भारतीय वैज्ञानिक एवं औद्योगिक अनुसंधान पत्रिका
वर्ष 34 अंक (1) जून 2026 पृ. 83-90
DOI: 10.56042/bvaap.v34i1.28315

नैनोकॉम्पोज़िट्सः वर्गीकरण, संश्लेषण एवं अनुप्रयोगों पर एक संक्षिप्त समीक्षा

राकेश कुमार[1] एवं दिनेश कुमार[2]

[1]भौतिकी विभाग, किशनलाल पब्लिक कॉलेज, रेवाड़ी, हरियाणा- 123401 (भारत)
[2]रसायन विभाग, किशनलाल पब्लिक कॉलेज, रेवाड़ी, हरियाणा- 123401 (भारत)
[ई-मेलः rakesh19singhalklp@gmail.com]

सारांशः यह समीक्षात्मक लेख नैनोकॉम्पोज़िट्स का एक स्पष्ट अवलोकन प्रस्तुत करता है, जिसमें उनकी वर्गीकरण प्रणालियाँ, संश्लेषण विधियाँ तथा व्यावहारिक अनुप्रयोगों पर विशेष ध्यान दिया गया है। नैनोकॉम्पोज़िट्स बहु-चरणीय पदार्थ होते हैं जिनमें कम-से-कम एक चरण नैनो-स्तरीय आयामों का होता है। ये पारंपरिक कॉम्पोज़िट्स के उत्कृष्ट विकल्प के रूप में उभरे हैं, जो गुणों के अनूठे संयोजन और अधिक डिज़ाइन लचीलापन प्रदान करते हैं। उनकी उत्कृष्ट यांत्रिक शक्ति, तापीय स्थिरता और पर्यावरणीय अनुकूलता के कारण इनका उपयोग पैकेजिंग, बायोमेडिकल इंजीनियरिंग, एयरोस्पेस, ऑटोमोबाइल, इलेक्ट्रॉनिक्स और ऊतक इंजीनियरिंग जैसे विविध क्षेत्रों में किया जा रहा है। नैनोकॉम्पोज़िट्स को कई तरीकों से वर्गीकृत किया जा सकता है। मैट्रिक्स के आधार पर इन्हें धात्विक, सिरेमिक और पॉलीमर नैनोकॉम्पोज़िट्स में बाँटा जाता है। प्रबलन (reinforcement) के प्रकार के आधार पर ये फाइबर-प्रबलित, लैमिनार, अथवा कण-प्रबलित हो सकते हैं। आयामिक संरचना (dimensional morphology) के अनुसार, इनमें शून्य-आयामी (नैनोकण), एक-आयामी (नैनोवायर, नैनोट्यूब), द्वि-आयामी (परतदार सिलिकेट) और त्रि-आयामी (ज़ियोलाइट्स) शामिल हैं। यह समीक्षा उनके वर्गीकरण, संश्लेषण रणनीतियों और विविध अनुप्रयोगों पर प्रकाश डालती है तथा आधुनिक पदार्थ विज्ञान में उनकी बढ़ती भूमिका को रेखांकित करती है।

मुख्य शब्दः नैनोकॉम्पोज़िट्स, मैट्रिक्स, पॉलीमर, नैनोकण

Nanocomposites: A short review on classification, synthesis & applications

Rakesh Kumar[1] & Dinesh Kumar[2]

[1]Department of Physics, Kishan Lal Public College, Rewari, Haryana- 123401 (India)
[2]Department of Chemistry, Kishan Lal Public College, Rewari, Haryana- 123401 (India)
[Email: rakesh19singhalklp@gmail.com]

Abstract

This review article provides a clear overview of nanocomposites, focusing on their classification, synthesis routes] and practical applications. Nanocomposites are multiphase materials that contain at least one phase with nanoscale dimensions. They have emerged as promising alternatives to traditional composites, offering unique combinations of properties and greater design flexibility. Their excellent mechanical strength, thermal stability, and environmental compatibility have led to applications in packaging, biomedical engineering, aerospace, automotive, electronics, and tissue engineering. Nanocomposites can be classified in several ways. Based on the matrix, they are grouped into metal, ceramic, and polymer nanocomposites. By reinforcement type, they are fibre-reinforced, laminar, or particulate-reinforced. According to dimensional morphology, they include zero&dimensional (nanoparticles), one-dimensional (nanowires, nanotubes), two-dimensional (layered silicates), and three-dimensional (zeolites). This review highlights their classification, synthesis strategies, and diverse applications, underlining their growing role in modern materials science.

Keywords: Nanocomposites, matrix, polymer, nanoparticles

प्रस्तावना

यह समीक्षा लेख नैनोकॉम्पोज़िट्स की विशेषताओं, वर्गीकरण और अनुप्रयोगों पर केंद्रित है। नैनोकॉम्पोज़िट्स ऐसी उन्नत सामग्री (advanced materials) हैं जिन्हें उनकी श्रेष्ठ प्रदर्शन क्षमता (superior performance) के कारण आधुनिक विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी में विशेष महत्व प्राप्त हो रहा है। सामान्यतः कॉम्पोज़िट पदार्थ अपनी मज़बूती, संक्षारण प्रतिरोध (corrosion resistance), तापीय एवं विद्युत चालकता, प्रकाशीय पारदर्शिता तथा रासायनिक स्थिरता के लिए जाने जाते हैं। जब भराव (fillers) को नैनोस्तर (nanoscale) पर लाया जाता है, तो उनका सतही क्षेत्रफल (surface area) और प्रतिक्रियाशीलता (reactivity) बढ़ जाती है। इसका परिणाम होता है नैनोकॉम्पोज़िट्स, जिनके गुण पारंपरिक माइक्रो या मोनोलिथिक कॉम्पोज़िट्स से कहीं अधिक होते हैं।

नैनोकॉम्पोज़िट्स को बहु-चरणीय पदार्थ (multiphase materials) माना जाता है, जिनमें से एक या अधिक चरण नैनोस्तर ($1\ nm = 10^{-9}$ m) पर होते हैं, जैसे कि नैनोकण (nanoparticles), नैनोट्यूब्स (nanotubes), अथवा परतदार नैनोसंरचनाएँ (lamellar nanostructures)। इनकी विशिष्ट विशेषताएँ विभिन्न घटकों के बीच उत्पन्न सहक्रियात्मक प्रभाव (synergistic effects) के कारण सामने आती हैं। नैनोकणों का समान रूप से वितरित होना (uniform dispersion) और मैट्रिक्स के साथ उनका मजबूत अंतःसंबंध (interfacial bonding) प्राप्त करना, उच्च प्रदर्शन प्राप्त करने के लिए अनिवार्य है। इन अंतःक्रियाओं को सहसंयोजक (covalent), आयनिक (ionic), वान डर वाल्स (van der Waals) अथवा हाइड्रोजन बंधों द्वारा नियंत्रित किया जाता है। कणों का आकार, आकारिकी (shape), अभिविन्यास (orientation) तथा मैट्रिक्स-भराव अंतःक्रियाएँ, सभी नैनोकॉम्पोज़िट्स के गुणों पर गहरा प्रभाव डालती हैं।

इनकी संभावनाएँ केवल इंजीनियरिंग तक ही सीमित नहीं हैं, बल्कि बायोमेडिकल क्षेत्रों जैसे दवा आपूर्ति (drug delivery), ऊतक अभियांत्रिकी (tissue engineering), स्टेम सेल नियमन, तथा चिकित्सकीय उपकरणों (medical devices) में भी महत्वपूर्ण भूमिका निभाती हैं। इन्हीं विशेषताओं के कारण नैनोकॉम्पोज़िट्स को ''इक्कीसवीं सदी की सामग्री'' (materials of the twenty & first century) कहा जाता है।[1],

नैनोकॉम्पोज़िट्स का वर्गीकरण (Classification of Nanocomposites)

नैनोकॉम्पोज़िट्स मुख्यतः दो घटकों से बने होते हैंः मैट्रिक्स (matrix) और प्रबलन (reinforcement)।

मैट्रिक्स प्रबलन को चारों ओर से घेरकर उसकी स्थिति को बनाए रखता है, जबकि प्रबलन नैनोकॉम्पोज़िट्स को बेहतर यांत्रिक, विद्युत और तापीय गुण प्रदान करता है।

A. मैट्रिक्स पदार्थ के आधार पर वर्गीकरण (Classification Based on Matrix Material)

1. धातु मैट्रिक्स नैनोकॉम्पोज़िट्स (Metal Matrix Nanocomposites - MMNCs)

MMNCs में नम्य धातु (ductile metals) या मिश्रधातु (alloys) का मैट्रिक्स होता है, जिसमें सामान्यतः सिरेमिक-आधारित नैनो कणों का प्रबलन किया जाता है।

इनमें उच्च विशिष्ट मज़बूती (specific strength), कठोरता (stiffness), कम तापीय प्रसार (reduced thermal expansion), उत्कृष्ट घिसाव-प्रतिरोध (wear resistance), तथा धातुओं की नम्यता (ductility) और सिरेमिक की कठोरता (toughness) का संयोजन पाया जाता है।

सामान्य प्रबलनों में कण (particulates), व्हिस्कर्स (whiskers) या रेशे (fibres) शामिल होते हैं।

उदाहरणस्वरूपः

- **Mg-आधारित MMNCs** में कार्बन फाइबर का उपयोग,
- **Al-आधारित MMNCs** में TiC, SiC और Al^2O^2 कणों का प्रबलन।

कार्बन फाइबर-प्रबलित तांबा मैट्रिक्स (Cu composites) का व्यापक उपयोग एयरोस्पेस उद्योगों में होता है[2]।

2. सिरेमिक मैट्रिक्स नैनोकॉम्पोज़िट्स (Ceramic Matrix Nanocomposites & CMNCs)

CMNCs में ऑक्साइड्स, कार्बाइड्स या नाइट्राइड्स को सिरेमिक मैट्रिक्स में प्रबलन के रूप में शामिल किया जाता है।

ये उत्कृष्ट फ्रैक्चर कठोरता (fracture toughness), तापीय स्थिरता (thermal stability), संक्षारण प्रतिरोध (corrosion resistance), और उच्च तापमान पर ऑक्सीकरण प्रतिरोध (oxidation resistance) प्रदर्शित करते हैं।

इस कारण इनका उपयोग औद्योगिक क्षेत्रों में व्यापक है, जैसेः

- घिसाव सतहें (wear surfaces),
- इम्प्लांट्स (implants),
- संरचनात्मक घटक (structural elements),
- विद्युत उत्पादन (power generation),
- चिकित्सकीय उपकरण (medical devices)[3]।

प्रबलन स्वरूप में कण, फ्लेक्स (flakes), रेशे, या रिक्त स्थान (voids) सम्मिलित किए जाते हैं।

3. पॉलिमर मैट्रिक्स नैनोकॉम्पोज़िट्स (Polymer Matrix Nanocomposites - PMNCs)

सभी कॉम्पोज़िट्स में लगभग 90% हिस्सेदारी PMNCs की होती है। इनमें थर्मोप्लास्टिक (thermoplastics), थर्मोसेट (thermosets), या इलास्टोमर (elastomers) पॉलिमर मैट्रिक्स का कार्य करते हैं।

पॉलिमर हल्के (lightweight), आसानी से प्रसंस्कृत (easy to process), और बहुउपयोगी (versatile) होते हैं।

इनके गुणों को नैनोकणों या रेशों को सम्मिलित करके नियंत्रित किया जा सकता है, जहाँ कण का आकार और वितरण (dispersion) महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं।

PMNCs का उपयोग मुख्य रूप से एयरोस्पेस, समुद्री (marine), और बायोमेडिकल अनुप्रयोगों में किया जाता है[4]।

B. प्रबलन (Reinforcement) के आधार पर वर्गीकरण

नैनोकॉम्पोज़िट्स का वर्गीकरण उनके प्रबलन (reinforcement) के प्रकार के आधार पर भी किया जाता है।

प्रबलन न केवल मज़बूती (strength) और कठोरता (stiffness) बढ़ाता है, बल्कि ऊष्मीय स्थिरता (thermal stability) और अन्य कार्यात्मक गुणों में भी सुधार करता है।

1. रेशा-प्रबलित नैनोकॉम्पोज़िट्स (Fibre-Reinforced Nanocomposites)

इनमें कार्बनिक (organic) या अकार्बनिक (inorganic) रेशों को शामिल किया जाता है ताकि सामग्री की मज़बूती, कठोरता और तापीय स्थिरता बढ़ाई जा सके। प्रमुख उदाहरण हैं:

- काँच (Glass)
- ग्रेफाइट (Graphite)
- बोरॉन (Boron)
- क्वार्ट्ज (Quartz)
- सिलिकॉन कार्बाइड (SiC)
- मल्टिफ़ेज़ फाइबर्स

रेशों का अभिविन्यास (orientation), अनुपात (aspect ratio), और वितरण (dispersion) सीधे तौर पर प्रदर्शन को प्रभावित करते हैं।

तालिका 1 — मैट्रिक्स पदार्थ के आधार पर नैनोकॉम्पोज़िट्स का वर्गीकरण

मैट्रिक्स का प्रकार	प्रबलक (Reinforcement) के उदाहरण	मुख्य विशेषताएँ	लाभ	सीमाएँ	प्रमुख अनुप्रयोग
धातु मैट्रिक्स नैनोकॉम्पोज़िट्स (MMNCs)	TiC, SiC, Al^2O^2 कण; कार्बन फाइबर	तन्य धातु/मिश्रधातु मैट्रिक्स जिसमें सिरेमिक प्रबलन जोड़ा गया हो; उच्च मज़बूती व कठोरता; कम ऊष्मीय प्रसार; धातु जैसी लचक के साथ सिरेमिक जैसी toughness	उत्कृष्ट घिसाव प्रतिरोध; उच्च विशिष्ट मज़बूती; अच्छे थर्मल/विद्युत गुण	महँगा प्रसंस्करण; कुछ मिश्रधातुओं में कमजोर जंग प्रतिरोध; पॉलिमर की तुलना में अधिक घनत्व	एयरोस्पेस (कार्बनफाइबर-Cu), ऑटोमोबाइल, रक्षा, उच्च-प्रदर्शन संरचनात्मक अवयव
सिरेमिक मैट्रिक्स नैनोकॉम्पोज़िट्स (CMNCs)	ऑक्साइड्स, कार्बाइड्स, नाइट्राइड्स; फ्लेक्स, फाइबर, रिक्त स्थान	भंगुर सिरेमिक जिन्हें नैनोस्तरीय प्रबलन से जवनही बनाया गया हो; बेहतर फ्रैक्चर toughness; उच्च तापमान पर स्थिर	उच्च थर्मल स्थिरता; जंग और ऑक्सीकरण प्रतिरोध; अच्छी कठोरता	अंतर्निहित भंगुरता; जटिल निर्माण; महँगा मशीनीकरण	घिसाव-प्रतिरोधी सतहें, इम्प्लांट्स, पावर जनरेशन, चिकित्सीय उपकरण, संरचनात्मक घटक
पॉलीमर मैट्रिक्स नैनोकॉम्पोज़िट्स (PMNCs)	नैनोक्ले, CNTs, ग्रैफीन, धातु ऑक्साइड्स, नैनोफाइबर	थर्मोप्लास्टिक, थर्मोसेट या इलास्टोमेरिक पॉलिमर मैट्रिक्स; नैनोकण/फाइबर द्वारा अनुकूलन; कुल कॉम्पोज़िट्स का लगभग 90%	हल्का वजन; आसान प्रसंस्करण; बहुउपयोगी डिज़ाइन; उत्कृष्ट मज़बूती-से-वजन अनुपात	धातुओं/सिरेमिक की तुलना में कम थर्मल स्थिरता; कठोर वातावरण में क्षरण	एयरोस्पेस, समुद्री, बायोमेडिकल, पैकेजिंग, ऑटोमोबाइल, लचीली इलेक्ट्रॉनिक्स

प्रबलन दो तरीकों से किया जा सकता हैः

1. नैनोमैटेरियल्स को कॉम्पोज़िट्स में एम्बेड करना।
2. प्रत्यक्ष रूप से नैनोफाइबर्स का उपयोग करना।[5],

2. परतदार नैनोकॉम्पोज़िट्स (Laminar Composites)

ये कॉम्पोज़िट्स कई परतों (layers) से बने होते हैं, जिन्हें आपस में जोड़कर संरचना बनाई जाती है।

परतें धातुओं या अन्य सामग्रियों की हो सकती हैं, जिन्हें एक निश्चित क्रम में व्यवस्थित किया जाता है।

सैंडविच संरचनाएँ (Sandwich structures) इसका प्रमुख उदाहरण हैं, जिनका उपयोग हल्के लेकिन मज़बूत ढाँचों में होता है।[6],

3. कण-प्रबलित नैनोकॉम्पोज़िट्स (Particulate & Reinforced Composites)

इनमें बारीक कणों (powders) या लेक्स (flakes) को मैट्रिक्स में वितरित किया जाता है ताकि सामग्री की कठोरता, मज़बूती और घिसाव-प्रतिरोध (wear resistance) में सुधार हो सके।

हालाँकि ये फाइबर-प्रबलित कॉम्पोज़िट्स की तुलना में कम प्रभावी होते हैं, लेकिन इनकी लागत-प्रभावशीलता (cost-effectiveness) और आसान निर्माण (ease of fabrication) इन्हें व्यावहारिक बनाती है।

उदाहरणः

- पार्टिकल बोर्ड (Particle board)
- कंक्रीट (Concrete)

इनका उपयोग सड़क निर्माण, निर्माण-कार्य और अन्य बुनियादी ढाँचों में व्यापक रूप से किया जाता है[7]।

C. **आयामिक संरचना (Dimensional Morphology) के आधार पर वर्गीकरण**

नैनोकॉम्पोज़िट्स को उनकी संरचना (morphology) और नैनोस्केल पर उपस्थित आयामों (dimensions) के आधार पर भी वर्गीकृत किया जाता है। यह वर्गीकरण उनके भौतिक, रासायनिक और कार्यात्मक गुणों को सीधे प्रभावित करता है।

1. शून्य-आयामी (0क) नैनोकण (Nanoparticles)

नैनोकण ऐसे पदार्थ होते हैं जिनका कम-से-कम एक आयाम 100 नैनोमीटर से कम होता है।

- इनका आकार और आकारिकी (morphology) इनके गुणों को काफी बदल देती है।
- प्रमुख अनुप्रयोगः बायोइमेजिंग (bioimaging), दवा-वितरण (drug delivery) और अन्य बायोमेडिकल क्षेत्र-

2. एक-आयामी (1D) नैनोवायर और नैनोट्यूब्स (Nanowires & Nanotubes)

- नैनोवायर (Nanowires): इनका व्यास 100 नैनोमीटर से कम होता है।
- नैनोट्यूब (Nanotubes): खोखले नैनोवायर जिनकी दीवारें आणविक स्तर (molecular&scale) पर पतली होती हैं।
- विशेष उदाहरणः सिंगल-वॉल्ड कार्बन नैनोट्यूब्स (SWCNTs), जिनकी विद्युत चालकता (electrical conductivity) असाधारण होती है-

3. द्वि-आयामी (2D) परतदार सिलिकेट्स (Layered Silicates)

- सिलिका बाइलेयर (silica bilayers) और अन्य 2D पदार्थ SiO^2 टेट्राहेड्रल नेटवर्क से बने होते हैं।
- इनकी संरचना और गुणों को substrate modification, doping, intercalation जैसी प्रक्रियाओं से बदला जा सकता है।
- ये अनेक अनुप्रयोगों में उपयोगी होते हैं-

4. त्रि-आयामी (3D) ज़िओलाइट्स (Zeolites)

- ज़िओलाइट्स क्रिस्टलीय एल्युमिनोसिलिकेट खनिज होते हैं जिनका ढाँचा सूक्ष्म-छिद्रों (micropores, 0.3.2 nm) से युक्त होता है।
- मुख्य विशेषताएँः
  - ♦ उच्च सतह क्षेत्रफल (high surface area)
  - ♦ रासायनिक रूप से नियंत्रित गुण (tunable chemistry)
  - ♦ उच्च उत्प्रेरक क्षमता (catalytic potential)
- प्रमुख अनुप्रयोगः आसंजन / अवशोषण (adsorption), उत्प्रेरण (catalysis), विभाजन तकनीकें (separation technologies)[8]

D. संश्लेषण प्रक्रिया (Synthesis Procedure) के आधार पर वर्गीकरण

नैनोकॉम्पोज़िट्स के गुण और उनका प्रदर्शन केवल मैट्रिक्स (matrix) तथा प्रबलन (reinforcement) पर ही निर्भर नहीं करते, बल्कि उनके संश्लेषण की विधि (synthesis method) पर भी निर्भर करते हैं।

विभिन्न संश्लेषण मार्ग नैनोकणों के वितरण (dispersion), अंतरफलक बंधन (interfacial bonding) तथा आकारिकी (morphology) पर नियंत्रण की क्षमता प्रदान करते हैं, जिससे सामग्री की कार्यक्षमता (functionality) निर्धारित होती है[18-19]।

मुख्यतः नैनोकॉम्पोज़िट्स को निम्नलिखित संश्लेषण विधियों के आधार पर वर्गीकृत किया जाता हैः

तालिका 2 — प्रबलक (Reinforcement) के आधार पर नैनोकॉम्पोज़िट्स का वर्गीकरण

प्रबलक का प्रकार	उदाहरण	मुख्य विशेषताएँ	लाभ	सीमाएँ	प्रमुख अनुप्रयोग
फाइबर-प्रबलित नैनोकॉम्पोज़िट्स	काँच, ग्रेफाइट, बोरॉन, क्वार्ट्ज, SiC, बहु-चरणीय फाइबर	जैविक/अजैविक फाइबर सम्मिलन से मज़बूती, कठोरता और थर्मल स्थिरता में सुधार; प्रदर्शन फाइबर के अभिविन्यास, आस्पेक्ट अनुपात और वितरण पर निर्भर करता है।	उच्च मज़बूती और कठोरता; बेहतर थर्मल स्थिरता; भार-वहन क्षमता	जटिल प्रसंस्करण; अनिसोट्रॉपिक गुण; कुछ फाइबर महँगे	एयरोस्पेस, ऑटोमोबाइल, समुद्री संरचनाएँ, बायोमेडिकल स्कैफोल्ड्स
परतदार कॉम्पोज़िट्स	धातु/सिरेमिक/पॉलिमर की वैकल्पिक परतें; सैंडविच संरचनाएँ	कई परतों से बने जो क्रमबद्ध ढंग से जुड़े होते हैं; भार परतों में वितरित होता है।	उत्कृष्ट अवरोधक गुण; उच्च लेक्सरल मज़बूती; अनुकूलन योग्य डिज़ाइन	परतों के अलग होने का जोखिम; सीमित out-of-plane मज़बूती; अक्सर कणिकीय/फाइबर कॉम्पोज़िट्स से भारी	एयरोस्पेस पैनल, पैकेजिंग फिल्में, सुरक्षात्मक कोटिंग्स, निर्माण
कणिकीय-प्रबलित कॉम्पोज़िट्स	पाउडर, फ्लेक्स, नैनोकण (जैसे SiO^2, Al^2O^2, $CaCO^2$)	समान रूप से वितरित कणों द्वारा मैट्रिक्स को मज़बूत किया जाता है; यांत्रिक प्रदर्शन कणों के आकार, आकृति और वितरण पर निर्भर करता है।	लागत-प्रभावी; अच्छी कठोरता, toughness और घिसाव प्रतिरोध; आसान निर्माण	-	ऑटोमोबाइल, निर्माण, कोटिंग्स, संरचनात्मक सामग्री

तालिका 3 — आयामिक संरचना के आधार पर नैनोकॉम्पोज़िट्स का वर्गीकरण

आयाम (Dimensions)	उदाहरण	मुख्य विशेषताएँ	लाभ	सीमाएँ	प्रमुख अनुप्रयोग
शून्य-आयामी (0D)	नैनोकण (जैसे धातु ऑक्साइड्स, क्वांटम डॉट्स)	कम से कम एक आयाम <100 nm; गुण आकार/आकृति पर अत्यधिक निर्भर	उच्च सतही क्षेत्रफल; अनुकूलित प्रकाशीय, चुंबकीय और इलेक्ट्रॉनिक गुण	गुच्छाकरण (agglomeration); समान वितरण प्राप्त करने में कठिनाई	बायो-इमेजिंग, औषधि वितरण, सेंसर, उत्प्रेरक
एक-आयामी (1D)	नैनोवायर, नैनोट्यूब (जैस CNTs, ZnO नैनोवायर)	व्यास < 100 nm, लंबाई व्यास से कहीं अधिक; नैनोट्यूब खोखले होते हैं	उत्कृष्ट विद्युत एवं थर्मल चालकता; उच्च आस्पेक्ट अनुपात	संरेखण और वितरण चुनौतियाँ; महँगा संश्लेषण	लचीली इलेक्ट्रॉनिक्स, सेंसर, चालक कॉम्पोज़िट्स, ऊर्जा उपकरण
दो-आयामी (2D)	परतदार सिलिकेट्स, ग्रैफीन, MoS^2	परतदार संरचनाएँ; 2D तल में उच्च आस्पेक्ट अनुपात	बड़ा सतही क्षेत्रफल; अनुकूलित यांत्रिक एवं अवरोधक गुण; बहुउपयोगी फंक्शनलाइज़ेशन	परतों का पुनःसंयोजन (restacking) होने की प्रवृत्ति; प्रसंस्करण में जटिलता	कोटिंग्स, झिल्ली (membranes), पैकेजिंग, ऊर्जा संचयन
त्रि-आयामी (3D)	ज़ियोलाइट्स, मेटल-गॉर्गेनिक फ्रेमवर्क्स (MOFs)	सूक्ष्म-छिद्रयुक्त क्रिस्टलीय ढाँचे जिनमें त्रि-आयामी नेटवर्क होता है	उच्च छिद्रता; चयनात्मक अवशोषण; उत्प्रेरक सक्रियता	सीमित यांत्रिक मज़बूती; जटिल संश्लेषण	उत्प्रेरण (catalysis), गैस पृथक्करण, जल शुद्धिकरण

1. बहुलक पिघल (Polymer Melt) अथवा विलयन (Solution) में प्रत्यक्ष नैनोस्तरीय सम्मिश्रण

- इस विधि में धातु ऑक्साइड (metal oxides), हाइड्रॉक्साइड्स (hydroxides), अथवा क्ले (clays) जैसे नैनो-भराव सीधे बहुलक पिघल (polymer melt) या विलयन (solution) में वितरित किए जाते हैं।
- **वितरण तकनीकें:** उच्च-शीयर मिक्सिंग (high-shear mixing), सोनिकेशन (sonication), या एक्सट्रूज़न (extrusion)।
- **लाभ:** सरल, किफायती, और बड़े पैमाने पर उत्पादन के लिए उपयुक्त।
- **चुनौतियाँ:** नैनोकणों का आपस में गुच्छा बनना (agglomeration) तथा कमजोर अंतरफलक आसंजन (weak adhesion)।
- **समाधान:** नैनोकणों की सतह का फंक्शनलाइज़ेशन (surface functionalization)।
- **उदाहरण:** पॉलीमर मैट्रिक्स में परतदार सिलिकेट्स (layered silicates) का सम्मिश्रण, जिससे खाद्य पैकेजिंग में अवरोधक गुण (barrier properties) बढ़ते हैं।

2. बहुलक मैट्रिक्स में धातु आयनों का इन-सीटू अपचयन (In Situ Reduction of Metal Ions)

- इस विधि में बहुलक मैट्रिक्स के भीतर ही धातु आयनों का रासायनिक अपचयन (chemical reduction) कर नैनोकण बनाए जाते हैं।
- **उदाहरण:** पॉलीमर विलयन में कैडमियम आयन का अपचयन कर कैडमियम सल्फ़ाइड (CdS) नैनोकण तैयार करना।
- यह विधि नैनोकणों की न्यूक्लिएशन और वृद्धि (nucleation & growth) पर सटीक नियंत्रण देती है।
- परिणामस्वरूप, समान वितरण (homogeneous dispersion) और मजबूत पॉलीमर-नैनोकण अंतःक्रिया (interaction) प्राप्त होती है।
- **अनुप्रयोग:** इलेक्ट्रॉनिक्स और सेंसरिंग के लिए चालक (conductive) तथा प्रकाशीय (optical) नैनोकॉम्पोज़िट्स जैसे चाँदी या सोना-प्रबलित बहुलक मैट्रिक्स।

3. नैनोकणों की उपस्थिति में मोनोमर्स का बहुलकीकरण (Polymerisation of Monomers in the Presence of Nanoparticles)

- इस विधि में मोनोमर्स को पहले से उपस्थित नैनोकणों की उपस्थिति में बहुलकित (polymerised) किया जाता है।
- बहुलकीकरण के दौरान नैनोकण पॉलीमर नेटवर्क में सम्मिलित हो जाते हैं।
- **उदाहरण:** सिलिका या कार्बन नैनोट्यूब्स की उपस्थिति में पॉलीस्टाइरीन (Polystyrene) या PMMA का संश्लेषण।
- **लाभ:**
  - ♦ नैनोकण संरचना में मजबूती से बंध जाते हैं।
  - ♦ बेहतर वितरण (dispersion) और मजबूत अंतःसंबंध (bonding) प्राप्त होता है।
- **अनुप्रयोग:** कोटिंग्स (coatings), सेंसर (sensors), तथा हल्के संरचनात्मक पदार्थ (lightweight structural materials)।

4. परतदार संरचनाओं में मोनोमर्स का अंतःस्थापन और बहुलकीकरण (Polymerisation with Intercalation of Monomers into Layered Structures)

- इस हाइब्रिड विधि में मोनोमर्स को पहले परतदार होस्ट संरचनाओं (जैसे क्ले, सिलिकेट्स, या ग्रेफाइट ऑक्साइड शीट्स) के भीतर अंतःस्थापित (intercalated) किया जाता है।
- इसके बाद, बहुलकीकरण (polymerisation) परतों के बीच होता है, जिससे exfoliated या intercalated nanocomposites बनते हैं।

• लाभ:

- ♦ अवरोधक गुणों (barrier properties) में वृद्धि
- ♦ ज्वाला प्रतिरोध (flame resistance)
- ♦ यांत्रिक मजबूती (mechanical strength)

- **उदाहरण:** नायलॉन-क्ले नैनोकॉम्पोज़िट्स, जिनका व्यापक उपयोग ऑटोमोबाइल और पैकेजिंग उद्योगों में होता है।

समग्र दृष्टिकोण

संश्लेषण विधि का चयन सीधे तौर पर नैनोकणों के वितरण, अंतरफलक आसंजन और माइक्रोस्ट्रक्चर को प्रभावित करता है।

इसके परिणामस्वरूप नैनोकॉम्पोज़िट्स के यांत्रिक, ऊष्मीय, प्रकाशीय और कार्यात्मक गुण निर्धारित होते हैं।

इसी कारण, संश्लेषण रणनीतियाँ (synthesis strategies) नैनोकॉम्पोज़िट्स के डिज़ाइन और अनुप्रयोग में अत्यंत महत्वपूर्ण भूमिका निभाती हैं।[9],-

समीक्षा का क्षेत्र (Scope of the Review)

यह समीक्षा नैनोकॉम्पोज़िट्स का तीन दृष्टिकोणों से व्यवस्थित अध्ययन प्रस्तुत करती है:

तालिका 4 — नैनोकॉम्पोज़िट्स के संश्लेषण विधियों की तुलना

संश्लेषण विधि	प्रक्रिया विवरण	लाभ	सीमाएँ	प्रमुख अनुप्रयोग
पॉलीमर पिघल/घोल में नैनोकणों का प्रत्यक्ष मिश्रण	नैनोकण (जैसे ऑक्साइड्स, क्ले) को भौतिक रूप से पॉलीमर पिघल या घोल में मिलाया और फैलाया जाता है।	सरल, विस्तार योग्य, कम लागत; बड़े पैमाने पर उत्पादन के लिए उपयुक्त	नैनोकणों का गुच्छाकरण; यदि सतह उपचार न हो तो कमजोर इंटरफेस आसंजन	खाद्य पैकेजिंग फिल्में, हल्के संरचनात्मक हिस्से, अवरोधक कोटिंग्स
पॉलीमर मैट्रिक्स में धातु आयनों का इन-सीटू अपचयन	धातु आयनों को पॉलीमर के भीतर रासायनिक रूप से घटाकर सीधे मैट्रिक्स में नैनोकण बनाए जाते हैं।	समान वितरण; मजबूत मैट्रिक्स-फिलर इंटरैक्शन; कण आकार को नियंत्रित करने योग्य	सटीक प्रतिक्रिया नियंत्रण की आवश्यकता; केवल अवकरणीय धातु प्रणालियों तक सीमित	चालक नैनोकॉम्पोज़िट्स, ऑप्टिकल डिवाइस, सेंसर, एंटीमाइक्रोबियल कोटिंग्स
नैनोस्तरीय प्रबलकों की उपस्थिति में मोनोमर का पॉलिमरीकरण	मोनोमर नैनोकणों की उपस्थिति में पॉलिमराइज़ होते हैं, जिससे वे मैट्रिक्स में अंतर्निहित हो जाते हैं।	मजबूत इंटरफेस बंधन; बेहतर फैलाव; गुणों को अनुकूलित करने की क्षमता	नैनोकण और मोनोमर के बीच संगतता की आवश्यकता; सतह संशोधन की आवश्यकता हो सकती है	हाई-परफॉर्मेंस कोटिंग्स, हल्के संरचनात्मक पदार्थ, ऑप्टिकल/इलेक्ट्रॉनिक कॉम्पोज़िट्स
परतदार संरचनाओं में मोनोमर का इंटरकलेशन और पॉलिमरीकरण	मोनोमर को परतदार होस्ट (जैसे क्ले, ग्रैफाइट ऑक्साइड) में इंटरकलेट किया जाता है और फिर इंटरलेयर्स में पॉलिमराइज़ किया जाता है।	एक्सफोलिएटेड/इंटरकलेटेड नैनोस्ट्रक्चर का उत्पादन; उत्कृष्ट अवरोधक, ज्वाला प्रतिरोध और मज़बूती	जटिल प्रक्रिया; इंटरकलेशन और एक्सफोलिएशन पर सावधानीपूर्वक नियंत्रण की आवश्यकता	ऑटोमोटिव पार्ट्स, ज्वाला-प्रतिरोधी सामग्री, उच्च-अवरोधक पैकेजिंग फिल्में

1. **वर्गीकरण (Classification):** नैनोकॉम्पोज़िट्स को मैट्रिक्स सामग्री, प्रबलन प्रकार तथा आयामिक संरचना (dimensional morphology) के आधार पर वर्गीकृत किया गया है।

2. **संश्लेषण (Synthesis):** प्रमुख संश्लेषण विधियों जैसे प्रत्यक्ष मिश्रण (direct mixing), in situ अपचयन (reduction), बहुलकीकरण-सहायक विधियाँ (polymerisation-assisted methods), तथा अंतःस्थापन-आधारित रणनीतियाँ (intercalation-based strategies) का वर्णन उनके लाभों और सीमाओं सहित किया गया है।

3. **अनुप्रयोग (Applications):** पैकेजिंग, एयरोस्पेस, ऑटोमोबाइल, बायोमेडिकल इंजीनियरिंग, इलेक्ट्रॉनिक्स, और ऊर्जा क्षेत्रों में नैनोकॉम्पोज़िट्स के उपयोग को रेखांकित किया गया है।

इन सभी पहलुओं के संयोजन से यह समीक्षा, शोधकर्ताओं और अभियंताओं के लिए अगली पीढ़ी के नैनोकॉम्पोज़िट्स के डिज़ाइन और विकास हेतु एक उपयोगी संदर्भ (reference) के रूप में कार्य करती है।

निष्कर्ष

नैनोकॉम्पोज़िट्स ने अपनी विशिष्ट विशेषताओं के कारण कई उद्योगों में अद्वितीय संभावनाएँ प्रदर्शित की हैं। फिर भी, बड़े पैमाने पर व्यावसायिक उपयोग से पूर्व कई चुनौतियों का समाधान आवश्यक है।

- **प्रमुख समस्याः** नैनोकणों का समान वितरण (uniform dispersion) सुनिश्चित करना, क्योंकि उनका गुच्छाकरण (agglomeration) प्रदर्शन को सीमित करता है।
- **औद्योगिक स्तर पर संश्लेषणः** उत्पादन तकनीकों का विस्तार करते हुए उन्हें किफ़ायती, पुनरुत्पादनीय (reproducible), और पर्यावरणीय रूप से टिकाऊ बनाए रखना अभी भी चुनौतीपूर्ण है।
- **मैट्रिक्स-प्रबलन अंतःक्रिया (Matrix-Reinforcement Interactions):** इनके गहन अध्ययन की आवश्यकता है। विशेष रूप से नैनोकणों की सतह-संशोधन (surface modification) तकनीक महत्वपूर्ण भूमिका निभाएगी।

- **अनुप्रयोग संबंधी चिंताएँः** दीर्घकालिक स्थिरता (long-term stability), पुनर्चक्रण क्षमता (recyclability), और विषाक्तता (toxicity)-विशेषकर बायोमेडिकल तथा पर्यावरणीय क्षेत्रों में-का सावधानीपूर्वक मूल्यांकन आवश्यक है।

भविष्य की दिशाः

- ग्रीन नैनोकॉम्पोज़िट्स पर शोध, जो बायो-पॉलीमर्स और प्राकृतिक नैनोफिलर्स पर आधारित हों।
- कंप्यूटेशनल मॉडलिंग और मशीन लर्निंग से विशिष्ट गुणों वाले पदार्थों का त्वरित डिज़ाइन, जिससे trial-and-error पर निर्भरता कम होगी।
- नवीन अनुप्रयोग क्षेत्र जैसे ऊर्जा भंडारण (energy storage), लचीली इलेक्ट्रॉनिक्स (flexible electronics), और पुनर्जनन चिकित्सा (regenerative medicine) नैनोकॉम्पोज़िट्स के भविष्य को उजागर करते हैं।[10]

संक्षेप में, पर्याप्त प्रगति होने के बावजूद मौजूदा बाधाओं को दूर करने के लिए अंतःविषयक (interdisciplinary) सहयोग आवश्यक है। नवीन संश्लेषण रणनीतियों और सतत (sustainable) प्रक्रियाओं के साथ, नैनोकॉम्पोज़िट्स विज्ञान और प्रौद्योगिकी को आगे बढ़ाने वाली प्रमुख सामग्रियों के रूप में स्थापित हो सकते हैं।

संदर्भ

1. Khdier, H. M., Husham, K. A. F., Shali, W. M., & Al-Atabi, H. A. (2024). Interfacial Effects on Mechanical, Thermal and Electrical Properties of Polymer-Based Nanocomposites: A Review. *Annales de Chimie & Science Des Materiaux*, 48(6), 857.869. https://doi.org/10.18280/acsm.480611
2. Miracle, D. B. Metal Matrix Composites. From Science to Technological Significance. *Compos. Sci. Technol*. 2005, 65 (15.16), 2526.2540. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.027
3. Niihara, K. New Design Concept of Structural Ceramics. Ceramic Nanocomposites. *J. Mater. Sci. Lett*. 1991, 10 (4), 207.209. https://doi.org/10.1007/BF00735690
4. Ray, S. S.; Okamoto, M. Polymer/Layered Silicate Nanocomposites: A Review from Preparation to Processing. *Prog. Polym. Sci*. 2003, 28 (11), 1539.1641. https;//doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002
5. Dhand, V.; Mittal, G.; Rhee, K. Y.; Park, S.&J.; Hui, D. A Short Review on Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites. *Compos. Part B Eng*. 2015, 73, 166.180. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.011
6. Sahu, S. K.; Sahoo, S. K.; Sahoo, S. K. A Brief Review on Advanced Sandwich Structures with Hybrid Core Materials. *Polym. Compos*. 2022, 43 (10), 5012.5028. https://doi.org/10.1002/pc.26989
7. Chawla, K. K. *Composite Materials: Science and Engineering*, 3rd ed.; Springer: New York, 2012. https://doi-org/10-1007/978-0-387-74365-3
8. Mekuye, B.; Zewge, F.; Kassahun, Y.; Redi-Abshiro, M. Nanomaterials; An Overview of Synthesis, Classification, and Applications. *Small* 2023, 19 (20), 2300038. https;//doi.org/10.1002/nano.202300038
9. Nambiar, R. B.; Perumal, A. B.; Sadiku, E. R. Advances in Nanocomposites: Preparation, Characterization, Properties, and Applications. *Molecules* 2024, 29 (24), 5924. https://doi.org/10.3390/molecules29245924
10. bin Abu Sofian, A. D. A., Sun, X., Gupta, V. K., Berenjian, A., Xia, A., Ma, Z., - Show, P. L. (2024). Advances, Synergy, and Perspectives of Machine Learning and Biobased Polymers for Energy, Fuels, and Biochemicals for a Sustainable Future. *Energy&Fuels*, 38(3), 1593.1617. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c03842