, Lawrence W. 1998. ‘Aerogel Applications’. *Journal of Non-Crystalline Solids* 225 (April):335–42. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(98\)00135-5](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(98)00135-5).
- Isnaeni (2019), Neni. n.d. ‘Nanomaterial dalam Industri Keramik’.
- Jubilate, Jascha Vigrel. 2024. ‘Analisa Efektivitas Zinc Oxide-Polyurethane Sebagai Coating Internal Terhadap Korosi Pipa Baja ASTM A 106 Untuk Perpipaan Pengangkutan Air Laut’. Other, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. <https://repository.its.ac.id/113689/>.
- ‘Kennedy Space, 2010’. n.d. Accessed 22 January 2025. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20110003996>.

- Li, Yan-Hui, Shuguang Wang, Jinquan Wei, Xianfeng Zhang, Cailu Xu, Zhaokun Luan, Dehai Wu, and Bingqing Wei. 2002. 'Lead Adsorption on Carbon Nanotubes'. *Chemical Physics Letters* 357 (3): 263–66. [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(02\)00502-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(02)00502-X).
- 'LUH SURIATI (2022)'. n.d. Accessed 22 January 2025. <https://repository.warmadewa.ac.id/id/eprint/2172/1/PENELITIAN%20HIBAH%20DIKTI%20FORMULASI%20NANOCOATING%20PORANG%20TAHUN%201%20%282022%29.pdf>.
- 'Masahiko Ishikawa (2015)'. 2024. *ResearchGate*, October. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2015.01.003>.
- 'Masoud (2015)'. n.d. Accessed 7 January 2025. https://www.researchgate.net/publication/277413865_Facile_Sonochemical_Synthesis_and_Characterization_of_CdTe_Nanoparticles?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnNOUGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoiX2RpcmVjdCJ9fQ.
- Merceron, Clémence. 2024. 'All the Benefits of Graphene for the Aerospace Industry'. *Carbon Waters* (blog). 2 January 2024. <https://www.carbon-waters.com/en/aerospace-how-does-graphene-meet-the-sectors-challenges/>.
- Mita, Febria, Asiah Jumarni, Rosita Wati, Azizah Patimah, and Dui Yanto Rahman. 2024. 'Perkembangan Penerapan Nanoteknologi Di Bidang Pelapisan (Coating)'. *Jurnal Penelitian Fisika Dan Terapannya (JUPITER)* 5 (2): 1–29. <https://doi.org/10.31851/jupiter.v5i2.14518>.
- 'Ms. Amelia, 2020'. n.d. Made-in-China.Com. Accessed 22 January 2025. <https://kumthai.en.made-in-china.com/product/oSOJVIwvSupB/China-Cubic-Boron-Nitride-Micron-Powder-CBN-A80m-with-High-Strength-High-Thermal-Stability.html>.
- Naresh Singh. n.d. 'Aluminium Oxide Nanoparticles'. Indiamart.Com. Accessed 7 January 2025. <https://www.indiamart.com/proddetail/aluminium-oxide-nanoparticles-6399589155.html>.
- 'Ngafwan Ngafwan, 2021'. n.d. ResearchGate. Accessed 18 December 2024. https://www.researchgate.net/figure/Carbon-quantum-dots-SEM-image-of-mesoporous-hematite-composite_fig1_353179017.
- Pakdel, Amir, Yoshio Bando, and Dmitri Golberg. 2014. 'Nano Boron Nitride Flatland'. *Chemical Society Reviews* 43 (3): 934–59. <https://doi.org/10.1039/C3CS60260E>.
- Pandey, Jitendra K., K. Raghunatha Reddy, A. Pratheep Kumar, and R. P. Singh. 2005. 'An Overview on the Degradability of Polymer Nanocomposites'. *Polymer Degradation and Stability* 88 (2): 234–50. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.09.013>.
- Parapat, Riny Y., Oey H. I. Saputra, Anton P. Ang, Michael Schwarze, and Reinhard Schomäcker. 2014. 'Support Effect in the Preparation of Supported Metal Catalysts via Microemulsion'. *RSC Advances* 4 (92): 50955–63. <https://doi.org/10.1039/C4RA10736E>.
- Parapat, Riny Yolandha, Muhammad Aldiansyah Amin, Rosa Rosmayani, and Imam Aschuri. 2023. 'Optimization of Nanoasphalt Rubber Using Response Surface Method'. *AIP Conference Proceedings* 2772 (1): 060004. <https://doi.org/10.1063/5.0115071>.
- Parapat, Riny Yolandha, Yuni Maulani, Gina Nur Fatimah, Freddy Haryanto, Mino Tasbihi, Michael Schwarze, and Reinhard Schomäcker. 2024. 'Eco-Friendly Nanocatalysts: Unleashing Non-Precious Metal Potential for Methylene Blue Remediation'. *E3S Web of Conferences* 484:03004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448403004>.
- Parapat, Riny Yolandha, Zamaludin Zamaludin, Muhamad Firmansyah Rizkiawan Putra, Imam Aschuri, Didin Agustian, and Reinhard Schomäcker. 2024. 'Elevating Sustainability and Profitability: Non-Precious Metal Nano Catalysts for Maximizing

- Yield and Calorific Value in Asphalt Pyrolysis'. *E3S Web of Conferences* 484:03007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448403007>.
- Prabhakaran, Ramamurthy. 2014. 'Prabhakaran'. *Journal of Aerospace Sciences and Technologies* Paper code V66 N3/853-2014 (August):170–85.
- Qian, Dong, and Wagner Gregory J, Wing Kam Liu, Min-Feng Yu, and Rodney S Ruoff. 2002. 'Mechanics of Carbon Nanotubes'. *Applied Mechanics Reviews* 55 (6): 495–533. <https://doi.org/10.1115/1.1490129>.
- Rafiee, Roham, and Reza Shahzadi. 2019. 'Mechanical Properties of Nanoclay and Nanoclay Reinforced Polymers: A Review'. *Polymer Composites* 40 (2): 431–45. <https://doi.org/10.1002/pc.24725>.
- 'RH Baughman(2002)'. n.d. Accessed 22 January 2025. <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1060928>.
- Setiawan, Diva Delfiani, Muthi Hannindyah, Suci Wulandari, and Riny Yolanda Parapat. 2025. 'PEMANFAATAN NANOTEKNOLOGI (NANOFILTRASI MEMBRAN) SEBAGAI SOLUSI KRISIS AIR BERSIH UNTUK KEBUTUHAN DOMESTIK'. *Scientica: Jurnal Ilmiah Sains Dan Teknologi* 3 (3): 148–68.
- 'Slakovic, 2020'. n.d. Accessed 7 January 2025. <https://www.nanoamor.com/inc/sdetail/55298>.
- Surahman, Moch Fikar, Akmal Muklas Mubarak, Haikal Teuku Darmansyah, Muhammad Dzaki Fadhil Ahnaf, and Riny Yolanda Parapat. 2025. 'NANO TEKNOLOGI DALAM PENINGKATAN EFISIENSI DAN KINERJA PANEL SURYA'. *Scientica: Jurnal Ilmiah Sains Dan Teknologi* 3 (3): 148–68.
- Suryawati, Sri, Wahyudi Kumorotomo, and Muhammad Baiquni. 2025. *Tantangan Presiden Ke-8 Republik Indonesia: Pemikiran Akademisi Universitas Gadjah Mada*. UGM PRESS.
- 'takayib'. 2021. iStock. 25 June 2021. <https://www.istockphoto.com/id/foto/kabel-daya-listrik-pada-latar-belakang-putih-kawat-tembaga-adalah-konduktor-listrik-gm1325381327-410423578>.
- 'Tang Lin, 2023'. n.d. ResearchGate. Accessed 22 January 2025. https://www.researchgate.net/figure/Cross-sectional-SEM-images-a-b-of-m-BN-PNF-50-nanocomposite-paper-schematic-diagram_fig4_376081511.
- Thostenson, Erik T, Zhifeng Ren, and Tsu-Wei Chou. 2001. 'Advances in the Science and Technology of Carbon Nanotubes and Their Composites: A Review'. *Composites Science and Technology* 61 (13): 1899–1912. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00094-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00094-X).
- Tjong, S. C., and Haydn Chen. 2004. 'Nanocrystalline Materials and Coatings'. *Materials Science and Engineering: R: Reports* 45 (1): 1–88. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2004.07.001>.
- 'Yapıncak Goncu, 2021'. 2024. *ResearchGate*, October. <https://doi.org/10.1007/s10876-020-01811-w>.
- Zheludkevich, M. L., R. Serra, M. F. Montemor, K. A. Yasakau, I. M. Miranda Salvado, and M. G. S. Ferreira. 2005. 'Nanostructured Sol–Gel Coatings Doped with Cerium Nitrate as Pre-Treatments for AA2024-T3: Corrosion Protection Performance'. *Electrochimica Acta* 51 (2): 208–17. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.04.021>.